

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



В І С Н И К
ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНОЛОГІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

№ 1(47)

Чернігів 2011

Міністерство освіти і науки України

УДК 62/69+004

30/35

В 53

Друкується за рішенням вченої ради університету (протокол № 12 від 27.12.2010 р.). Вісник ЧДТУ включено до нового переліку наукових фахових видань України, затвердженого постановою президії ВАК України від 01.07.2010 р. № 1-05/5. Бюлетень ВАК України № 7, 2010.

Головний редактор:

Казимир В.В., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи

Заступник головного редактора

Пилипенко О.І., доктор технічних наук, професор

Члени редакційної колегії:

Болотов Г.П., доктор технічних наук, доцент;

Волков І.В., доктор технічних наук, професор;

Денисов Ю.О., доктор технічних наук, професор;

Дубенець В.Г., доктор технічних наук, професор;

Дудла І.О., доктор технічних наук, доцент;

Кальченко В.І., доктор технічних наук, професор;

Кальченко В.В., доктор технічних наук, професор;

Литвинов В.В., доктор технічних наук, професор;

Сенько В.І., доктор технічних наук, професор;

Сиза О.І., доктор технічних наук, професор;

Скоробогатова В.І., доктор технічних наук, професор;

Харченко Г.К., доктор технічних наук, професор;

Чередніченко П.І., доктор технічних наук, професор.

Рецензенти:

Ахонін С.В., доктор технічних наук;

Жильцов А.В., доктор технічних наук;

Козирський В.В., доктор технічних наук, професор;

Кутін В.М., доктор технічних наук, професор;

Литвинов В.В., доктор технічних наук, професор;

Сидорець В.М., доктор технічних наук;

Ямненко Ю.С., доктор технічних наук, професор.

В 1(47) Вісник Чернігівського Державного технологічного університету.

Збірник. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 1(47). – 244 с.

Заснований у 1996 році. Свідectво про державну реєстрацію КВ № 14994-3966 ПР від 27.02.2009 р.

Зміст

РОЗДІЛ І. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОМОБІЛІ	6
1 Чуприна В.М. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПОВУЗЛОВИХ ДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ.....	6
2 Федориненко Д.Ю. ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ ТИСКУ В ШПИНДЕЛЬНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ.....	16
3 Рудик А.В. ПЕРЕРОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ГЛИБИННОМУ ШЛІФУВАННІ.....	24
4 Полуян А.В., Пасов Г.В. КОМП'ЮТЕРНА ПЕРЕВІРКА ОДНОРІДНОСТІ ДИСПЕРСІЙ.....	29
5 Хоменко І.М., Кобринець А.К. ПРО РОЗРАХУНОК РАДІАЛЬНИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ.....	39
РОЗДІЛ ІІ. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ	48
6 Зяхор І.В., Кучук-Яценко С.І., Харченко Г.К., Новомлинець О.О. РОЛЬ ПОЧАТКОВИХ СТАДІЙ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ ТИТАНУ ЗІ СТАЛЛЮ.....	48
7 Прибилько І.О., Петрушинець Л.В., Харченко Г.К., Фальченко Ю.В. ТЕМПЕРАТУРНІ НАПРУЖЕННЯ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС МИТТЄВОГО НАГРІВАННЯ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ.....	55
РОЗДІЛ ІІІ. ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД	62
8 Баженов В.А. ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПО РЕАКТИВНІЙ ПОТУЖНОСТІ ТА НАПРУЗІ.....	62
9 Бессараба П.І. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА РАХУНОК СКОРОЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЇЇ ТРАНСПОРТУВАННІ.....	67
10 Бодунов В.М. ВРАХУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	70
11 Буйний Р.О., Зорін В.В., Квицинський А.О. ВИКОРИСТАННЯ 4-Х ОДНОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ І ТА ІІ КАТЕГОРІЇ ЗА НАДІЙНІСТЮ.....	75
12 Бушма А.И. ПРИМЕНЕНИЕ ОПЫТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДУГ ОТКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ К КОМБИНИРОВАННОМУ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОМУ РАЗРЯДУ.....	82
13 Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. ЭНЕРГОЛОКАТОР® МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ.....	87

14	Зорин В.В. ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000В.....	94
15	Квицинський А.О. ЩОДО НОВОЇ РЕДАКЦІЇ ГЛАВИ 1.5 «ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ» ПРАВИЛ УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК.....	100
16	Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Ковальчук О.А., Хоменко В.О. РОЗОСЕРЕДЖЕНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	104
17	Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Поліщук А.Л., Сидоренко В.Ю. ФОРМУВАННЯ ЗАХОДІВ З КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ПІДСТАВІ НЕЧІТКОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ.....	109
18	Мальований М.М. ПРІОРИТЕТНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ВАТ ЕК «ЧЕРНІГІВООБЛЕНЕРГО», СПРЯМОВАНІ НА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ З ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	116
19	Назаров В.В. ГОЛОВНА ІДЕЯ ЕНЕРГО-ЕКОНОМІЧНОГО ПЛАНУ ДЛЯ УКРАЇНИ.....	120
20	Омельчук А.О., Мосейчук В.О., Рябчук О.І., Скидан А.В. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ.....	126
21	Пентегов И.В., Безручко В.М., Приступа А.Л. ВЫБОР МЕСТ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ФИЛЬТРА ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ К РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВЫСОТНЫХ АДМИНИСТРАТИВНЫХ И ОФИСНЫХ ЗДАНИЙ.....	134
22	Перетятко В.А. ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	142
23	Скоробогатова В.И. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНИВАНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ДЛИТЕЛЬНОМУ НАГРЕВУ.....	152
24	Скоробогатова В.І., Горбань Т.В. ТОПОЛОГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЯК ФАКТОР ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.....	156
25	Шевченко С.Ю., Волохін В.В., Ганус О.І. МЕРЕЖА ВІДОМЧИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТЕОПОСТІВ ЯК ОСНОВА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БОРОТЬБИ З ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИМИ УТВОРЕННЯМИ.....	160
26	Шутенко О.В., Баклай Д.Н. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ.....	164
27	Денисов Ю.О. ПУЛЬСАЦІЙНА НЕСТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВІ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА З СИНУСОЇДАЛЬНОЮ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ.....	174

РОЗДІЛ IV. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ	181
28 Казимир В.В., Зайцев С.В., Горлинський Б.В. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕКОДУВАННЯ ТУРБО КОДІВ ПО МОДИФІКОВАНОМУ АЛГОРИТМУ <i>MAX LOG MAP</i>	181
29 Бивойно П.Г., Бивойно Т.П., Сисоєва М.М. ПРИКЛАДНА ПРОГРАМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	189
30 Войтенко В.П., Хоменко М.А., Рудіч П.В. ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ.....	196
31 Соломаха В.В., Верьовко О.В. ЗАХИСТ АРИФМЕТИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ.....	202
32 Зацерковний В. І., Кривоберець С. В., Сімакін Ю. С. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЕТАЛОННИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ ГІС ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГУЛЯРИЗУЮЧОГО ФУНКЦІОНАЛУ.....	206
33 Цулун О.В., Роговенко А.І. АРХІТЕКТУРА КРИПТОГРАФІЧНОГО АКСЕЛЕРАТОРА З МОЖЛИВІСТЮ ЗМІНИ КРИПТОГРАФІЧНОГО АЛГОРИТМУ.....	214
РОЗДІЛ V. МЕХАНОХІМІЯ	220
34 Сиза О.І., Савченко О.М., Квашук Ю.В., Гаценко С.В. ІНГІБІТОРНИЙ ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	220
АНОТАЦІЇ.....	225
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ.....	240

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ І АВТОМОБІЛІ

УДК 621.9.06: 621.9-112.5: 621.9-112.6

В.М. Чуприна, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ПОВУЗЛОВИХ ДИНАМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Розглянута актуальна проблема досліджень динаміки верстатів по частинах. На основі теорії множин з застосуванням методів діакоптики виконано теоретичне обґрунтування визначення динамічних характеристик пружної системи верстата по характеристиках його вузлів. Наведено приклад знаходження динамічної характеристики верстата в формі АФЧХ по характеристиках його шпиндельного вузла і несучої системи. Дані рекомендації щодо застосування даного методу для повузлових динамічних досліджень пружних систем верстатів.

Вступ

Одним із сучасних напрямків розвитку вітчизняного і світового верстатобудування є принцип агрегування, коли конструкції верстатів збираються із готових агрегатів – вузлів і модулів, вироблених централізовано іншими підприємствами. До таких вузлів належать агрегатні елементи несучої системи (станини, стійки, консолі), поздовжні і хрестові столи (поворотні і неповоротні), агрегатні головки (самодіючі і несамодіючі), комплектні шпиндельні вузли (типу Fortuna), автоматичні коробки швидкостей (АКС) і багато інших. Всі ці елементи мають власні характеристики, які визначають аналогічні характеристики всього верстату після його збирання за агрегатним принципом. Те ж саме відноситься і до динамічних характеристик верстатів і їх вузлів, але тут є певні особливості, які будуть розглянуті далі в даній статті.

Згідно В.О. Кудинову [1] динамічна система металорізального верстату (рисунок 1-а) є замкненою багатоконтурною системою, яка складається з пружної системи (ПС) і робочих процесів, що відбуваються в її рухомих з'єднаннях (процеси різання – ПР, тертя – ПТ, в двигунах – ПД). Запропоновані еквівалентні динамічні системи дозволяють перейти до одноконтурної системи (рисунок 1-б), яка містить еквівалентну пружну систему (ЕПС) і один з процесів (наприклад, ПР). Виділення окремих елементів цієї системи (рисунок 1-в) дозволяє досліджувати їх незалежно один від одного і отримувати необхідні властивості. Знаючи характеристики кожного елемента і застосувавши математичний апарат теорії автоматичного керування, можна визначити необхідні характеристики повної динамічної системи верстату.

Представлена робота присвячена дослідженню динаміки еквівалентної пружної системи (далі – просто ПС), складеної за агрегатним принципом.

При повузлових дослідженнях ПС верстату необхідно мати достовірні відомості про динамічні характеристики його вузлів. Наявні методи не дозволяють отримувати достовірні (розрахункові і експериментальні) характеристики вузлів і на їх основі динамічні характеристики верстатів, оскільки призначені в основному для досліджень повної системи верстату. Але перехід до сучасних принципів агрегування металорізальних верстатів нагально вимагає розробки і впровадження такої методології як актуальної задачі.

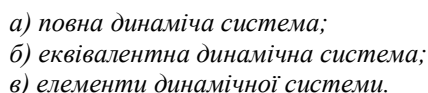


Рис.1. Схема динамічної системи металорізального верстату та її основних елементів

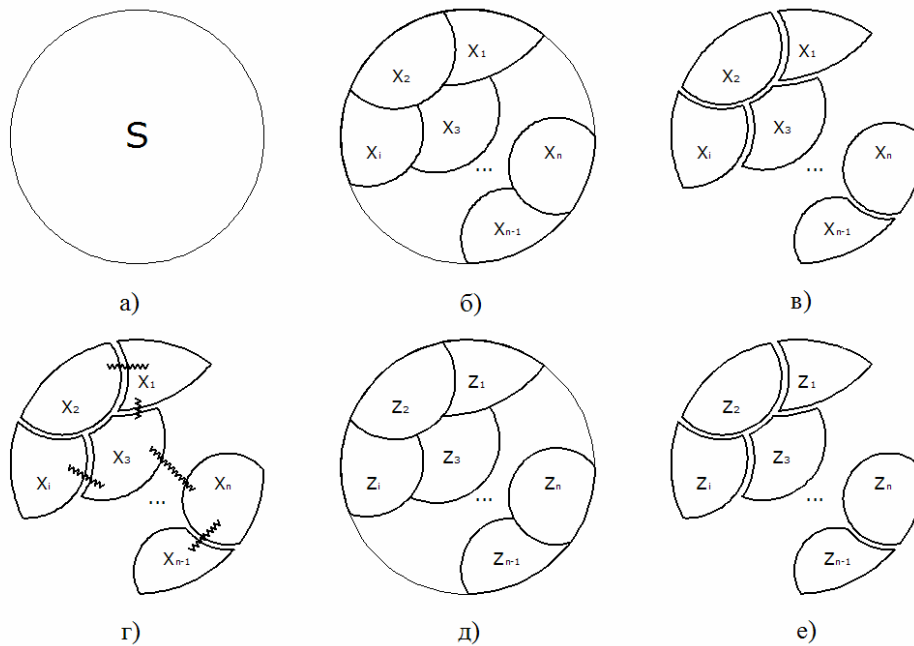
Метою даної роботи є визначення основних методологічних принципів і теоретичних засад повузлових динамічних досліджень металорізальних верстатів.

ПС верстату – це складна багатовузлова механічна конструкція, яка містить не тільки сам верстат, але і пристосування, інструмент і деталь (система ВПІД). При цьому в сучасних верстатах доволі часто застосовуються по декілька інструментів, шпинделів, супортів, столів та інших деталей і вузлів (наприклад, багатоопераційні, багатошпиндельні оброблюючі центри, агрегатні верстати і верстати з ЧПК). Тому ПС верстату необхідно досліджувати і оцінювати з позицій системного підходу до аналізу і синтезу складних механічних конструкцій, в тому числі і при вирішенні динамічних задач.

Нехай існує первісна система (рисунк 2-а) з невідомою кінцевою множиною D її власних властивостей (характеристик).

При розділенні повної системи на n частин (рисунок 2-б) отримаємо ряд незалежних (тобто не пов'язаних між собою) підсистем і відповідну їм систему S множин їх властивостей

$$S = \{X_1, \dots, X_n\}. \quad (1)$$



- а) повна (неподілена) система;
 б) розбиття системи на елементи;
 в) незалежні елементи системи;
 г) пов'язання елементів;
 д) розбиття з пов'язаними елементами;
 е) виділення пов'язаних елементів.

Рис.2. Схеми поділу довільної системи S на складові частини (елементи) з урахуванням їх взаємодії

При цьому новостворена система S повинна задовольняти наступним базовим умовам:

1. довільна множина X_k з системи S є підмножиною вихідної множини D , або

$$\forall X \in S: X \subseteq D; \quad (2)$$

2. дві будь-які множини X_i та X_j з системи S повністю незалежні (рисунки 2-в) і не перетинаються, або

$$\forall X_i, X_j \in S: X_i \cap X_j = \emptyset; \quad (3)$$

3. дві будь-які множини X_i та X_j з системи S в загальному вигляді не однакові між собою (хоча в регулярних системах це можливо як частковий випадок), або

$$\forall X_i, X_j \in S: X_i \neq X_j; \quad (4)$$

4. дві будь-які множини X_i та X_j з системи S не повинні мати ніяких зв'язків між собою у повній системі (їх диз'юнкція дорівнює нулю), або

$$\forall X_i, X_j \in S: X_i \oplus X_j = \emptyset; \quad (5)$$

5. довільна множина X_k сама може бути системою множин властивостей нижчого рівня (тобто можлива побудова системи за ієрархічною структурою), або

$$X = \{x_1, \dots, x_m\}; \forall x_k, x_l \in X \Rightarrow \forall x \subset S \Rightarrow x \subset D \quad (6)$$

Таким чином, постає задача знаходження властивостей кожного з елементів системи S окремо як незалежних підсистем.

Тоді невідому множину властивостей D повної вихідної системи можна знайти поєднанням властивостей всіх множин, які входять в розбиття S , або

$$\bigcup_{X \subset S} X \subseteq D \Rightarrow \bigcup_{X \subset S} \left(\bigcup_{x \in X} x \right) \subseteq D \quad (7)$$

Виходячи з такої постановки задачі, для дослідження повної системи D можна залучити методи декомпозиції. Вони досить ефективно використовуються при дослідженні

складних систем. Ці методи є основою блочно-ієрархічного підходу під час проектування і математичного аналізу складних об'єктів в системах автоматизованого проектування (САПР) [3].

Декомпозиція – це поділ системи на окремі частини й незалежний аналіз отриманих частин в умовах прийняття спрощених припущень про взаємовплив частин. При цьому повну систему зазвичай розділяють на ряд підсистем більш низького порядку, досліджують їх незалежно, а потім отримують рішення для повної системи. При математичному моделюванні на комп'ютерах це дає можливість суттєво знизити обчислювальні ресурси (машинного часу – T_m і машинної пам'яті – P_m) для отримання розв'язку великої системи рівнянь. Так, показник T_m оцінюється за виразом $T_m = C \cdot n^\alpha$, де C – коефіцієнт пропорційності, n – порядок системи рівнянь, α – показник ступеня, причому зазвичай $\alpha > 2$. Якщо розділити модель на m рівних частин, то отримаємо $T_m = C \cdot m \cdot (n/m)^\alpha$, тобто машинний час T_m зменшується в $k = m^{\alpha-1}$ разів. Також суттєво зменшуються і обсяг машинної пам'яті P_m .

Такий підхід можна застосовувати для спрощеного вирішення багатьох задач під час аналізу складних систем, в яких зв'язки між підсистемами не суттєві. Наприклад, для знаходження об'ємних, масово-інерційних, теплових та інших статичних показників і характеристик верстатів як складальних одиниць.

Проте, в динамічній коливальній системі зв'язки між підсистемами є значущими і їх не можна ігнорувати. Згідно класичної теорії коливань парціальні системи в повній системі пов'язані між собою, взаємодіють і взаємовпливають одна на одну, їх параметри при цьому змінюються і суттєво відрізняються від аналогічних параметрів у незалежних підсистемах. При цьому має місце перехід енергії коливань з однієї підсистеми в іншу, навіть при слабкому зв'язку між ними. Наявність різного виду зв'язків змінює характер резонансних явищ в системі у порівнянні з вільними підсистемами. В такій системі можливе виникнення «внутрішнього резонансу» при зближенні парціальних частот, спостерігається різка зміна фаз і амплітуд коливань та інші подібні явища тощо.

Приміром, в теорії коливань існує поняття *зв'язаності парціальних систем*. В простій двохмасовій коливальній системі з власними частотами коливань ω_1 і ω_2 це явище визначається коефіцієнтом зв'язаності $C_z = c_{12} \cdot 2 \cdot \omega_1 \omega_2 / (\omega_2^2 - \omega_1^2)$, який навіть при малому коефіцієнті зв'язку c_{12} між обома масами може набувати великих значень (при сильному зближенні власних частот ω_1 і ω_2). При цьому парціальні частоти коливань не відповідають власним частотам і знаходяться поміж ними, а резонансні амплітуди різко змінюються. Енергія коливань може перетікати з однієї підсистеми до іншої (за принципом динамічного гасіння коливань). Академік Л.І. Мандельштам, який увів саме поняття зв'язаності, назвав це явище «парадоксальним» [4, с. 237].

В багатомасових коливальних пружних системах зв'язки можуть бути ще більш складними і їх необхідно обов'язково враховувати. Тому методи декомпозиції як недостатньо точні, до аналізу динамічних систем в загальному плані застосовуватись не можуть. Більш придатними для дослідження складних динамічних систем по частинах є методи діакоптики, започатковані Г.Кроном [5].

Діакоптика – це напрямок дослідження складних систем по частинах з обліком усіх наявних зв'язків між підсистемами. Відрізняється від декомпозиції відсутністю спрощеного підходу до врахування взаємовпливу складових частин. При цьому економічність діакоптичного методу порівняна з методом декомпозиції, а точність є значно вищою. Діакоптичні методи ефективно використовуються для дослідження динаміки верстатів [1,6-8,12].

В даній роботі наводиться запропонований автором діакоптичний підхід до дослідження лінійної динамічної системи по частинах. Цей підхід є універсальним і викори-

стовується як засадничий для аналізу і синтезу динаміки верстатів (та інших машин) по частинах (вузлах).

При розгляді системи (1) необхідно змінити умови входження підсистем X в повну систему S кінцевої множини властивостей D з урахуванням вищезазначених особливостей пов'язаних динамічних систем (рисунок 2-г). Так, при збереженні умов (2)-(4), (6), необхідно додати до властивостей ізолюваних підсистем X також властивості зв'язків Y , що їх пов'язують в повній системі, тобто змінити умову (5).

Тоді в загальному випадку система множин властивостей підсистем S буде складатись із пов'язаних поміж собою підсистем Z

$$S = \{ Z_1, \dots, Z_n \}, \quad (8)$$

причому

$$Z \neq X: Z \supset X : Z \supset Y : Z \supseteq X \cup Y. \quad (9)$$

Звідси

$$Y = X \cap Z \Rightarrow X = Z \setminus Y \quad (10)$$

При цьому Z також належить кінцевій множині D , або

$$\forall Z \in S: Z \subseteq D. \quad (11)$$

Проте, на відміну від умови (5) для двох будь-яких множин Z_i та Z_j з системи S , що мають між собою зв'язки, їх диз'юнктивне поєднання вже не буде дорівнювати нулю, або

$$\forall Z_i, Z_j \in S \Rightarrow Z_i \oplus Z_j \neq \emptyset; \quad (12)$$

тобто ці підсистеми множин в повній системі перетинаються, або

$$\forall Z_i, Z_j \in S \Rightarrow Z_i \cap Z_j \neq \emptyset; \quad (13)$$

Тоді первісну множину властивостей D повної вихідної системи, з урахуванням зв'язків між підсистемами, можна знайти об'єднанням властивостей всіх множин, які входять в систему S , або

$$\bigcup_{Z \in S} Z \subseteq D \Rightarrow \bigcup_{Z \in S} (X \cup Y) \subseteq D \quad (14)$$

Таким чином, знаючи властивості множин ізолюваних підсистем X і їх зв'язків Y з системи S , можна знайти множину властивостей D , тобто виконати задачу синтезу властивостей повної системи по властивостях її підсистем.

Застосуємо приведенний загальний системний підхід до аналізу динаміки ПС верстату.

Динамічна модель ПС верстату являє собою складну нелінійну коливальну систему з великою кількістю мас і ступенів вільності. Під час обробки деталі на верстаті ПС лінеаризується за рахунок навантаження її постійними складовими сил різання. Тому в подальшому під час розгляду малих переміщень (амплітуд коливань) будемо вважати її лінійною системою, до якої можна застосовувати принцип суперпозиції.

При дослідженні динаміки лінійної коливальної системи [10] її рух під дією зовнішніх сил описується системою диференціальних рівнянь

$$[A] d^2q/dt^2 + [B] dq/dt + [C] q = [F] \quad (15)$$

де q – матриця переміщень узагальнених координат системи (невідомих);

A, B, C – квадратні матриці постійних коефіцієнтів (відповідно: інерційних, демпфювання і жорсткості);

F – матриця зовнішніх силових навантажень (збурень);

t – час.

Для розв'язку системи застосуємо метод комплексних амплітуд. При цьому матриці q і F записуються в комплексній формі $q = q \cdot e^{i\omega t}$ і $F = F \cdot e^{i\omega t}$, де ω – кругова частота гармонійного збурення.

Підставляючи значення q і F в рівняння (15), прийдемо до системи алгебраїчних рівнянь з комплексними коефіцієнтами виду

$$G \cdot q = F, \quad (16)$$

де G – комплексна матриця динамічної жорсткості системи, яка складається з матриць A , B і C згідно виразу $G = -\omega^2 A + i\omega B + C = (C - \omega^2 A) + i\omega B$.

Для даної неособливої матриці G завжди існує зворотня матриця K , тобто матриця динамічної податливості системи

$$K = G^{-1}. \quad (17)$$

При цьому дійсні і уявні частини елементів комплексної матриці K можуть бути знайдені за виразами

$$Re K = Re G \cdot [(Re G)^2 + (Im G)^2]^{-1} = (C - \omega^2 A) \cdot [\omega^4 A^2 + C^2 + \omega^2 \cdot (B^2 - 2AC)]^{-1} \quad (18)$$

$$Im K = -Im G \cdot [(Re G)^2 + (Im G)^2]^{-1} = -\omega B \cdot [\omega^4 A^2 + C^2 + \omega^2 \cdot (B^2 - 2AC)]^{-1} \quad (19)$$

Тоді рівняння (16) можна записати у вигляді

$$q = K \cdot F. \quad (20)$$

Якщо знайдені усі елементи матриці K , то при відомих зовнішніх навантаженнях F можна легко знайти елементи матриці q , тобто рішення системи (15).

Однак для систем високого порядку n обернення, як правило, погано обумовленої матриці G не завжди раціонально (а у разі особливої матриці G – не можливо). В такому разі доцільно перейти до аналізу повної системи (15) чи (16) по частинах.

Нехай повна динамічна система, яка описується матричним рівнянням (16), має невідомі динамічні властивості (характеристики) і в найпростішому випадку складається з двох пов'язаних між собою підсистем. Тоді, застосовуючи метод розділення матриці на блоки, рівняння (16) можна записати в такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

де G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} – блоки матриці G , причому G_{11} і G_{22} – квадратні блоки, q_1 , q_2 , F_1 , F_2 – відповідні частини матриць q і F .

Застосовуючи принцип суперпозиції по зовнішньому навантаженню F , лінійну систему рівнянь (21) можна поділити на дві системи:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q''_1 \\ q''_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

а загальне рішення q визначиться як сума розв'язків цих систем

$$q = q' + q''. \quad (24)$$

В свою чергу, згідно з виразами (9-10), матриця G може бути представлена у вигляді

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 \\ 0 & H_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

де H_{11} , H_{22} – квадратні блоки блочно-діагональної матриці динамічної жорсткості H ; C_{11} , C_{12} , C_{21} , C_{22} – відповідні блоки матриці зв'язку C .

Тоді

$$G_{11} = H_{11} - C_{11}; \quad G_{12} = -C_{12}; \quad G_{21} = -C_{21}; \quad G_{22} = H_{22} - C_{22}. \quad (26)$$

Блочно-діагональна матриця динамічної жорсткості H записується для двох незалежних підсистем, що входять до складу повної ПС.

Матриця зв'язку C описує усі зв'язки двох парціальних систем у повній системі. В загальному випадку вона містить в собі елементи матриць A , B і C . Таким чином підсистеми можуть пов'язуватись між собою інерційними, швидкісними і жорсткісними зв'язками відповідно (причому, окремими або в комбінаціях).

Неособливий матриці H відповідає зворотня блочно-діагональна матриця динамічної податливості системи D

$$D = H^{-1}, \quad (27)$$

а також система незалежних рівнянь

$$\begin{bmatrix} H_{11} & 0 \\ 0 & H_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{F}_1 \\ \mathcal{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

або в іншій формі

$$\begin{bmatrix} \mathcal{F}_1 \\ \mathcal{F}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

де $\mathcal{F}_1$, $\mathcal{F}_2$ – частини матриці узагальнених координат $\mathcal{F}$ в незалежних підсистемах.

Кожна з систем рівнянь (28) і (29) розпадається на дві незалежні підсистеми, які описують поведінку окремих ізольованих частин повної системи (парціальних систем).

Запропоноване уявлення про поділ повної системи на парціальні системи є особливо зручним при повузлових дослідженнях конструкції, коли по характеристиках повної системи необхідно визначити характеристики окремих її вузлів (аналіз), або навпаки – по характеристиках окремих вузлів треба визначити характеристики всієї конструкції в цілому (синтез).

Для дослідження динаміки складних ПС широко застосовують частотні методи. При цьому динамічні властивості оцінюють за допомогою амплітудно-фазових частотних характеристик (АФЧХ), які є графіками відповідних частотних передаточних функцій (ПФ) $W_{\alpha}^{\beta}(i\omega)$, де α – вхідна, а β – вихідна координати. Цими узагальненими координатами є елементи матриць q і F . Тому позначення ПФ можуть мати вид $W_F^q(i\omega)$, $W_F^F(i\omega)$, $W_q^q(i\omega)$, $W_q^F(i\omega)$.

Для знаходження ПФ ПС не обов'язково розв'язувати всю систему рівнянь (15). Можна знайти ПФ незалежних підсистем, а потім, за допомогою розробленого методу, знайти ПФ для всієї системи (синтез ПФ). Також тут можливо вирішення і зворотної задачі (аналіз ПФ).

Такий підхід особливо зручний при експериментальних дослідженнях, оскільки, знявши АФЧХ в необхідних точках, можна знайти АФЧХ як всієї системи, так і її підсистем, тобто вирішувати задачі аналізу і синтезу АФЧХ системи.

Уведемо позначення для матриць ПФ координат систем q по зовнішніх впливах в повній системі у вигляді:

$$q_1' = W_{F_1}^{q_1} \cdot F_1; q_2' = W_{F_1}^{q_2} \cdot F_1; q_1'' = W_{F_2}^{q_{11}} \cdot F_2; q_2'' = W_{F_2}^{q_2} \cdot F_2; \quad (30)$$

в незалежних підсистемах:

$$\mathcal{F}_1 = W_{F_1}^{q_1} \cdot F_1; \mathcal{F}_2 = W_{F_2}^{q_2} \cdot F_2; \quad (31)$$

Тоді з системи рівнянь (29) виходить, що

$$W_{F_1}^{q_1} = D_{11}; W_{F_2}^{q_2} = D_{22}. \quad (32)$$

З загальних рівнянь руху системи виведемо співвідношення для визначення ПФ повної системи по ПФ її підсистем. З другого рівняння системи (22) будемо мати

$$q_2' = (H_{22} - C_{22})^{-1} C_{21} q_1'. \quad (33)$$

Підставимо цей вираз в перше рівняння системи (21)

$$(H_{11} - C_{11})q'_1 - C_{12}(H_{22} - C_{22})^{-1}C_{21}q'_1 = F_1. \quad (34)$$

Оскільки справедлива рівність

$$(H_{22} - C_{22})^{-1} = (E - D_{22}C_{22})^{-1}D_{22}, \quad (35)$$

то після перетворень отримаємо

$$q'_1 = \{E - D_{11}[C_{11} + C_{12}(E - D_{22}C_{22})^{-1}D_{22}]C_{21}\}^{-1}D_{11}F_1. \quad (36)$$

Підставляючи, в свою чергу, (33) в (30), можна записати

$$q'_2 = \{(E - D_{11}C_{11})C_{21}^{-1}[(D_{22})^{-1} - C_{22}] - D_{11}C_{12}\}^{-1}D_{11}F_1. \quad (37)$$

Переходячи в рівняннях (32) та (33) до ПФ по зовнішньому впливу F_1 , отримаємо

$$W_{F_1}^{q_1} = \left\{ E - \mathcal{W}_{F_1}^{q_1} \left[C_{11} + C_{12} (E - \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} C_{22})^{-1} \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} C_{21} \right] \right\}^{-1} \mathcal{W}_{F_1}^{q_1}, \quad (38)$$

$$W_{F_2}^{q_2} = \left\{ (E - \mathcal{W}_{F_1}^{q_1} C_{11}) C_{12}^{-1} \left[(\mathcal{W}_{F_2}^{q_2})^{-1} - C_{22} \right] - \mathcal{W}_{F_1}^{q_1} C_{12} \right\}^{-1} \mathcal{W}_{F_1}^{q_1}. \quad (39)$$

З системи (22), можна по аналогії отримати подібні формули для ПФ повної системи по зовнішньому впливу F_2 . Однак, наведемо тут тільки кінцеві вирази

$$\mathcal{W}_{F_1}^{q_1} = D_{11}; \quad \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} = D_{22}. \quad (40)$$

$$W_{F_2}^{q_1} = \left\{ (E - \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} C_{22}) C_{12}^{-1} \left[(\mathcal{W}_{F_1}^{q_1})^{-1} - C_{11} \right] - \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} C_{21} \right\}^{-1} \mathcal{W}_{F_2}^{q_2} \quad (41)$$

Вирази (35)–(38) показують, як (при відомій матриці C) можна перейти від ПФ незалежних підсистем до ПФ повної пружної системи.

По суті матриці ПФ $W_{F_1}^{q_1}, W_{F_1}^{q_2}, W_{F_2}^{q_2}, W_{F_2}^{q_1}$ є блоками матриці динамічної податливості K и визначають рішення системи (15).

Тепер по аналогії виведемо формули для знаходження ПФ незалежних підсистем по ПФ повної системи. Для цього з системи (22) з урахуванням виразу (25) отримаємо

$$\begin{bmatrix} (H_{11} - C_{11}) & -C_{12} \\ -C_{21} & (H_{22} - C_{22}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q'_1 \\ q'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (42)$$

З першого рівняння знайдемо вираз для матриці H_{11}

$$H_{11} = (F_1 + C_{11}q'_1 + C_{12}q'_2)(q'_1)^{-1}, \quad (43)$$

а з другого – для матриці H_{22}

$$H_{22} = (C_{21}q'_1 + C_{22}q'_2)(q'_2)^{-1}. \quad (44)$$

Або, враховуючи (15) – (17), будемо мати

$$D_{11} = q'_1(F_1 + C_{11}q'_1 + C_{12}q'_2)^{-1} \quad (45)$$

$$D_{22} = q'_2(C_{21}q'_1 + C_{22}q'_2)^{-1} \quad (46)$$

Переходячи в рівняннях (24) і (25) до ПФ по F_1 , з урахуванням (30)–(32), отримаємо

$$\mathcal{W}_{F_1}^{q_1} = W_{F_1}^{q_1} (E + C_{11}W_{F_1}^{q_1} + C_{12}W_{F_1}^{q_2})^{-1} \quad (47)$$

$$\mathcal{W}_{F_2}^{q_2} = W_{F_1}^{q_2} (C_{21}W_{F_1}^{q_1} + C_{22}W_{F_1}^{q_2})^{-1} \quad (48)$$

Аналогічні викладки можна зробити і для систем рівнянь (23), з чого отримаємо

$$\mathcal{W}_{F_1}^{q_1} = W_{F_1}^{q_1} (C_{12}W_{F_2}^{q_2} + C_{11}W_{F_2}^{q_1})^{-1} \quad (49)$$

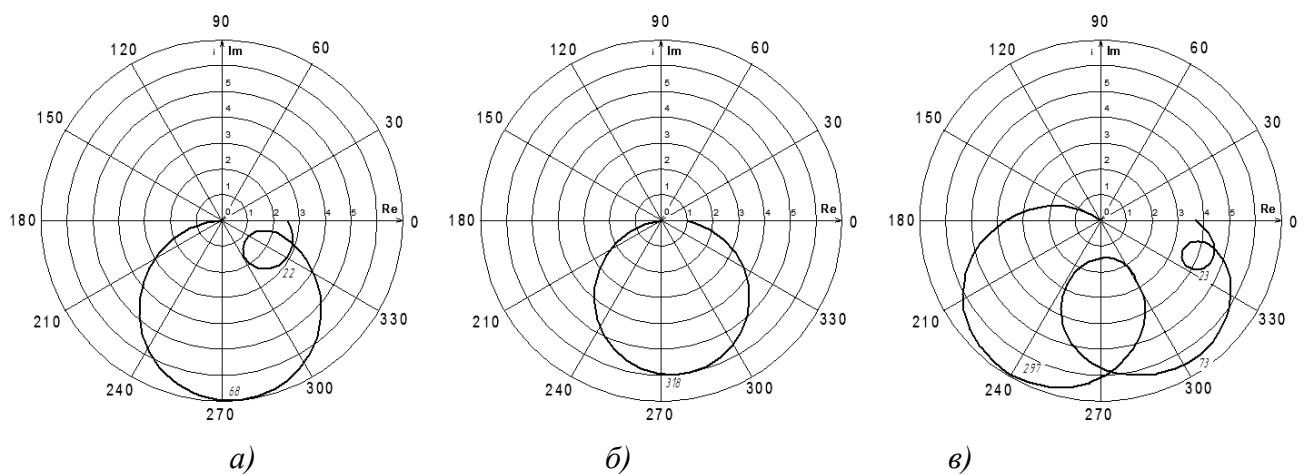
$$\mathcal{W}_{F_2}^{q_2} = W_{F_2}^{q_2} \left(E + C_{22} W_{F_2}^{q_2} + C_{21} W_{F_2}^{q_1} \right)^{-1} \quad (50)$$

Вирази (47) – (50) показують, як при відомих блоках матриці C можна перейти від ПФ повної ПС до ПФ незалежних (парціальних) підсистем.

Отримані загальні матричні вирази можуть ефективно використовуватись для аналізу і синтезу АФЧХ ПС верстатів різних технологічних груп.

Для прикладу наведемо результати використання вище приведених розробок під час повузлового динамічного дослідження радіально-свердлильного верстату. Головною технологічною операцією на цьому верстаті є свердління отворів. При цьому і сила різання, і деформації ПС направлені вздовж осі шпинделя. Тому основною динамічною характеристикою тут є осьова АФЧХ ПС верстату. В цьому частковому випадку задача зводиться практично до аналізу простої однокоординатної системи. Тому усі матричні формули можна замінити на аналогічні скалярні вирази.

В радіально-свердлильному верстаті, як і в багатьох інших, важливим вузлом є шпиндельний вузол [11, 12]. Тому ПС верстату розділимо на дві підсистеми – несучу систему і шпиндельний вузол. На основі розрахунків АФЧХ підсистем знайдемо АФЧХ всього верстату. Для цього використовуються приведені вище розробки. Результати розрахунків показані на рисунку 3. Спочатку були розраховані АФЧХ двох вузлів: несучої системи (рисунок 3-а) і шпиндельного вузла (рисунок 3-б), а потім за розробленим методом – АФЧХ радіально-свердлильного верстату в цілому (рисунок 3-в). Для знаходження результуючої АФЧХ верстату були знайдені спрощені формули, які отримані з виразів (38)-(41), (47) згідно методики [7].



а) несуча підсистема;

б) підсистема шпиндельного вузла;

в) повна система.

Рис.3. Амплітудно-фазово-частотні характеристики (АФЧХ) пружної системи (ПС) радіально-свердлильного верстату (в напрямку осі шпинделя)

З аналізу годографів АФЧХ виходить, що основні власні частоти парціальних підсистем несучої системи 68 Гц і шпиндельного вузла 318 Гц змінюються і в повній системі складають 73 Гц і 297 Гц відповідно.

В інших верстатах (токарних, фрезерних) приведення системи до однокоординатної задачі практично неможливе, тому слід використовувати повні матричні співвідношення. При цьому задача визначення повної АФЧХ верстату дещо ускладнюється. Однак і тут є можливості для спрощення, наприклад, за рахунок рекомендацій, що приведені в [7, 9].

Висновки

На базі загальних положень динаміки верстатів з використанням класичної теорії механічних коливань, теорії множин і методів діакоптики виконано теоретичне обґрунтування методології повузлових досліджень динаміки пружних систем, зокрема, металорізальних верстатів.

Встановлені основні засади і запропоновані оригінальні діакоптичні методи аналізу і синтезу динамічних характеристик складної коливальної системи верстату з застосуванням математичного апарату теорії автоматичного керування, зокрема, передаточних функцій і частотних характеристик.

Розроблені методи дозволяють при агрегатному складанні верстатів із окремих вузлів (модулів) отримати динамічні характеристики верстату у вигляді амплітудно-фазово-частотних характеристик (АФЧХ) повної пружної системи по відомих характеристиках окремих вузлів. При цьому характеристики модулів можуть бути отримані як розрахунковим, так і експериментальним шляхом (або у змішаний спосіб).

Розроблена методологія аналізу-синтезу систем є універсальною і може застосовуватись для дослідження пружних систем різних конструкцій як верстатів, так і інших машин.

Список літературних джерел

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М., Машиностроение, 1967 – 360 с.
2. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М., УРСС, 2004 – 398 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 – 333 с.
4. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. – М., Наука, 1972 – 471 с.
5. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. – М., Наука, 1972 – 544 с.
6. Чуприна В.М. Метод поузлового исследования динамических характеристик упругой системы станка как модульной структуры //Известия ВУЗов. Машиностроение. – М., 1986, № 9. – С. 124-130.
7. Чуприна В.М. Разработка методики поузлового анализа динамических характеристик металлорежущих станков (на примере шпиндельных узлов): Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: М, ЭНИМС, 1987 – 210 с.
8. Кудинов В.А. Чуприна В.М. Поузловой анализ динамических характеристик упругой системы станка. – М., Станки и инструмент, 1989. – № 11. – С. 8-11
9. Лончих П.А. Обеспечение динамического качества станков на основе методов диакоптики и результатов диагностики: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01: Иркутск, 2004 – 325 с.
10. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М., Высшая школа, 1980 – 408 с.
11. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: качество и надежность. – М.: Машиностроение 1992 – 288 с.
12. Данильченко Ю.М., Кузнецов Ю.М. Прецизійні шпиндельні вузли на опорах кочення. – Тернопіль: «Економічна думка», 2003 – 342 с.

УДК 621.822.172:621.7.079

Д.Ю. Федориненко, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ ТИСКУ В ШПИНДЕЛЬНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОРАХ

Визначено функцію тиску в радіальних гідростатичних підшипниках з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь.

Постановка проблеми

Проблема підвищення якості машинобудівних виробів тісно пов'язана з точністю механічної обробки, і, передусім, з точністю та робочими швидкостями шпиндельних вузлів як однієї з основних формоутворюючих ланок динамічної системи верстату.

Одними з найбільш перспективних типів шпиндельних опор для забезпечення прецизійної обробки є гідростатичні підшипники (ГСП), які поряд з високою жорсткістю та демпфіруючою здатністю дозволяють керувати вихідними параметрами точності обертання шпинделя. Під час проектування ГСП основою для розрахунку їх характеристик є функція розподілу тиску. Від точності її знаходження залежать вихідні параметри ГСП: несуча здатність, жорсткість, демпфірування, втрати потужності та ін.

Аналіз досліджень і публікацій

М.В. Коровчинським [1] досліджено вплив деяких відхилень поверхонь шипа і вкладиша від правильної геометричної форми на роботу підшипників ковзання. Там же відзначено, що несуча здатність, момент тертя істотно залежать від геометрії спряжених поверхонь навіть при незначних відхиленнях функції зазору від гармонійної складової.

В роботі [2] розглянуто вплив основних похибок вала і втулки в поперечному та поздовжньому напрямках на тиск в карманах ГСП з визначенням відповідних витратних характеристик, коефіцієнта навантажувальної здатності при ламінарному режимі течії рідини. Авторами роботи [3] отримано просторову функцію розподілу тиску в підшипниках ковзання при впливі відхилень круглості, профілю поздовжнього перетину та ін. Відзначено залежність похибок форми опорних поверхонь від ексцентриситету в опорі, тиску насоса, швидкості обертання вала, геометричних параметрів підшипника.

Зазначеним методикам аналізу притаманний суттєвий недолік – функція радіального зазору містить, як правило, одне (або два) окремі відхилення опорних поверхонь підшипників. Проте, в реальних ГСП геометричні відхилення в поперечному та поздовжньому напрямках наявні одночасно, що обумовлює доцільність аналізу вихідних характеристик підшипників з одночасним урахуванням впливу значної кількості похибок спряжених поверхонь.

Мета статті

Метою роботи є розробка математичної моделі функції тиску в радіальних шпиндельних ГСП з урахуванням впливу неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника.

Виклад основного матеріалу

В основі розрахунку розподілу тиску в змащувальній плівці ГСП покладені основні рівняння гідромеханіки, які відображають три закони[4]:

$$\text{збереження імпульсу} \quad \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} = F - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(p) + \nu \cdot \nabla^2 \cdot \vec{V},$$

$$\text{збереження маси} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{V} = 0,$$

$$\text{збереження енергії} \quad \rho \frac{dE}{dt} = \frac{dp}{dt} + \operatorname{div} \left(\mu \cdot \operatorname{grad} \frac{i}{\sigma} \right) + \mu \cdot \Phi,$$

де $\vec{V}$ – вектор швидкості частинки рідини в точці простору з координатами x, y, z в певний момент часу t ; ∇ – оператор Гамільтона; F – об’ємні сили, що діють на частинку рідини; ρ, ν – густина та коефіцієнт кінематичної в’язкості рідини; ∇^2 – оператор Лапласа; E – внутрішня енергія; μ – коефіцієнт динамічної в’язкості рідини; σ – фізична постійна; Φ – дисипативна функція; i – ентальпія.

Для ізотермічного ($\nu = \text{const}$) ламінарного усталеного $\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0 \right)$ руху нестискаємої ($\operatorname{div} \vec{V} = 0, \rho = \text{const}$) в’язкої рідини з урахуванням порядку величин в попередніх рівняннях в декартовій системі координат можемо записати [5]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Граничними умовами для системи рівнянь (1) є швидкості рідини на спряжених поверхнях підшипника, а саме: при $y = 0$ $u = U, \omega = W$; при $y = h_0$ $u = 0, \omega = 0$.

Будемо вважати, що мастило – ньютонівська рідина, тиск за товщиною мастильного прошарку постійний, ковзання на границях зазору та розрив рідини в прошарку відсутні, товщина мастильного прошарку незначна в порівнянні з радіусом підшипника, в’язкість мастила приймаємо при деякій усередненій температурі, градієнт тиску в кармані опори незначний.

Інтегруючи рівняння нерозривності (останнє рівняння в системі (1) за y в межах від 0 до h з урахуванням попередньо обчислених компонент швидкості u, ω та граничних умов, отримаємо рівняння Рейнольдса для тиску в радіальному ГСП [6]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uh) + \frac{\partial}{\partial z} (Wh) \right]. \quad (2)$$

При мащенні радіальних циліндричних підшипників можна покласти $\frac{\partial}{\partial z} (Wh) = 0$ [6].

Враховуючи, що привод головного руху верстату володіє значним запасом потужності, можна покласти $U = \text{const}$. Тоді в циліндричній системі координат рівняння (2) можна переписати у вигляді

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3(\varphi, z) \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3(\varphi, z) \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \cdot \omega \frac{\partial h(\varphi, z)}{\partial \varphi},$$

де R – радіус опорної шийки шпинделя.

Спочатку розглянемо задачу визначення розподілу тиску для підшипника нескінченної довжини. Для умов мащення поверхонь тертя нескінченної довжини функція зазору h не залежить від z ($h = f(\varphi)$). В цьому випадку рівняння Рейнольдса (2) значно спрощується і для полярної системи координат набуває вигляду

$$\frac{d}{d\varphi} \left(h^3(\varphi) \frac{dp}{d\varphi} \right) = \pm 6\mu R V_R \frac{dh(\varphi)}{d\varphi}, \quad (3)$$

де V_R – лінійна швидкість опорної шийки шпинделя.

Швидкість V_R додатня, якщо напрямок обертання шпинделя співпадає з напрямком напірного плину рідини з карману підшипника.

Відомо, що похибки форми спряжених поверхонь ГСП чинять суттєвий вплив на витратні характеристики опор, несучу здатність, жорсткість [1] та вихідну точність обертання шпинделя [7]. При остаточному шліфуванні деталей ГСП на окремих поверхнях

підшипника формуються відхилення від круглості в його поперечному перетині. Причому для шпинделя найбільше значення набуває еліпсність, для гідростатичної втулки характерна похибка з кількістю хвиль до 6.

Для математичного опису макрогеометричних відхилень профілю поперечного перетину опорних поверхонь підшипника пропонується використання ряду Фур'є у вигляді [8]

$$r(\varphi) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\varphi + \psi_{ok}),$$

де A_0 – постійна складова ряду; n – кількість гармонік k ряду, що характеризують певне відхилення контуру поперечного перетину; A_k, ψ_{ok} – амплітуда та початкова фаза k -ї гармоніки відповідно.

Зручність застосування ряду Фур'є для опису макрогеометрії опорних поверхонь полягає в можливості одночасного врахування багатьох відхилень профілю, що є сумою декількох синусоїд з певними значеннями амплітуди. Кожна гармоніка ряду має чітко виражений геометричний сенс. Наприклад, нульова гармоніка ряду $A_0/2$ відповідає радіусу базового кола, перша гармоніка – абсолютному ексцентриситету положення шийки шпинделя в опорі, друга гармоніка характеризує еліпсність контуру, наступні гармоніки визначають огранку та хвилястість контуру з числом хвиль, що дорівнює номеру гармоніки ряду.

Початкова фаза гармоніки ψ_{ok} відповідає повороту контуру у від'ємному напрямку від кута $\pi/2$, тобто

$$\psi_{ok} = \frac{\pi}{2} - \varphi_n,$$

де φ_n – полярний кут, що визначає положення контуру, рад.

Таким чином, функція зазору $h = f(\varphi)$ з урахуванням відхилень форми спряжених поверхонь може бути представлена у вигляді

$$h(\varphi) = \delta_0 + \left[A_1^e \sin(\varphi + \psi_{01}^e) + A_2^e \sin(2\varphi + \psi_{02}^e) + A_3^e \sin(3\varphi + \psi_{03}^e) + \right. \\ \left. A_4^e \sin(4\varphi + \psi_{04}^e) + A_5^e \sin(5\varphi + \psi_{05}^e) + A_6^e \sin(6\varphi + \psi_{06}^e) \right] - \\ - \left[A_1^u \sin(\varphi + \chi_{01}^u) + A_2^u \sin(2\varphi + \chi_{02}^u) \right], \quad (4)$$

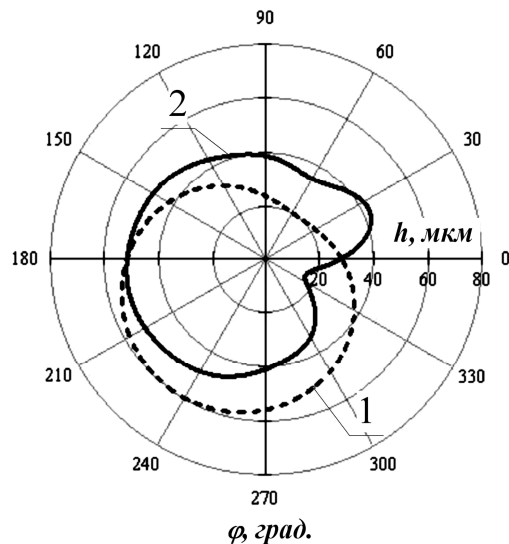
де δ_0 – радіальний статичний зазор в опорі; $A_1^e \dots A_6^e, \psi_{01}^e \dots \psi_{06}^e$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення гідростатичної втулки; $A_1^u \dots A_2^u, \psi_{01}^u \dots \psi_{02}^u$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення опорної поверхні шпинделя.

Функція радіального динамічного зазору $h = f(\varphi)$ в підшипнику наведена на рис. 1 за умов: абсолютний ексцентриситет $e=20$ мкм, $\delta_0=40$ мкм, $\varphi_n=55^\circ$, $A^e=(17, 7, 4, 3, 2, 1)$, мкм, $A^u=(20, 2)$, мкм, $\chi_{01}^u=(90-\varphi_n)^\circ$.

Тиск в будь-якій точці за кутом φ тангенціальної перемички ГСП може бути визначений шляхом подвійного інтегрування рівняння (3)

$$p(\varphi) = k \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{d\varphi}{h^2(\varphi)} + C_1 \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{d\varphi}{h^3(\varphi)} + C_2, \quad (5)$$

де $k = \pm 6 \mu R V_R$; C_1, C_2 – сталі інтегрування.



1 – ідеалізовані поверхні підшипника; 2 – відхилення форми спряжених поверхонь ГСП
Рис. 1. Функція радіального динамічного зазору $h = f(\varphi)$

Граничні умови для даної задачі мають вигляд: при $\varphi = \varphi_1$ $p = p_1$, при $\varphi = \varphi_2$ $p = p_2$.

Використовуючи зазначені граничні умови з рівняння (5), можна визначити сталі інтегрування C_1 , C_2 :

$$C_2 = p_1, \quad C_1 = \frac{p_2 - p_1 - k \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{h^2(\varphi)} d\varphi}{\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{h^3(\varphi)}}.$$

Тиск в карманах ГСП визначається шляхом розв'язування рівнянь балансу витрат рідини, що для окремого карману має вигляд

$$Q_{\text{vxi}} = Q_{\text{vixi}} \quad (6)$$

де Q_{vxi} , Q_{vixi} – витрати рідини, що надходять (або виходять) в (з) i -тий (ого) карману ГСП відповідно.

Величина Q_{vxi} обумовлена гідростатичним опором на вході в i -тий карман опори. Вихідна витрата Q_{vixi} може бути представлена сумою трьох компонент: сумарною витратою крізь контур i -ого карману в аксіальному ΣQ_a та тангенціальному напрямках ΣQ_τ опори та витратою рідини Q_p , що обумовлена радіальним зміщенням шийки шпинделя.

Елементарні витрати рідини в аксіальному dQ_a і тангенціальному dQ_τ напрямках, що враховують градієнтні течії рідини та витрати, обумовлені обертанням шпинделя, можуть бути знайдені на основі рівняння Пуазейля у вигляді:

$$dQ_a = -\frac{h^3(\varphi, z) \cdot R}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} d\varphi, \quad (7)$$

$$dQ_\tau = [Q_\omega - Q_{\Delta p}] dz = \left[\frac{k_\omega \cdot \omega \cdot R \cdot h(\varphi, z)}{2} - \frac{h^3(\varphi, z)}{12\mu R} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right] dz,$$

де Q_ω , $Q_{\Delta p}$ – витрати рідини в тангенціальному напрямку, обумовлені відповідно обертанням шпинделя та градієнтним плином рідини; k_ω – коефіцієнт, що враховує напрямок обертання шпинделя по відношенню до градієнтних витоків рідини з карманів підшипника ($k_\omega = \pm 1$).

Після інтегрування рівняння (7) отримаємо відповідні об'ємні витрати рідини:

$$Q_a = -\frac{R}{12\mu} \frac{\partial \rho}{\partial z} \int_{\varphi_{tk1}}^{\varphi_{tk2}} h^3(\varphi, z) d\varphi, \quad (8)$$

$$dQ_\tau = \frac{k_{ax} \cdot \omega \cdot R}{2} \int_0^{l_{ka}} h(\varphi, z) dz - \frac{l}{12\mu \cdot R} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \int_0^{l_{ka}} h^3(\varphi, z) dz, \quad (9)$$

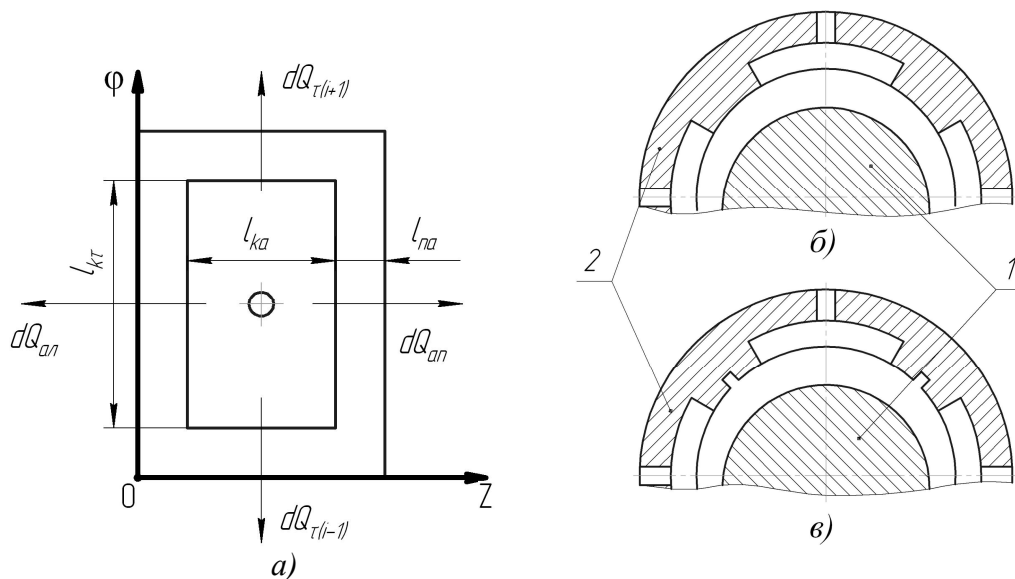
де φ_{tk1} , φ_{tk2} – кути, що визначають положення i -ого карману в циліндричній системі координат; l_{ka} – ширина карману (рис. 2, а).

Об'ємні витрати рідини Q_p в циліндричній системі координат можуть бути представлені

$$Q_p = -\frac{l}{R} \iint_S V_u(\varphi, z) d\varphi dz,$$

де S – площа карману; V_u – швидкість поступального руху опорної шийки шпинделя.

Величину Q_p доцільно враховувати для високошвидкісних ГСП [9]. Отже, в першому наближенні, розглянемо обчислення витрат крізь контур i -ого карману підшипника.



1 – шпиндель; 2 – гідростатична втулка

Рис. 2. Розгортка карману ГСП на площину а) та схеми відводу мастила б), в)

Відвід робочої рідини з підшипника можливий двома наступними способами: в осьовому напрямку (рис 2, б), або в тангенціальному та аксіальному напрямках одночасно (рис. 2, в). За другим способом мастило в бічному напрямку відводиться за допомогою спеціальних дренажних канавок, що виконуються паралельно осі підшипника. При цьому тиск на кожній тангенціальній перемичці підшипника змінюється в межах від p_k до 0 (на дренажній канавці). Таким чином, при застосуванні другої конструктивної схеми відводу мастила витрати рідини в тангенціальному напрямку з i -ого карману не залежать від градієнтних тисків в суміжних ($i \pm 1$) карманах на відміну від першого способу.

В металорізальних верстатах найбільше застосування знаходять підшипники, що виконані за другою схемою, оскільки вони забезпечують більшу точність обертання шпинделя [10].

Будемо вважати, що на аксіальних перемичках карманів розподіл тиску в напрямку осі OZ відповідає лінійній характеристиці. Це припущення не чинить суттєвого впливу на точність розрахунку, оскільки похибка, що виникає при лінеаризації епюри тиску, має величину порядку 0,1 % [11].

Враховуючи, що довжина осьових перемичок l_{na} на порядок менше довжини кармана l_{ka} (див. рис. 2, а) в цьому ж напрямку, впливом геометричних похибок за віссю OZ в функції зазору $h = f(\varphi, z)$ по довжині окремої перемички можна знехтувати. Адекватність такого підходу показана в роботі [7] на прикладі виникнення перекосу в опорі.

В такому випадку сумарні об'ємні витрати рідини в осьовому напрямку визначаються як

$$\sum Q_a = 2 \cdot Q_a, \quad (10)$$

де Q_a – витрати рідини через окрему перемичку при $h = f(\varphi)$.

З урахуванням вище сказаного рівняння (8) можна записати

$$Q_a = \frac{p_{ki} \cdot R}{12\mu \cdot l_{k\tau}} \cdot A, \quad (11)$$

$$\text{де } A = \int_{\varphi_{k1}}^{\varphi_{k2}} h^3(\varphi) d\varphi.$$

В першому наближенні будемо вважати, що величина зазору вздовж осі шпинделя є величиною постійною.

Тоді перший доданок в формулі (9) набуває вигляду

$$Q_\omega = \frac{k_\omega \cdot \omega \cdot R}{2} \int_{\varphi_{m1}}^{\varphi_{m2}} h(\varphi) d\varphi, \quad (12)$$

де φ_{m1} , φ_{m2} – кути, що визначають положення тангенціальної перемички в полярній системі координат.

Для обчислення другого доданку у виразі (9) потрібно визначити похідну $\frac{\partial p}{\partial \varphi}$. Перетворимо градієнтні витрати рідини відносно тиску у вигляді

$$p(\varphi) = - \frac{12 \cdot \mu \cdot R \cdot Q_{\Delta p}}{l_{ka}} \int_{\varphi_{m1}}^{\varphi} \frac{1}{h^3(\varphi)} d\varphi. \quad (13)$$

Визначимо різницю тисків між карманом та дренажною канавкою Δp

$$\Delta p = p|_{\varphi=\varphi_{m1}} - p|_{\varphi=\varphi_{m2}} = -p|_{\varphi=\varphi_{m2}}. \quad (14)$$

Приймаємо тиск зливу на кромці дренажної канавки $p_{зл} = 0$, тоді $\Delta p = p_{ki} - p_{зл} = p_{ki}$.

Отже, з урахуванням (13-14) другий доданок у формулі (9) можна переписати у вигляді

$$Q_{\Delta p} = \frac{p_{ki} \cdot l_{ka}}{12\mu \cdot R} \int_{\varphi_{m1}}^{\varphi_{m2}} \frac{1}{h^3(\varphi)} d\varphi.$$

Тоді витрати рідини через тангенціальну перемичку будуть

$$Q_\tau = \frac{k_\omega \cdot \omega \cdot R}{2} \int_{\varphi_{m1}}^{\varphi_{m2}} h(\varphi) d\varphi + \frac{p_{ki} \cdot l_{ka}}{12\mu \cdot R} \int_{\varphi_{m1}}^{\varphi_{m2}} \frac{1}{h^3(\varphi)} d\varphi. \quad (15)$$

Таким чином, сумарні витрати рідини з карману підшипника в тангенціальному напрямку знайдуться як

$$\sum Q_\tau = Q_{\tau(i-1)} + Q_{\tau(i+1)}. \quad (16)$$

Застосовуючи формулу (15) до виразу (16), після перетворень отримаємо

$$\sum Q_{\tau} = \frac{p_{ki} \cdot l_{ka}}{12\mu R} \cdot B + \frac{\omega \cdot R}{2} \cdot C, \quad (17)$$

$$\text{де } B = \frac{I}{\int_{\varphi_{m1(i-1)}}^{\varphi_{m2(i-1)}} \frac{1}{h^3(\varphi)} d\varphi} + \frac{I}{\int_{\varphi_{m1(i+1)}}^{\varphi_{m2(i+1)}} \frac{1}{h^3(\varphi)} d\varphi}; \quad C = k_{\omega(i-1)} \int_{\varphi_{m1(i-1)}}^{\varphi_{m2(i-1)}} h(\varphi) d\varphi + k_{\omega(i+1)} \int_{\varphi_{m1(i+1)}}^{\varphi_{m2(i+1)}} h(\varphi) d\varphi.$$

Коефіцієнти $k_{\omega(i-1)}$, $k_{\omega(i+1)}$ мають протилежні знаки, які залежать від напрямку обертання шпинделя.

Запишемо рівняння нерозривності (6) з урахуванням залежностей (10), (11), (17) та витрати рідини через дросель

$$\frac{p_H - p_{ki}}{p_{op}} = \frac{p_{ki} \cdot R}{6\mu \cdot l_{k\tau}} \cdot A + \frac{p_{ki} \cdot l_{ka}}{12\mu \cdot R} \cdot B + \frac{\omega \cdot R}{2} \cdot C,$$

де p_H – тиск насоса; R_{op} – гідравлічний опір вхідного дроселя.

Звідки після перетворень отримаємо значення тиску в кармані опори

$$p_{ki} = \frac{2p_H - R_{op} \cdot \omega \cdot R \cdot l_{ka} \cdot C}{2R_{op} \left[\frac{R}{6\mu \cdot l_{k\tau}} \cdot A + \frac{l_{ka}}{12\mu \cdot R} \cdot B - \frac{I}{R_{op}} \right]}. \quad (18)$$

Перетворимо рівняння (18) до безрозмірного вигляду шляхом заміни:

$$p_{ki} = \bar{p}_{ki} \cdot p_H, \quad \bar{R} = 2R_{op} \left[\frac{R}{6\mu \cdot l_{k\tau}} \cdot A + \frac{l_{ka}}{12\mu \cdot R} \cdot B - \frac{I}{R_{op}} \right], \quad \bar{p}_{\omega} = \frac{R_{op} \cdot \omega \cdot R \cdot l_{ka} \cdot C}{p_H}, \quad (19)$$

де $\bar{p}_{ki}$ – безрозмірна величина тиску в карманах підшипника; $\bar{R}$ – безрозмірна величина, зворотна до гідравлічного опору в системі живлення та крізь контур кармана підшипника; $\bar{p}_{\omega}$ – безрозмірна величина, що характеризує тиск в кармані, обумовлений обертанням шпинделя.

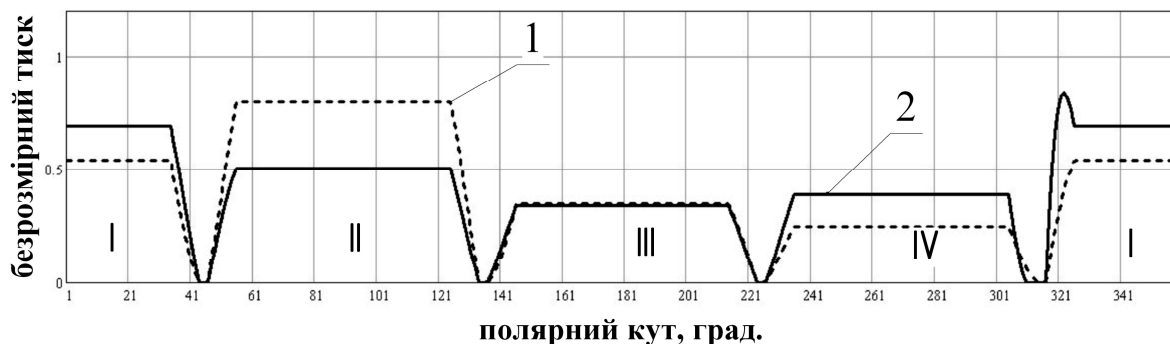
Таким чином, з урахуванням (19) рівняння (18) набуде вигляду

$$\bar{p}_{ki} = \frac{2 - \bar{p}_{\omega}}{\bar{R}}. \quad (20)$$

В результаті математичного моделювання отримали залежності (5) і (20), що описують функцію тиску рідини в тангенціальному напрямку радіального ГСП в залежності від реальної геометрії спряжених поверхонь.

На основі розрахунку за допомогою пакету MathCAD визначені епюри безрозмірного тиску в тангенціальному напрямку переднього радіального ГСП верстату УТ16А (рис. 3) за початкових умов ідентичним до графіка на рис. 1.

На графіку (рис. 3) римськими цифрами позначено номер карману опори. Як видно з рис. 3, урахування реальної геометрії спряжених поверхонь опори призводить до суттєвого відхилення функції тиску (крива 2) в тангенціальному напрямку в порівнянні з її ідеалізованими поверхнями. Зазначене явище обумовлює відповідну зміну вихідних характеристик ГСП, насамперед несучої здатності та жорсткості, які, в свою чергу, істотно впливають на точність механічної обробки деталей.



1 – ідеалізовані поверхні підшипника; 2 – відхилення форми спряжених поверхонь ГСП

Рис. 3. Функція тиску в тангенціальному напрямку ГСП

Висновки

Розроблено математичну модель функції тиску в радіальних ГСП з урахуванням неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника, яка є підґрунтям для визначення точнісних параметрів підшипника.

Запропонована залежність функції радіального динамічного зазору у вигляді функціонального ряду з базисними тригонометричними функціями, що дозволяє описувати макро і мікрогеометричні відхилення спряжених поверхонь підшипника та може бути використана для математичного моделювання ГСП широкої номенклатури.

Отримані в роботі теоретичні результати щодо розв'язку рівняння балансу витрат рідини можуть бути узагальнені для визначення просторових епюр тиску в радіальних ГСП з відповідним розподілом геометричних похибок в циліндричних координатах.

Список літературних джерел

1. Коровчинский М.В. Прикладная теория подшипников жидкостного трения /Коровчинский М.В. – М.: МиС, 1954. – 186 с.
2. Белоусов А.И. Влияние некоторых погрешностей форм вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника /А.И. Белоусов, Т.А. Хромова //Исследование гидростатических подшипников. – 1973. – С. 18-28.
3. Савин Л.А. Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения /Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа /Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
5. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости /Н.А. Слезкин. – М.: ТТЛ, 1955. – 519 с.
6. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле /А. Камерон. – М.: Машиностроение, 1962. – 296 с.
7. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в станках /В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.
8. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки /Струтинський В.Б. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.
9. Гидростатические опоры роторов быстроходных машин /[Артеменко Н.П., Чайка А.И., Доценко В.Н. и др.]; под. ред. Н.П. Артеменко. – Х.: Основа, 1991. – 197 с.
10. Детали и механизмы металлорежущих станков /[Каминская В.В., Левина З.М. и др.]; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 519 с. – (Шпиндели и их опоры, механизмы и детали приводов; Т. 2).
11. Тодер И.А. Крупногабаритные гидро-статодинамические подшипники /И.А. Тодер, Г.И. Тарабаев. – М.: Машиностроение, 1976. – 199 с.

УДК 621.923.42

А.В. Рудик, канд. техн. наук,

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПЕРЕРОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ГЛИБИННОМУ ШЛІФУВАННІ

Наведені уточнені вирази для визначення питомих підведених об'ємів матеріалу заготовки до робочої поверхні абразивного інструменту вздовж його профілю при круглому глибинному шліфуванні. Отримана замкнена система залежностей характеризує перерозподіл навантаження по висоті круга.

Вступ

Продуктивність шліфування пов'язана з процесами формоутворення, тепловою напруженістю, точністю та якістю обробленої поверхні, вона впливає на зношення круга.

При механічній обробці матеріалів розрізняють [1] продуктивність зняття припуску і формоутворення. По положенню в межах контакту говорять про питому і середню продуктивність, по тривалості дії розрізняють миттєву і середню тощо.

Підвищення продуктивності зняття припуску при круглому глибинному поздовжньому шліфуванні може бути досягнуто за умови підвищення її до рівня різальної здатності інструменту по всій області контакту, де відбувається підведення матеріалу, і збільшення її розмірів. Продуктивність зростає із збільшенням скалярного добутку V_n вектора швидкості відносного руху інструменту на вектор нормалі до його поверхні, який виражає інтенсивність підведення металу, що зрізається. Зняття припуску із заготовки відбувається при позитивному значенні скалярного добутку $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i > 0$, а формоутворення поверхні деталі – при умові $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i = 0$. Таким чином, актуальною є задача визначення проекції векторів $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i$. Залежності для її визначення не приведені в явному вигляді, що не дозволяє проводити аналіз завантаження інструменту уздовж профілю під час обробки.

Загальна модель зняття припуску і формоутворення дає можливість визначити локальну продуктивність Q_n на кожній елементарній ділянці dS контакту S деталі з абразивним кругом.

Підведення металу до поверхні інструменту в роботах [1, 4] визначали згідно рівнянню:

$$Q = \iint_S V_n \cdot dS, \quad (1)$$

де S , dS – площі поверхонь контакту круга і деталі і елемента в її межах.

Подібно приведеній залежності визначають товщину шару при лезовій обробці металів [2]. У роботі [3] автор впливом забірною конуса та поздовжньої подачі нехтує, що може привести до помилок та значного недовантаження круга.

У роботі [6] пов'язують продуктивність зі зміною температури та властивостей металу, що зрізається.

Мета статті

Метою даної роботи є підвищення ефективності процесу поздовжнього шліфування шляхом знаходження та подальшого використання уточнених рівнянь підведення металу до ділянок периферії круга по координатах обробки.

Викладення основного матеріалу

Для визначення проекції векторів V_n швидкості відносного руху інструменту на нормаль до його поверхні розглянемо відомий вираз [4, 5] одиничного вектора нормалі і спростимо кінематику процесу круглого шліфування.

Орт вектора нормалі до поверхні інструменту для довільної точки на периферійній наближеній до торця i -ї ділянки визначається кутовими параметрами θ, α_i [4]

$$\vec{n}_i(\theta) = [-\cos \theta \cdot \cos \alpha_i \quad -\sin \theta \cdot \cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i]^T. \quad (2)$$

де α_i – кут нахилу i -ої ділянки профілю по відношенню до осі круга, який можна визначити в осьовій площині інструменту (рисунок 1) з рівняння

$$\alpha_i \approx \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{I_i}{S_0}. \quad (3)$$

S_0 – подача на оберт, I_i – знос i -ої ділянки забірної частини круга прямого профілю; θ – кутовий параметр, який вимірюють в площині обертання інструменту, відповідає питомій ширині контакту і знаходиться в межах $\theta_{1i} \leq \theta \leq \theta_{2i}$ від положення характеристики на поверхні інструменту θ_{1i} до межі, визначеної припуском θ_{2i} (рисунок 2, а).

Для випадку круглого глибинного шліфування, нехтуючи величинами другого порядку малості, які не перевищують 0,1%, вираз (2) (рисунок 2, в) зручніше переписати у вигляді:

$$\vec{n}(\theta, \alpha_i) \approx \begin{bmatrix} -\sqrt{1-\theta^2-\alpha_i^2} & -\theta & \alpha_i \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

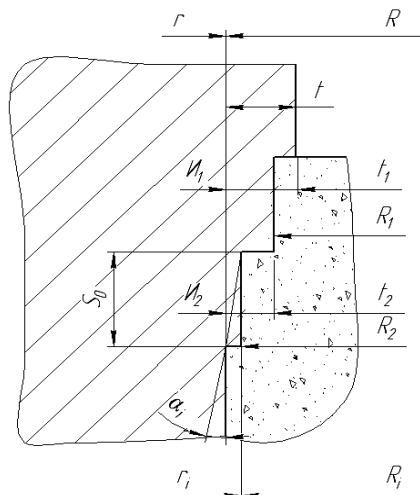


Рис. 1. Розподіл припуску по ділянках

Кількість ділянок K , призначених для перерозподілу навантаження у знятті припуску, може бути знайдена з рівняння: $K \approx \frac{H_k}{S_0}$, (5)

де $0 \leq i \leq K$ – робоча змінна, що визначає положення i -ої ділянки на конічній забірній частині шліфувального круга уздовж осі в напрямку від торця до калібрувальної частини (рисунок 1), H, H_k – загальна висота круга і його ділянки, що зрізає чорновий припуск;

t_i – частина загального припуску $0 \leq t_i \leq t$, яка підводиться для зрізання до i -ої ділянки. Якщо профіль круга не має чорнової частини, то $t_i = T$.

У загальному випадку:

$$\begin{aligned} t_1 &= t - I_1; \\ t_2 &= I_1 - I_2; \\ &\dots\dots\dots \\ t_i &= I_{i-1} - I_i \end{aligned} \quad (6)$$

Радіуси ділянок деталі r_i та чорнових частин профілю круга R_i (рисунок 1) співвідносяться до номінальних розмірів:

$$\begin{aligned} R_i &= R - I_i, \\ r_i &= r + I_i, \end{aligned} \quad (7)$$

де r – номінальний радіус деталі; R – радіус калібрувальної ділянки круга; $R+r$ – міжосьова відстань.

Кінематика процесу круглого шліфування (рисунок 1, б) включає поступальний рух подачі, обертання інструменту та деталі.

Обертання інструменту, яке визначається вектором ω_n , не приводить до зміни його положення щодо деталі, поверхня ковзає «сама по собі», а швидкість довільної точки спрямована перпендикулярно радіусу (нормалі). Тому даний рух не враховують.

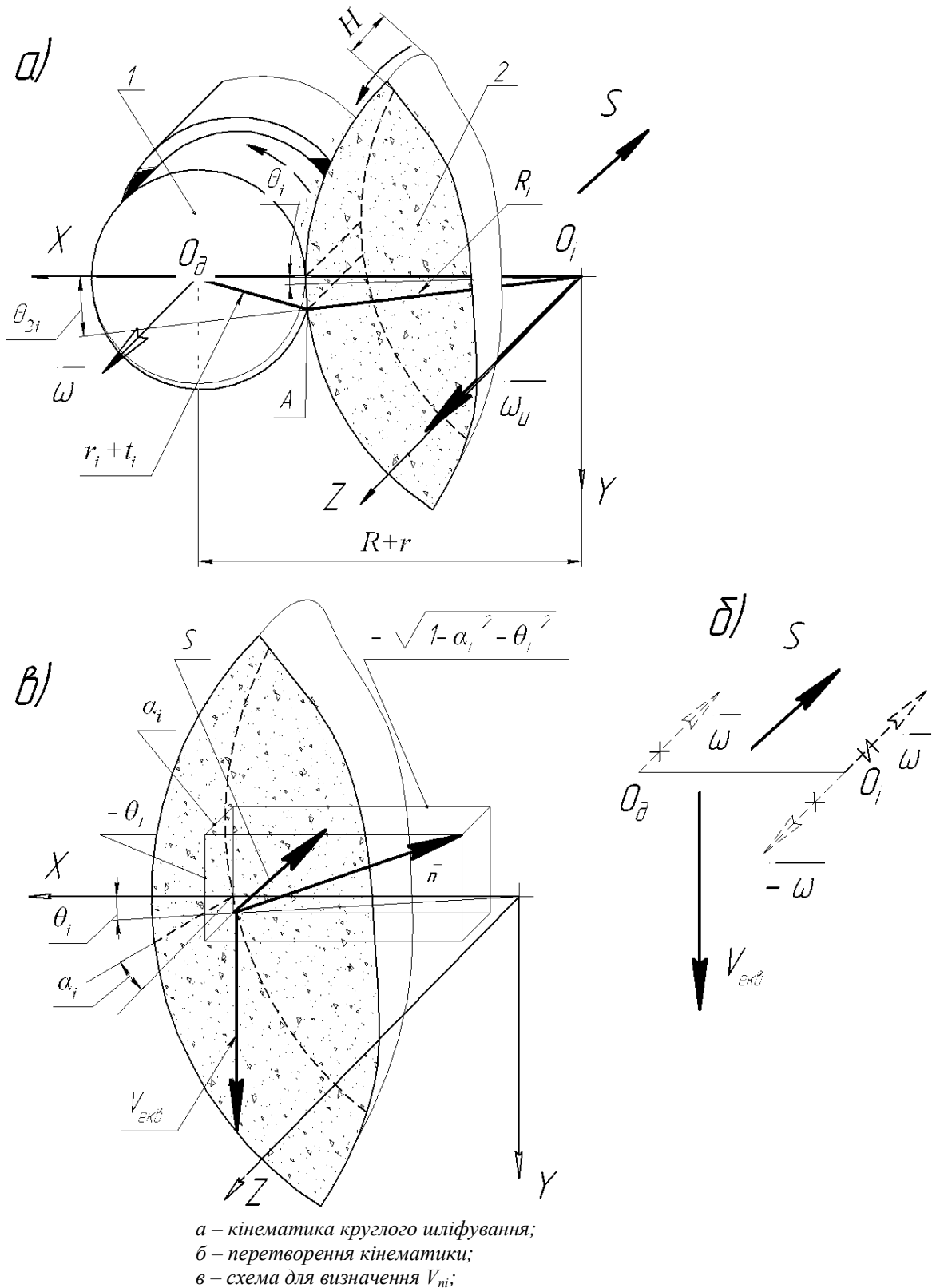


Рис. 2. Схема круглого поздовжнього глибокого шліфування

Прикладемо в центрі шліфувального круга два протилежно направлених вектора, рівних вектору ω кутової швидкості обертання деталі. Таким чином, обертання деталі можна замінити еквівалентним поступальним переміщенням $V_{екв}$, нормальним площині, яка проходить через осі.

Сума векторів швидкості поступальних переміщень осьової подачі та еквівалентного парі обертань дорівнює:

$$\vec{V}_{екв} + \vec{S} = -\omega \cdot \left[\vec{j} \cdot (R+r) + \vec{k} \cdot \frac{S_0}{2\pi} \right], \quad (8)$$

де швидкість осьової подачі визначають як $S = S_0 \cdot \omega / 2\pi$.

З урахуванням виразів (4), (8) визначають проекцію вектора відносної швидкості на нормаль до поверхні круга V_{ni} як скалярний добуток цих векторів. Після перетворень одержимо:

$$V_{ni} = \omega \cdot \left[(R+r) \cdot \theta + \frac{I_i}{2\pi} \right]. \quad (9)$$

Помітимо, що проекція V_{ni} швидкості відносного переміщення круга на нормаль до його поверхні лінійно залежить від кутової швидкості, майже лінійно – від параметра θ і не залежить від подачі на оборот.

Лінія контакту (або характеристика) обмежує значення кутової координати θ_{1i} плями контакту. Його визначають (рисунок 2,а) за умови $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i = 0$:

$$\theta_{1i} \approx \frac{-I_i}{2\pi \cdot (R+r)} \approx 0. \quad (10)$$

На рисунку 2, б умовно показаний кут $\theta_{1i}=0$.

Розмір контакту інструменту з припуском в площині його обертання також обмежений кутом θ_{2i} , який може бути знайдений з теореми косинусів [5] або рішенням векторних рівнянь. Нехтуючи малими величинами, одержимо

$$\theta_{2i} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{(R+r)} \cdot \frac{r_i}{R_i}}. \quad (11)$$

Питома продуктивність $Q_y(i)$ обробки показує, який об'єм металу підводиться до i -ої ділянки профілю круга і визначається інтегралом в межах дуги контакту [1,4]

$$Q_y(i) = \int_{\theta_{1i}}^{\theta_{2i}} V_{ni} \cdot (R_i \cdot d\theta). \quad (12)$$

З урахуванням рівняння (6)

$$Q_y(i) = \frac{\omega \cdot R_i}{2} \cdot \left\{ (R+r) \cdot [\theta_{2i}^2 - \theta_{1i}^2] + \frac{I_i}{\pi} \cdot [\theta_{2i} - \theta_{1i}] \right\}. \quad (13)$$

Даний вираз дозволяє враховувати вплив подачі, форми периферії і положення лінії контакту на поверхні інструмента на питому продуктивність шліфування. Проте, нехтуючи малими величинами кута θ_{1i} , можна значно спростити одержаний вираз:

$$Q_y(i) \approx \omega \cdot \left[t_i \cdot r_i + \frac{I_i \cdot R_i}{2\pi} \cdot \theta_{2i} \right]. \quad (14)$$

Таким чином, на зміну продуктивності впливають два доданки. Перший доданок значною мірою визначається значенням t_i (див. (6), (7)). Другий доданок в дужках враховує збільшення об'єму металу, що підводиться, за рахунок поздовжньої подачі. Проте, його внесок, як правило, не перевищує 5 %.

Лінійний знос I_i ділянки профілю круга в області i -тої точки в процесі обробки деталі визначається з міркувань, подібних приведеним в роботі [4].

За час $d\tau$ об'єм зношеного абразиву повинен відповідати об'єму матеріалу, що підводиться

$$dI_i \cdot 2\pi \cdot R_i = C \cdot (Q_y(i))^m \cdot d\tau, \quad (15)$$

де m – показник степені, C – коефіцієнт.

Формула (15) враховує силові та часові фактори.

Проте, питома продуктивність обробки залежить від кругової подачі і глибини різання, які впливають на навантаження, товщину зрізу і кількість контактів неоднаково. Отже, мають різне силове і теплове навантаження:

$$I_i = C \cdot t^x \cdot \omega^y \cdot R \cdot \tau. \quad (16)$$

де значення коефіцієнтів C , x , y визначають методом апроксимації.

Миттєва продуктивність шліфування Q_{mit} дає можливість розраховувати об'єм металу, що зрізається в місці контакту круга і деталі по координаті обробки θ_y , з урахуванням подачі круга на оборот і його зносу I_i .

$$Q_{mit} = S_0 \cdot \sum_i Q_y(i). \quad (17)$$

Висновки

Отримана замкнена система рівнянь, що пов'язує технологічні параметри, знос і форму круга з продуктивністю підведення матеріалу. Одержані вирази зручно піддавати аналізу та досліджувати навантаження, які приходяться на ділянки поверхні абразивного інструменту.

Розроблена модель дає можливість розраховувати локальну, питому, миттєву і середню продуктивності шліфування різних поверхонь.

Виконана програма розрахунку, що дозволяє визначати продуктивність шліфування з урахуванням розмірів і форми деталі. Вона дозволяє оцінити погрішність розрахунків, порівнюючи об'єми зрізаного із заготівки металу і сумарний, обчислений по питомій продуктивності. 0

Отриману систему рівнянь планується використати для дослідження товщини шару, що зрізається, і теплової напруженості поздовжнього шліфування по координатах обробки.

Список літературних джерел

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – К.: «Вища школа», 1997. – 192 с.
3. Гусев В.В. О распределении параметров срезов при глубинном круглом шлифовании периферией круга //Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003 – Вып. 65. – С. 37-46.
4. Кальченко В.В. Научные основы эффективного шлифования со скрещивающимися осями инструмента и обрабатываемой детали: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. – Харьков, 2006. – 36 с.
5. Кальченко В.В., Рудик А.В. Теоретичні дослідження товщини шару, який зрізується різальною кромкою, при шліфуванні орієнтованим абразивним інструментом //Вісн. Черніг. технол. ун-ту, 2005, № 21. – С. 68-74.
6. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей – М., Машиностроение, 1974. – 280 с.

УДК 378: 371.333

А.В. Полуян, магістрант**Г.В. Пасов**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КОМП'ЮТЕРНА ПЕРЕВІРКА ОДНОРІДНОСТІ ДИСПЕРСІЙ

Розглянуто комп'ютерні програмні продукти перевірки однорідності дисперсій за критеріями Фішера, Кохрена, Бартлета, які дозволяють використовувати їх в дослідницькому процесі та більш ефективно проводити лабораторні заняття.

Вступ

Освіта повинна бути орієнтована на майбутнє, що вимагає від людини уміння працювати з великими потоками інформації. В наш час при вивченні різноманітних дисциплін використовується багато джерел різноманітної інформації: підручники, посібники, журнали, збірники, інтернет. В сучасних умовах широкі можливості відкриває використання електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) в навчальному процесі, особливо персональних комп'ютерів (ПК).

Аналіз досліджень і публікацій

Числове моделювання активно застосовують у гідрології, інженерії доквілля, хімічній інженерії, нафтовидобувній промисловості, інженерії тканин, медицині. Числові розрахунки здійснюють, зокрема, через складність вимірювань. Сучасна наука концентрує увагу на теоретичній розробці концепції і структурно-організаційних моделях комп'ютеризації освіти, оскільки реальна комп'ютеризація навчального процесу на місцях фактично відсутня. Обґрунтовування невідкладної необхідності впровадження комп'ютерної і мікропроцесорної техніки в університетську практику містить дві основні, тісно пов'язані між собою складові. По-перше, техніко-операційні можливості комп'ютера несуть в собі дидактичний матеріал, який може і повинен бути реалізований в навчально-виховному процесі. По-друге, дієвість науково-технічного прогресу залежить від підготовки кадрів на рівні сучасних вимог. Тому вивчення і використання комп'ютерної техніки в навчальному процесі – найважливіший компонент підготовки студентів до подальшого трудового життя. Не можна не враховувати того, що для більшості випускників середніх і вищих навчальних закладів майбутня професія стане переважно комп'ютерною. Рівень володіння знаннями, або, більш узагальнено, інформацією, визначає політичний і господарський статус держав. Для успішної роботи в таких умовах державам потрібні люди – висококваліфіковані фахівці. Тому освіта перетворюється на одне з джерел стратегічних ресурсів – людського капіталу і знань. Інформатизація суспільства практично неможлива без комп'ютеризації системи освіти, через що ця проблема по своїй значущості виходить зараз на перше місце в педагогічній науці. Пріоритетність цієї проблеми посилюється ще і тим, що вона є принципово новою. Виникнувши разом з появою комп'ютера, тобто в останні два десятиріччя, вона не може використовувати досвід минулих століть і тисячоліть, як це зазвичай має місце в класичній педагогіці, і вимушена розвиватися тільки «зсередини», формуючи свою наукову базу одночасно у всіх необхідних сферах – філософії, психології, педагогіці й методології. Ця обставина, в поєднанні з крайньою практичною необхідністю, додає проблемі комп'ютеризації освіти підвищену актуальність, виводить її на перше місце в групі першочергових задач сучасної педагогіки. Комплексна інформатизація шкіл і вузів орієнтується тепер на формування і розвиток інтелектуального потенціалу науки, вдосконалення форми і змісту навчального процесу, впровадження комп'ютерних методів навчання, використання в педагогічній роботі сучасних інформаційних технологій [1-10].

Мета статті

Основною метою статті є опис комп'ютерних програм, які можна використовувати як для визначення однорідності декількох дисперсій, так і для визначення великої кількості дисперсій проведених експериментів.

Виклад основного матеріалу

В Чернігівському державному технологічному університеті (ЧДТУ) на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування і автомобілі» для вивчення навчальних дисциплін: «Математичне моделювання процесів та металорізальних верстатів», «Експериментальні методи дослідження», «Основи наукових досліджень» розроблені програми в системі Delphi 7 [11], які дозволяють обчислювати та автоматично робити висновки про однорідність дисперсій за трьома критеріями: Фішера, Кохрена, Бартлета. Розглянемо їх структуру та принцип роботи.

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Фішера

Даний критерій являє собою порівняння двох або більшої кількості дисперсій, в яких кількість паралельних експериментів однакова і, як результат, відношення більшої дисперсії до меншої, по якому і роблять висновки про однорідність.

Порядок розрахунку наступний.

1. Обчислюють середнє арифметичне значення параметру оптимізації в кожному експерименті матриці за формулою:

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ij}}{n}, \quad (1)$$

де $\bar{y}_j$ – середнє арифметичне значення параметру оптимізації в паралельних експериментах j -того експерименту матриці;

y_{ij} – i -те значення параметру оптимізації в паралельних експериментах j - того експерименту матриці;

n – кількість паралельних експериментів.

2. Обчислюють дисперсію у j -тому експерименті матриці:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}, \quad (2)$$

де S_j^2 – дисперсія параметру оптимізації в j -тому експерименті матриці.

3. Обчислюють однорідність ряду дисперсій за критерієм Фішера за формулою:

$$F_p = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}, \quad (3)$$

де $S_{\max}^2$ – максимальна дисперсія в ряду;

$S_{\min}^2$ – мінімальна дисперсія в ряду.

Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо $F_p < F_{\text{табл}}$. Якщо розрахункове значення критерію Фішера більше, ніж табличне $F_p > F_{\text{табл}}$, то дисперсії неоднорідні.

В програмному продукті «Визначення однорідності дисперсій за критерієм Фішера» розрахунки проводить програма. Початкове вікно програми представлено на рис. 1.

Рис. 1. Вікно програми без занесених даних (критерій Фішера)

Далі заносять початкові дані (рис. 2) та натискають «Розрахунок» і отримують готову інформацію про однорідність занесених дисперсій (рис. 3).

200	199	198
270	271	268
540	531	545
718	725	716

Рис. 2. Вікно програми з занесеними даними (критерій Фішера)

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Фішера

Розрахункове значення критерію Фішера F_p | Табличне значення критерію Фішера F_{tab}

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..10:

Введіть кількість паралельних експериментів 1..10:

Введіть рівень значимості 1% або 5%:

Введіть числові значення дисперсій:

200	199	198
270	271	268
540	531	545
718	725	716

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

199	269,66666	538,66666	719,66666
-----	-----------	-----------	-----------

Значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

1	2,333333	50,33333	22,33333
---	----------	----------	----------

Мінімальне значення дисперсій: 1
Максимальне значення дисперсій: 50,3333333333333

Розрахункове значення критерію Кохрена F_p : 50,3333333333333

Табличне значення критерію Кохрена F_{tab} : 6,591

Отже: дисперсії неоднорідні!

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 3. Вікно програми з розрахунками та висновками (критерій Фішера)

Також програма дозволяє переглянути табличну інформацію, перейшовши на закладку «Табличне значення критерію Фішера F_{tab} » (рис. 4).

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Фішера

Розрахункове значення критерію Фішера F_p | Табличне значення критерію Фішера F_{tab}

Рівень значимості - 5%

Кількість ступенів вільності "Г" (кількість паралельних експериментів)

Н екс.	1	2	3
1	161,45	199,5	215,71
2	18,513	19	19,164
3	10,128	9,552	9,277
4	7,709	6,944	6,591

Рівень значимості - 1%

Кількість ступенів вільності "Г" (кількість паралельних експериментів)

Н екс.	1	2	3
1	4052,2	4999,5	5403,3
2	98,503	99	99,166
3	34,116	30,817	29,457
4	21,198	18	16,694

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 4. Вікно програми з табличною інформацією (критерій Фішера)

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена

Даний критерій використовується для порівняння двох або більшої кількості дисперсій, в яких кількість паралельних експериментів однакова і, як результат, роблять висновки про однорідність дисперсій.

Порядок розрахунку наступний.

1. Обчислюють середнє арифметичне значення параметру оптимізації в кожному експерименті матриці за формулою (1).
2. Обчислюють дисперсію у j -тому експерименті матриці за формулою (2).
3. Обчислюють однорідність ряду дисперсій за критерієм Кохрена за формулою:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}, \quad (4)$$

де N – кількість дисперсій (кількість незалежних експериментів у матриці).

Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо $G_p < G_{\text{табл}}$. Якщо розрахункове значення критерію Фішера більше, ніж табличне $G_p > G_{\text{табл}}$, то дисперсії неоднорідні.

В програмному продукті: «Визначення однорідності дисперсій за критерієм Кохрена» розрахунки проводить програма. Початкове вікно програми наведено на рис. 5.

Рис. 5. Вікно програми без занесених даних (критерій Кохрена)

Заносять початкові дані (рис. 6) та натискають «Розрахунок» і отримують готову інформацію про однорідність занесених дисперсій (рис. 7).

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена

Розрахункове значення критерію Кохрена Gr Табличне значення критерію Кохрена Gtab

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..20

Введіть кількість паралельних експериментів 1..20

Введіть рівень значимості 1% або 5%

Введіть числові значення дисперсій:

200	199	198
270	271	268
540	531	545
718	725	716

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 20:

Значення дисперсій відповідно з 1 по 20:

Розрахунок

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 6. Вікно програми з занесеними даними (критерій Кохрена)

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена

Розрахункове значення критерію Кохрена Gr Табличне значення критерію Кохрена Gtab

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..20

Введіть кількість паралельних експериментів 1..20

Введіть рівень значимості 1% або 5%

Введіть числові значення дисперсій:

200	199	198
270	271	268
540	531	545
718	725	716

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 20:

199 269,66666 538,66666 719,66666

Значення дисперсій відповідно з 1 по 20:

1 2,333333 50,33333 22,33333

Максимальне значення дисперсій: 50,3333333333333

Розрахункове значення критерію Кохрена Gr: 0,662280701754385

Табличне значення критерію Кохрена Gtab: 0,629

Дисперсія всього експерименту або дисперсія параметру оптимізації: 19

Отже: дисперсії неоднорідні!

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 7. Вікно програми з розрахунками та висновками (критерій Кохрена)

Також програма дозволяє переглянути табличну інформацію, перейшовши на закладку «Табличне значення критерію Кохрена Gtab» (рис. 8).

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена

Розрахункове значення критерію Кохрена Gp Табличне значення критерію Кохрена Gtab

Рівень значимості - 5%

Кількість ступенів вільності "f" (кількість паралельних експериментів)

N екс.	1	2	3
2	0,999	0,939	0,906
3	0,967	0,798	0,746
4	0,907	0,684	0,629

Рівень значимості - 1%

Кількість ступенів вільності "f" (кількість паралельних експериментів)

N екс.	1	2	3
2	1	0,995	0,979
3	0,993	0,942	0,883
4	0,968	0,864	0,781

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ITM і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 8. Вікно програми з табличною інформацією (критерій Кохрена)

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Бартлета

Даний критерій використовується для порівняння двох або більшої кількості дисперсій, в яких кількість паралельних експериментів не однакова і, як результат, робиться висновок про однорідність дисперсій.

Порядок розрахунку наступний.

1. Обчислюють середнє арифметичне значення параметру оптимізації в кожному експерименті матриці за формулою (1).
2. Обчислюють дисперсію у j -тому експерименті матриці за формулою (2).
3. Обчислюють дисперсію параметра оптимізації за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2 \cdot f_j}{\sum_{j=1}^N f_j}, \quad (5)$$

де S_y^2 – дисперсія параметру оптимізації;

f_j – кількість ступенів вільності в j -му експерименті, яка дорівнює кількості паралельних експериментів мінус 1, тобто:

$$f_j = n_j - 1, \quad (6)$$

де n_j – кількість паралельних експериментів в j -ому експерименті.

4. Обчислюють величину критерію Бартлета χ_p^2 :

$$\chi_p^2 = \frac{1}{c} \left(f \cdot \lg S_y^2 - \sum_{j=1}^N f_j \cdot \lg S_j^2 \right), \quad (7)$$

де

$$c = 0,4343 \left[1 + \frac{1}{3 \cdot (N-1)} \left(\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} - \frac{1}{f} \right) \right], \quad (8)$$

Якщо χ_p^2 більш, ніж $\chi_{табл}^2$ для даної кількості ступенів вільності та прийнятого рівня значимості, то дисперсії неоднорідні і навпаки.

В програмному продукті: «Визначення однорідності дисперсій за критерієм Бартлета» розрахунки проводить програма. На рис. 9 наведено початкове вікно програми.

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Бартлета

Розрахункове значення критерію Бартлета V_p Табличне значення критерію Бартлета V_{tab}

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..10: 0

Введіть мак. кількість паралельних експер. 1..10: 0

Введіть рівень значимості 1% або 5%:

Введіть числові значення дисперсій:

Розрахунок

Кількість паралельних експериментів відповідно: 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А ст.гр. ММВ-05 Полуняк Анатолій Вікторович

Рис. 9. Вікно програми без занесених даних (критерій Бартлета)

Далі заносять початкові дані (рис. 10) та натискають «Розрахунок» і отримують готову інформацію про однорідність занесених дисперсій (рис. 11).

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Бартлета

Розрахункове значення критерію Бартлета V_p Табличне значення критерію Бартлета V_{tab}

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..10: 4

Введіть мак. кількість паралельних експер. 1..10: 4

Введіть рівень значимості 1% або 5%: 5

Введіть числові значення дисперсій:

6429	6430	6431	6432
540	541	538	
880	881	879	
1125	1127	1128	1127

Розрахунок

Кількість паралельних експериментів відповідно: 4, 3, 3, 4, 0, 0, 0, 0, 0, 0

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А ст.гр. ММВ-05 Полуняк Анатолій Вікторович

Рис. 10. Вікно програми з занесеними даними (критерій Бартлета)

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Бартлета

Розрахункове значення критерію Бартлета V_p | Табличне значення критерію Бартлета V_{tab}

Введіть кількість досліджуваних дисперсій 1..10:

Введіть мак. кількість паралельних експер. 1..10:

Введіть рівень значимості 1% або 5%:

Введіть числові значення дисперсій:

6429	6430	6431	6432
540	541	538	
880	881	879	
1125	1127	1128	1127

Середні арифметичні значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Значення дисперсій відповідно з 1 по 10:

Дисперсія всього експерименту або дисперсія параметру оптимізації: 1,64166666666667

Розрахункове значення критерію Бартлета V_p : 0,308085616099417

Табличне значення критерію Бартлета V_{tab} : 0,352

Отже: дисперсії однорідні!

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 11. Вікно програми з розрахунками та висновками (критерій Бартлета)

Також програма дозволяє переглянути табличну інформацію, перейшовши на закладку «Табличне значення критерію Бартлета V_{tab} » (рис. 12).

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Бартлета

Розрахункове значення критерію Бартлета V_p | Табличне значення критерію Бартлета V_{tab}

Рівень значимості - 5%

Кількість ступенів вільності "Г" (кількість паралельних експериментів)

N экс.	
1	0,0039
2	0,103
3	0,352

Рівень значимості - 1%

Кількість ступенів вільності "Г" (кількість паралельних експериментів)

N экс.	
1	0,0016
2	0,02
3	0,115

Даний програмний продукт розробив на вимогу кафедри ІТМ і А
ст.гр. ММВ-05 Полуян Анатолій Вікторович

Рис. 12. Вікно програми з табличною інформацією (критерій Бартлета)

Висновки

Розроблені програмні продукти можуть ефективно використовуватись при вивченні дисциплін: «Математичне моделювання процесів та металорізальних верстатів», «Експериментальні методи дослідження», «Основи наукових досліджень». Дані програмні продукти дозволяють визначити однорідність будь-якої кількості дисперсій за трьома критеріями: Фішера, Кохрена, Бартлєта, а також працювати незалежно від встановленої операційної системи Windows. Дані програмні продукти не потрібно інсталиювати, вони портатбельні.

Список літературних джерел

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий – М.: Наука, 1971. – 28 с.
2. Белый И.В. и др. Основы научных исследований и технического творчества /И.В. Белый, К.П. Власов, В.Б. Клепиков. – Х.: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1989. – 200 с.
3. Душинський В.В. Основы научных исследований. Теорія та практикум з програмним забезпеченням: Навч. посібник – К.: НТУУ «КПІ», 1998. – 408 с.
4. Кане М.М. Основы научных исследований в технологии машиностроения: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 231 с.
5. Лудченко А.А., Лудченко Я.А., Примак Т.А. Основы научных исследований: Учеб. пособие /Под ред А.А. Лудченко. – К.: О-во «Знання», КОО, 2000. – 114 с.
6. Математическое планирование эксперимента. Методические указания для студентов спец. 05.01. Составитель Полозок Н.Д. – К.: КПИ, 1981. – 55 с.
7. Новик Ф.С. Планирование экспериментов в металловедении – М.: Машиностроение, 1974. – 40 с.
8. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. Душинский В.В., Пуховский Е.С., Радченко С.Г. /Под общей редакцией С.Э. Таурита – К.: Техника, 1977. – 176 с.
9. Чкалова О.Н. Основы научных исследований – К.: Вища школа, 1978. – 120 с.
10. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Навчально-методичний посібник. – К.: Політехніка, 2002. – 88 с.
11. Культин Н.Б. Основы программирования в Delphi 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 608 с.

УДК 621.822. 3

І.М. Хоменко, канд. техн. наук,

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

А.К. Кобринець, магістр,

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

ПРО РОЗРАХУНОК РАДІАЛЬНИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

Наведено методику розрахунку радіальних підшипників ковзання автотракторних двигунів і приклад розрахунку радіального підшипника ковзання двигуна СМД.

Вступ

Розрахунок радіальних підшипників ковзання в автотракторному машинобудуванні традиційно ведуть по середньому тиску K , який створюється зовнішнім навантаженням P на площу проекції вкладиша підшипника:

$$K = \frac{P}{l \cdot D}, \quad (1)$$

де l – довжина опірної поверхні шийки вала, м;

D – діаметр шийки вала, м.

Середні і максимальні значення тиску на радіальні підшипники ковзання автотракторних двигунів наведено в таблиці 1 [1].

Таблиця 1

Значення тиску на радіальні підшипники ковзання автотракторних двигунів

Тип двигуна і автомобіля	Підшипники	$K_{\text{ср}}$, МПа	K_{max} , МПа
Бензинові для легкових автомобілів	Шатунні	6...8	8...10
	Корінні	5...7	6...8
Бензинові для вантажних автомобілів	Шатунні	5...7	7...10
	Корінні	4...6	5...7
Дизелі для автотракторних двигунів	Шатунні	4...5	8...12
	Корінні	5...6	7...9
Форсовані двигуни внутрішнього згорання	Шатунні	9...16	25...35
	Корінні	10...17	20...30

Міждержавним Європейським стандартом МЄСТ ІСО 7902 – 1 2001 «Гідродинамічні радіальні підшипники ковзання, які працюють у стаціонарному режимі. Круглоциліндричні підшипники. Метод розрахунку» [2], регламентуються наступні характеристики і параметри: число Рейнольдса, при якому забезпечується ламінарний потік мастила в підшипнику; параметр Зоммерфельда, яким характеризується несуча здатність підшипника; витрати мастила через підшипник; втрати потужності на тертя; параметри теплового балансу.

Число Рейнольдса визначається за формулою:

$$R_e = \frac{\rho \cdot \pi \cdot D \cdot \omega \cdot (\psi \cdot D)}{2 \cdot \mu_t} \leq 41,3 \cdot \sqrt{\frac{D}{(\psi \cdot D)}}, \quad (2)$$

де R_e – число Рейнольдса;

D – номінальний внутрішній діаметр підшипника, м;

$(\psi \cdot D)$ – ефективний діаметральний зазор у підшипнику;

ψ – відносний зазор у спряженні підшипник-вал;

ω – кутова швидкість обертання колінчастого вала, с^{-1} .

μ_t – динамічна в'язкість мастила при робочій температурі підшипника, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

ρ – густина мастила. Для автотракторних двигунів $\rho = 900 \dots 920 \text{ кг/м}^3$.

Число Зоммерфельда, яке характеризує вантажність (несучу здатність) підшипника, визначається за формулою:

$$S_o = \frac{p_{\max} \cdot \psi}{\mu_t \cdot \omega}, \quad (3)$$

де $p_{\max}$ – максимальний тиск на подушку підшипника, Па .

Витрати мастила з підшипника ($\text{м}^3/\text{с}$) визначають як суму двох складових, а саме:
– викликані гідродинамічним тиском мастила – за формулою:

$$M_1 = D^3 \cdot \psi \cdot \omega \cdot M_1^e, \quad (4)$$

де M_1^e – параметр витрат мастила по причині гідродинамічного тиску;

– викликані тиском джерела мастила M_2 – за формулою:

$$M_2 = \frac{D^3 \cdot \psi^3 \cdot p_n \cdot M_1^d}{\mu_t}; \quad (5)$$

де M_1^d – параметр витрати мастила по причині тиску джерела мастила;

p_n – тиск джерела мастила.

$$M_1^d = \frac{\pi \cdot (1 + \chi)^3}{48 \cdot \ln\left(\frac{l_n}{d_d}\right) \cdot q_1}, \quad (6)$$

$$q_1 = 1,204 + 0,368 \cdot \frac{d_d}{l_n} - 1,046 \cdot \left(\frac{d_d}{l_n}\right)^2 + 1,942 \cdot \left(\frac{d_d}{l_n}\right)^3, \quad (7)$$

де $\frac{d_d}{l_n}$ – відношення діаметра отвору джерела мастила до ширини підшипника;

χ – відносний ексцентриситет вала в підшипнику.

Для визначення втрат тепла в підшипнику приймають тиск і температуру мастила на вході в підшипник і температуру на виході з нього, а також – визначають коефіцієнт тертя в підшипнику.

У таблиці 2 наведено значення тиску мастила джерела і температур мастила на вході і виході в підшипнику колінчастого вала для автотракторних двигунів.

Таблиця 2

*Значення тиску джерела мастила і температур в підшипниках
колінчастого вала автотракторних двигунів*

Двигуни	p_n , МПа	$T_{\text{вх}}$, $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{вих}}$, $^{\circ}\text{C}$
Бензинові	0,3...0,5	70...75	90...95
Дизелі	0,4...0,6	75...80	80...110

Коефіцієнт тертя в підшипнику визначають за формулою:

$$f = \beta \cdot \psi_c; \quad (8)$$

де β – коефіцієнт, який залежить від χ і відношення l_n/d_d . Значення β визначаються з графіка, який наведено на рисунку 1[1].

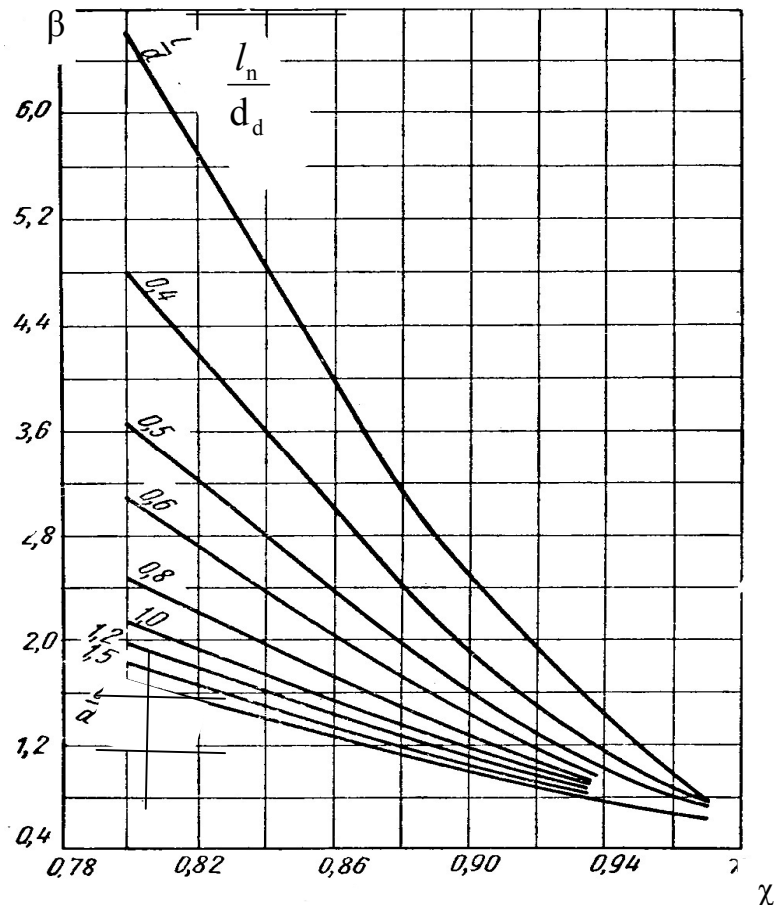


Рис.1 Номограма для визначення коефіцієнта β

Кількість тепла, що виділяється в результаті тертя в підшипнику, визначається за формулою:

$$Q_f = \frac{f \cdot P \cdot D \cdot \omega}{2}. \quad (9)$$

Середня температура мастила в підшипнику $T_c = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вих}})$.

Під час дисипації тепла через мастило від сил тертя температуру на виході визначають за формулою:

$$T_{\text{вих}} = \frac{Q_f}{\mu_{cv} \cdot M} + 75, \quad (10)$$

де $\mu_{cv} = 1,8 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К) – об'ємна питома теплоємність мастила.

Остаточне значення температури на виході з підшипника визначається методом послідовних наближень.

Кількість тепла, що розсіюється у навколишнє середовище, визначається за формулою:

$$Q_c = k \cdot F_n \cdot (T_n - T_{\text{oc}}), \quad (11)$$

де Q_c – тепло, яке випромінюється в навколишнє середовище;

$k = 15 \dots 20 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ – коефіцієнт, який характеризує тепловіддачу поверхні корпусу підшипника;

T_n, T_{oc} – відповідно температури підшипника і оточуючого середовища;

F_n – площа поверхні корпусу підшипника, $F_n = (15 \dots 20) \cdot D \cdot l_n$.

Кількість тепла, яке може бути відведене в результаті витоків з підшипника мастила, становить:

$$Q_m = \mu_{cv} \cdot M \cdot \frac{Q_f}{\mu_{cv} \cdot M} \cdot (T_{вих} - T_{вх}). \quad (12)$$

Під час курсового і дипломного проектування з дисципліни «Двигуни внутрішнього згоряння» студентами використовується застарілі методи розрахунку радіального підшипника ковзання, які зводяться до визначення середнього тиску на подушку підшипника і мінімального зазору в підшипнику з урахуванням гідродинамічних сил, які діють в підшипнику [1]. Крім того, у автотракторних двигунах використовують радіальні підшипники ковзання з джерелом мастила, тобто з примусовим постачанням мастила від спеціального насоса, що також рідко враховується.

З метою покращення якості розрахунку доцільно під час проектування радіальних підшипників ковзання використовувати сучасні методи проектування з урахуванням показників і параметрів, рекомендованих міждержавним стандартом [2].

Методи та результати

Методику, що пропонується, проілюструємо на прикладі розрахунку радіального підшипника ковзання автотракторного двигуна СМД.

Навантаження на шип вала у підшипнику в двигуні створюються силами тиску робочого тіла у циліндрі і силами інерції рухомих мас кривошипно-шатунного механізму.

Максимального значення навантаження сягають, коли поршень знаходиться поблизу верхньої мертвої точки (*в.м.т*), під час samozapalювання палива або запалювання робочої суміші. При цьому на поршень діє сила:

$$P = P_z + P_j, \quad (13)$$

де $P_z = p_z \cdot F_n$ – сила, що діє на поршень під час samozapalювання палива в циліндрі двигуна;

p_z – тиск газів на дно поршня; для автотракторних дизелів під час розрахунків рекомендується приймати $p_z = 9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$;

$F_n = \pi \cdot d^2 / 4$ – площа поверхні дна поршня м^2 ;

P_j – сила інерції поршневої групи, Н:

$$P_j = -m_{jnr} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot (1 + \lambda_w); \quad (14)$$

m_{jnr} – маса деталей поршневої групи, що рухаються зворотно-поступально; дорівнює сумі мас поршневого комплексу (поршень, палець, поршневі кільця) і частини маси шатуна, віднесеної до поршня, кг;

r – радіус кривошипа колінчастого вала, м;

l – довжина шатуна, м;

ω – кутова швидкість обертання колінчастого вала, с^{-1} ;

$$\lambda_{\text{ш}} = r/l.$$

Для двигуна СМД: $m_{j_{nr}} = 5.272 \text{ кг}$; $r = 0.07 \text{ м}$; $\omega = \pi \cdot n / 30 = \pi \cdot 1700 / 30 = 178 \text{ с}^{-1}$;
 $\lambda_{\text{ш}} = 0,28$.

Знаходимо силу інерції поршневої групи, враховуючи, що при положенні поршня в *в.м.т.* вона має максимальне значення:

$$P_j = -5,272 \cdot 0,07 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 1700}{30} \right)^2 \cdot (1 + 0,28) = -14956 \text{ Н.}$$

Визначаємо силу тиску, що діє на поршень двигуна під час samozapalovannya палива, приймаючи $p_z = 9 \cdot 10^6 \text{ МПа}$:

$$P_r = 9 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,12^2}{4} = 101787,6 \text{ Н.}$$

Знаходимо максимальну силу, що діє на поршень у верхній мертвій точці (формула (13)):

$$P = 101787,6 - 14956 = 86831,6 \text{ Н.}$$

Максимальний середній тиск на корінний підшипник колінчастого вала, враховуючи, що сила P розподіляється на два корінні підшипники:

$$p_{\text{max}} = \frac{P}{2 \cdot D \cdot l_n}; \quad (15)$$

$$p_{\text{max}} = \frac{86831,6}{2 \cdot 0,088 \cdot 0,08} \approx 6,17 \text{ МПа,}$$

де l_n – ширина корінного підшипника колінчастого вала; для двигуна СМД $l_n = 0,08 \text{ м}$;
 D – діаметр корінної шийки вала; для двигуна СМД $D = 0,088 \text{ м}$.

Робочий зазор у підшипнику залежить від посадки і теплового розширення вала і підшипника. При нормальних умовах ($t_0 = 20^\circ \text{C}$) відносний зазор у підшипнику визначаємо за формулами:

$$\psi_{\text{max}} = \frac{D_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{D}; \quad \psi_{\text{min}} = \frac{D_{\text{min}} - d_{\text{max}}}{D}; \quad \psi_c = \frac{\psi_{\text{max}} + \psi_{\text{min}}}{2}, \quad (16)$$

де ψ_{max} , ψ_{min} , ψ_c – відповідно максимальний, мінімальний і середній відносні зазори в підшипнику;

D_{max} , D_{min} , D – відповідно максимальний, мінімальний і номінальний діаметри підшипника;

d_{max} , d_{min} – максимальний і мінімальний діаметри вала.

Зміна зазору по причині теплового розширення вала і підшипника визначається за формулою:

$$\Delta \psi = \alpha_n \cdot (t_n - t_{0c}) - \alpha_v \cdot (t_v - t_{0c}), \quad (17)$$

де α_n , α_v – коефіцієнти лінійного розширення підшипника і вала відповідно. Приймаємо $\alpha_n = 23 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\alpha_v = 11 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$;

t_n, t_g – температура підшипника і вала відповідно. Прийmemo для розрахунку t_n , $t_g = 90^\circ\text{C}$. $t_{0c} = 40^\circ\text{C}$ – температура оточуючого середовища.

Отже, $\Delta\psi = (90 - 40) \cdot (23 - 11) \cdot 10^{-6} = 0,0006$ м.

Для корінного підшипника колінчастого вала двигуна СМД максимальні і мінімальні значення діаметрів підшипника і вала, а також номінальний діаметр спряження відповідно $D_{\max} = 88,045 \cdot 10^{-3}$ м; $D_{\min} = 88,0040 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\max} = 87,900 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\min} = 87,885 \cdot 10^{-3}$ м; $D = 88 \cdot 10^{-3}$ м.

Після підстановки розмірів діаметрів знаходимо максимальне, мінімальне і середнє значення відносного діаметра:

$$\psi_{\max} = 0,00182; \quad \psi_{\min} = 0,00118; \quad \psi_c = 0,0015.$$

З урахуванням теплових змін розмірів вала і підшипника відносний зазор у спряженні підшипник-вал має значення:

$$\psi = \psi_c + \Delta\psi = 0,0015 + 0,0006 = 0,0021 = 2,1 \cdot 10^{-3}.$$

Підставляючи значення розрахункових параметрів, знаходимо число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{900 \cdot 3,14 \cdot 88 \cdot 10^{-3} \cdot 178 \cdot (0,0021 \cdot 88 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 0,017} \leq 41,3 \cdot \sqrt{\frac{1}{0,021}};$$

$$R_e = 240,7 < 901,2.$$

Отже, у даному випадку потік мастила в підшипнику ламінарний.

Рідинне тертя в підшипнику забезпечується, якщо мінімальний зазор між підшипником $h_{\min}$ і валом буде задовільняти умові:

$$h_{\min} \geq h_{\min \cdot kp} + h_p, \quad (18)$$

де $h_{\min \cdot kp}$ – критична товщина мастильного шару в підшипнику, м. Для автотракторних двигунів, які пройшли обкатку, можна приймати $h_{\min \cdot kp} = (3 \dots 4) \cdot 10^{-6}$ м [1];

h_p – робоча мінімальна товщина шару мастила в підшипнику.

Мінімальний зазор між підшипником і валом для автомобільних двигунів можна приймати $h_{\min} = (5 \dots 6) \cdot 10^{-6}$ м, для тракторних дизелів $h_{\min} = (10 \dots 15) \cdot 10^{-6}$ м. Для двигуна СМД приймаємо $h_{\min} = 12,6 \cdot 10^{-6}$ м [3].

Середній радіальний зазор у спряженні підшипник-вал визначаємо за формулою:

$$c = \psi_c \cdot D / 2; \quad (19)$$

$$c = 0,0015 \cdot 88 / 2 = 0,066 \text{ мм} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ексцентриситет вала в підшипнику:

$$\rho = h_{\min} - c; \quad (20)$$

$$\rho = (12,6 - 6,6) \cdot 10^{-6} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Відносний ексцентриситет вала в підшипнику:

$$\chi = \rho / c; \quad (21)$$

$$\chi = 6 \cdot 10^{-6} / 6,6 \cdot 10^{-6} = 0,91.$$

Для робочої температури (90°C) і мастила ДП-14 з графіка на сторінці 490 [1] знаходимо $\mu_{t=90} = 0,017$ Па·с.

Прийнявши $\rho = 900$ кг/м³, за формулою (3) знаходимо число Зоммерфельда:

$$S_o = \frac{6,17 \cdot 10^6 \cdot 2,1^2 \cdot 10^{-6}}{0,017 \cdot 178} = 8,99.$$

Практично значення So не перевершує 30.

Витрати мастила з підшипника через зазори, викликані гідродинамічним тиском, визначаємо за формулою (4).

Для кута $\theta = 180^\circ$ (половинне охоплення цапфи вала мастилом) при $\chi = 0,9$,

$l_n / D = 1$, $M_1^c = 0,0679$ (таблиця 9, сторінка 3 стандарту МЄСТ ISO 7902 – 1 2001).

Приймаємо для розрахунку $M_1^c = 0,067$;

Отже, витрати мастила, обумовлені гідродинамічним тиском:

$$M_1 = 0,088^3 \cdot 0,0021 \cdot 178 \cdot 0,067 = 0,00001707 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Витрати мастила, обумовлені тиском джерела мастила M_2 при $p_n = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – за формулами (5), (6), (7):

$$q_1 = 1,204 + 0,368 \cdot 0,0625 - 1,046 \cdot (0,0625)^2 + 1,942 \cdot (0,0625)^3 = 1,2234,$$

де $d_d / l_n = 5/80 = 0,0625$ – відношення діаметра отвору джерела мастила до ширини підшипника;

$$M_1^d = \frac{3,14 \cdot 0,91^3}{48 \cdot \ln\left(\frac{80}{5}\right) \cdot 1,2234} = 0,1344;$$

$$M_2 = \frac{0,088^3 \cdot 2,1^3 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^5}{0,017} \cdot 0,1344 = 24,95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Загальні витрати мастила:

$$M = M_1 + M_2 = (17,07 + 24,95) \cdot 10^{-6} = 42,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для визначення втрат тепла попередньо приймаємо тиск і температуру мастила на вході в підшипник і температуру на виході з нього.

Згідно з таблицею 2 приймаємо значення тиску мастила джерела і температур мастила в підшипнику колінчастого вала для автотракторного двигуна СМД:

$$p_n = 0,5 \text{ МПа}; T_{\text{вх}} = 75^\circ\text{C}; T_{\text{вих}} = 105^\circ\text{C}.$$

Середня температура в підшипнику $T_c = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вих}}) / 2 = 90^\circ\text{C}$.

Визначаємо коефіцієнт тертя в підшипнику за формулою:

$$f = \beta \cdot \psi_c; \quad (22)$$

де β – коефіцієнт, який залежить від χ і відношення $\frac{l_n}{d_d}$. Значення β визначаються

з графіка, який наведено на рисунку 1.

З графіка на рисунку 1 для двигуна СМД знаходимо $\beta = 1,2$. Отже, значення коефіцієнта тертя:

$$f = 1,2 \cdot 0,0015 = 0,0018.$$

Кількість тепла, що виділяється в результаті тертя в підшипнику, визначаємо за формулою (9):

$$Q_f = \frac{0,0018 \cdot 101314 \cdot 88 \cdot 10^{-3} \cdot 178}{2} = 1428,3 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{с} (\text{Вт}).$$

Знаходимо температуру мастила на виході з підшипника, прийнявши її значення на вході $T_{\text{вх}} = 75^{\circ}\text{C}$ і підвищення – на виході з підшипника на 30°C .

Отже, $T_{\text{вих}} = 105^{\circ}\text{C}$.

Середня температура мастила в підшипнику:

$$T_c = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вих}}) / 2 = 90^{\circ}\text{C}.$$

При дисипації тепла від тертя через мастило, прийнявши об'ємну теплоємність $\mu c V = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$, отримаємо температуру на виході за формулою (10):

$$T_{\text{вих}} = \frac{1428,3}{1,8 \cdot 10^6 \cdot 42,02 \cdot 10^{-6}} + 75 = 93,9^{\circ}\text{C}.$$

Визначаємо середнє значення температури в підшипнику для наступного наближення в розрахунках:

$$T_{c1} = (T_{\text{вх}} + T_{\text{вих1}}) / 2 = (75 + 93,9) / 2 = 84,5^{\circ}\text{C}.$$

Далі знаходимо чергове наближення температури мастила на виході з підшипника:

$$T_{\text{вих}} = \frac{1428,3}{1,8 \cdot 10^6 \cdot 42,02 \cdot 10^{-6}} + 84,5 = 103,4^{\circ}\text{C}.$$

Наступна ітерація показала, що $T_{\text{вих2}} = 108,09^{\circ}\text{C}$. Ітерації продовжуються до тих пір, поки різниця між наступним і попереднім значеннями температури мастила на виході з підшипника буде меншою 2°C .

У нашому випадку встановлено, що $T_{\text{вих}} = 108^{\circ}\text{C}$.

Кількість тепла, що розсіюється у навколишнє середовище, визначаємо за формулою (11) у такий спосіб.

Приймаємо для розрахунку $F_n = 20 \cdot 88 \cdot 10^{-3} \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 0,1408 \text{ м}^2$ і попереднє значення $T_n - T_{\text{ос}} = 40^{\circ}\text{C}$.

За умови, що все тепло тертя відводиться через поверхню корпусу підшипника (розсіювання тепла здійснюється лише шляхом конвекції), то:

$$Q_c = 20 \cdot 0,1408 \cdot (T_n - 40).$$

У цьому випадку, при $Q_f = Q_c$, температура поверхні корпусу підшипника становить:

$$T_n = 1428,3 / 20 \cdot 0,1408 + 40 = 547,2^{\circ}\text{C}.$$

Тобто, дисипація тепла шляхом конвекції за відсутності тепловідводу з мастилом не забезпечить нормальні умови роботи підшипника.

Кількість тепла, яке може бути відведене в результаті витоків з підшипника мастила, визначаємо за формулою (12):

$$Q_m = 1,8 \cdot 10^6 \cdot 42,02 \cdot 10^{-6} \cdot (108 - 75) = 2117,81 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{с} (\text{Вт}).$$

Отриманий результат ($Q_m > Q_f$) свідчить про надійність тепловідводу мастилом.

Висновки

Поширений метод розрахунку радіального підшипника ковзання за величинами $K_{\text{ср}}$ і $K_{\text{мах}}$ наближений, оскільки він не враховує ряд експлуатаційних факторів, таких як: температура підшипника, наявність джерела мастила, його витрати через зазори тощо.

Запропоновано метод, який базується на міждержавному стандарті по розрахунку радіальних підшипників ковзання, враховує параметри і особливості роботи автотрак-

торних двигунів, може бути використаним під час виконання студентами курсових і дипломних проектів і в інших інженерних розрахунках.

Список літературних джерел

1. Вихерт М.М. (Под редакц. проф. Степанова Ю.А.). Конструкция и расчет авто-тракторных двигателей /М.М. Вихерт, Р.П. Доброгаев и др. – М.: Машгиз, 1957. – 604 с.
2. Гидродинамические радиальные подшипники скольжения, работающие в стационарном режиме. Круглоцилиндрические подшипники. Часть 1. Метод расчета (GOST ISO 7902-1 2001). – (Введен 01.07.2002). – М.: Госстандарт России (ВНИИНМАШ), 2002. – 31 с.
3. Хоменко І.М. Технологічні критерії граничного зносу машин. Монографія ISBN 966-7496-17-1) /І.М. Хоменко. – Чернігів: Чернігівський держ. техн. ун-т, 2005. – 191 с.

ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.03

І.В. Зяхор, канд. техн. наук**С.І. Кучук-Яценко**, академік НАН України

Інститут електрозварювання ім. С.О. Патона НАН України, м. Київ

Г.К. Харченко, д-р техн. наук**О.О. Новомлинець**, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РОЛЬ ПОЧАТКОВИХ СТАДІЙ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ З'ЄДНАНЬ ТИТАНУ ЗІ СТАЛЛЮ

Досліджено особливості структури та фазового складу зони з'єднання титану з нержавіючою сталлю на початкових стадіях процесу зварювання тертям, експериментально та розрахунковим шляхом визначено температуру нагрівання зони контакту. Встановлено наявність інтерметалідного прошарку у зоні контактної взаємодії при часі зварювання менше 1 с задовго до початку освової і радіальної деформації заготовок.

Постановка проблеми

Для машинобудування й виробів нової техніки необхідні біметалеві елементи зі сполученням таких властивостей, як висока міцність і корозійна стійкість в агресивних середовищах. Таким вимогам задовольняють біметалеві з'єднання титанових сплавів з нержавіючою сталлю. Незначна взаємна розчинність титану та заліза, утворення інтерметалідних фаз та евтектик виключають можливість безпосереднього з'єднання титану зі сталлю всіма відомими способами зварювання плавленням – зварні шви виходять крихкими та розтріскуються [1]. Для одержання біметалевих з'єднань звичайно використовуються способи зварювання тиском.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для рішення вказаної проблеми ряд дослідників вивчали використання дифузійного зварювання [1]. Проте, металургійні й механічні властивості отриманих з'єднань були низькими, і з'єднання руйнувалося по границі розділу при механічних випробуваннях. Для одержання різнорідних з'єднань одним з ефективних способів є зварювання тертям [2, 3]. Зварювання тертям сталі з титаном досліджувалися в роботах [4-6]. При зварюванні титану з вуглецевою сталлю (до 0,25 % C) відповідним вибором технологічних параметрів вдається одержати з'єднання із задовільною міцністю [5], однак пластичність і ударна в'язкість з'єднань дуже низька. Погіршення пластичних властивостей автори пов'язують з утворенням у зоні з'єднання прошарку, який містить інтерметалідну фазу TiFe і карбіди титану. У роботі [6] зроблено спробу оптимізації режимів зварювання сплавів титану з нержавіючою сталлю. Однак, з'єднання мають задовільні показники міцності на розрив і низькі показники пластичності внаслідок утворення прошарку, що містить інтерметалідні фази (FeNiCr)Ti.

Вважається, що для деяких біметалів запобігти виникненню крихкого прошарку можна в тому випадку, якщо при зварюванні температура і деформація у зоні контакту будуть достатні для утворення з'єднання, а тривалість впливу цієї температури на зону контакту буде нижчою тривалості латентного періоду виникнення суцільного прошарку інтерметалідів. Наявність латентного періоду під час хімічної взаємодії титану з іншими металами (Fe, Ni, Cr) при зварюванні тиском є питанням дискусійним і обумовлює необхідність проведення подальших досліджень. Науковий і практичний інтерес становлять також питання можливості одержання працездатних з'єднань титану зі сталлю,

які не містять інтерметалідних та карбідних фаз.

Мета роботи

Мета роботи – дослідити структуру і фазовий склад з'єднань титану зі сталлю на початкових стадіях процесу зварювання тертям, встановити можливість існування латентного періоду виникнення інтерметалідних фаз та визначити кінетику утворення крихкого прошарку у зоні з'єднання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для дослідження фазового складу з'єднань титану BT1-0 з нержавіючою сталлю 12X18H10T виконували зупинку процесу ЗТ на ранніх його стадіях. Для вивчення механізму утворення інтерметалідної фази на ранніх стадіях контактної взаємодії вивчали мікроструктуру з'єднань титан-сталь, отриманих при значеннях часу нагрівання $t_n=0,5-1$ с (діаметр зразків 20 мм). Також виконували фактографічні дослідження поверхонь зламу з'єднань. Експерименти проводились на установці СТ120 для зварювання тертям з регульованим гальмуванням обертання [7]. Структуру біметалевих з'єднань вивчали з використанням оптичної мікроскопії («Neophot-32») і растрової електронної мікроскопії на мікроскопі СЭМ-515 фірми «Philips». Визначення мікротвердості металу зони з'єднання проводили на мікротвердомірі М400 фірми «LECO» при навантаженні 1-5 Н.

Мікроструктура різних ділянок зони з'єднання титан-сталь 12X18H10T при $t_n=0,8$ с і поверхні зламу показані на рисунку 1. Наявність проміжного прошарку у зоні з'єднання спостерігається на периферійних ділянках перерізу, а в частині перерізу на відстані близько 0,5R (R – радіус заготовок) спостерігаються ділянки із змішаною структурою шириною до 15 мкм.

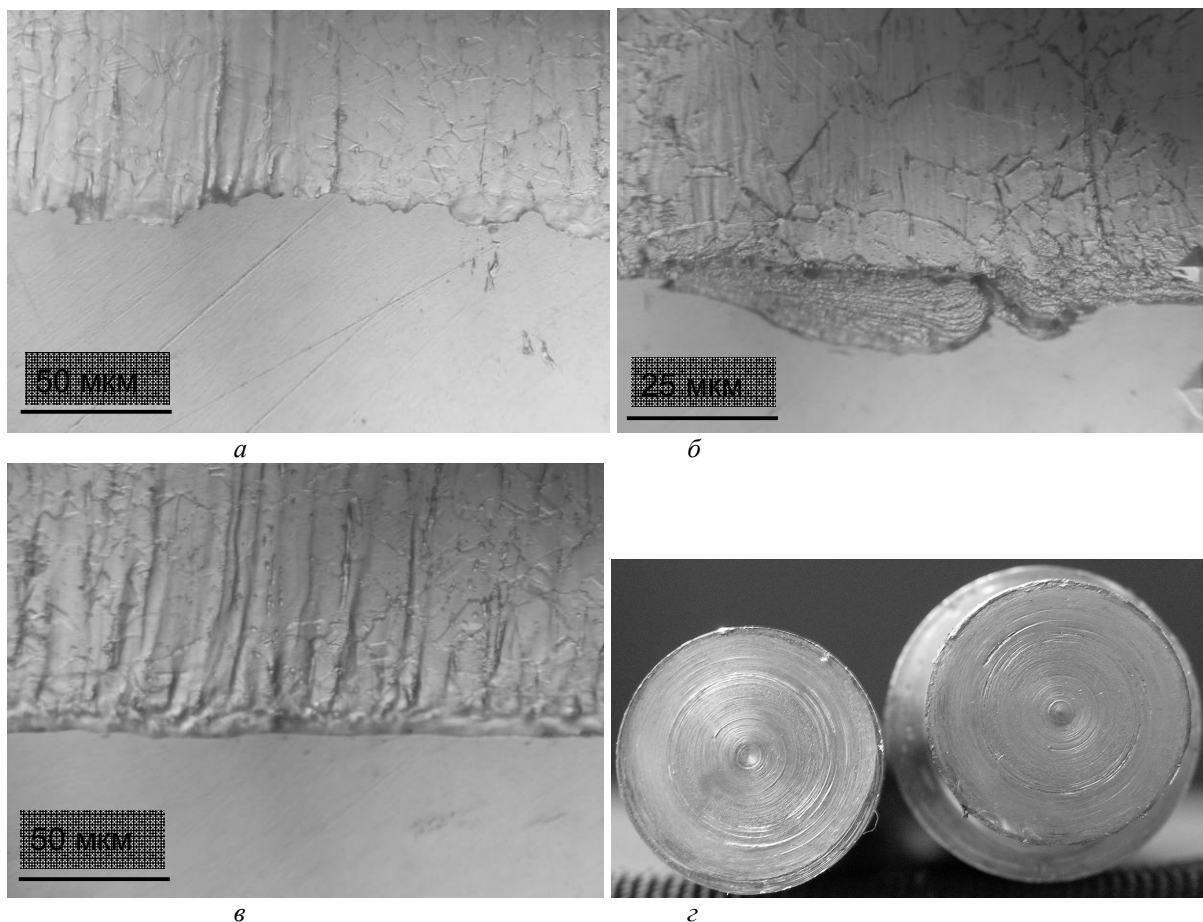


Рис. 1. Мікроструктура зони з'єднання на відстані від центру перерізу: 0,1R (а), 0,5R (б), 0,9R (в) і макроструктура поверхні зламу (г) після випробувань з'єднання на згин (R – радіус заготовок)

Руйнування зразків при випробуваннях на згин відбувається по поверхні розділу з'єднання. Мікрорентгеноспектральний аналіз поверхні зламу зруйнованих зразків виявив наявність областей, збагачених титаном з боку сталі, та ділянок, збагачених залізом, нікелем, хромом з боку титану. На поверхні зламу з боку титану й сталі (рисунки 2, 3) виявляються лінії ковзання і кільцеві ділянки, хімічний склад металу яких наведено в таблиці 1.

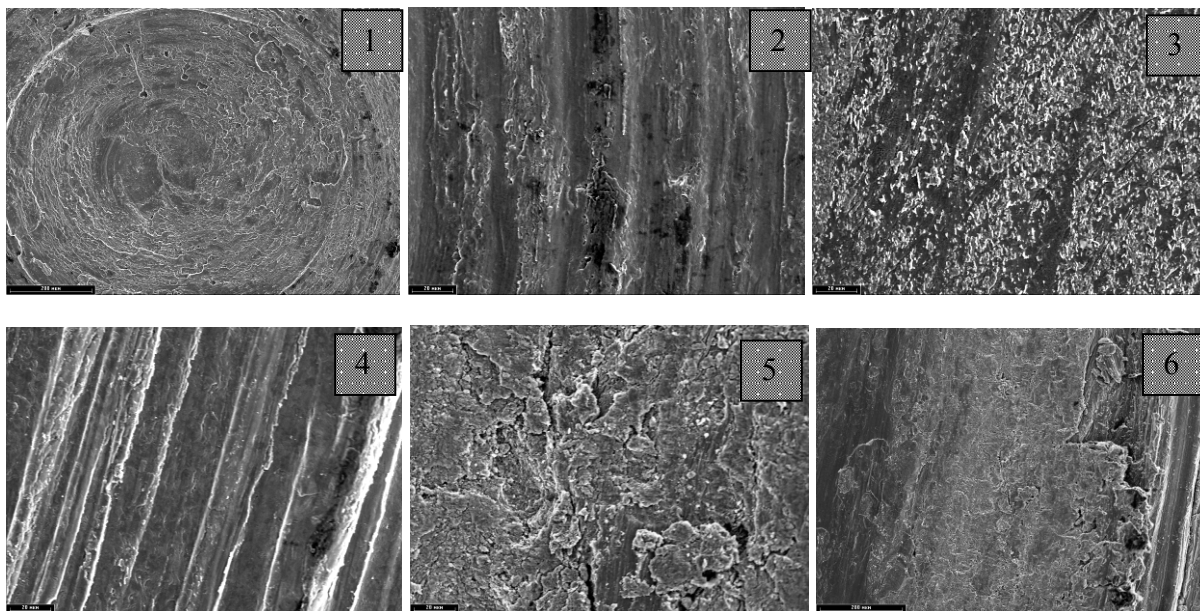


Рис. 2. Поверхня зламу з боку титану з'єднання сталь 12X18H10Т-титан ВТ1-0 на відстані від центру перерізу: 0,1R (1), 0,2R (2), 0,4R (3), 0,6R (4), 0,8 R (5), 0,9R (6)

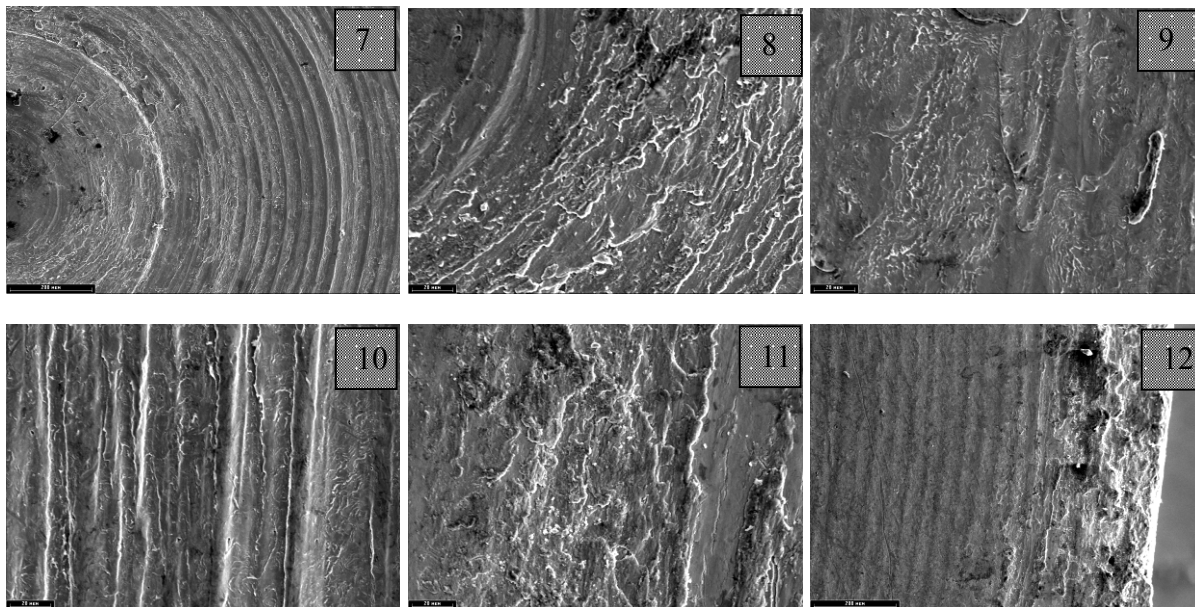


Рис. 3. Поверхня зламу з боку сталі з'єднання сталь 12X18H10Т-титан ВТ1-0 на відстані від центру перерізу: 0,1R (7), 0,2R (8), 0,4R (9), 0,6R (10), 0,8 R (11), 0,9R (12)

Таблиця 1

Склад (мас. %) поверхні зламу з'єднання сталь 12X18H10T-титан BT1-0

Хімічний елемент	№ ділянки (див. рисунки 2, 3)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ti	89,9	91,8	81,8	90,9	94,1	80,3	30,3	14,9	6,9	4,8	15,6	34,7
Fe	7,1	6,4	14,0	6,7	4,2	14,2	50,5	62,1	65,8	68,3	60,4	46,1
Cr	1,7	1,1	2,6	1,6	1,1	3,6	13,9	17,4	20,3	19,3	19,1	14,6
Ni	1,3	0,7	2,1	0,8	0,6	1,8	5,3	5,7	6,9	7,6	4,6	4,6

Концентрація титану в сталі та концентрація Fe, Ni, Cr в титані значно перевищує граничну розчинність цих елементів при кімнатній температурі. Це свідчить про наявність у зоні з'єднання проміжного прошарку, що містить інтерметалідні фази (Fe, Ni, Cr)Ti (таблиця 1). Характерно, що інтерметалідні фази на обох поверхнях зламу виявляються у всіх частинах перетину заготовок (від центральної до периферійної), які значно відрізняються швидкістю відносного переміщення, а значить, і температурою нагрівання.

Відомо, що для початкових стадій процесу ЗТ характерним є нерівномірний розподіл температури нагрівання по перерізу заготовок [2, 3, 8]. Зокрема, в центральній частині перетину підвищення температури відбувається поступово і досягає значень сталого нагрівання, щонайменше за декілька секунд.

Для оцінки температурного режиму ЗТ титану зі сталлю вимірювали температуру зони контакту з використанням хромель-алюмелевих термопар з діаметром дроту 0,2 мм. У зв'язку з тим, що при зварюванні титану з нержавіючою сталлю остання практично не деформуються, спай термопар закріплювали у сталевому зразку на відстані 0,5 мм від поверхні (рисунок 4, а).

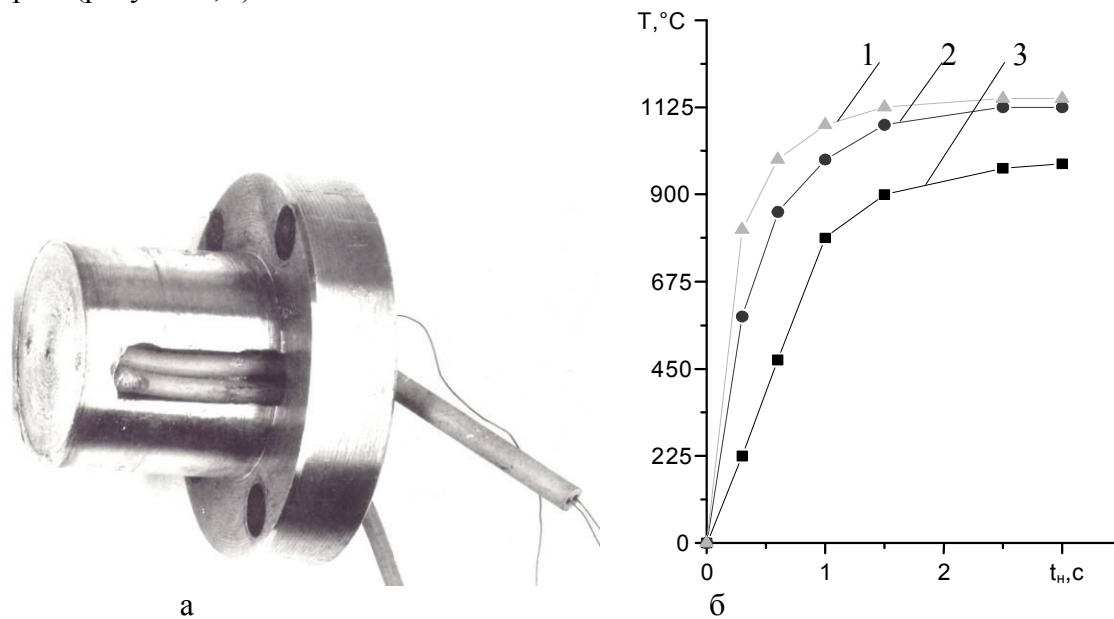


Рис.4. Зразок із сталі 12X18H10T для вимірювання температури у зоні контакту (а), зміна температури в зоні контакту сталь 12X18H10T-титан BT1-0 в залежності від часу нагрівання t_n на відстані від центру перетину 0,9R (1), 0,5R (2), 0,1R (3) при значенні колової швидкості $V=2$ м/с; тиску при нагріванні $P_n=300$ МПа

Контроль термічних циклів у зоні контакту за допомогою термопар показав (рисунок 4, б), що у процесі зварювання досягається температура евтектичного перетворення у системі Fe-Ti (1080 °C). При коловій швидкості $V=2$ м/с температура в різних частинах перетину заготовок досягає значення 1080 °C приблизно за 1-3 с. Одержані експериментальні дані задовільно корелюють з даними (рисунок 5), одержаними за допомогою розрахунків, виконаних на основі розробленої математичної моделі процесу нагрівання при зварюванні

тертям [8].

Дані по реєстрації термічних циклів зварювання свідчать про те, що на початкових етапах процесу тертя швидкість нагрівання металу в зоні контакту може становити близько 10^3 °C/с, температура контакту може перевищувати значення евтектичного перетворення 1080 °C, тривалість перебування при температурі більше 1000 °C становить декілька секунд.

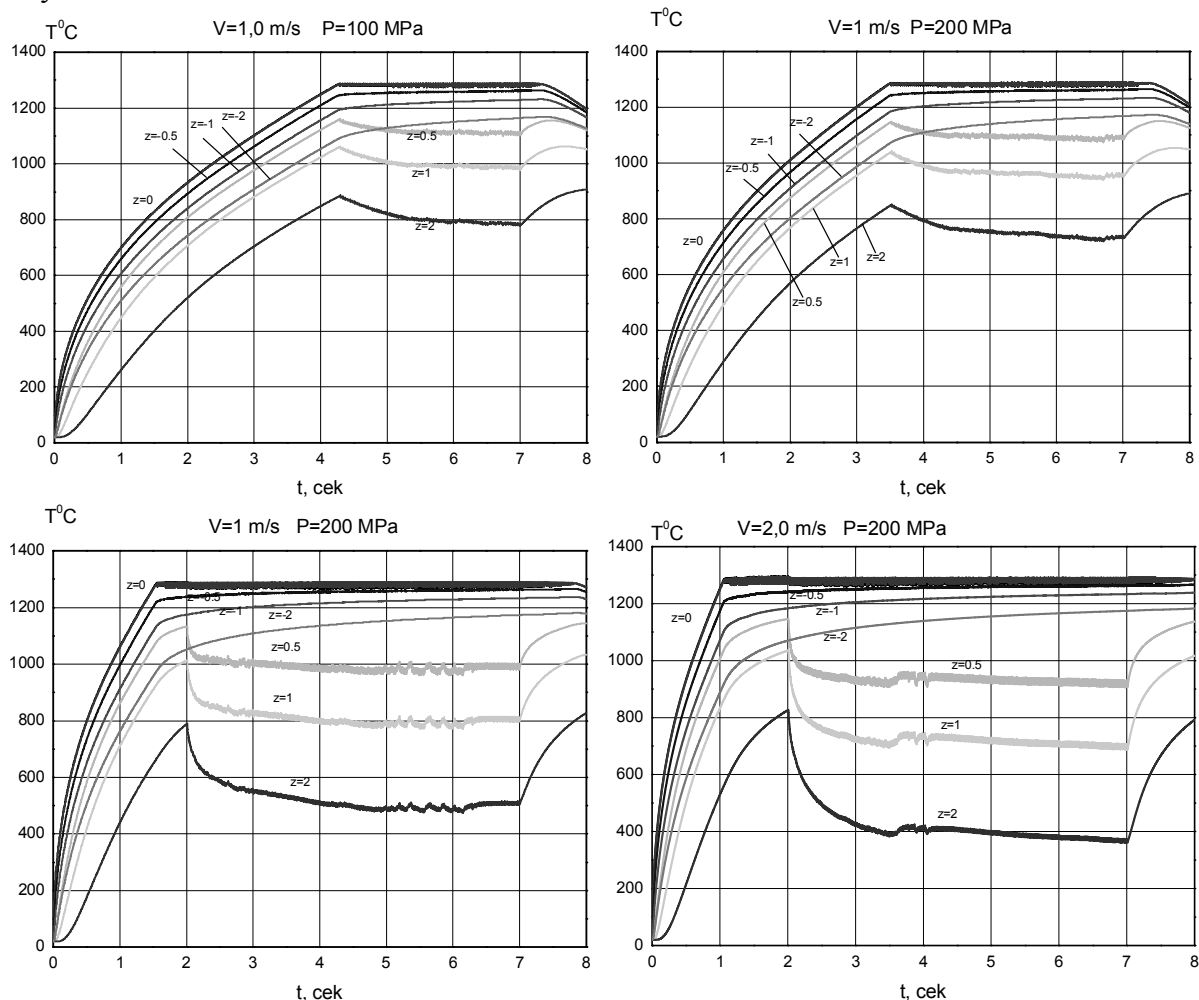


Рис. 5. Розрахункова зміна температури на різних відстанях z від зони контакту сталі 12X18H10T ($-z$) з титаном VT1-0 ($+z$) в залежності від часу нагрівання (t_n), колової швидкості (V) та тиску при нагріванні (P):
 $z=0$ мм, $z=0,5$ мм, $z=1$ мм, $z=2$ мм, $z=-0,5$ мм, $z=-1$ мм, $z=-2$ мм

Швидкості дифузії титану в нержавіючій сталі, а також нікелю, хрому й заліза в титані в температурному діапазоні 1000-1300 °C наведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Коефіцієнти дифузії ($10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) заліза, хрому і нікелю в титані та титану у γ -залізі

Температура, °C	Матриця (β) титану			Матриця (γ) заліза
	Fe	Cr	Ni	Ti
1000	5,67	0,390	6,44	0,130
1100	13,7	1,15	16,3	0,784
1200	19,6	2,99	37,1	3,70
1300	59,5	7,14	77,9	14,4

Нікель дифундує в титані з більш високою швидкістю, ніж залізо або хром, а швидкість дифузії титану в залізі набагато менша, ніж швидкість дифузії заліза в титані. Ці швидкості

дифузії відносяться до випадку, коли елемент дифундує під впливом градієнта хімічного потенціалу. Наявність на початкових стадіях нагрівання інтерметалідних фаз у зоні з'єднання, в тому числі і центральній частині перетину, свідчить про значну інтенсифікацію дифузійних потоків під час тертя. Деформаційний цикл ЗТ створює високу щільність дислокацій та інших дефектів кристалічної решітки. Характерним для початкової стадії ЗТ є виникнення миттєвих локальних «спалахів» температури в місцях виникнення фрикційних зв'язків. У результаті, реальні швидкості дифузії при зварюванні тертям набагато вище, ніж зазначені в таблиці 2.

Очевидно, в місцях виникнення й руйнування фрикційних зв'язків на початковій стадії зварювання тертям миттєво утворюються ділянки адгезійного зчеплення, які являють собою перенасичені тверді розчини легуючих елементів сталі і титану. Оскільки розчинність титану у залізі і легуючих елементів сталі у титані при температурі зварювання і кімнатній температурі відрізняється на декілька порядків, то із перенасичених твердих розчинів при охолодженні виділяються хімічні сполуки $TiFe$, $TiFe_2$, або, більш імовірно, комплексні інтерметалідні сполуки $(FeCrNi)Ti$. Тому формування інтерметалідного прошарку може реалізуватися по всій поверхні контактної взаємодії за дуже короткий проміжок часу задовго до початку осадки, тобто, осової і радіальної деформації заготовок. Таким чином, при зварюванні тертям титану зі сталлю не має підстав стверджувати про існування латентного періоду утворення інтерметалідного прошарку, якщо не розглядати випадок зварювання окислених поверхонь.

В деяких роботах по дослідженню кінетики утворення крихких прошарків при відпалі з'єднань титану зі сталлю стверджується, що утворення карбідних плівок у зоні контакту пасивує поверхню титану і перешкоджає розвитку процесу схоплювання зі сталлю. Відомо [9], що у багатокомпонентній системі першочерговість протікання хімічних реакцій визначається за величиною зменшення ізобарного потенціалу ΔG у локальній області контактуючих фаз. В умовах контакту титану і сталі протікають реакції з утворенням TiC ($\Delta G_{1200} = -170,7$ кДж/моль) $TiFe$ ($\Delta G_{1200} = -40,6$ кДж/моль), Fe_3C ($\Delta G_{1200} = -0,8$ кДж/моль). Ці дані свідчать, що утворення карбіду TiC значно «вигідніше» утворення інтерметаліду $TiFe$.

Встановлена у нашому дослідженні наявність інтерметалідних фаз у зоні контакту при часі зварювання тертям $0,5 \dots 0,8$ с свідчить про те, що реакції утворення карбідних та інтерметалідних фаз протікають одночасно і утворення карбідного прошарку не перешкоджає утворенню інтерметалідного.

Можна стверджувати, що при утворенні перших ділянок адгезійного зчеплення матеріалів формуються ділянки об'ємної взаємодії на основі твердих розчинів титану і легуючих елементів сталі, що сприяє дифузійному переміщенню вуглецю із сталі до титану саме через ці утворені містки зчеплення. У процесі охолодження після зварювання дифузійні зони неминуче перетворюються у прошарки інтерметалідів, що містять також прошарок карбіду вуглецю.

Проводили дослідження з'єднань (рисунок 6), одержаних при часі зварювання тертям $2 \dots 5$ с, для яких характерним є наявність видаленого при осадці нагрітого металу.

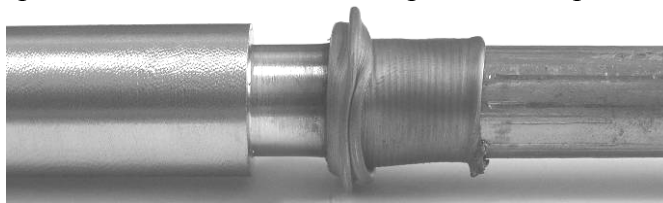


Рис. 6. Вигляд зварного з'єднання сталь 12Х18Н10Т-титан ВТ1-0

На кривих зміни концентрації легуючих елементів (рисунок 7) у зоні з'єднання виявлено дифузійні зони як з боку титану, так і сталі, між якими спостерігаються ділянки з постійною концентрацією елементів. Ці ділянки є прошарками інтерметалідів різного хімічного складу, в тому числі і ділянки, що приблизно відповідають стехіометричному складу інтерметалідних фаз $TiFe$ і $TiFe_2$. Найбільш імовірним є утворення шарів комплексних

інтерметалідних сполук легуючих елементів сталі (Fe, Ni, Cr)Ti. Таким чином, при збільшенні часу нагрівання до декількох секунд утворюється багатошаровий прошарок, що містить інтерметалідні та карбідні фази. Під час механічних випробувань таких з'єднань руйнування відбувається по найбільш крихкому прошарку карбіду титану, що висвітлено в роботах [1, 4-6].

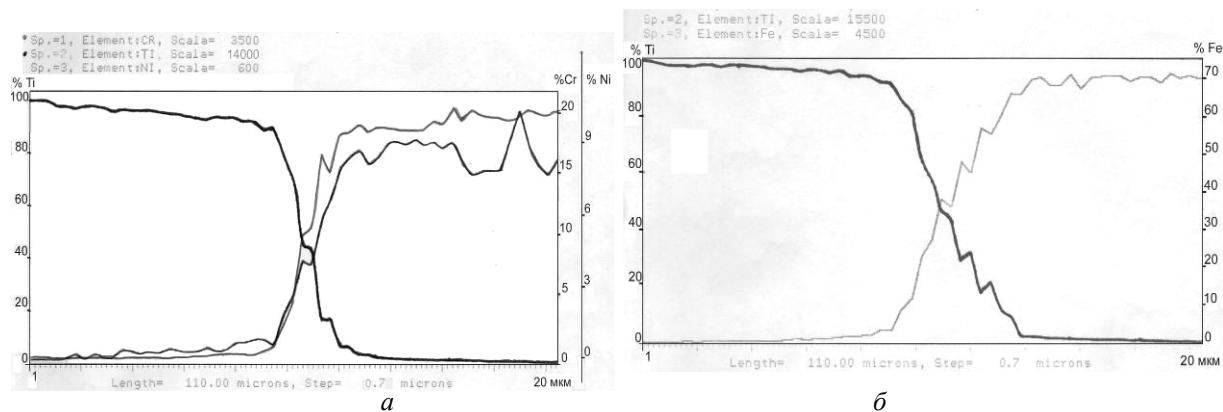


Рис. 7. Зміна концентрації Ti, Ni, Cr (а) і Fe, Ti (б) поперек зони з'єднання сталь 12X18H10T - титан BT1-0

Висновки

1. На початкових стадіях процесу зварювання тертям в місцях виникнення й руйнування фрикційних зв'язків миттєво утворюються перенасичені тверді розчини титану і легуючих елементів сталі, які при охолодженні трансформуються в інтерметаліди.
2. Існування латентного періоду утворення інтерметалідів при зварюванні тертям титану зі сталлю не виявлено. Встановлено наявність інтерметалідного прошарку у зоні контактної взаємодії при часі зварювання менше 1 с задовго до початку осової і радіальної деформації заготовок.
3. При збільшенні часу нагрівання тертям утворюються багатошаровий прошарок, що містить інтерметалідні та карбідні фази. Під час механічних випробувань таких з'єднань руйнування відбувається по найбільш крихкому прошарку.

Список літературних джерел

1. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов /Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. – 2-е изд. доп. и перераб. – К.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
2. Сварка трением. Справочник /В.К. Лебедев, И.А. Черненко, В.И. Вилль и др. – Л.: Машиностроение, 1987. – 236 с.
3. Lebedev V.K., Chernenko I.A. Friction welding. – Sov. Tech. Rev. C. Weld. Surf. 1992, Vol. 4. – Harwood Academic Publishers. – 1992. –P. 59-168.
4. Харченко Г.К., Продан С.К. Инерционная сварка трением титана со сталью //Автоматическая сварка. – 1983. – № 4. – С. 70.
5. Futamata M., Fuji A. 1990. Friction welding of titanium and SUS 304L austenitic stainless steel, Weld. Int. 4(10). – P. 768-774.
6. A. Hasui, Y. Kira. Friction welding of titanium and carbon steel //Trans. of Jap. Weld. Soc., Vol. 16. – 1985. – № 1, April. – P. 21-25.
7. Кучук-Яценко С.І., Зяхор І.В. Спосіб зварювання тертям і машина для його реалізації. Патент № 46460 Україна, 15.11.2004, Бюл. № 11.
8. Зяхор І.В., Кучук-Яценко С.І., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф. Расчетная оценка термдеформационных условий формирования соединений жаропрочного сплава ЭИ698ВД при сварке трением //Автоматическая сварка. – 2009. – № 7. – С. 8-13.
9. Химическая термодинамика и фазовые равновесия /В.М. Глазов, Павлов Л.М. – М.: Металлургия, 1988. – 560 с.

УДК 621.924.1/6

І.О. Прибителько, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

Л.В. Петрушинець, аспірант**Г.К. Харченко**, д-р техн. наук**Ю.В. Фальченко**, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Э.О. Патона НАН України, м. Київ

ТЕМПЕРАТУРНІ НАПРУЖЕННЯ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС МИТТЄВОГО НАГРІВАННЯ КОНТАКТУЮЧИХ ПОВЕРХОНЬ

Розрахунковим шляхом визначений характер зміни напруженого стану на границі прошарок-метал під час протікання реакції високотемпературного синтезу, що самопоширюється (СВС реакція), в процесі дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ). Запропоновано циклограму процесу ДЗВ, що враховує СВС реакцію як додаткове джерело активації процесу зварювання.

Постановка проблеми

Зварні з'єднання сплавів на основі алюмінідів титану між собою та з іншими конструкційними матеріалами застосовуються для виготовлення деталей авіаційних двигунів, обшивок й стільникових конструкцій надзвукових літальних апаратів [1]. Сплави на основі TiAl також перспективні для одержання деталей газотурбінних двигунів, які працюють при 700...1000°C [2]. Литі сплави на основі γ-фази використовуються під час виготовлення опор трубопроводів, ущільнювачів кожухів, повітряних фільтрів, деталей сопла, лопаток компресорів, елементів конструкцій камер згоряння, корпусів турбін, поршнів автомобільних двигунів, тощо [3].

Алюмініди титану мають незадовільну зварюваність, обумовлену крихкістю та низькою пластичністю при температурах до 700 °C [4]. Існуючі технології зварювання плавленням даних матеріалів і пайка не дозволяють одержати високоякісне зварне з'єднання внаслідок структурних перетворень у колошовній зоні, а також інтенсивних контактних реакцій між припоєм і основним матеріалом [5-8]. Застосування методів зварювання тиском дозволяє підвищити якість зварних вузлів. Проте, безпосереднє з'єднання алюмінідів між собою і через м'які прошарки з фольг титану й алюмінію не забезпечує одержання якісного з'єднання через значну хімічну та фазову неоднорідність зони контакту [9-10]. Магнетронне осадження тонких нанощаруватих покриттів системи Ti/Al на поверхні, що з'єднуються, зразків зі сплаву TiAl забезпечує при дифузійному зварюванні у вакуумі (ДЗВ) одержання в зоні з'єднання однорідної структури [11-12]. Однак, процес осадження таких покриттів на поверхні деталей, що з'єднуються, у ряді випадків має певні технологічні труднощі. Технологія одержання нероз'ємних з'єднань спрощується за допомогою застосування нанощаруватих матеріалів у вигляді фольг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше в роботах [13-15] було показано, що застосування нанощарів системи Al/Ti дозволяє одержати бездефектне з'єднання з міцністю на рівні основного матеріалу. Також було встановлено, що під дією термодеоформаційного циклу в результаті протікання реакції високотемпературного синтезу, що самопоширюється (СВС), прошарок перетворюється з нанощарного у нанокристалічний. Стрибок температури та структурно-фазові перетворення у складових нанощарах повинні викликати значні напруження у прошарку, які сприяють активації матеріалів, що з'єднуються.

Формулювання цілей статті

Тому метою даної роботи є визначення інтенсивності силового впливу СВС реакції

на поверхні інтерметалідів, що зварюються за допомогою ДЗВ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розрахунку теплових напружень, що виникають у наношарі в процесі СВС реакції, використовували задачу про тепловий удар на поверхні напівпростору [16-18]. Відповідно до умов завдання, температура середовища, що охоплює поверхню напівпростору $x = 0$ (рис. 1), раптово (у момент часу $t=0$) змінюється від T_0 до ν . При $t>0$ між поверхнею напівпростору й середовищем відбувається конвективний теплообмін.

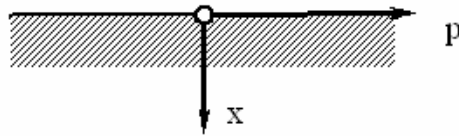


Рис. 1. Схема напівпростору

У цьому випадку, згідно [18], теплові напруження у наношаруватому елементі описуються наступною формулою:

$$\sigma_x = \sigma_x^I + \begin{cases} 0, & \text{при } t < \frac{x}{c_1}; \\ \sigma_x^{II}, & \text{при } t > \frac{x}{c_1} \end{cases} \quad (1)$$

Тут:

$$\sigma_x^I = -K \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2(1+\beta)} \cdot \exp(\tau - \xi) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} - \sqrt{\tau}\right) + \frac{1}{2(1-\beta)} \times \\ & \times \exp(\tau + \xi) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} + \sqrt{\tau}\right) - \frac{1}{1-\beta^2} \times \\ & \times \exp\left[\frac{1}{\beta} \left(\xi + \frac{\tau}{\beta}\right)\right] \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\xi}{\sqrt{\tau}} + \frac{\sqrt{\tau}}{\beta}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\sigma_x^{II} = K \frac{1}{1-\beta^2} \left\{ \begin{aligned} & \exp(\tau - \xi) \cdot (1 - \beta \operatorname{erf} \sqrt{\tau - \xi}) - \\ & - \exp\left[\frac{1}{\beta^2} (\tau - \xi)\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{\beta} \sqrt{\tau - \xi}\right] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де c_1 – швидкість розповсюдження пружної хвилі розширення, що визначається наступною формулою:

$$c_1^2 = \frac{\lambda_q + 2\mu}{\rho} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot \rho}, \quad (4)$$

ξ , τ , β , K – безрозмірні величини:

$$\xi = \frac{x \cdot c_1}{a}, \quad \tau = \frac{t \cdot c_1^2}{a}, \quad \beta = \frac{c_1}{a \cdot \gamma}; \quad (5)$$

$$K = \frac{E \cdot \alpha_T \cdot (g - T_0)}{(1-2\nu)}, \quad (6)$$

E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – відносна координата (рис. 1);

γ – коефіцієнт теплопровідності $\gamma = \frac{\alpha}{\lambda_q}$; α – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні $x=0$; λ_q – коефіцієнт теплопровідності матеріалу напівпростору; a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу напівпростору; α_T – температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Для функцій $erfx$ і $erfcx$, що входять у формули (2)-(6), відомі наступні співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} erfx &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx; \\ erf 0 &= 0; \quad erf \infty = 1; \quad erf(-x) = -erfx; \\ erfcx &= 1 - erfx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-x^2) dx; \\ \frac{d}{dx} erfx &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Знаючи σ_x , можна визначити σ_y :

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_x - \frac{1}{1-\nu} \alpha_T E (T - T_0), \quad (8)$$

де

$$T = T_0 + (T_\infty - T_0) erf \frac{x}{2\sqrt{at}}. \quad (9)$$

Для проведення розрахунків теплових напружень, що виникають у зоні контакту в момент проходження екзотермічної реакції безгазового горіння наночаруватої фольги, використовували теплові й механічні характеристики алюмініда титану TiAl (табл. 1). Значення модуля пружності визначали за результатами автоматичного мікроіндентування [13], для ТКЛР і коефіцієнту Пуассона приймалися середні значення цих параметрів для титану й алюмінію.

Таблиця 1

Теплові й механічні характеристики алюмініда титану TiAl

Модуль пружності *10 ⁵ , МПа	ТКЛР *10 ⁻⁶ , 1/°C	Коефіцієнт Пуассона
1,2	17,6	0,3

Розрахунки виконувалися за допомогою математичного пакета MATHCAD 2000 Professional послідовно для різних температурних інтервалів. У фольгах Al/Ti під час нагрівання в інтервалі 400...600°C одночасно ініціюється проходження декількох твердофазних реакцій, що супроводжуються стрибком температури до 1000...1300°C [19-20]. У зв'язку з цим були обрані наступні температурні проміжки: 400-1000°C, 400-1200°C, 400-1300°C, 600-1000°C, 600-1200°C, 600-1300°C. Згідно [21], швидкість протікання твердофазних реакцій у фользі приймали 10⁻² м/с. Зміна рівня максимальних напружень після проходження теплового удару досліджували в інтервалі 0,01...1 с.

Розглянемо характер зміни напруженого стану в момент проходження СВС реакції залежно від початкових температур її протікання й максимальних температур на фронті горіння. На рисунках 2-5 наведено залежності напружень σ_x і $\sigma_y = \sigma_z$ від параметру τ .

Отримані графіки мають ідентичний вигляд і відрізняються тільки величиною розтягуючих та стискаючих напружень на поверхні проміжного шару.

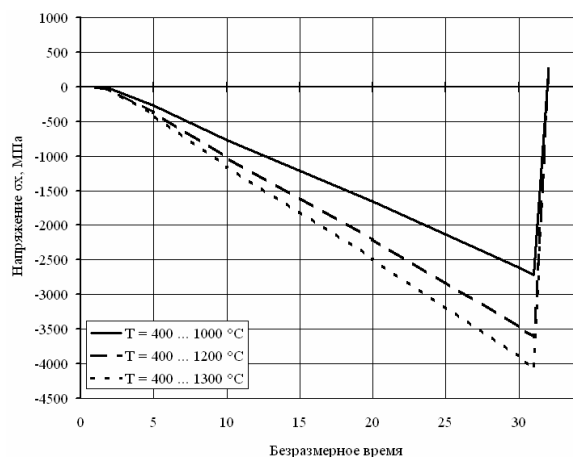


Рис. 2. Розподіл напружень σ_x у момент проходження теплового удару в залежності від безрозмірного часу в температурних інтервалах 400–1000 °C, 400–1200 °C, 400–1300 °C

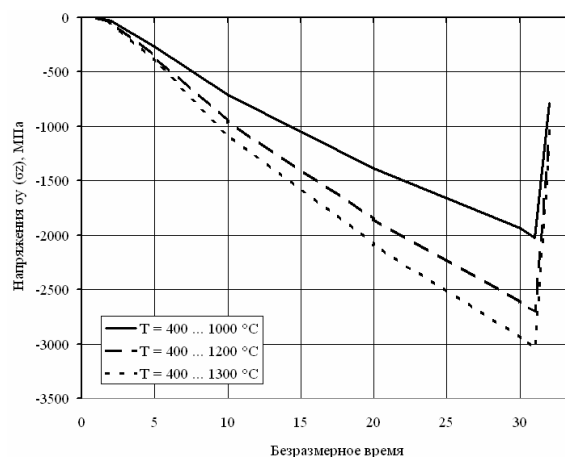


Рис. 3. Розподіл напружень σ_y (σ_z) у момент проходження теплового удару в залежності від безрозмірного часу в температурних інтервалах 400–1000 °C, 400–1200 °C, 400–1300 °C

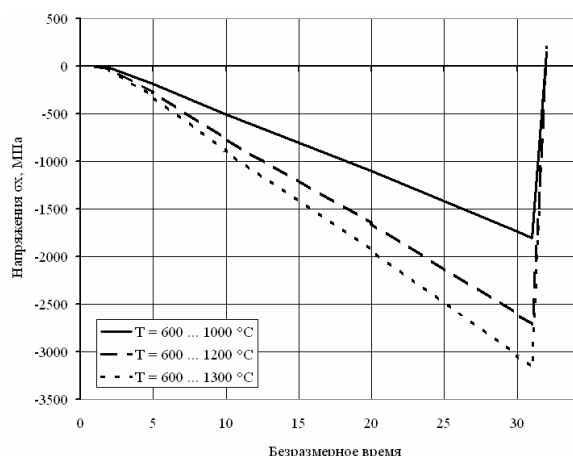


Рис. 4. Розподіл напружень σ_x у момент проходження теплового удару в залежності від безрозмірного часу в температурних інтервалах 600–1000 °C, 600–1200 °C, 600–1300 °C

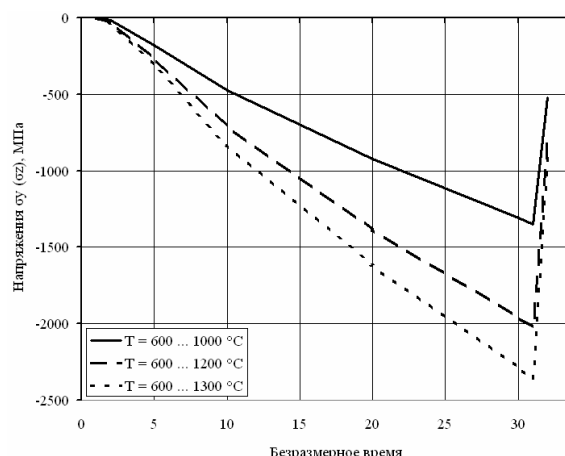


Рис. 5. Розподіл напружень σ_y (σ_z) у момент проходження теплового удару в залежності від безрозмірного часу в температурних інтервалах 600–1000 °C, 600–1200 °C, 600–1300 °C

Результати показують, що вже через 0,01 с після проходження СВС реакції у прошапку спостерігається значний перепад напружень до величини 2910..4365 МПа для σ_x і 2809..4213 МПа для σ_y (σ_z). При температурі закінчення екзотермічної реакції в прошапку спостерігається зменшення величини напружень до 1940..3395 МПа для σ_x і 1872..3277 МПа для σ_y (σ_z). При цьому нормальні напруження мають знакозмінний характер.

Розглянемо характер зміни рівня максимальних напружень в залежності від часу, що пройшов з моменту протікання СВС реакції для різних початкових температур її проходження й максимальної температури на фронті горіння (рис. 6). На графіках спостерігається монотонне зниження напружень σ_x і σ_y (σ_z), що досягає нуля вже через 1 с після початку реакції у фользі. Із чого можна зробити висновок про те, що значний вне-

сок в активацію поверхонь, що зварюються, наношарувата фольга вносить безпосередньо в момент проходження СВС реакції.

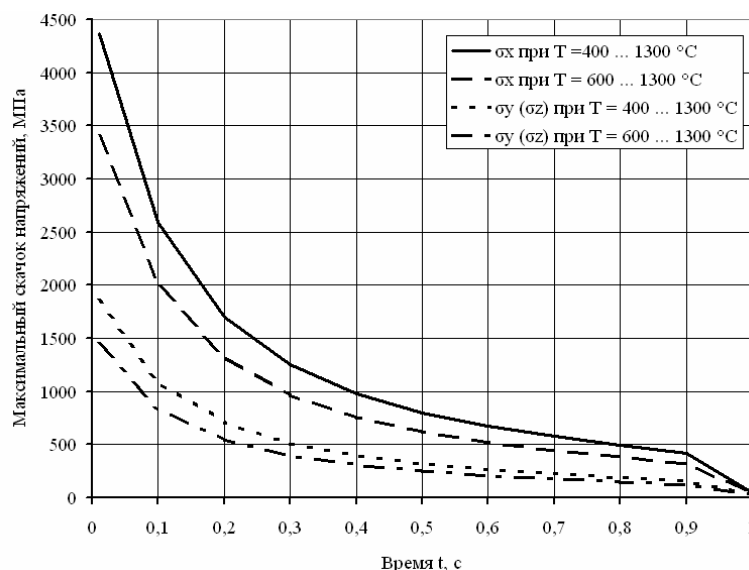


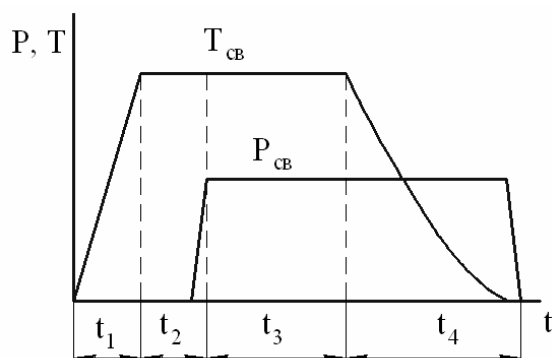
Рис. 6. Характер зміни максимального стрибка напружень σ_x і σ_y (σ_z) в залежності від часу після проходження теплового удару в температурних інтервалах 400–1300 °C та 600–1300 °C

Отримані розрахункові дані свідчать про те, що в заданих температурних інтервалах СВС реакції відбувається значний за інтенсивністю деформаційний вплив на поверхні, що зварюються.

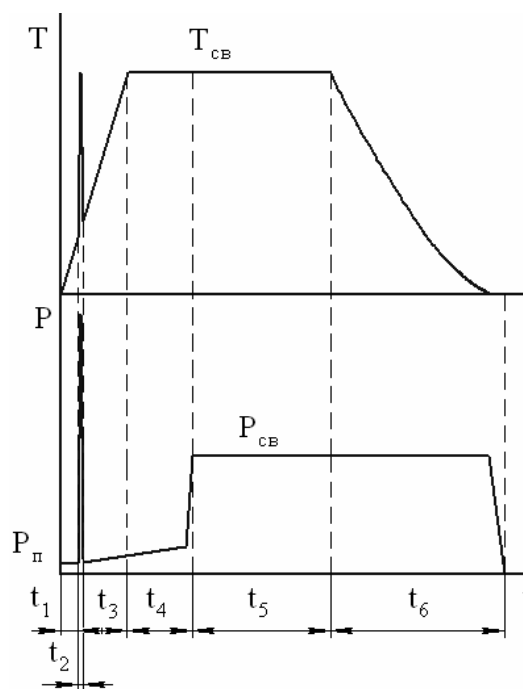
Для сприйняття силового впливу контактними поверхнями зразків, що зварюються, було запропоновано змінити класичну циклограму процесу ДЗВ [22–23] (рис. 7), виконуючи нагрівання до температури зварювання не у вільному стані, а з попереднім підтисканням зразків зусиллям $(0,1 \dots 0,2)P_{св}$, яке дозволить сприйняти термдеформаційний імпульс СВС реакції поверхнями, що зварюються. Виходячи з отриманих результатів, було запропоновано розбити перший етап циклограми на три (рис. 8): попереднє підтискання і нагрівання до температур протікання СВС реакції (t_1); проходження СВС реакції, що характеризується потужним стрибком температури в області стику (t_2); нагрівання до температури зварювання $T_{св}$, що супроводжується незначним підвищенням тиску внаслідок термонатягу (t_3).

Висновки з даного дослідження

- проведені дослідження показують, що під час проходження СВС реакції у наношаруватій фользі з'являються значні знакозмінні напруження в зоні контакту. Удосконалення технологічного процесу ДЗВ відповідно до циклограми (рис. 8) дозволяє сприйняти поверхнями, що зварюються, термдеформаційний імпульс СВС реакції, який робить додатковий внесок в активацію поверхонь та сприяє одержанню високоміцних з'єднань.



$T_{св}$ - температура зварювання;
 $P_{св}$ - зусилля стиску зразків (ДСВ);
 t_1 - час нагрівання до $T_{св}$;
 t_2 - час витримки при $T_{св}$;
 t_3 - час зварювання;
 t_4 - час охолодження.



$T_{св}$ - температура зварювання; $P_{п}$ - попереднє підтиснення зразків; $P_{св}$ - зусилля стиснення зразків (ДСВ);
 t_1 - час нагрівання до початку протікання СВС реакції; t_2 - час протікання СВС реакції; t_3 - час нагрівання до $T_{св}$; t_4 - час витримки при $T_{св}$; t_5 - час зварювання;
 t_6 - час охолодження

Рис. 7. Класична циклограма процесу ДЗВ [22-23]

Рис. 8. Циклограма процесу ДЗВ з попереднім підтисненням зразків

Список літературних джерел

1. Г.А. Бочвар, В.С. Саленков. Исследование сплава на основе алюминидов титану с орторомбической структурой. //Технология легких сплавов. – 2004. – № 4. – С. 44-46.
2. Механические свойства литых сплавов γ -TiAl. /О.А. Банных, К.Б. Поварова, Г.С. Браславская и др. //Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 4. – С. 11-14.
3. В.И. Иванов, К.К. Ясинский. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе Ti3Al и TiAl для работы при температурах 600-800°C в авиакосмической технике //Технология легких сплавов. – 1996. – № 3. – С. 7-12.
4. К.Б. Поварова, О.А. Банных. Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов (часть 2) //Материаловедение. – 1999. – № 3. – С. 29-37.
5. Patterson R.A., Martin P.L., Damkroger B.K., Christodoulou L. Titanium aluminide: electron beam weldability //Welding research supplement. – 1990. – № 1. – P. 39-s – 44-s.
6. В.Н. Замков, Е.А. Великоиваненко, В.К. Сабокар, Э.Л. Вржижевский. Выбор температуры предварительного подогрева γ -алюминидов титану при ЭЛС //Автоматическая сварка. – 2001. – № 11. – С. 20-23.
7. С.В. Максимова. Формирование паяных соединений алюминидов титану //Автоматическая сварка. – 2009. – № 3. – С. 7-13.
8. Высокотемпературная пайка сплава на основе интерметаллида Ti3Al /Hua-Ping Xiong, Bo Chen, Wei Maои др. //Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2009. – № 4. – С. 43-49.
9. Особенности структурных изменений жаропрочного сплава на основе Ti3Al при сва-

- рке давлением в вакууме /В.Н. Замков, Л.И. Маршакова, Л.С. Киреев и др. //Автоматическая сварка. – 1992. – № 9-10. – С. 13-16.
10. Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl /А.Н. Юштин, В.Н. Замков, В.К. Сабокаръ и др. //Автоматическая сварка. – 2001. – № 1. – С. 33-37.
11. Solid-state diffusion bonding of gamma-TiAl alloys using Ti/al thin films as interlayers /Duarte L.I., Ramos A.S., Vieira M.F., etc. //Intermetallics. – 2006. – № 14. – P. 1151-1156.
12. Nanometric multilayers: A new approach for joining TiAl /Ramos A.S., Vieira M.T., Duarte L.I., etc. //Intermetallics. – 2006. – № 14. – P. 1157-1162.
13. Исследование методом автоматического индентирования соединений алюминидов титану с титановым сплавом BT8 /В.Ф. Горбань, Г.К. Харченко, Ю.В. Фальченко и др. //Автоматическая сварка. – 2009. – № 12. – С. 20-23.
14. Дифузійне зварювання сплаву TiAl /Г.К. Харченко, А.І. Устінов, Ю.В. Фальченко та ін. //Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. – 2008. – № 36. – С. 94-99.
15. Дослідження дифузійних процесів у зварних з'єднаннях алюмініду титану (TiAl) /Г.К. Харченко, В.Ф. Мазанко, А.І. Устінов та ін. //Вісник ЧДТУ. Серія технічні науки. – 2009. – № 37. – С. 117-119.
16. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагрева его границы //Прикладная математика и механика. – 1950. – Т. 14, № 3. – С. 315-318.
17. Даниловская В.И. Об одной динамической задаче термоупругости //Прикладная математика и механика. – 1952. – Т. 16, № 3. – С. 341-344.
18. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – К.: Наукова думка, 1970. – 307 с.
19. Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения /А.И. Устинов, Л.А. Олиховская, Т.В. Мельниченко и др. //Проблемы СЭМ. – 2008. – № 2. – С. 21-28.
20. Безгазовое горение многослойных биметаллических нанопленок Ti/Al /А.С. Рогачев, А.Э. Григорян, Е.В. Илларионова и др. //Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 45-51.
21. В.Г. Мягков, Л.Е. Быкова. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез в тонких пленках //Доклады Академии наук. – 1997. – Т. 354, № 6. – С. 777-779.
22. Мусин Р.А., Конюшков Г.В. Соединение металлов с керамическими материалами. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
23. Диффузионная сварка в среде водорода пористого и компактного никеля через микрорепоры /Харитонов С.Д., Конюшков Г.В., Гаврилов П.И. и др. //Диффузионная сварка в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. Сборник научных трудов VII научно-технической конференции № 6. – М. – 1973. – С. 203-214.

ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ* ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.311.1

В.А. Баженов, канд. техн. наук

Національний технічний Університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПО РЕАКТИВНІЙ ПОТУЖНОСТІ ТА НАПРУЗІ

Розглянуті питання використання методу сполучених градієнтів для оптимізації усталених режимів електричних мереж сучасних енергосистем по реактивній потужності і напрузі. Пропонований метод реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів.

Вступ

Рішення задачі комплексної оптимізації режиму електричної системи при одночасній зміні всіх регульованих параметрів, у якості яких використовуються активні і реактивні потужності електростанцій, напруги опорних пунктів і комплексні коефіцієнти трансформації регульованих трансформаторів, викликає істотні утруднення, обумовлені насамперед розмірністю задачі, великим обсягом інформації, що стосується як електростанцій системи, так і елементів електричної мережі. Крім того, розрахунки виконуються на різних тимчасових інтервалах різними організаціями [1]. Внаслідок цього, задача оптимізації режимів вирішується, як правило, у два етапи: оптимізація розподілу активних потужностей і оптимізація режиму електричної мережі по реактивній потужності і напрузі.

Найбільш перспективними методами оптимізації сталих режимів електричних систем є градієнтні методи. Однак їхнє використання утруднене у випадку витягнутого гіперпростору, коли лінії рівнів цільової функції утворюють витягнутий «яр». У цьому випадку напрямок антиградієнта майже ортогональний напрямкові досягнення мінімуму і вирішення задачі або вимагає значних витрат часу розрахунку, або взагалі не може бути отримане. Тому доцільно використання методів сполучених градієнтів, збіжність яких у ряді випадків майже така ж, як і в квазіньютонівських методах [2].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації режимів електричної мережі по реактивній потужності та напрузі, що забезпечують ефективне вирішення поставленої задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Виклад основного матеріалу статті

Задачу оптимізації режиму електричної мережі по реактивній потужності і напрузі можна сформулювати в такий спосіб.

Мінімізувати функцію $f(X)$ при наявності S нелінійних обмежень у виді рівностей

$$h_s(X) = W_s(X) - W_s, s = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

і I лінійних і нелінійних обмежень у виді нерівностей

$$g_i(X) \geq 0, i = 1, 2, \dots, I. \quad (2)$$

Функція $f(X)$ – це в загальному випадку дисконтовані витрати на спорудження й експлуатацію додаткових пристроїв, що генерують реактивну потужність, покриття втрат активної потужності в мережі й існуючих джерел реактивної потужності. Крім того, тут може враховуватися збиток у споживачів, обумовлений відхиленнями параметрів режиму від припустимих значень і порушеннями енергопостачання.

* Матеріали науково-практичної конференції «Підвищення ефективності роботи електричних мереж напругою 0,38-110 кВ».

До складу J -мірного вектора незалежних перемінних оптимізації X входять реактивні потужності електростанцій та інших джерел реактивної потужності Q_j , напруги контрольованих генераторних пунктів U_t , регулювальні ЕРС (електрорушійні сили) e_r . При цьому для забезпечення стійкості розрахунку сталого режиму електричної системи на кожному кроці процесу оптимізації в частині пунктів із джерелами реактивної потужності, так званих опорних пунктах, у якості незалежних перемінних використовуються не потужності, а модулі напруг [1,3]. Регулювальними ЕРС називаються модулі збільшень напруг на обмотках трансформаторів або автотрансформаторів, отримані за рахунок застосування передбачених конструкцій засобів регулювання [3]. Використання регулювальних ЕРС у якості незалежних перемінних зменшує число аргументів, забезпечує спільний облік поздовжніх та поперечних складових коефіцієнтів трансформації і полегшує практичне використання результатів оптимізації.

Обмеження типу рівностей (1) обумовлені, як правило, функціональними зв'язками, що доводиться враховувати виходячи з структури і властивостей керованого об'єкта. При вирішенні розглянутої задачі оптимізації сталих режимів електричних систем у цю групу можуть бути віднесені рівняння балансу потужностей у вузлах із заданими активною і реактивною потужностями, а також рівняння балансу активних потужностей для пунктів з фіксацією модулів напруг.

Обмеження типу нерівностей (2) зв'язані із умовами регулювання незалежних перемінних

$$x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}, j = 1, 2, \dots, J, \quad (3)$$

і залежних характеристик режиму

$$\varphi_p^{\min} \leq \varphi_p \leq \varphi_p^{\max}, p = 1, 2, \dots, P. \quad (4)$$

До складу обмежень у вигляді нерівностей входять обмеження по незалежних перемінних оптимізації – реактивних потужностях джерел Q_j , напругах опорних пунктів U_t і регулювальних ЕРС регульованих трансформаторів e_r . Крім того, до складу обмежень (4) включені функціональні обмеження по активній потужності балансуючого пункту, активних потужностях гілок мережі, контрольованих по потужності, струмах гілок, контрольованих по струму і напругах навантажувальних пунктів.

Алгоритми методів сполучених градієнтів будують послідовність напрямків пошуку, що є лінійними комбінаціями вектора антиградієнта $-\nabla f(X^{(k)})$ і попередніх напрямків пошуку $s^{(0)}, s^{(1)}, \dots, s^{(k-1)}$. При цьому коефіцієнти напрямку ω_k вибираються таким чином, щоб зробити напрямки сполученими. Для розрахунку ω_k використовуються вектори $-\nabla f(X^{(k)})$ і $-\nabla f(X^{(k-1)})$.

Для забезпечення однакової розмірності складових вектора градієнта доцільно вибрати в якості незалежних перемінних оптимізації відносні значення величин Q_{j*} , U_{t*} і e_{r*} , що можуть бути розраховані за допомогою виразів

$$Q_{j*} = \frac{Q_j - Q_j^{\min}}{Q_j^{\max} - Q_j^{\min}} \quad U_{t*} = \frac{U_t - U_t^{\min}}{U_t^{\max} - U_t^{\min}} \quad e_{r*} = \frac{e_r}{e_r^{\max}}. \quad (5)$$

Перехід із точки простору $X^{(k)}$ в точку $X^{(k+1)}$ при оптимізації режимів енергосистем по реактивній потужності і напрузі здійснюється по формулі

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{jk} \nabla f(X^{(k)}), \quad (6)$$

де $\xi^{(k)}$ – коефіцієнт довжини кроку; a_{jk} – діагональна матриця коефіцієнтів, що приводять змінні до одного масштабу. У запропонованому алгоритмі для розрахунку

напрямку пошуку при оптимізації режимів енергосистем по реактивній потужності і напрузі застосовується вираз

$$s^{(k)} = -\nabla f(X^{(k)}) + s^{(k-1)} \omega_k. \quad (7)$$

При цьому коефіцієнт напрямку ω_k розраховується по формулі

$$\omega_k = \frac{(\nabla f(X^{(k)}), \nabla f(X^{(k)}))}{(\nabla f(X^{(k-1)}), \nabla f(X^{(k-1)}))}, \quad (8)$$

Для визначення складових вектора градієнта $\nabla f(X^{(k)})$ використовуються методи, засновані на правилах диференціювання складних неявних функцій [3-5].

Якщо функція витрат на спорудження й експлуатацію додаткових джерел реактивної потужності, покриття втрат активної потужності в мережі й існуючих джерелах реактивної потужності $f(X)$ в загальному випадку задовольняє вимогам унімодальності, безперервності й може бути однократно продиференційована, то алгоритм оптимізації можна записати в такий спосіб.

1. Задаємо початкове наближення вектора незалежних перемінних оптимізації $X^{(k)}$.

2. Як напрямок пошуку вибираємо напрямок антиградієнта в k -й точці простору

$$s^{(k)} = -\nabla f(X^{(k)})$$

3. Визначаємо оптимальний коефіцієнт довжини кроку $\xi_{opt}^{(k)}$.

4. Виконуємо крок у напрямку пошуку $s^{(k)}$ з оптимальним коефіцієнтом довжини кроку

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi_{opt}^{(k)} \nabla f(X^{(k)}),$$

5. Перевіряємо закінчення процесу оптимізації $\|\nabla f(X^{(k+1)})\| \leq \varepsilon$, де $\|\nabla f(X^{(k+1)})\|$ – норма вектора $\nabla f(X^{(k+1)})$; ε – точність розрахунку. Якщо нерівність виконується, то переходимо до пункту 8 алгоритму, якщо ні, то – до пункту 6.

6. Визначаємо напрямок пошуку, сполучений з попереднім,

$$s^{(k+1)} = -\nabla f(X^{(k+1)}) + s^{(k)} \frac{(\nabla f(X^{(k+1)}), \nabla f(X^{(k+1)}))}{(\nabla f(X^{(k)}), \nabla f(X^{(k)}))}.$$

7. Змінюємо номер кроку оптимізації $k = k + 1$ і переходимо до пункту 3 алгоритму.

8. Кінець.

У пункті 3 алгоритму для визначення оптимального коефіцієнта довжини кроку використовується метод одномірного пошуку, заснований на проведенні квадратичної апроксимації цільової функції після виконання двох пробних кроків у напрямку пошуку.

Щоб уникнути відмовлень методу, рекомендується через певне число кроків виконувати процедуру «відновлення» алгоритму. При цьому як напрямок пошуку приймається не напрямок, сполучений з попереднім, а сам напрямок антиградієнта.

При оптимізації сталих режимів електричних систем по реактивній потужності і напрузі обмеження рівності враховуються в процесі розрахунку сталого режиму на кожнім кроці обчислювального процесу з отриманими компонентами вектора $X^{(k)}$. Для обліку обмежень по незалежних перемінних використовується метод стримуючих обмежень, що впливає з узагальненого методу Лагранжа, а для задоволення функціональних обмежень застосовується комбінований метод штрафних функцій [2, 6].

Сутність методу стримуючих обмежень полягає в наступному. Починаємо від точки простору, що задовольняє всім обмеженням, виконуємо крок пошуку і перевіряємо дотримання обмежень у новій точці. Обмеження, що не задовольняються в цій точці, називаються стримуючими. Щоб задовольнити їх, фіксуємо відповідні перемінні на порушених межах і виконуємо новий крок пошуку. Далі необхідно уточнити склад

стримуючих обмежень. У залежності від значень часткових похідних обмеження, що раніше були включені до складу стримуючих, можна виключити з розгляду. Одночасно можуть виникати нові стримуючі обмеження і т.д.

Для урахування стримуючих обмежень при $x_j < x_j^{\min}$ перемінна x_j приймається рівною порушеній межі $x_j^{\min}$, а при $x_j > x_j^{\max}$ – рівній $x_j^{\max}$. Якщо перемінна раніше зафіксована на межі $x_j^{\min}$, то обмеження виключається з складу стримуючих при виконанні умови $\frac{\partial f(X)}{\partial x_j} < 0$. Якщо перемінна зафіксована на межі $x_j^{\max}$, то умова виключення даного обмеження з складу стримуючих має вигляд $\frac{\partial f(X)}{\partial x_j} > 0$.

Для обліку функціональних обмежень (4) при оптимізації режимів електричних систем застосовується комбінований метод зовнішніх і внутрішніх штрафних функцій, що дозволяє призначати як зовнішні штрафи при порушенні обмежень, так і внутрішні при наближенні до границь припустимої області [5, 6]. При використанні комбінованого методу штрафних функцій задача оптимізації режиму перетворюється в послідовність задач, кожна з яких не має обмежень. З цією метою множина індексів усіх функціональних обмежень розбивається на дві підмножини. Перша з них містить у собі індекси обмежень, що були порушені, а друга – індекси обмежень, що виконані в початковій точці пошуку

При цьому цільова функція записується у вигляді

$$\Phi(X) = f(X) + \frac{1}{\varepsilon'} P'(X) + \varepsilon'' P''(X), \quad (9)$$

де $P'(X)$ і $P''(X)$ – відповідно зовнішні і внутрішні штрафні функції; ε' і ε'' – коефіцієнти штрафу зовнішніх і внутрішніх штрафних функцій. Зовнішні штрафні функції призначають штрафи при порушенні обмежень, індекси яких входять у першу підмножину. Внутрішні штрафні функції призначають штрафи при наближенні залежних характеристик до границь припустимої області і призначаються для обмежень, індекси яких входять у другу підмножину.

Початкові значення коефіцієнтів ε' і ε'' розраховуються на першому циклі оптимізації як відношення довжин векторів $\nabla f(X)$, $\nabla P'(X)$, $\nabla P''(X)$

$$\varepsilon'^{(1)} = \frac{|\nabla P'(X)|}{|\nabla f(X)|}, \quad \varepsilon''^{(1)} = \frac{|\nabla f(X)|}{|\nabla P''(X)|} \quad (10)$$

При визначенні кожної точки відносного мінімуму функції $\Phi(X)$ розраховуються нові значення коефіцієнтів. При цьому всі вони повинні бути позитивними, значення кожного наступного коефіцієнта повинно бути менше попереднього і границя послідовності коефіцієнтів при спрямуванні номера коефіцієнта до нескінченності повинна дорівнювати нулю.

В цілому процес оптимізації будується наступним чином. При початкових значеннях коефіцієнтів штрафу ε' і ε'' визначаємо точку мінімуму функції (9) $X^{(1)}$. В отриманій точці перевіряємо виконання обмежень по незалежних змінних. Обмеження, які не виконуються в цій точці, називаються стримуючими. Щоб задовольнити їх, фіксуємо відповідні компоненти вектора X на порушених межах. Потім знаходимо нові значення коефіцієнтів $\varepsilon'^{(2)}$ і $\varepsilon''^{(2)}$ та знову визначаємо точку відносного мінімуму цільової функції $X^{(2)}$. Далі необхідно уточнити склад стримуючих обмежень. В залежності від значень частинних похідних $\frac{\partial \Phi(X^{(k)})}{\partial x_j}$ деякі обмеження, які раніше були включені до скла-

ду стримуючих, можуть бути виключені з розгляду. Одночасно можуть виникати нові стримуючі обмеження. Якщо їх склад залишився без змін і виконуються всі функціональні обмеження, то на цьому оптимізаційний розрахунок завершується. Якщо ні, тоді необхідно знову розрахувати значення коефіцієнтів штрафу, визначити положення точки відносного мінімуму функції $\Phi(X)$, уточнити склад стримуючих обмежень і т.д.

Висновки

Методи та алгоритми оптимізації режимів електричної мережі по реактивній потужності та напрузі, що запропоновані в роботі, забезпечують ефективне вирішення задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень у вигляді рівностей та нерівностей.

Розглянутий алгоритм оптимізації режимів по реактивній потужності і напрузі реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів. Розрахунки показали, що запропонована методика оптимізації відрізняється гарною збіжністю, досить стійка до вибору початкових наближень.

Список літературних джерел

1. Методы оптимизации режимов энергосистем /Под ред. В.М. Горнштейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
2. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы. – М.: Мир, 1977. – 189 с.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Баженов В.А. Оптимизация режимов электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
4. Крумм Л.А. Методы приведенного градиента при управлении электроэнергетическими системами. – Новосибирск: Наука, 1977. – 368 с.
5. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование – М.: Мир, 1975. – 534 с.
6. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. – М.: Мир, 1974. – 375 с.

УДК 621.311

П.І. Бессараба, інженер

ВАТ ЕК «Чернігівобленерго», м. Чернігів, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА РАХУНОК СКОРОЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИ ЇЇ ТРАНСПОРТУВАННІ

Розглянуто класифікацію технологічних витрат електроенергії та запропоновано комплекс заходів по зниженню величини технологічних витрат електроенергії.

Вступ

Головною особливістю електроенергетики як галузі промисловості є нерозривність у часі процесу генерації, транспортування та споживання електроенергії. Електроенергія – єдиний вид продукції, транспортування якої здійснюється за рахунок певної частини самої продукції, що зумовлюється наявністю технологічних витрат електроенергії (ТВЕ). Саме величина ТВЕ є одним з найважливіших показників економічності роботи електричних мереж, наглядним показником їхнього технічного стану і ефективності роботи енергонагляду та збутової діяльності в енергопостачальній компанії [1]. У зв'язку з впровадженням ринкових відносин в електроенергетиці питання зниження технологічних витрат електроенергії в електричних мережах стало в один ряд із головними завданнями, спрямованими на забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних компаній, а також на збереження паливно-енергетичних ресурсів у галузі.

Методи та результати

Структура технологічних витрат електроенергії показана на рисунку 1.



Рис. 1. Структура технологічних витрат електроенергії

Слід відзначити, що в розвинених країнах Європи та Північної Америки технологічні втрати електроенергії у процесі її транспортування складають 4-8 %, в той час як для українських енергопостачальних компаній цей показник становить 8-22 %. Основними причинами такої різниці є насамперед високий ступінь зношеності електрообладнання електричних мереж і недостатній рівень технічного та програмного забезпечення існуючої системи обліку електроенергії та системи управління режимами роботи електричних мереж.

З метою скорочення технологічних витрат електроенергії у процесі її транспортування Чернігівськими міськими електричними мережами активно впроваджується такий інструментарій виявлення місць підвищених втрат електроенергії, як пофідерний аналіз балансів електроенергії, за результатами якого щомісяця розробляється комплекс заходів для усунення причин, що призвели до виникнення осередків підвищених втрат [2-5].

Розглянемо динаміку зміни енергозбутових показників ефективності роботи Чернігівських міських електричних мереж на прикладі окремої ділянки мережі – фідерів ЛРП-29.1 та ЛРП-29.2 (таблиця 1).

Таблиця 1

Динаміка зміни енергозбутових показників ефективності роботи по фідерах ЛРП-29.1 та ЛРП-29.2 протягом 2010 року

Місяць	Надходження, кВт·год	Корисний відпуск, кВт·год	Понаднормативні ТВЕ, кВт·год	Понаднормативні ТВЕ, %
Січень	968688	871482	29718	3,07
Лютий	863568	775375	27929	3,23
Березень	971388	926375	3252	0,33
Квітень	884832	838772	-8940	-1,01
Травень	858808	839730	-28816	-3,36
Червень	862614	853227	-12763	-1,48
Липень	935644	896468	-8887	-0,95
Серпень	904032	880469	-18580	-2,06
Вересень	861972	833229	-13932	-1,62
Усього	8111546	7715127	-31019	-0,38

Як бачимо, протягом року величина понаднормативних ТВЕ зменшилась з 3,07 % у січні до -1,62 % у вересні 2010 року. Даного результату було досягнуто за допомогою розробки та впровадження комплексу заходів щодо зниження величини ТВЕ. Детальна структура комплексу заходів представлена на рисунку 2.

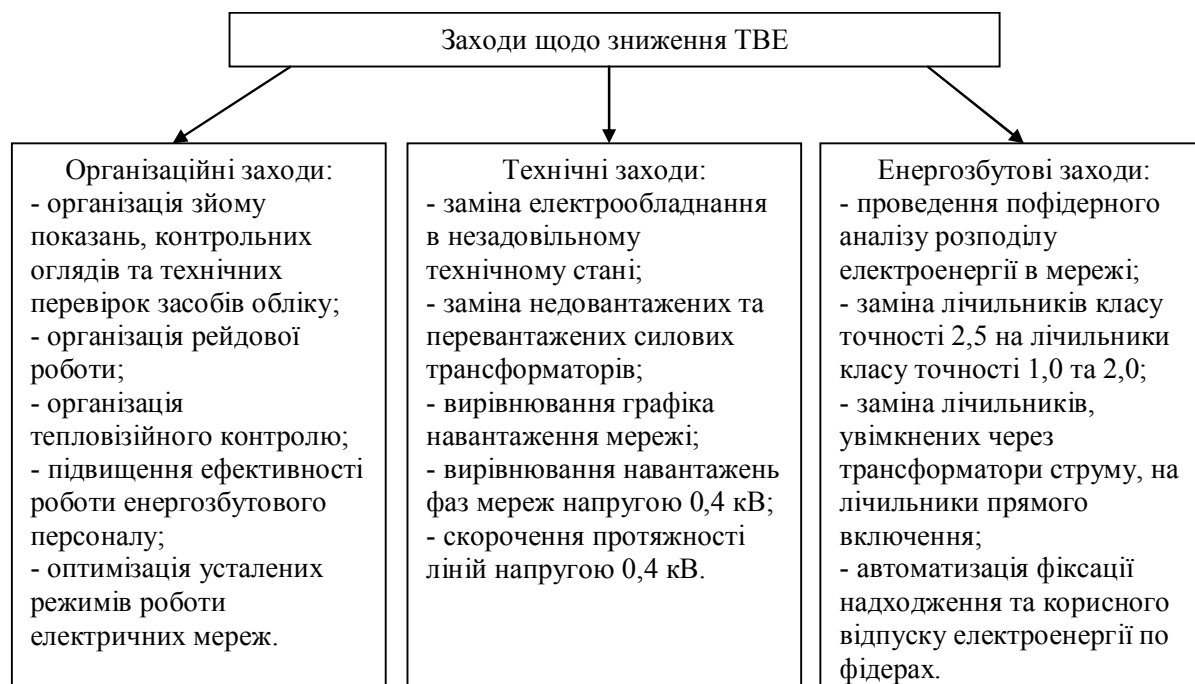


Рис. 2. Структура комплексу заходів щодо зниження ТВЕ

Слід відзначити, що в сучасних умовах роботи виникають додаткові перешкоди на шляху скорочення технологічних витрат електроенергії, такі як:

- скорочення кількості потужних промислових споживачів зі сталим режимом роботи і відповідне збільшення кількості дрібних юридичних споживачів сфери послуг та розваг, які не мають усталеного режиму роботи, що призводить до зростання кількості точок обліку та зростання асинхронізації режиму роботи мережі;
- неадаптованість нормативної бази у галузі електроенергетики до сучасних умов споживання електроенергії (відсутність нових способів несанкціонованого споживання електроенергії, таких як використання магніту та високочастотних генераторів для впливу на показання приладів обліку, у переліку порушень ПКЕЕ та ПКЕЕН), що розв'язує руки несумлінним споживачам;
- відсутність автоматизованої системи управління режимами роботи електричних мереж та контролю за енергетичними потоками в мережі.

Висновки

1. В світлі зазначених проблем одним з найбільш ефективних засобів підвищення ефективності роботи електричних мереж є розробка та впровадження автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ).
2. Незважаючи на проведену роботу у напрямку зниження технологічних витрат електроенергії у процесі її транспортування, маємо констатувати, що в майбутньому доведеться шукати нові шляхи вирішення сучасних та вже наболілих проблем у питанні зниження як технічних, так і комерційних витрат електроенергії.

Список літературних джерел

1. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Динамика, структура, методы анализа и мероприятия /В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина, Е.В. Комкова, В.И. Пятигор //Энергосбережение. – 2005. – № 2. – С. 2-6.
2. Тригуб В. Организация учета электроэнергии: проблемы эксплуатации приборов учета //Электропанорама. – 2005. – № 6. – С. 34-37.
3. РД 153-34.0-03.205–2001 Інструкція про порядок комерційного обліку електричної енергії. – К.: НКРЕ, 1998. – 12 с.
4. Р 50-072-98 Методика розрахунку технологічних витрат електроенергії в мережах електропостачання напругою від 0,38 до 110 кВ включно: Рекомендації. Видання офіційне. – К.: Держстандарт України, 1999. – 66 с.
5. ГНД 34.09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0.38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. – К.: ГРІФРЕ, 2004. – 164 с.

УДК 621.311

В.М. Бодунов, інженер

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВРАХУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

З використанням класичного регресійного аналізу запропоновано модель прогнозування електричного навантаження комунально-побутових споживачів з врахуванням метеорологічної інформації.

Вступ

Електричні навантаження представляють собою випадкові процеси, які залежать від часу, а також ряду зовнішніх та внутрішніх факторів, серед яких є такий зовнішній фактор, як погодні умови.

Для вирішення задач планування режимів та оперативного управління електричним навантаженням як в рамках енергосистеми в цілому, так і для окремо взятих груп споживачів необхідно мати інформацію про прогнозовані значення електричних навантажень та споживання електричної енергії. Від похибки такого прогнозування в значній мірі залежить ефективність роботи електричних мереж, їх економічність та надійність.

Мета проведеного дослідження полягала у створенні моделі прогнозування електричних навантажень житлового сектору, яка б була придатна для використання при короткостроковому прогнозуванні без застосування додаткових апаратних та програмних засобів.

Методи та результати

В якості об'єкта для моделювання був обраний мікрорайон Ялівщина міста Чернігова, більша частина якого представляє собою приватний сектор, а отже електричні навантаження є характерними як для міських, так і для сільськогосподарських споживачів. Електропостачання цього району здійснюється від підстанції 35/10 кВ «Ялівщина», яка знаходиться на балансі Чернігівських міських електричних мереж енергокомпанії ВАТ «Чернігівобленерго». Від підстанції відходять 16 фідерів, до яких підключено 120 трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ.

Для побудови моделі було використано статистичні дані навантажень на головних ділянках фідерів 10 кВ та метеорологічні дані чернігівської метеостанції за період з 01.12.2009 по 28.02.2010, тобто за зимовий період.

Проаналізувати та врахувати вплив всіх значущих факторів на електричне навантаження неможливо, оскільки для більшості з них невідомі числові значення, і це привело б до надмірного ускладнення моделі. До того ж форма графіка добового навантаження, нормована відносно середньодобової потужності, як видно з рисунку 1, практично незмінна, тому було вирішено в якості функції відгуку при моделюванні використовувати такий показник, як середньодобову активну потужність, що характеризує добове споживання електроенергії.

В якості основних метеорологічних факторів, які впливають на споживання електроенергії, використовують температуру та вологість [1]. Оцінімо ступінь взаємодії цих факторів з електричним навантаженням, використовуючи методи кореляційного аналізу.

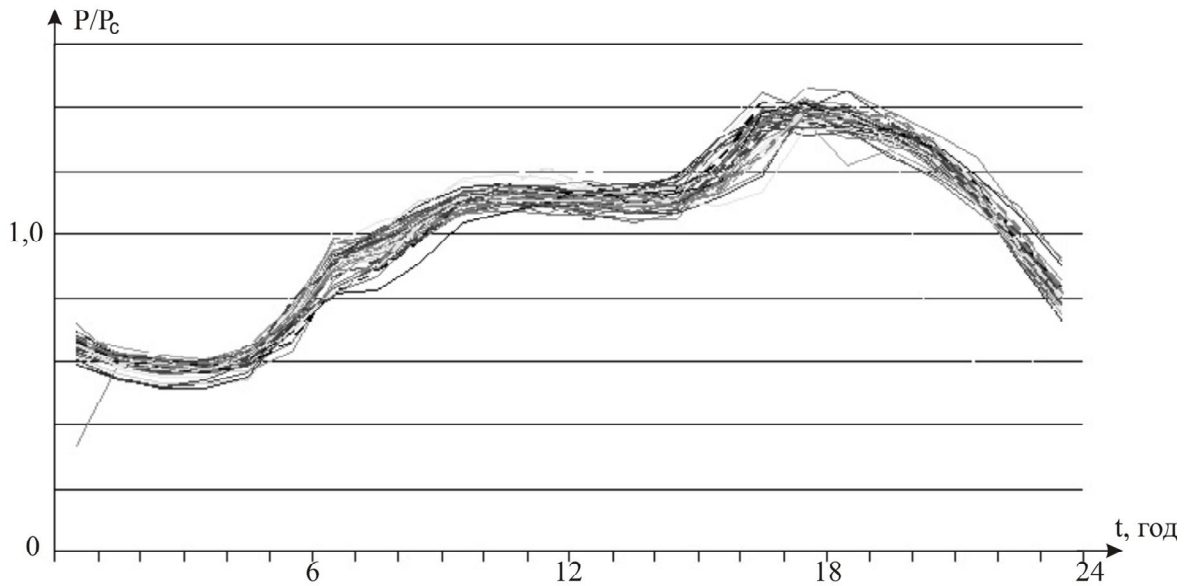


Рис. 1. Нормовані значення добових графіків електричного навантаження на шинах 10 кВ підстанції 35/10 кВ Ялівщина за період з 01.12.2009 по 28.02.2010 року

Коефіцієнт кореляції між параметрами x та y при об'ємі вибірки N визначається за формулою [2]:

$$r = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{\sqrt{\left[N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \left[N \cdot \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

Результати розрахунків коефіцієнтів кореляції зведені до таблиці 1.

Таблиця 1
Коефіцієнти кореляції між електричним навантаженням та метеорологічними показниками

Метеорологічний показник	Коефіцієнт кореляції між метеопказником та середньодобовою потужністю
середньодобова температура	-0,63158
мінімальна температура за добу	-0,62354
максимальна температура за добу	-0,62077
середньодобова вологість	-0,50735
мінімальна вологість за добу	-0,47418
максимальна вологість за добу	-0,50238

Чим ближче знаходиться коефіцієнт кореляції до ± 1 , тим більше зв'язок між параметрами, але точність знаходження кореляційної залежності залежить від об'єму вибірки та розкидання значень параметрів. Для встановлення реального статистичного зв'язку між параметрами використаємо перевірку за критерієм Стюдента [2]. Для цього визначимо розрахункові значення критерія Стюдента (табл. 2).

$$t_{розр} = |r| \sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}}. \quad (2)$$

Таблиця 2

Розрахункові значення критерія Стьюдента

Метеорологічний показник	$t_{розр}$
Середньодобова температура	7,6850
Мінімальна температура за добу	7,5243
Максимальна температура за добу	7,4698
Середньодобова вологість	5,5542
Мінімальна вологість за добу	5,0809
Максимальна вологість за добу	5,4813

Для кількості ступенів вільності $f = N - 2 = 91 - 2 = 89$ та рівня значущості $q = 0,01$ табличне значення коефіцієнта Стьюдента $t_{табл} = 2,63$ [2]. Оскільки для всіх залежностей $t_{табл} < t_{розр}$, то можна стверджувати про наявність лінійного статистичного взаємозв'язку між електричним навантаженням та метеорологічними показниками.

За результатами побудови ряду регресійних залежностей можна зробити висновки про те, що:

- використання в регресійній залежності лише одного значення температури (середньодобового, максимального або мінімального) практично не впливає на похибку моделювання;
- електричні навантаження, отримані за регресійними залежностями з використанням вологості та без її використання, відрізняються в середньому на 2 %, тому вологість повітря можна відкинути як другорядний фактор;
- введення додаткового параметру, який характеризує день тижня, значно підвищує точність моделі.

Остаточна регресійна залежність набула вигляду

$$P_{ср\ розр} = 20,82 - 0,1498 \cdot T_{ср} - 0,2616 \cdot n, \quad (3)$$

де n – номер дня тижня (1-«пн», 2-«вт», 3-«ср»...).

На рисунку 2 наведено графіки середньодобового навантаження та прогнозу значень середньодобових електричних навантажень за період 01.03.2010-31.03.2010.

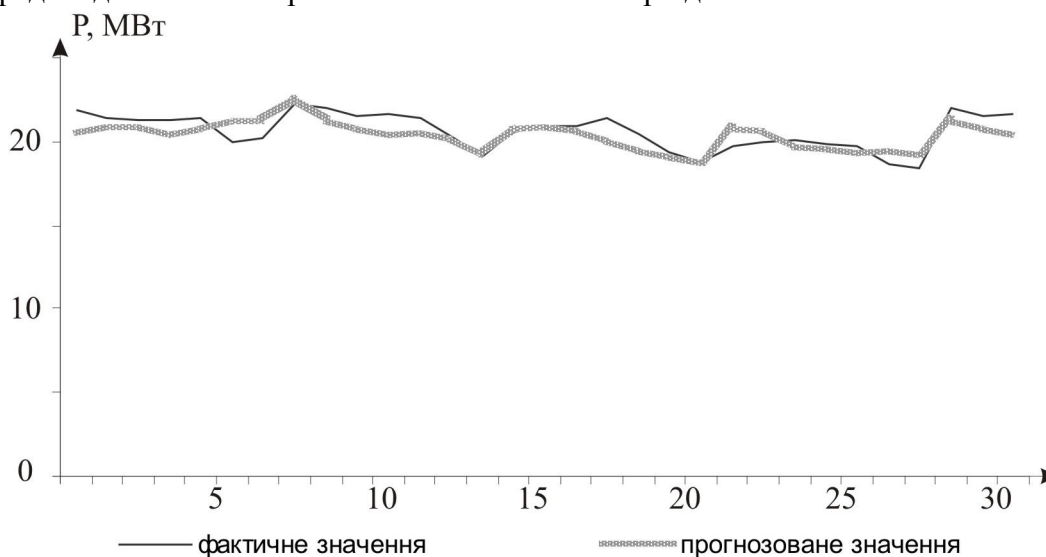


Рис. 2. Фактичні та прогнозовані значення середньодобових електричних навантажень за період 01.03.2010 – 31.03.2010

На рисунку 3 наведено значення відносних похибок при прогнозуванні. Як видно з рисунку, похибка в основному не перевищує 5-6 %.

З метою узагальнення отриманої регресійної залежності (3), та можливості її застосування для інших об'єктів пропонується виразити отримані значення коефіцієнтів через середньодобову потужність $P_{cp,доб}$, яку легко визначити, використовуючи фактичні дані про споживання електроенергії за попередній період. Отримаємо вираз:

$$P_{cp,розн} = P_{cp,доб} \cdot (1 - 7,21 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cp} - 1,26 \cdot 10^{-2} \cdot n). \quad (4)$$

Результати перевірки отриманої моделі на окремих фідерах 10 кВ з використанням в якості початкових даних споживання електроенергії за лютий та середньодобових температур за березень 2010 року наведені у таблиці 3.

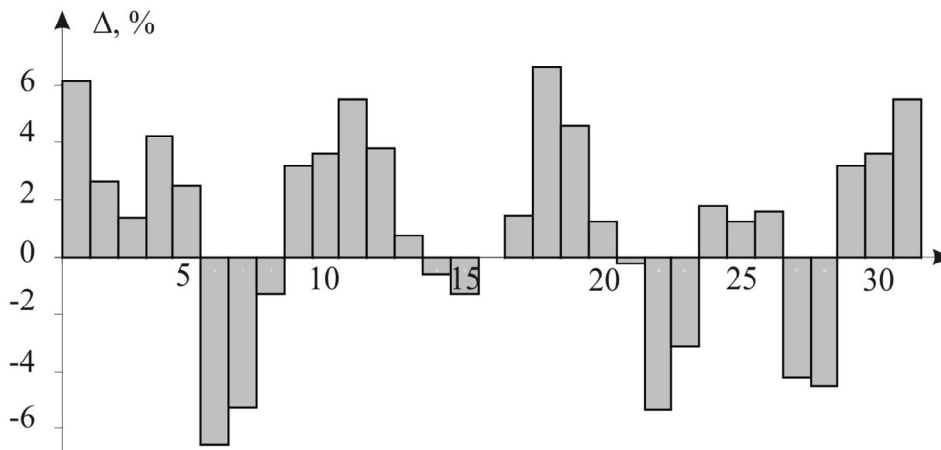


Рис. 3. Відносні похибки прогнозування середньодобових електричних навантажень на період 01.03.2010 – 31.03.2010

Таблиця 3

Похибки прогнозування середньодобових навантажень на березень 2010 року

Назва фідеру 10 кВ	Діапазон варіювання похибок, %	Середнє значення похибки, %
BT10 T1	-60,0*..6,5	-4,6
BT10 T2	-11,9..27,2	0,7
РП1-1	-253,7*..9,1	-11,7
РП1-2	-10,8..47,4*	4,0
РП7	-8,5..2,1	-1,8

Примітка. * – Великі значення похибок у другому стовпчику обумовлені аваріями та (або) перемиканням навантажень на інші фідери.

Висновки

Отримана лінійна регресійна модель для прогнозування середньодобового електричного навантаження житлового сектора, яка враховує температуру навколишнього середовища. Залежна від температури частка активної потужності для розрахункової температури опалювального сезону -23 градуса (Чернігів) становить біля 14-15 % в залежності від дня тижня. Простота отриманої моделі дозволяє користуватися нею навіть без спеціалізованого програмного забезпечення та з мінімумом контрольно-виміральної апаратури.

Список літературних джерел

1. Power Line Ampacity System: Theory, Modeling, and Applications /Anjan K. Deb.– CRC Press LLC, 2000. – 251 p.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2003 г. – 480 с.

УДК 621.311

Р.О. Буйний, канд. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

В.В. Зорін, д-р техн. наук

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ, Україна

А.О. Квицинський, канд. техн. наук

Науково-технічний центр електроенергетики НЕК «Укренерго», м. Київ, Україна

ВИКОРИСТАННЯ 4-Х ОДНОЖИЛЬНИХ КАБЕЛІВ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ І ТА II КАТЕГОРІЇ ЗА НАДІЙНІСТЮ

Для електропостачання споживачів I та II категорії за надійністю запропоновано використовувати одну кабельну лінію з резервною фазою, що дозволяє зменшити капіталовкладення в електричну мережу.

Вступ

За останні декілька років зросла популярність одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, що обумовило переробку у 2009 році розділу 2.3 ПУЕ [1]. Такі кабелі, у порівнянні з трьохжильними кабелями, мають ряд переваг:

- підвищена пропускна спроможність, яка обумовлена більш високою допустимою температурою в робочому режимі;
- висока термічна стійкість при протіканні струмів короткого замикання;
- менша вага і зовнішній діаметр, що полегшує прокладку кабелів (особливо на складних ділянках кабельних трас);
- менший допустимий радіус вигину кабелів;
- великі будівельні довжини.

В даний час вищенаведені переваги одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену дозволяють створити систему електропередавання з необхідними показниками надійності.

Методи та результати

Згідно з ПУЕ для забезпечення надійності електропостачання споживачів I і II категорії необхідно забезпечити можливість їх живлення від двох взаєморезервованих джерел, що передбачає наявність двох ліній електропередавання (рисунки 1). У зв'язку з тим, що вплив зовнішніх факторів на КЛ (кабельні лінії) електропередавання практично відсутній, то надійність електропостачання споживачів по КЛ на багато більша за надійність ПЛ (повітряних ліній) [2]. У разі застосування одножильних кабелів існує можливість живлення таких споживачів від однієї лінії електропередавання (ЛЕП) з резервною фазою (рисунки 2). Такий варіант передбачає наявність спеціального релейного захисту та автоматики. При цьому витрати на спорудження КЛ з резервною фазою будуть меншими. Причому зі збільшенням довжини ЛЕП ефективність використання цього варіанту буде збільшуватися.

Для порівняльної оцінки надійності електропостачання споживачів від двох ПЛ, двох КЛ та однієї КЛ з резервною фазою скористаємося методикою, наведеною в [3]. У зв'язку з тим, що частота відмов з'єднувальних муфт мала у порівнянні з проводами, кабелями та комутаційною апаратурою, то її не будемо враховувати при визначенні показників надійності. Однолінійна схема живлення споживача S зображена на рисунку 3.

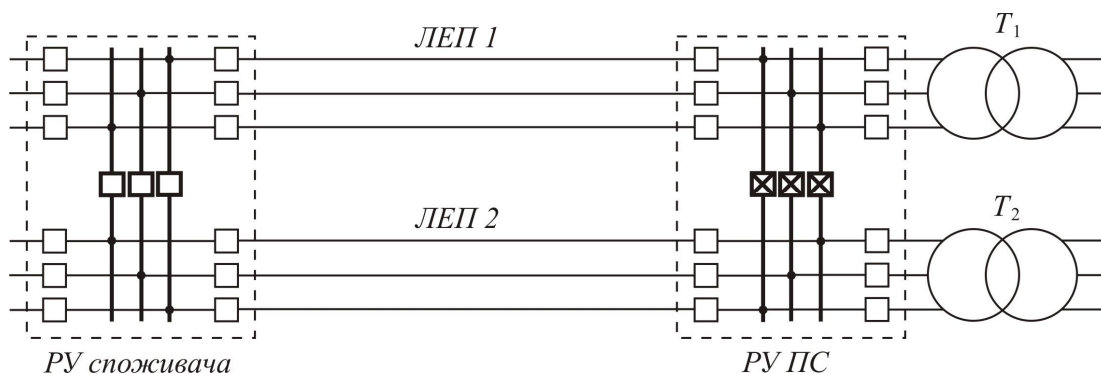


Рис. 1. Живлення споживачів від двох ЛЕП

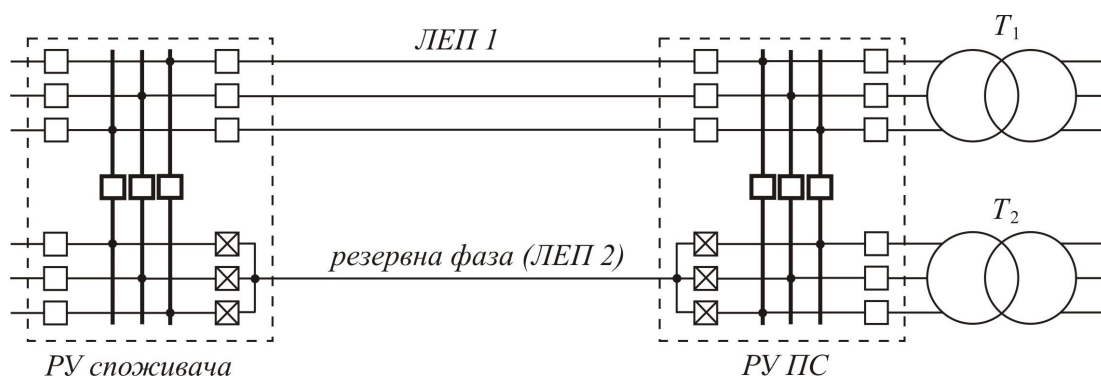


Рис. 2. Живлення споживачів від однієї КЛ з резервною фазою

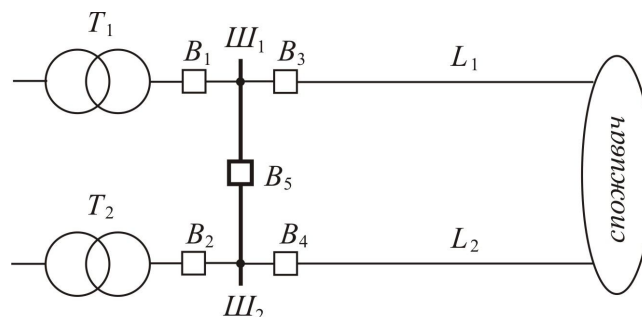


Рис. 3. Однолінійна схема живлення споживача

У зв'язку з тим, що для КЛ електропередавання ймовірність відмови для будь-якого інтервалу часу залежить тільки від довжини КЛ і не залежить від пори року, то потік відмов можна вважати стаціонарним. Також потік відмов має властивості ординарності (виникнення двох та більше відмов малоімовірне) та відсутності наслідків (відмови на попередньому інтервалі часу не впливають на кількість відмов у майбутньому). Для потоку відмов з такими властивостями (найпростіший потік) можна вважати, що випадкові відмови розподілені за законом Пуассона, а інтервали між послідовними відмовами – за експоненціальним законом.

Погонна частота відмов та середня тривалість відновлення елементів ЛЕП напругою 35-110кВ приведені у таблиці 1 [2, 3].

Таблиця 1

Показники надійності елементів ЛЕП

Назва показника надійності	Значення показника надійності для			
	вимикача	шин	ПЛ	КЛ
Частота відмов, ω	0,02 1/рік	0,001 1/(рік·приєднання)	0,08 1/(рік·км)	$0,72 \cdot 10^{-3}$ 1/(рік·км)
Середня тривалість безвідмовної роботи, τ	5,5год	4год	6год	7,2год

Ймовірність безвідмовної роботи для i -го елемента ЛЕП за t років експлуатації визначається за формулою:

$$R_i(t) = e^{-\omega_i \cdot t} . \quad (1)$$

Ймовірність безвідмовної за 1 рік експлуатації вимикача складає:

$$R_B(1) = e^{-0,02 \cdot 1} = 0,98 ,$$

секції шин на три приєднання (рисунок 1):

$$R_{Ш}(1) = e^{-0,001 \cdot 3 \cdot 1} = 0,997 ,$$

повітряної ЛЕП напругою 35-110 кВ довжиною 20 км:

$$R_{ПЛ}(1) = e^{-0,08 \cdot 20 \cdot 1} = 0,2 ,$$

кабельної ЛЕП напругою 35-110 кВ довжиною 20 км:

$$R_{КЛ}(1) = e^{-0,72 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 1} = 0,986 .$$

1. Варіант живлення від двох ПЛ

Для розрахунку показників надійності електропостачання для схеми, яка зображена на рисунку 4, необхідно виявити усі мінімальні шляхи успішного функціонування від трансформаторів T_1, T_2 до споживача:

- 1) $B_1 \rightarrow Ш_1 \rightarrow B_3 \rightarrow L_1$;
- 2) $B_1 \rightarrow Ш_1 \rightarrow B_5 \rightarrow Ш_2 \rightarrow B_4 \rightarrow L_2$;
- 3) $B_2 \rightarrow Ш_2 \rightarrow B_4 \rightarrow L_2$;
- 4) $B_2 \rightarrow Ш_2 \rightarrow B_5 \rightarrow Ш_1 \rightarrow B_3 \rightarrow L_1$.

Для повної відмови системи необхідно порушити усі шляхи успішного функціонування, тому схема заміщення за надійністю буде мати вигляд, зображений на рисунку 4.

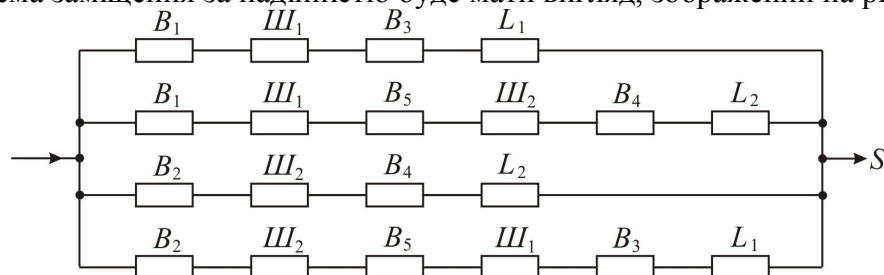


Рис. 4. Схема заміщення за надійністю для двох ЛЕП (ПЛ або КЛ)

При послідовному з'єднанні n елементів ймовірність безвідмовної роботи $R_k(t)$ та ймовірність відмови $Q_k(t)$ розраховуються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} R_k(t) &= \prod_{i=1}^n R_i(t); \\ Q_k(t) &= 1 - R_k(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а при паралельному:

$$\left. \begin{aligned} Q_k(t) &= \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)); \\ R_k(t) &= 1 - Q_k(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови кожного зі шляхів успішного функціонування системи за 1 рік її експлуатації згідно з (2) складають:

$$R_1(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,2 = 0,192;$$

$$Q_1(1) = 1 - R_1(1) = 1 - 0,192 = 0,808;$$

$$R_2(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,2 = 0,187;$$

$$Q_2(1) = 1 - R_2(1) = 1 - 0,187 = 0,813;$$

$$R_3(1) = R_1(1) = 0,192;$$

$$Q_3(1) = Q_1(1) = 0,808;$$

$$R_4(1) = R_2(1) = 0,187;$$

$$Q_4(1) = Q_2(1) = 0,813.$$

Користуючись формулами (3) знаходимо ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови системи:

$$Q_{2III}(1) = Q_1(1) \cdot Q_2(1) \cdot Q_3(1) \cdot Q_4(1) = 0,808 \cdot 0,813 \cdot 0,808 \cdot 0,813 = 0,432;$$

$$P_{2III}(1) = 1 - Q_{2III}(1) = 1 - 0,432 = 0,568.$$

2. Варіант живлення від двох КЛ

Шляхи успішного функціонування будуть аналогічні, як і в попередньому випадку. Користуючись схемою заміщення за надійністю (рисунк 4) та показниками надійності елементів (таблиця 1), знаходимо ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови системи за 1 рік експлуатації.

$$R_1(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KЛ}(1) = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,986 = 0,944;$$

$$Q_1(1) = 1 - R_1(1) = 1 - 0,944 = 0,056;$$

$$R_2(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KЛ}(1) = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,986 = 0,922;$$

$$Q_2(1) = 1 - R_2(1) = 1 - 0,922 = 0,078;$$

$$R_3(1) = R_1(1) = 0,944;$$

$$Q_3(1) = Q_1(1) = 0,056;$$

$$R_4(1) = R_2(1) = 0,922;$$

$$Q_4(1) = Q_2(1) = 0,078.$$

$$Q_{2KЛ}(1) = Q_1(1) \cdot Q_2(1) \cdot Q_3(1) \cdot Q_4(1) = 0,056 \cdot 0,078 \cdot 0,056 \cdot 0,078 = 0,00002;$$

$$P_{2KЛ}(1) = 1 - Q_{2KЛ}(1) = 1 - 0,00002 = 0,99998.$$

3. Варіант живлення від КЛ з резервною фазою

Для цього випадку шляхи успішного функціонування схеми, зображеної на рисунку 3:

- 1) $B_1 \rightarrow III_1 \rightarrow B_3 \rightarrow L_1$;
- 2) $B_1 \rightarrow III_1 \rightarrow B_5 \rightarrow III_2 \rightarrow B_4 \rightarrow L_2 \rightarrow (B_3)$;
- 3) $B_2 \rightarrow III_2 \rightarrow B_2 \rightarrow L_2 \rightarrow (B_5) \rightarrow (III_1) \rightarrow (B_3)$;
- 4) $B_2 \rightarrow III_2 \rightarrow B_5 \rightarrow III_1 \rightarrow B_3 \rightarrow L_1$.

В даному випадку другий та третій шляхи будуть мати додаткові елементи, відмова яких призводить до розриву шляху успішного функціонування.

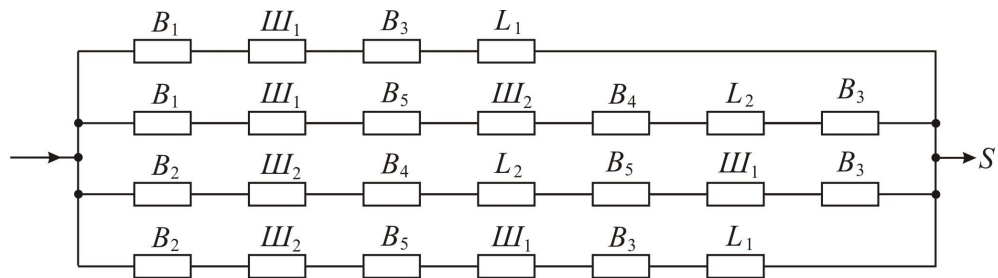


Рис. 5. Схема заміщення за надійністю для однієї КЛ з резервною фазою

Користуючись схемою заміщення за надійністю (рисунок 5) та показниками надійності елементів (таблиця 1), знаходимо ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмови системи за 1 рік експлуатації.

$$R_1(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KL}(1) = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,986 = 0,944;$$

$$Q_1(1) = 1 - R_1(1) = 1 - 0,944 = 0,056;$$

$$R_2(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KL}(1) \cdot R_B(1) = \\ = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,986 \cdot 0,98 = 0,904;$$

$$Q_2(1) = 1 - R_2(1) = 1 - 0,904 = 0,096;$$

$$R_3(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KL}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) = \\ = 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 \cdot 0,986 \cdot 0,98 \cdot 0,997 \cdot 0,98 = 0,904;$$

$$Q_3(1) = 1 - R_3(1) = 1 - 0,904 = 0,096;$$

$$R_4(1) = R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{III}(1) \cdot R_B(1) \cdot R_{KL}(1) = 0,922;$$

$$Q_4(1) = 1 - R_4(1) = 0,078.$$

$$Q_{1KL+1pf}(1) = Q_1(1) \cdot Q_2(1) \cdot Q_3(1) \cdot Q_4(1) = 0,056 \cdot 0,096 \cdot 0,096 \cdot 0,078 = 0,00004;$$

$$R_{1KL+1pf}(1) = 1 - Q_{1KL+1pf}(1) = 1 - 0,00004 = 0,99996.$$

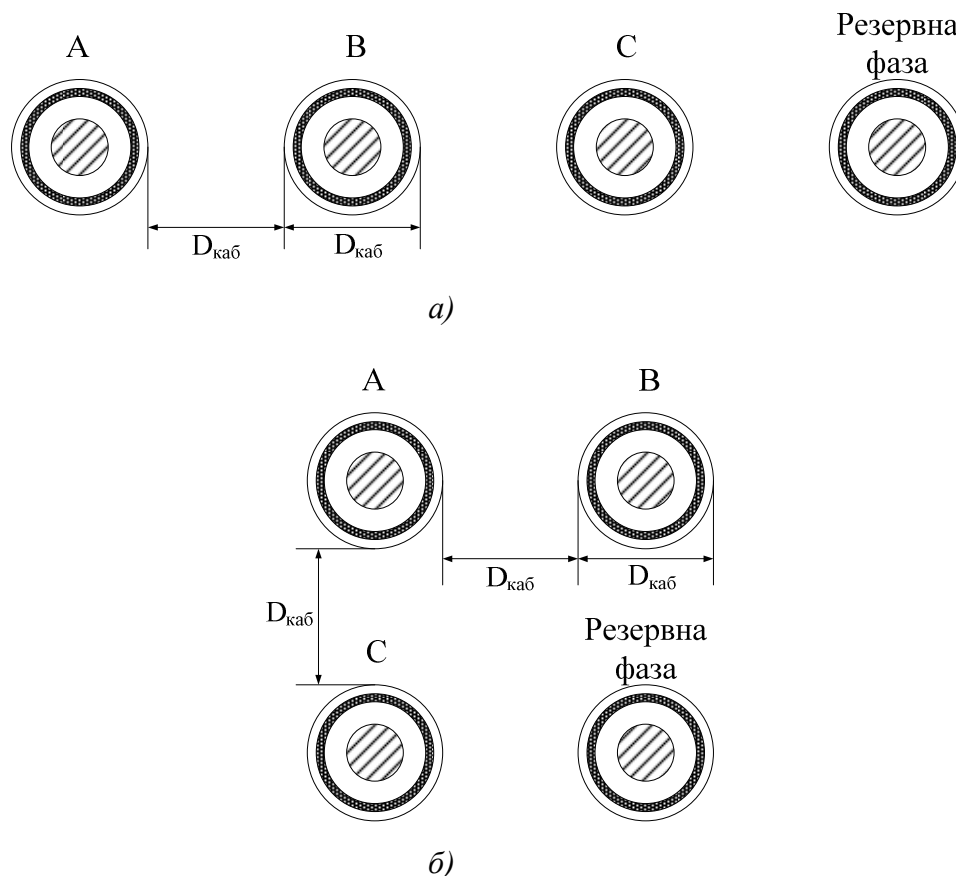
Таблиця 2

Ймовірності безвідмовної роботи для різних варіантів живлення

Варіант живлення	Ймовірність безвідмовної роботи
Від двох ПЛ	0,568
Від двох КЛ	0,99998
Від однієї КЛ з резервною фазою	0,99996

Як видно з таблиці 2, ймовірність безвідмовної роботи системи електропостачання споживача у разі живлення по одній КЛ з резервною фазою трохи менша за ймовірність безвідмовної роботи у разі живлення по двох КЛ і набагато більша за варіант живлення від двох ПЛ. Це дозволяє стверджувати про можливість живлення споживачів I та II категорії від однієї КЛ з резервною фазою.

Така кабельна лінія може мати варіанти прокладання, зображені на рисунку 6.



а) у ряд («flat-formation»);

б) у вершинах квадрата

Рис. 6. Розташування кабелів у траншеї

При розташуванні кабелів у ряд суттєво спрощується експлуатація КЛ, а при розташуванні у вершинах квадрата зменшуються витрати на спорудження КЛ.

Кабельні лінії електропередавання найбільш ефективні в умовах міської багатоповерхової забудови, де вартість земельних ділянок дуже велика. В [4] показано, що вартість будівництва 1 км КЛ замість ПЛ сумірна з вартістю ділянки землі, яка звільняється. Це дозволяє стверджувати про економічну ефективність застосування кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену як засобу підвищення надійності електричних мереж.

Також для кабельних ліній електропередавання характерні на 10-15 % менші втрати при передаванні електричної енергії у порівнянні з повітряними. Це обумовлено генерацією КЛ ємнісної потужності, яка частково компенсує індуктивну складову навантаження.

Висновки

1. Розрахунки показників надійності дозволяють стверджувати про можливість застосування однієї КЛ з резервною фазою для електропостачання споживачів I та II категорії.
2. Ефективність однієї КЛ з резервною фазою збільшується зі збільшенням довжини ЛЕП

Список літературних джерел

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 2. Передавання електроенергії. Глава 2.3. Кабельні лінії напругою до 330 кВ – К.: «КВІЦ», 2009. – 80 с.
2. Кожевников А. Системы электропередачи на базе СПЭ-кабелей. Эффективность применения //Новости Электротехники. – 2007. – № 1(43). – С. 41-43.
3. Надежность систем электроснабжения /В.В. Зорин, В.В. Тисленко, Ф. Клеппель, Г. Адлер. – К.: Вища школа, 1984. – 192 с.
4. Буйный Р.А., Квицинский А.А., Зорин В.В. Анализ эффективности использования различных средств для повышения надежности распределительных электрических сетей 10-110 кВ //Новини Енергетики. – 2010. – № 9. – С. 34-37.

УДК 621.3.012.6: 537.523.5: 535.341

А.И. Бушма, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЫТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДУГ ОТКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ К КОМБИНИРОВАННОМУ ЛАЗЕРНО-ДУГОВОМУ РАЗРЯДУ

Изложен опыт Института электросварки им. Е.О. Патона по моделированию динамики электрической дуги с изменяющейся длиной, обдуваемой и движущейся дуги. Обобщенная модель может применяться для описания дуг отключения в электрических сетях. Показано, что такой же подход, а именно, непосредственный учет какого-либо энергетического параметра, позволяет получить модель комбинированного лазерно-дугового разряда.

Введение

Электрические дуги, которые возникают при коммутации высоковольтных распределительных сетей, значительно влияют на надежность их эксплуатации и вносят свой вклад в потери электроэнергии при ее транспортировании.

Дуга отключения – это быстропротекающее, динамическое явление. Его описание невозможно без применения динамических моделей электрической дуги. В Институте электросварки им. Е.О. Патона разработана обобщенная модель динамической дуги [1, 2]. Приобретен большой опыт применения ее для описания сварочных дуг, а также электрических дуг отключения. Последнее стало возможным благодаря тому, что обобщенная модель охватывает случаи описания дуги с изменяющейся длиной, дуги с продольным или поперечным обдувом газом.

Представляет интерес применение этого опыта для описания других видов газовых разрядов и расширения диапазона приложения обобщенной модели.

В последние годы во всем мире проявляется огромный интерес к комбинированным лазерно-дуговым процессам, в частности, сварке и обработке материалов [3-5]. Эти процессы обеспечивают значительное повышение качества изделий, увеличение производительности их изготовления, а также получение новых типов изделий, которые невозможно получить с помощью лазера и электрической дуги в отдельности.

Настоящее исследование посвящено разработке модели лазерно-дугового разряда как элемента электрической цепи с использованием аналогичных подходов, которые использовались при описании электрических дуг отключения.

Обобщенная модель дуги с неизменной длиной

Кратко напомним основные положения, на которых основывается обобщенная модель динамической дуги.

Дуга рассматривается феноменологически как тепловой макрообъект, который является элементом электрической цепи со статической вольтамперной характеристикой (ВАХ) $U(i)$. Закон сохранения энергии для этого теплового макрообъекта имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_0. \quad (1)$$

Этот закон связывает три энергетических параметра столба электрической дуги: внутреннюю энергию Q , подводимую P и отводимую P_0 мощности. Внутренняя энергия столба дуги Q представляет собой сумму всех энергий плазмы: энергии теплового движения, энергии ионизации, энергии колебательных и вращательных степеней свободы молекул и т.п., и зависит от радиуса и длины дуги, т.е. ее объема. Под подводимой мощностью P понимается мощность, потребляемая столбом дуги от электрической цепи, а под отводимой мощностью P_0 понимается мощность, отдаваемая столбом дуги в окружающее пространство различными видами теплопроводности и излучением.

Применение понятия тока состояния дуги [1] и введение переменной i_θ позволяют выразить энергетические параметры дуги через электрические параметры

$$P = \frac{U(i_\theta)}{i_\theta} i^2; \quad P_\theta = U(i_\theta) i_\theta; \quad (2)$$

$$Q = 2\theta \int_0^{i_\theta} U(i_{\theta*}) di_{\theta*}, \quad (3)$$

где i – ток дуги, θ – постоянная времени дуги, получить дифференциальное уравнение модели

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2. \quad (4)$$

Уравнение (4) дополняется формулой связи между током дуги и падением напряжения на ней

$$u = \frac{U(i_\theta)}{i_\theta} i, \quad (5)$$

которая входит в уравнения, которые соответствуют законам Кирхгофа.

Обобщенная модель электрической дуги с изменяющейся длиной

Полученная при создании модели дуги формула (3) для внутренней энергии столба дуги позволяет расширить сферу применения уравнения динамики дуги для описания дуги с изменяющейся во времени длиной, что принципиально невозможно в альтернативных моделях [2].

Воспользуемся равенством

$$U(i_\theta) = l E(i_\theta), \quad (6)$$

где $E(i_\theta)$ – функция, задающая среднее значение напряженности электрического поля в столбе дуги. Статическая ВАХ столба дуги строится именно для этого значения напряженности. В случае цилиндрической дуги напряженность $E(i_\theta)$ совпадает с истинной напряженностью электрического поля в столбе дуги. Формула (3) с учетом (6) принимает вид

$$Q = 2\theta l \int_0^{i_\theta} E(i_{\theta*}) di_{\theta*}. \quad (7)$$

Производная от внутренней энергии по времени находится по правилу дифференцирования сложной функции двух переменных

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial i_\theta} \frac{di_\theta}{dt} + \frac{\partial Q}{\partial l} \frac{dl}{dt} = 2\theta l E(i_\theta) \frac{di_\theta}{dt} + 2\theta \frac{dl}{dt} \int_0^{i_\theta} E(i_{\theta*}) di_{\theta*}. \quad (8)$$

Подставляя это выражение совместно с выражениями (2) в формулу (1), получим уравнение модели для дуги с изменяющейся длиной

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{2\theta v_l}{l E(i_\theta) i_\theta} \int_0^{i_\theta} E(i_{\theta*}) di_{\theta*} \right], \quad (9)$$

где $v_l = dl / dt$ – скорость изменения длины дуги.

Последнее уравнение допускает следующие формы записи в общем случае

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{v_l}{l} \frac{Q}{P_\theta} \right]. \quad (10)$$

И в частном случае, когда аппроксимация статической ВАХ дуги является степенной функцией

$$U(i) = U_0 \left(\frac{i}{I_0} \right)^n, \quad (11)$$

(где U_0 и I_0 – координаты одной из точек ВАХ дуги; n – показатель степени) запись значительно упрощается

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{2\theta v_l}{(1+n)l} \right]. \quad (12)$$

Полученные уравнения открывают большие перспективы при решении задач, связанных с дугой в дугогасительных аппаратах, где происходит ее удлинение.

Обобщенная модель электрической дуги с обдувом газом и движущейся дуги

При обдуве электрической дуги газом или ее движении помимо естественной конвекции появляется дополнительный механизм отвода энергии посредством принудительной конвекции, мощность P_v которой можно учесть непосредственно: при продольном обдуве

$$P_v = \frac{W_A}{V_A} Q = \frac{|v|}{l} Q; \quad (13)$$

при поперечном обдуве или движении

$$P_v = \frac{W_A}{V_A} Q = \frac{2l_e |v|}{\pi l r_A} Q, \quad (14)$$

где V_A – объем, занимаемый столбом дуги, W_A – объемный расход плазмы, выдуваемой в единицу времени: для продольного обдува $W_A = \pi r_A^2 |v|$, для поперечного обдува или движения $W_A = 2r_A l |v|$, v – скорость обдува или скорость движения дуги, r_A – радиус столба дуги, l_e – расстояние между электродами (в общем случае $l_e < l$).

Уравнение баланса мощностей в этом случае имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta - P_v. \quad (15)$$

Уравнение модели дуги с продольным обдувом

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{|v|}{l} \frac{Q}{P_\theta} \right], \quad (16)$$

с поперечным обдувом или движущейся дуги

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{2l_e |v|}{\pi l r_A} \frac{Q}{P_\theta} \right]. \quad (17)$$

Уравнение (16) перспективно применять для описания плазменных дуг, в которых продольный обдув газом является неотъемлемой частью процесса. Уравнение (17) следует применять для описания дуг в дугогасительных аппаратах с поперечным обдувом, а также для движущихся дуг, включая движение дуги в магнитном поле. Необходимо отметить, что возможны комбинации случаев, описываемых уравнениями (10), (16) и (17).

Полученные модификации модели дуги были объединены в одну с названием – обобщенная модель

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i^2 - i_\theta^2 \left[1 + \frac{v_l + k |v|}{l} \frac{Q}{P_\theta} \right], \quad (18)$$

где $k = 1$ для продольного обдува и $k = 2l_e / \pi r_A$ для поперечного обдува или движения дуги. Эту обобщенную модель перспективно применять для исследования динамики электрической дуги отключения.

Обобщенная модель комбинированного лазерно-дугового разряда

Как указывалось выше, комбинированный лазерно-дуговой разряд находит все большее технологическое применение. В настоящее время для осуществления лазерно-

дугового процесса применяется обычное сварочное оборудование, в частности, источники питания электрической дуги. Это не всегда оправдано. Практический опыт свидетельствует о необходимости разработки специализированных источников питания лазерно-дугового разряда. Решение этой задачи включает в себя анализ электрических цепей с сосредоточенными параметрами, в состав которых входит лазерно-дуговой разряд. Поэтому представляет интерес выявление закономерностей зависимости характеристик комбинированного разряда от мощности лазерного излучения, а также создание динамической модели лазерно-дугового разряда как элемента электрической цепи.

Это становится возможным благодаря применению в качестве модели – обобщенной динамической модели дуги, т.к. она построена на законе сохранения энергии. Как было показано в предыдущих параграфах, в некоторых случаях можно записать явное выражение для какого-либо энергетического параметра дуги. В частности, было исследовано влияние скорости обдува дуги защитным газом, поскольку удастся записать дополнительный член, который соответствует мощности, отводимой от дуги потоком газа.

Поступим аналогично и в нашем случае, выразив часть подводимой мощности от лазерного излучения дополнительным членом

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta} + P_L \quad (19)$$

Здесь P_L – подводимая мощность, которая обеспечивается лазерным излучением. Очевидно, что подводимая мощность зависит от конкретного технологического процесса и оборудования, которое его осуществляет. В случае, когда лазерный луч проходит по оси дугового разряда [7, 8], можно принять, что $P_L = \alpha Q^0$ – мощность, поглощаемая плазмой, пропорциональна мощности лазера Q^0 (α – коэффициент поглощения будем рассматривать неизменным).

Подставляя значения подводимой и отводимой мощностей (2) и внутренней энергии (3) в уравнение (19), получим дифференциальное уравнение модели лазерно-дугового разряда

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} = i^2 - i_{\theta}^2 \left(1 - \frac{P_L}{P_{\theta}} \right). \quad (20)$$

Формула для связи тока разряда и падения напряжения на нем остается той же (5), при условии, если $U(i)$ – функция статической вольтамперной характеристики дугового разряда.

Для того, чтобы проверить адекватность созданной модели, получим с ее помощью квазистатические вольтамперные характеристики лазерно-дугового разряда.

Используя процедуру получения квазистатических вольтамперных характеристик, которая описана в статье [6] для обдуваемых дуг, получим параметрическую зависимость для функции квазистатических вольтамперных характеристик комбинированного лазерно-дугового разряда, которые учитывают мощность лазерного излучения

$$U_L(i_{\theta}, P_L) = U(i_{\theta}) \cdot \sqrt{1 - \frac{P_L}{P_{\theta}}}; \quad (21)$$

$$I_L(i_{\theta}, P_L) = i_{\theta} \cdot \sqrt{1 - \frac{P_L}{P_{\theta}}}, \quad (22)$$

где $U(i)$ – функция статической вольтамперной характеристики дугового разряда; i_{θ} – ток состояния дуги [1], который в этих формулах играет роль параметра.

Полученные зависимости, в общем, правильно описывают тенденцию понижения напряжения на комбинированном лазерно-дуговом разряде при повышении мощности лазерного излучения по сравнению с дуговым разрядом [3, 4, 9], что свидетельствует об адекватности созданной модели.

Выводы

1. Обобщенная модель динамической электрической дуги с изменяющейся длиной, обдуваемой и движущейся дуги перспективно применять для описания дуг отключения в коммутационных аппаратах электрических сетей.
2. Использование опыта моделирования электрической дуги отключения позволяет создать модель комбинированного лазерно-дугового разряда.

Список литературных источников

1. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги //Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 36-40.
2. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Сравнительный анализ математических моделей динамической сварочной дуги //Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33-36.
3. Горный С.Г., Лопота В.А., Редозубов В.Д. Исследование электрических характеристик дуги при лазерно-дуговой сварке //Сварочное производство. – 1989. – № 1. – С. 28-29.
4. Laser-arc discharge: Theory and applications /V.S. Gvozdetzky, I.V. Krivtsun, M.I. Chizhenko, et al. //Welding and Surfacing Rev. – Harwood Academic Publ., 1995. – Vol. 3. – 148 P.
5. Сом А.И., Кривцун И.В. Лазер + плазма: поиск новых возможностей в наплавке //Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 36-41.
6. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Квазистатические и динамические вольтамперные характеристики и постоянная времени обдуваемых и движущихся сварочных дуг //Автоматическая сварка. – 1991. – № 5. – С. 38-41.
7. Заявка 60-234782 Япония, МКИ В23К 26/00, 26/14. Laser beam working apparatus /М. Kanaoka, S. Hoshinouchi. – Оpubл. 21.11.85.
8. Пат. 5700989 США, МКИ В23К 26/00, 10/00. Combined laser and plasma arc welding torch /I.S. Dykhno, I.V. Krivtsun, G.N. Ignatchenko. – Оpubл. 23.12.97.
9. Характеристики дуги постоянного тока прямой полярности при одновременном нагреве металла лазерным пучком /С.Г. Горный, В.А. Лопота, В.Д. Редозубов и др. //Автоматическая сварка. – 1987. – № 11. – С. 73-74.

УДК 621.31.017

В.Г. Дерзский, д-р техн. наук**В.Ф. Скиба**, аспирант

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, г. Киев, Украина

**ЭНЕРГОЛОКАТОР®****МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**

Приведены возможности многофункционального программного комплекса ЭНЕРГОЛОКАТОР, который упрощает работу инженеров электроснабжающих и энергоаудиторских организаций, деятельность которых связана с обеспечением надежного и качественного электроснабжения.

Вступление

Многофункциональный программный комплекс (шифр «Энерголокатор») предназначен для автоматизации электротехнических расчетов в распределительных сетях объединенной энергосистемы (ОЭС) с учетом реальных условий их эксплуатации. Реальные условия эксплуатации это:

неточность, неопределенность, недостоверность большей части исходных данных;
износ сетевого оборудования (линий, трансформаторов, счетчиков и т.д.);
случайная несимметрия нагрузки фаз линий;
неполнофазные режимы электроснабжения;
нескомпенсированные перетоки реактивной мощности;
несанкционированный отбор электроэнергии;
нелинейность ТРЭ (технологического расхода электроэнергии);
незапланированные (аварийные) переключения схемы;
недоучет потребления электроэнергии из-за погрешности измерительного комплекса и т.д.

Основные функции Энерголокатора

Основными функциями Энерголокатора являются:

расчет установившихся режимов работы сетей с учетом перечисленных выше нарушений технологии передачи и распределения электроэнергии;
поиск и выявление «проблемных» фидеров (в которых имеет место несанкционированный отбор электроэнергии) [1];
расчет сверхнормативных потерь электроэнергии [2];
приведение к норме потерь электроэнергии [1];
выбор мощности, количества и мест установки КУ (конденсаторных установок);
расчет платы за потребленную реактивную энергию [3];
расчет объемов несанкционированного отбора электроэнергии [1];
распределение потерь в общих элементах электрической сети между потребителями [4];
выбор МСП (мероприятий по снижению потерь электроэнергии) [2];
энергоаудит;
рекомендации по энергосбережению.

Область применения

Многофункциональность Энерголокатора, простота использования позволяют с успехом применять его инженерами многих организаций, деятельность которых связана с обеспечением надежного и качественного электроснабжения. Обычно это:

- предприятия электроснабжения (облэнерго и независимые поставщики электрической энергии);
- производственные и промышленные предприятия со сложными схемами промышленных электросетей;
- другие средние и малые производственные предприятия;
- организации, специализирующиеся на проведении внешних энергоаудитов и пр. (таблица 1).

Таблица 1

Потенциальные пользователи программы Энерголокатор

Структуры и подразделения	Перечень решаемых задач
Отделы снабжения и отделы расчета технических потерь районных электрических сетей (РЭС) областных энергопередающих компаний (облэнерго)	1. Расчет показателей технологического расхода электроэнергии при ее передаче в распределительных сетях различной топологии 2. Пофидерный анализ с учетом переключений в электросетях 3. Контроль качества и надежности
Крупные, средние и малые промышленные предприятия	1. Оптимизация существующих схем электроснабжения цехов и других производственных помещений 2. Планирование расширения, реконструкции сетей предприятий с учетом минимизации технологического расхода электроэнергии 3. Выбор оптимальных мест размещения КУ 4. Обоснование коэффициента реактивной мощности при расчете и утверждении тарифа на покупку электроэнергии
Ведомственные и частные энергоаудиторские конторы, инспекции по энергосбережению и др. государственные контролирующие организации	1. Комплексный энергоаудит потребителей электроэнергии 2. Контрольная проверка результатов расчета технологических потерь электроэнергии и их нормативов в сетях энергоснабжающих организаций при утверждении тарифов на продажу электроэнергии
Проектные организации	1. Тестирование соответствия проектируемых участков электросетей их проектным нагрузкам; проверка надежности электроснабжения, качества и экономичности передаваемой мощности с применением методов моделирования случайных процессов (приближение к реальным условиям эксплуатации)

Структура Энерголокатора

Главное окно Энерголокатора выполнено в виде удобного графического редактора схем (рисунок 1). Дополнительные окна Энерголокатора:

Схемы – иерархия схем проекта электросетей с возможностью их группирования.

Оборудование – справочники энергетического оборудования (воздушные и кабельные линии, двух и трехобмоточные трансформаторы, БСК и др.) с возможной коррекцией данных.

Свойства – доступные свойства активного элемента электросети.

Учет электроэнергии – журнал учета активной и реактивной электроэнергии.

Переключения – журнал переключений в электросетях.

Журнал – журнал сообщений, оповещающий об ошибках при анализе и расчете схем.

Навигатор – миниатюрное отображение холста текущей схемы.

Кроме того, имеются

Расчетный модуль.

Модуль стохастической вариации.

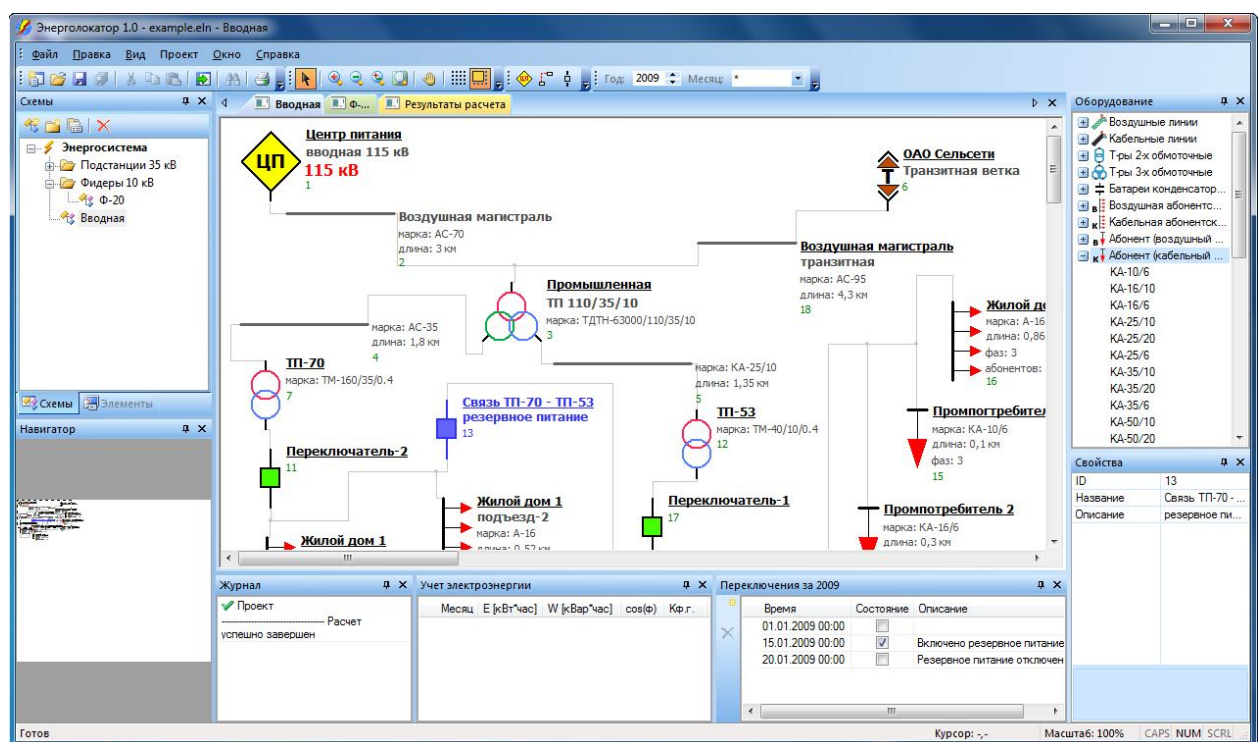


Рис. 1. Графический интерфейс программы Энерголокатор

Типы и условия проведения расчетов

В Энерголокаторе возможны два типа расчетов (рисунок 2):

детерминированный;

вероятностный (с учетом случайной несимметрии нагрузки фаз, износа оборудования, погрешности измерительного комплекса и др.).

Рис. 2. Параметры расчета

При всех типах расчетов используется поэлементный подход без эквивалентирования при следующих условиях.

1. Линии могут быть 3, 2 или 1-фазными.
2. Нагрузка линий задается средними фазными токами.
3. Сети 0,38 кВ могут быть представлены:
 - городскими кабельными линиями (неразветвленные линии с участками различного сечения и равномерно распределенной нагрузкой) (рисунок 3);

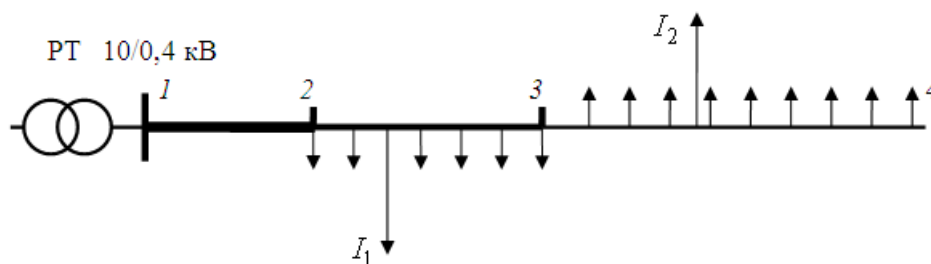


Рис.3. Типовая городская кабельная линия

- сельскими воздушными линиями (разветвленные линии с равномерно распределенной вдоль участков нагрузкой) (рисунок 4);

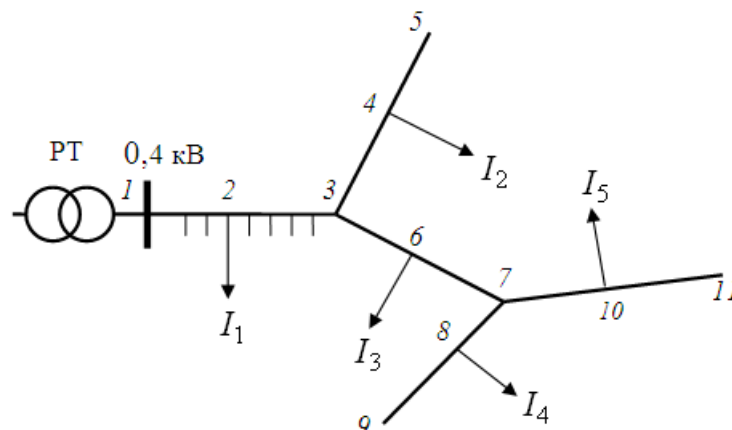


Рис.4. Типовая сельская воздушная линия

–промышленными линиями с сосредоточенной в конце нагрузкой (рисунок 5);

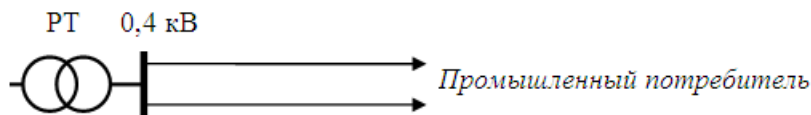


Рис.5. Промышленная воздушная (кабельная) линия

–транзитными линиями.

4. Токовая нагрузка потребителей определяется с помощью показаний счетчиков; АСКУЭ; АСКУЭ БП; программного комплекса биллинг; социальной нормы потребления электроэнергии [5].

Пример типичной схемы электроснабжения городских бытовых потребителей в графической интерпретации Энерголокатора показан на рисунке 6.

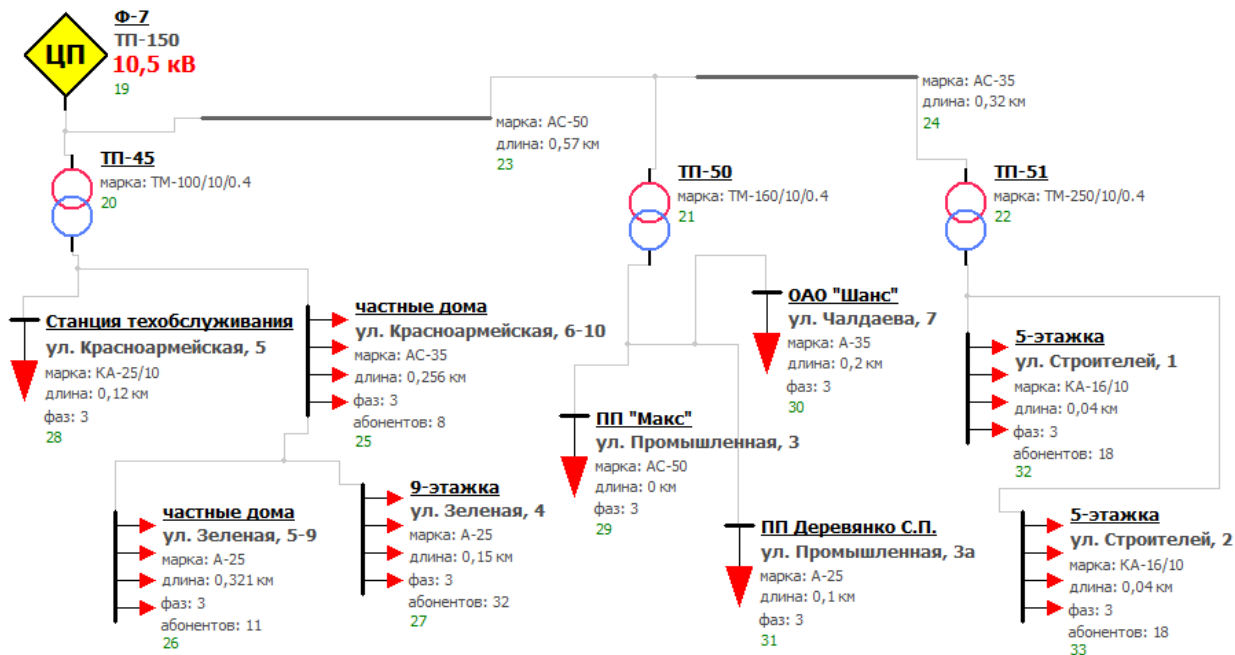


Рис. 6. Схема фидера 10 кВ

Перед выполнением процедуры расчета Энерголокатор автоматически проверяет правильность введения схем электросетей на соответствие напряжений питания и номинальных напряжений элементов электросети, направлений токов, переключений. В случае возникновения ошибки анализатор укажет, в каком месте и в какое время она произошла.

Результаты расчетов

Общие результаты расчетов в Энерголокаторе представлены в виде двух таблиц, отдельно для элементов и узлов электросети (рисунок 7). Результаты расчетов отображаются посхемно, после выбора интересующей схемы в дополнительном окошке Схемы.

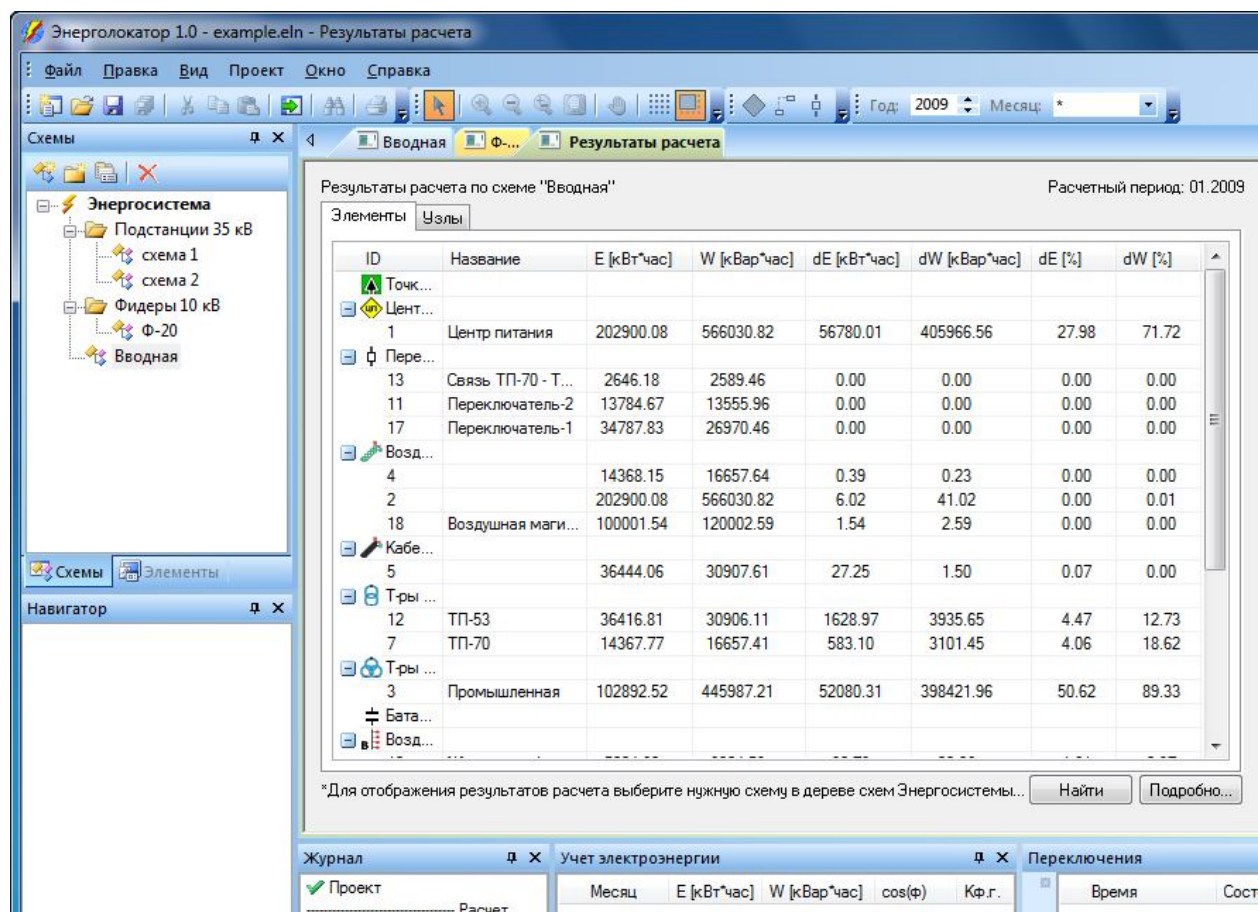


Рис. 7. Общие результаты расчетов

В общих результатах расчетов для каждого элемента электросети отображается информация о количестве поступившей активной и реактивной электроэнергии, потерях активной и реактивной электроэнергии в абсолютных и относительных единицах измерения. Для каждого из узлов отображаются отклонения напряжения в узлах.

Также в Энерголокаторе реализованы функции статистической обработки результатов расчета, которые значительно надежнее и достовернее детерминированных результатов. Визуализация данных в графо-аналитическом виде (рисунок 8) позволяет быстро и удобно оценивать обстановку, состояние и условия эксплуатации каждого элемента либо узла электросети.

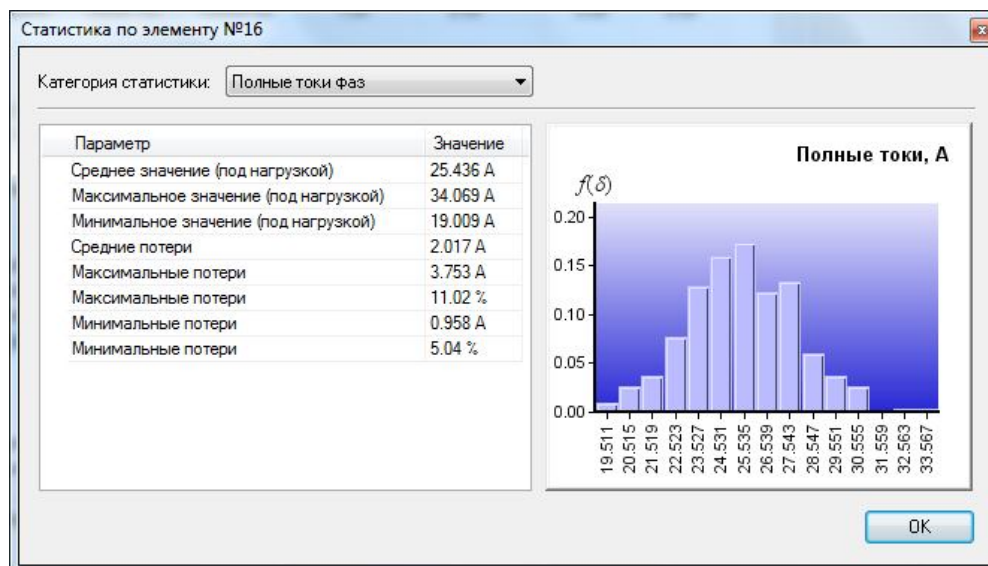


Рис. 8. Статистическая обработка результатов расчета

Заключение

С помощью удобного графического редактора схем электросетей Энерголокатор позволяет быстро формировать расчетную модель электросети и вносить все необходимые для расчетов данные. В расчетный аппарат Энерголокатора вошли классические, однако усовершенствованные нами методы электротехнических расчетов, позволяющие приблизить расчет к реальным условиям эксплуатации электросетей. Сочетание методов имитационного моделирования и поэлементного подхода способно наиболее подробно и объективно представить реальную картину потокораспределения в элементах расчетной модели электросети. За счет этого удалось значительно повысить информативность результатов расчета, которая особо важна в условиях неопределенности части исходной информации. Результаты расчетов легко читаются специалистами отрасли и позволяют принимать на их основании обоснованные решения.

Скачать демонстрационную версию программы Энерголокатор, изучить ее возможности можно по адресу в сети Интернет: <http://www.energyexpert.com.ua>.

Список литературных источников

1. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Обоснование уровня нормативных потерь электроэнергии в распределительных сетях //Энергетические сети и системы. –2007. – № 6.
2. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях //Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2009. – № 6.
3. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Расчет платы за реактивную мощность //Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2009. – № 11.
4. Дерзский В.Г. Распределение технологического расхода электроэнергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями //Энергетика и электрификация. – 2001. – № 3.
5. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф., Чекаленко М.И. Потребление электроэнергии населением //Энергетика та електрифікація. – 2008. – № 4.

УДК 621.311

В.В. Зорин, д-р техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1000В

Рассмотрены методы выбора сечений проводов и жил кабелей в условиях рыночной экономики. Количественный анализ позволил предложить унификацию стандартных сечений линий электропередачи напряжением 6-10 кВ с целью упрощения процесса проектирования и эксплуатации электрических сетей.

Вступление

Общая протяженность линий электропередачи (ЛЭП) в Украине составляет около 1 млн.км., значительная часть которых израсходовала свой жизненный ресурс и требует серьезной реконструкции и замены. Это является причиной заметного возрастания потерь электрической энергии и ухудшения ее качества, снижения надежности и безопасности эксплуатации ЛЭП.

Рыночные условия функционирования электроэнергетики требуют гарантированного высокого качества электроснабжения. В связи с этим следует ожидать в ближайшее время увеличения объема работ по замене, реконструкции и модернизации ЛЭП всех напряжений.

Важное место при этом занимает решение задачи обоснованного выбора сечений проводов и жил кабелей. Выбор сечений является распространенной, наиболее массовой задачей, поэтому недостаточная обоснованность и даже небольшие неточности могут приводить к существенным, неоправданным дополнительным затратам.

ПУЭ [3] предписывают проводить выбор сечений проводов и жил кабелей выше 1000 В по экономическим соображениям. Однако в ряде публикаций, методических указаниях и даже в руководящих материалах предлагается проводить выбор сечений по допустимым токам в нормальных режимах. Это нельзя признать правильным, так как в этом случае будет выбрано минимальное сечение, а не экономическое, что приведет к чрезмерно большим потерям.

В настоящее время известны три подхода при выборе сечений проводов:

- 1) на основе ТЭР (ЛЭП-330 кВ и выше);
- 2) по экономической плотности тока $j_{\text{эк}}$ (А/мм²);
- 3) по экономическим интервалам.

Самым простым методом для выбора сечений проводов является метод экономической плотности тока:

$$F = \frac{I_p}{j_{\text{эк}}}, \text{ мм}^2, \quad (1)$$

но он имеет ряд серьезных недостатков:

- данные $j_{\text{эк}}$ были установлены в 50-х годах прошлого столетия;
- не дает однозначного решения, так как приходится округлять сечения до стандартных значений;
- предполагалась прямолинейная зависимость $K = f(F)$;
- затраты на потери принимались одинаковыми по всей территории;
- учитывалась дефицитность цветного металла;
- значения $j_{\text{эк}}$ действовали по всей территории СССР, что противоречит современной экономической политике.

Учитывая перечисленные недостатки, метод $j_{эк}$ не может быть рекомендован для применения.

Для выбора сечений в ЛЭП выше 1000В следует использовать метод экономических интервалов. В основу технико-экономической модели был положен показатель экономической эффективности, такой как дисконтированные затраты [1,4]:

$$Z = \sum_{t=2}^{T_p} (K_t + I_{\Sigma}) \cdot (1 + E)^{-t} . \quad (2)$$

Для тех простых случаев, когда инвестиции вкладываются однократно в течение первого года, а издержки остаются неизменными в течение всего расчетного срока, выражение затрат принимает вид:

$$Z = (E_n + p_a) \cdot K + I . \quad (3)$$

Оно дает тот же результат, что и расчет дисконтированных затрат. Экономический критерий приведенных затрат наиболее приспособлен и удобен для сравнения альтернативных вариантов проектов электросетевых объектов и устройств. Метод экономических интервалов практически свободен от всех перечисленных недостатков метода нормированных экономических плотностей тока.

Граничный ток смежных экономических интервалов сечений F_i и F_{i+1} определяется по формуле:

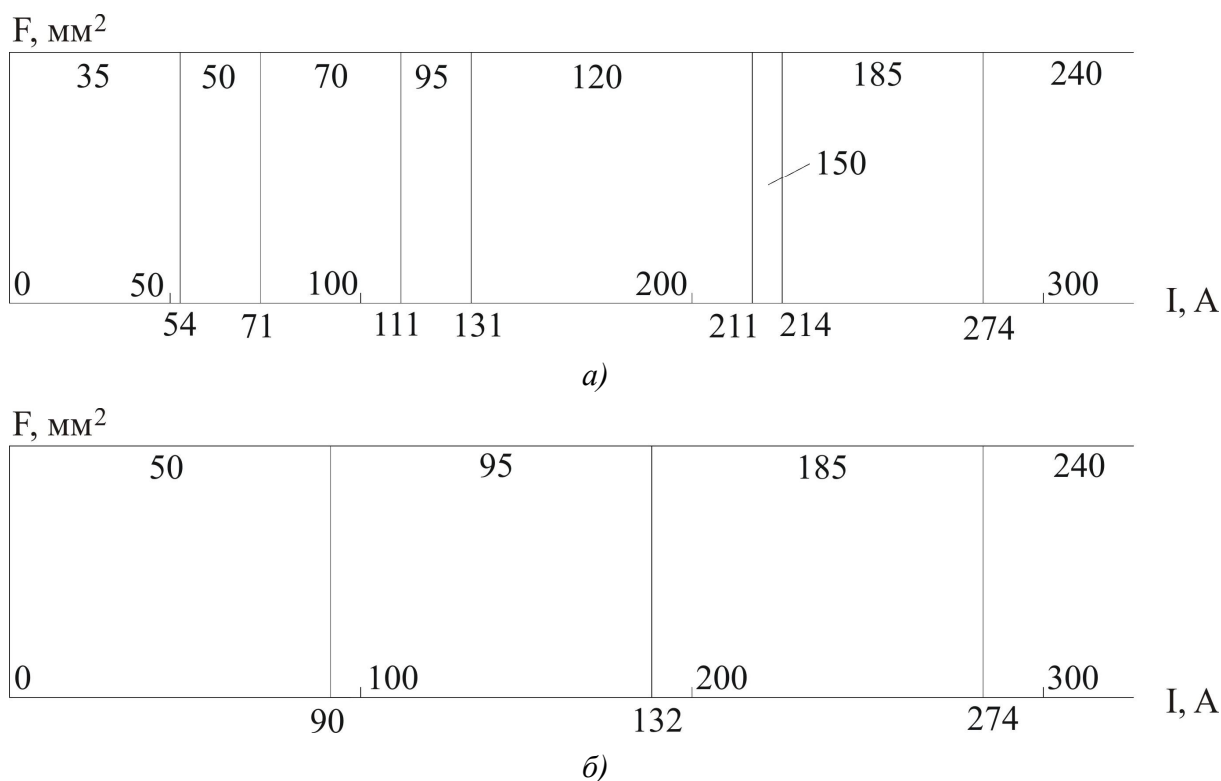
$$I_{\text{гп}} = \sqrt{\frac{E_n + p_a}{3 \cdot \tau \cdot c_0 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{i+1} - K_i}{r_{0i} - r_{0i+1}}} = A \cdot \sqrt{\frac{\delta K}{\delta r_0}} . \quad (4)$$

Задаваясь пределами изменения параметров в формуле (4), представляется возможность оценить степень их влияния на изменение значений экономических интервалов и таким образом подойти более объективно к решению задачи выбора параметров линий электропередачи. Было исследовано влияние некоторых экономических параметров на изменение экономических интервалов $I_{\text{гп}} = f(K, c_0, T_m)$. Оказалось, что наибольшее влияние оказывает изменение числа часов использования максимума нагрузки T_m .

Сечения, выбранные методом экономических интервалов, позволяют снизить потери активной мощности в несколько раз по сравнению с сечениями, выбранными по величине нормированной экономической плотности тока. Внедрение метода экономических интервалов можно рассматривать как заметный вклад в решение проблемы энергосбережения [2]. Так, например, при расчетном токе $I_p = 60 \text{ А}$ и $T_m = 1000 \text{ ч}$ экономически оправданным сечением будет 3х35, при $T_m = 3000 \text{ ч}$ – 3х50 и при $T_m = 5000 \text{ ч}$ – 3х70 мм².

На рисунке 1а приведены экономические интервалы тока для КЛ-10кВ при $T_m = 3000 \text{ ч}$ и $c_0 = 0,3 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч}$ для стандартного ряда сечений. Анализируя рисунок 2а, можно заметить, что ширина экономических интервалов для отдельных сечений заметно отличается друг от друга. Так, для сечения 150 мм² практически нет экономического интервала, так как его ширина составляет всего 3А, в то время как сечение 120 мм² имеет ширину интервала, равную 80А. Меньшую ширину интервала по сравнению с другими имеют сечения 50 и 95 мм².

Стремление создать более равномерные и равноценные характеристики экономических интервалов шкалы стандартных сечений подводит к мысли о разработке нового унифицированного ряда стандартных сечений. Здесь под унификацией понимается рациональное сокращение излишнего многообразия типов, типоразмеров изделий и их частей. На рисунке 1б показаны экономические интервалы для трех унифицированных сечений (50, 95, 185), ширина которых при $T_m = 3000 \text{ ч}$ соответственно составила 90, 92, 92 А, при $T_m = 5000 \text{ ч}$ – 61, 63, 62.



а) для стандартной шкалы сечений;

б) для унифицированной шкалы сечений

Рис. 1. Экономические интервалы КЛ-10 при $T_{\text{м}} = 3000 \text{ ч}$ и $c_0 = 0,3 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$

Был проведен анализ изменения суммарных приведенных затрат Z_{Σ} для двух вариантов выбора экономических сечений КЛ-10кВ из стандартного ряда сечений (вариант 1) и унифицированного ряда сечений (вариант 2). Как видно из результатов проведенных расчетов, суммарные затраты при выборе экономических сечений оказались практически одинаковыми (табл. 1) при расхождении на 3-4 %.

Таблица 1

Результаты сравнения расчетов Z_{Σ}

Номер варианта	Сечение, мм^2	Суммарные затраты Z_{Σ} , грн
1	35,50,70	33858
2	50,50,50	35511
1	70,95,120	56295
2	95,95,95	58145
1	120,150,185	86032
2	185,185,185	88200

Сокращение количества используемых стандартных сечений позволит оптимизировать проектирование и сооружение кабельных линий, обеспечит сокращение запасов резервного электрооборудования, создаст дополнительные удобства в организации эксплуатации сети. Ограниченное количество применяемых сечений позволит осуществлять их выбор исходя из назначения проектируемых линий в системах электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельских районов. Ограничения по нагреву

для унифицированных сечений КЛ, выбранных по экономическим интервалам, оказались не активными как для нормального, так и для послеаварийного режимов.

При разработке методик и конкретных рекомендаций по унификации параметров электрических сетей следует подразумевать экономически целесообразные или оптимальные решения.

В распределительных электрических сетях часто встречаются случаи, когда вдоль магистральных линий происходит до 4-5 и более отборов мощности при сравнительно небольших расстояниях между ними. По условиям удобства монтажа и эксплуатации нежелательно иметь на одной линии несколько разных сечений. В этом случае целесообразно выбирать одно сечение по всей длине линии $F = const$, но такое, которое по экономическим показателям было бы эквивалентно реальной линии с различными экономически выбранными сечениями на отдельных участках. Это можно осуществить с помощью эквивалентного тока $I_{эк}$ [2].

Эквивалентный ток $I_{эк}$ – это такой условный ток нагрузки, который, будучи приложенным в конце линии длиной L с сечением $F = const$, вызывает в ней такие же потери мощности, как и в реальной линии с разными экономическими сечениями F_i на отдельных участках.

$$I_{эк} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (5)$$

где I_i – расчетный ток на i -м участке линии; l_i – длина i -го участка линии.

Сечения проводов и жил кабелей, выбранные по экономическим соображениям, должны быть проверены по техническим ограничениям. Если технические ограничения не удовлетворяются, это вынуждает увеличить ранее выбранное экономическое сечение. Вариант, который соответствует ограничениям, считается предпочтительным.

В рассмотренных выше задачах выбора сечений проводов и кабелей с помощью экономических интервалов и при унификации стандартного ряда сечений использовался метод приведенных затрат. Однако среди некоторых специалистов распространено мнение о том, что критерий минимума приведенных (дисконтированных) затрат утратил в новых экономических условиях свое назначение, поскольку вопросы экономического обоснования вариантов должны решаться на основе критерия чистой прибыли.

Поэтому следует еще раз наглядно показать, что методы технико-экономических расчетов и нормативные документы, которые основаны на методе приведенных затрат [5, 6, 7], разработанные при плановой экономике, в современных условиях не потеряли научной и практической ценности и их следует применять и использовать. Здесь рассматриваются исключительно вопросы сравнительной технико-экономической оценки альтернативных вариантов в электрических сетях систем электроснабжения и не затрагиваются коммерческие инвестиции с целью прибыльного размещения капитала. Критерий приведенных затрат не следует также использовать при планировании и отчетности. Они удобны только для сравнения равноценных вариантов между собой и выбора наилучшего.

Рассмотрим основные показатели [8], которые используются в технико-экономических расчетах:

- экономический эффект $\mathcal{E}$ определяется как разница между результатом P (доходом) и затратами $З$:

$$\mathcal{E} = P - З, \text{ грн;} \quad (6)$$

- экономическая эффективность $\bar{\mathcal{E}}$ – это объем результата на единицу затрат:

$$\bar{\mathfrak{E}} = \frac{P}{3}; \quad (7)$$

– рентабельность R – это отношение прибыли Π_p к капиталовложениям K :

$$R = \frac{\Pi_p}{K}; \quad (8)$$

– срок окупаемости $T_{ок}$ или период возврата капитала $T_{воз}$ это термин, за который инвестиции окупятся за счет увеличения дохода:

$$T_{ок} = T_{воз} = \frac{K}{P}; \quad (9)$$

– приведенные затраты 3 – расходная составляющая экономического эффекта, которую удобно использовать для сопоставления эффективности нескольких вариантов инвестиционного проекта при условии идентичности результатов:

$$3 = E_n \cdot K + И \rightarrow \min \quad (10)$$

Наряду с задачами определения коммерческой эффективности проектов (6,7,8) имеется класс электросетевых задач, которые решаются на основе сравнительной экономической эффективности вариантов путем расчета приведенных затрат (10). Здесь условия приложения инвестиций заранее предопределены и цель расчета состоит в том, чтобы из ряда сравниваемых вариантов выбрать наилучший по критерию минимума приведенных затрат, что гарантирует при равенстве результатов одновременно максимум прибыли.

Справедливость последнего утверждения наглядно видна из анализа приведенных показателей экономичности. Так наибольший экономический эффект (6) будет иметь место при минимуме затрат $3 = \min$. Экономическая эффективность $\bar{\mathfrak{E}}$ (7) будет наибольшей также при $3 = \min$, так как величина $3 = \min$ в формуле (7) стоит в знаменателе. Период возврата капитала и срок окупаемости (9) по определению представляют одинаковые понятия.

Следовательно, нет оснований для противопоставления критериев максимума прибыли и минимума приведенных затрат [9]. Просто у каждого из этих критериев есть своя область применения. Критерий максимума прибыли характеризует коммерческую эффективность проекта, когда инвестор ставит своей целью получить максимальную прибыль и ему все равно, что строить. При решении задач сравнительной экономической эффективности, когда область вложения капитала предопределена, более удобным является критерий минимума затрат.

Выводы

1. Экономически обоснованный выбор параметров линий электропередачи по своей массовости и значимости может быть отнесен к наиболее ответственным задачам. Недостаточное научное обоснование технико-экономической модели задачи и неадекватность модели реальным условиям может приводить к ощутимым погрешностям расчета и значительному ущербу.

2. Централизованные нормированные экономические плотности тока не имеют достаточного научного и методического обоснования и установлены еще в 50-х годах прошлого столетия. Поэтому использование их при выборе экономических сечений не может быть рекомендовано, а следует применять метод экономических интервалов.

3. Метод экономических интервалов позволяет учитывать дискретность шкалы стандартных сечений и получать однозначные решения. Метод дает возможность анализировать и получать более достоверные и экономически обоснованные решения индивидуально для каждого расчета и тем самым способствовать решению проблемы ресурсо- и энергосбережения в условиях рыночных отношений.

4. Унификация стандартных сечений линий электропередачи напряжением 6-10 кВ позволит типизировать проектирование электрических сетей систем электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельских районов, сократить запасы резервного электрооборудования, улучшить условия строительства и эксплуатации.

5. Расчет магистральных линий с отбором мощности по ее длине следует производить, используя понятие эквивалентного тока, что позволяет получить экономически обоснованные постоянные сечения по всей длине магистрали.

6. Методы, информационные технологии, нормативные документы, которые основывались на критерии приведенных затрат и использовались в условиях административно-плановой экономики, в современных условиях рыночных отношений в Украине не утратили научной и практической ценности и их можно использовать.

7. Неразрешимых противоречий между показателями, гарантирующими максимум прибыли, и приведенными затратами нет, поскольку минимизация затрат приводит к максимизации прибыли. Просто у каждого из этих критериев есть своя область применения.

Список литературных источников

1. Вааг Л.А., Захаров С.Н. Методы экономической оценки в энергетике. – М., Л.: ГЭИ, 1962. – 270 с.
2. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. – Чернигов, 2005. – 341 с.
3. Правила устройства электроустановок /Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
4. Зуев Э.Н., Ефентьев С.Н. Задачи выбора экономически целесообразных сечений проводов и жил кабелей. – М.: МЭИ, 2005. – 88 с.
5. Бебко В.Г. Економічне обґрунтування технічних рішень в електричних мережах //Енергетика и электрификация. – 2000. – Спецвыпуск. – С. 4-11.
6. Мисриханов М.Ш., Мозгалева К.В., Неклепаев Б.Н., Шунтов А.В. О технико-экономическом сравнении вариантов электроустановок при проектировании //Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 2-8.
7. ГКД 340.000.002. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі. – К.: Міністерство України, 1997. – 53 с.
8. Круш П.В., Подвігіна Б.М., Сердюк Б.Н. Економіка підприємства. – К.: Ельга, 2007. – 718 с.

УДК 621.311

А.О. Квицинський, канд. техн. наук

Науково-технічний центр електроенергетики НЕК «Укренерго», м. Київ, Україна

ЩОДО НОВОЇ РЕДАКЦІЇ ГЛАВИ 1.5 «ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ» ПРАВИЛ УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Наведено основні положення нової редакції глави 1.5 правил улаштування електроустановок України.

Чинна редакція глави 1.5 Облік електроенергії Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) була затверджена Головтехуправлінням і Держенергонаглядом Міністерства енергетики та теплоенергетики України у 1977 році. Зміни, що відбулися з моменту її затвердження як у суспільному житті, так і у функціональних можливостях засобів вимірювальної техніки, давно вимагали перегляду вимог до улаштування вимірювальних комплексів, використовуваних в електроенергетиці. Поява пов'язаних з главою 1.5 ПУЕ нових нормативно-правових актів зумовила певні особливості викладення пропонованих змін. Структура проекту нової редакції глави 1.5 ПУЕ не зазнала змін.

У проекті нової редакції глави 1.5 ПУЕ пункти, що зазнали суттєвих змін, викладено у наступній редакції:

1.5.1. Ця глава Правил містить вимоги до **вимірювальних комплексів** у разі улаштування **обліку електроенергії** в електроустановках. Додаткові вимоги до улаштування **обліку електроенергії** встановлено Правилами користування електричною енергією (далі – ПКЕЕ), Інструкцією з комерційного обліку електричної енергії (далі – ІКОЕ), ДБН В.2.5-23:2009 Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення, Регламентом учета межгосударственных перетоков электроэнергии ИКЭС-Р-005-2008 та чинними нормативно-правовими актами.

1.5.2. Нижче подано терміни, використані у цій главі, і визначення означених ними понять.

Вимірювальний комплекс (ВК) – сукупність **засобів вимірювальної техніки** (далі – ЗВТ, до яких відносяться трансформатори струму, трансформатори напруги, лічильники електроенергії) та допоміжного обладнання (засоби зберігання і передачі даних, збірки затискачів тощо), з'єднаних між собою за встановленою схемою і призначених для вимірювання та обліку електроенергії, характеристики яких є достатніми для здійснення вимірювання електричної енергії у **точці вимірювання** із заданими періодичністю та похибкою. У передбачених нормативно-правовими актами випадках або за наявності техніко-економічного обґрунтування ВК об'єднують у **систему обліку**.

Система обліку (СО) – сукупність ВК, каналів зв'язку, апаратного та програмного забезпечення, а також баз **даних обліку**, функціонально об'єднаних з метою забезпечення збору, обробки та передачі **результатів вимірювань** та формування **даних обліку**. Тут і далі поняття використовуються у таких значеннях:

результат вимірювання – значення фізичної величини, знайдене шляхом її вимірювання;

дані обліку – значення облікових показників, що отримані в процесі здійснення обліку електроенергії;

облік електроенергії – процес формування даних обліку для забезпечення фінансових розрахунків на ринку електричної енергії або контролю витрати електроенергії в технологічних процесах.

СО, їх складові і дані, які використовуються для комерційних розрахунків, називають розрахунковими (комерційними).

СО, їх складові і дані, які використовують для контролю витрати електроенергії в технологічних процесах на електростанціях, підстанціях, підприємствах, у будівлях тощо, називають технічними (контрольними).

Точка вимірювання (ТВ) – місце в електричній мережі, в якому за допомогою ВК здійснюється вимірювання електричної енергії.

Лічильник електроенергії інтервальний – лічильник електроенергії, який вимірює і фіксує сукупне (інтегральне) значення електроенергії, що перетікає через точку вимірювання на початок і кінець **періоду інтеграції або за період інтеграції**.

Період інтеграції – інтервал часу, за який вимірюється і фіксується кількість електроенергії.

Технічні умови на приєднання до електричних мереж (ТУ) – комплекс умов і вимог до ВК, встановлений власником мереж, до яких здійснюється приєднання.

1.5.3. У цій главі використано терміни, установлені Законом України «Про електроенергетику»: електропередавальна організація; Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність»: уповноважений орган; ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення: повірочне тавро.

1.5.4. Встановлювані ЗВТ повинні бути дозволені до використання в Україні та мати чинні повірочні тавра уповноваженого органу.

Технічні характеристики складових ВК повинні відповідати умовам використання і ТУ.

За наявності зустрічних перетікань електроенергії в точці вимірювання лічильники повинні вимірювати і фіксувати кількість електроенергії для кожного напрямку окремо.

1.5.13. Кожний установлений розрахунковий лічильник повинен мати на гвинтах, які кріплять кожух лічильника, пломбу з чинним повірочним тавром уповноваженого органу, а на затискній кришці – пломбу електропередавальної організації (у разі спільного використання лічильника двома юридичними особами – пломби обох сторін).

1.5.14. Облік електроенергії трифазного струму потрібно виконувати трифазними лічильниками; облік електроенергії однофазного струму потрібно виконувати однофазними лічильниками прямого вмикання.

Основні і дублюючі лічильники повинні бути одного класу точності і мати однакові функціональні можливості, суттєві для здійснення обліку. Струмові кола основних і дублюючих лічильників потрібно приєднувати, як правило, до різних вторинних обмоток трансформаторів струму і трансформаторів напруги.

1.5.15. Класи точності і технічні характеристики лічильників електроенергії (розрахункових і технічних) повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів і бути не гіршими, ніж наведені в таблиці 1.

1.5.16. Класи точності вимірювальних обмоток трансформаторів струму і трансформаторів напруги для приєднання розрахункових лічильників електроенергії повинні відповідати вимогам чинних нормативно-правових актів і бути не гіршими, ніж наведені в таблиці 2.

Дозволено використовувати комбіновані трансформатори (блоки трансформаторів струму-трансформаторів напруги), клас точності яких відповідає вимогам таблиці 2.

У разі встановлення дублюючих лічильників трансформатори струму повинні мати не менше двох вторинних обмоток для вимірювання необхідного класу точності.

Таблиця 1

Класи точності і технічні характеристики лічильників електроенергії

Напруга, кВ	Приєднана потужність	Наявність функцій інтервального обліку і дистанційного зчитування показів	Клас точності лічильника енергії	
			активної	реактивної
220÷750	понад 50 МВт	так	0,2S	2
	до 50 МВт включно	так	0,5S	2
110÷150	понад 50 МВт	так	0,2S	2
	до 50 МВт включно	так	0,5S	2
6÷35	понад 1 МВт	так	0,5S	2
	від 150 кВт до 1 МВт	так	1,0	2
	до 150 кВт	згідно з ТУ	1,0	2
0,4	понад 50 кВт	згідно з ТУ	1,0	2
	до 50 кВт включно	згідно з ТУ	2,0	3

Таблиця 2

Класи точності вимірювальних обмоток трансформаторів струму і трансформаторів напруги

Напруга, кВ	Приєднана потужність	Клас точності вимірювальної обмотки трансформатора	
		струму (ТС)	напруги (ТН)
220÷750	понад 50 МВт	0,2S	0,2
	до 50 МВт включно	0,5S	0,5
110÷150	понад 50 МВт	0,2S	0,2
	до 50 МВт включно	0,5S	0,5
6÷35	понад 1 МВт	0,5S	0,5
	від 150 кВт до 1 МВт	0,5S	0,5
	до 150 кВт	0,5S	0,5
0,4	понад 50 кВт	0,5S	-
	до 50 кВт включно	-	-

1.5.17. Дозволено застосовувати трансформатори струму із завищеним коефіцієнтом трансформації (за умов електродинамічної та термічної стійкості або захисту шин), якщо в разі максимального навантаження приєднання струм у вторинній обмотці трансформатора струму складатиме не менше 40 % номінального струму лічильника, а в разі мінімального робочого навантаження – не менше 5 % (у разі застосування ТС і лічильників з літерою S – не менше 1 %).

Станом на жовтень 2010 року проект нової редакції глави 1.5 ПУЕ надіслано на відгук.

Список літературних джерел

1. Правила устройства электроустановок /Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Правила користування електричною енергією. Затверджено постановою Національної комісії регулювання електроенергетики України від 31 липня 1996 р. № 28 (у редакції постанови НКРЕ від 17 жовтня 2005 р. № 910).
3. ДБН В.2.5-23:2009. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення.
4. Регламент учета межгосударственных перетоков электроэнергии. ИКЭС-Р-005-2008.
5. Закон України «Про електроенергетику».
6. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність».
7. ДСТУ 2681-94 Метрологія. Терміни та визначення: повірочне тавро.

УДК 621.316.21.001

П.Д. Лежнюк^{*}, д-р техн. наук**В.В. Кулик**^{*}, канд. техн. наук**О.А. Ковальчук**^{**}, директор**В.О. Хоменко**^{*}, магістрант^{*}Вінницький національний технічний університет, ^{**}ТОВ «Енергоінвест», м. Вінниця, Україна

РОЗОСЕРЕДЖЕНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Робота присвячена аналізу впливу альтернативних джерел електроенергії, розміщених в розподільних електричних мережах, на їх режими. Показано вплив розосередженого генерування в електричних мережах на втрати потужності та електроенергії в них. Запропоновано метод визначення втрат потужності в мережах від адресних потоків електроенергії.

Вступ

Останні роки і на перспективу в Україні спостерігається тенденція переходу від чисто централізованого електропостачання до комбінованого, коли зростає кількість місцевих джерел електроенергії. Причому частка останніх в енергобалансі енергосистем зростає. До місцевих джерел електроенергії, що працюють безпосередньо в мережах 10–6–0,4 кВ, відносяться як традиційні джерела невеликої потужності, так і альтернативні. Як альтернатива традиційним розвиваються відновлювані джерела електроенергії (ВДЕ) (вітрові електростанції та малі гідроелектростанції), когенераційні установи та ін.

Разом з тим електричні мережі (ЕМ) енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання. Розбудова в них розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) породжує нові нехарактерні для минулого періоду задачі [1]. Окрім того, слід враховувати, що одночасно змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема, перехід від оптового ринку електроенергії до балансувального ринку електроенергії та електропостачання за двосторонніми угодами. Отже, актуальним є дослідження впливу розосередженого генерування електроенергії на режими електричних мереж.

Метою даної роботи є дослідження впливу розосереджених джерел електроенергії в електричних мережах на втрати потужності та електроенергії в них за різних умов експлуатації.

Вплив РДЕ на втрати потужності та електроенергії в розподільних мережах

Важливим напрямком обґрунтування ефективності РДЕ є дослідження їх впливу на втрати електроенергії у розподільних мережах. Очевидно, що на значення втрат впливають як параметри РДЕ, так і схема їх приєднання, а також значення та графік споживання суміжних навантажень.

Виходячи з типових схем приєднання РДЕ до розподільних мереж, за певних потужностей генерування вони частково компенсують потоки потужності, зумовлені навантаженням споживачів, і надходження електроенергії з боку системи зменшується. Разом з цим зменшуються втрати електроенергії в розподільних мережах:

$$\Delta W = \frac{S_{\text{сист}}^2}{U_n^2} r_{\text{ек}} k_{\phi}^2 T_n = \frac{(P_{\text{нав}} - P_z)^2 + (P_{\text{нав}} \operatorname{tg} \varphi_n - P_z \operatorname{tg} \varphi_z)^2}{U_n^2} r_{\text{ек}} k_{\phi}^2 T_n, \quad (1)$$

де $S_{\text{сист}}$ – повна потужність, що надходить до шин приєднання РДЕ з боку системи у режимі середніх навантажень; P_z , $P_{\text{нав}}$ – середні потужності, відповідно, РДЕ та суміжного навантаження; U_n – номінальна напруга ЕМ; $r_{\text{ек}}$ – еквівалентний опір ЕМ, визначений з урахуванням приведення навантажень до U_n ; k_{ϕ} – коефіцієнт форми графіка нава-

нтаження споживачів, суміжних з РДЕ; T_n – тривалість звітної періоду.

Вирази для наближеного визначення втрат електроенергії в ЕМ залежно від типу та потужності генераторів РДЕ мають такий вигляд:

– для випадку застосування синхронних генераторів (СГ)

$$\Delta W_{CG} = \frac{P_{\varepsilon}^2 (1 + tg^2 \varphi_{\varepsilon}) + P_{нав}^2 (1 + tg^2 \varphi_n)}{U_n^2} r_{ек} k_{\phi}^2 T_n - \frac{2 P_{\varepsilon} P_{нав} (1 + tg \varphi_{\varepsilon} tg \varphi_n)}{U_n^2} r_{ек} k_{\phi}^2 T_n; \quad (2)$$

– для випадку застосування асинхронних генераторів (АГ)

$$\Delta W_{AG} = \frac{P_{\varepsilon}^2 + P_{нав}^2 (1 + tg^2 \varphi_n) - 2 P_{\varepsilon} P_{нав}}{U_n^2} r_{ек} k_{\phi}^2 T_n. \quad (3)$$

З метою оцінки міри впливу різних типів генераторів РДЕ на втрати електроенергії в розподільних мережах введено коефіцієнти впливу, що характеризують відношення втрат електроенергії в ЕМ до та після введення розосередженого генерування в експлуатацію:

$$k_{\Delta W_{CG}} = 1 + \frac{P_{\varepsilon}^2 (1 + tg^2 \varphi_{\varepsilon})}{P_{нав}^2 (1 + tg^2 \varphi_n)} - 2 \frac{P_{\varepsilon} (1 + tg \varphi_{\varepsilon} tg \varphi_n)}{P_{нав} (1 + tg^2 \varphi_n)} \approx \left(\frac{P_{\varepsilon}}{P_{нав}} - 1 \right)^2; \quad (4)$$

$$k_{\Delta W_{AG}} = 1 + \frac{P_{\varepsilon}^2}{P_{нав}^2 (1 + tg^2 \varphi_n)} - 2 \frac{P_{\varepsilon}}{P_{нав} (1 + tg^2 \varphi_n)} = \left(\frac{P_{\varepsilon}}{P_{нав}} - 1 \right)^2 \cos^2 \varphi_n + \sin^2 \varphi_n. \quad (5)$$

З наведених виразів видно, що збільшення втрат в розподільних мережах за рахунок роботи РДЕ буде мати місце лише у випадку, коли середня потужність генерації станції буде перевищувати аналогічний показник суміжного навантаження удвічі.

Оцінити вплив джерел енергії на втрати потужності у вітках ЕМ можливо за результатами розрахунків усталених режимів. Проте, виділити в цих втратах складову від РДЕ є проблематично. Складність задачі оцінки впливу режимів роботи РДЕ на втрати потужності в ЕМ полягає в тому, що втрати потужності залежать від перетоків у вітках схеми мережі нелінійно і скористатися методом накладання неможливо. В інженерній практиці використовується ряд методів, що дозволяють виконувати розрахунок зазначеної складової втрат як з однозначно заданою інформацією, так і з імовірнісно-статистичним оцінюванням втрат [2]. Використання даних методів в розімкнених розподільних мережах, як правило, призводить до виникнення похибки, допустимої на етапі планування режимів ЕМ. Однак, у замкнених розподільних ЕМ збільшується вплив нелінійності функції втрат потужності, що може викликати суттєві помилки обчислення додаткових технічних втрат електроенергії у випадку відхилення режиму ЕМ від планового.

В [3] показано, що втрати потужності у вітках ЕМ визначаються як

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_B = \dot{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{S}}, \quad (6)$$

де $\Delta \dot{\mathbf{S}}_B$ – вектор втрат потужності у вітках схеми; $\dot{\mathbf{M}}$ – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми ЕМ в залежності від потужності у її вузлах $\dot{\mathbf{S}}$.

В (6) втрати потужності в i -й вітці визначаються:

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \mathbf{m}_i \dot{\mathbf{S}}, \quad (7)$$

де $\dot{\mathbf{m}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_{\Sigma i}) \mathbf{E}_i \dot{\mathbf{U}}_o^{-1}$; $\dot{\mathbf{U}}_i$, $\mathbf{E}_o$ – транспонований вектор та діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і базисний; $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ – вектор-стовпець матриці з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансуєчий; $\mathbf{E}_i$ – i -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах по вітках схеми.

Вектор-рядок $\mathbf{m}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних

втратах в i -й вітці складає протікання по ній потужності від кожного вузла, в тому числі і від РДЕ.

Зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів заступної схеми, які за певних припущень можна вважати постійними, а також від значень напруги у вузлах ЕМ, які визначаються навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином, нелінійність залежності втрат потужності в ЕМ від параметрів її режиму враховується. Визначення коефіцієнтів матриці $\dot{\mathbf{M}}$ через поточні значення вузлових напруг по суті означає лінеаризацію режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях у вузлах.

Таким чином, для випадку, коли зміна потужностей у вузлах ЕМ є незначною, тобто не викликає істотних (не більше 1%) відхилень напруги у вузлах, залежність втрат потужності в ЕМ від потужностей у її вузлах можна вважати лінійною. Отже, для дослідження впливу РДЕ на втрати потужності в розподільних мережах з прийнятною точністю можна використовувати метод накладання згідно (7).

Визначення адресних втрат потужності від РДЕ

В умовах електропостачання за двосторонніми договорами виникає задача визначення втрат потужності та електроенергії, що викликані адресною передачею електроенергії від джерела (в тому числі і РДЕ) до споживача. Виділити цю складову втрат (адресних) з сумарних технічних втрат електроенергії в електричній мережі можна, скориставшись виразами для визначення втрат потужності у вітках (6) та (7).

Сумарні втрати потужності в ЕМ від РДЕ визначаються:

$$\Delta \dot{S}_{pd} = \dot{\mathbf{M}}_j \dot{\mathbf{S}}_j, \quad j \in \mathbf{M}_{pd}, \quad (8)$$

де $\dot{\mathbf{S}}_j$ – вектор потужностей РДЕ; $\mathbf{M}_{pd}$ – множина вузлів з РДЕ.

Втрати у вітках, через які здійснюються адресні потоки електроенергії від j -го РДЕ до k -го споживача, визначаються на підставі (7):

$$\Delta \dot{S}_{ei} = \mathbf{m}_i \dot{\mathbf{S}}_j, \quad i \in \mathbf{M}_{kj}, \quad (9)$$

де $\dot{\mathbf{S}}_j$ – вектор потужностей вузлів, у якому тільки в j -му вузлі задана потужність, а в решті нулі; $\mathbf{M}_{kj}$ – множина віток, що безпосередньо зв'язують вузли j -й і k -й.

В розподільних мережах, які переважно є радіальними, втрати від адресних перетоків визначаються простіше. За відомих потужностей навантаження $\dot{S}_i$ та напруг у вузлах $\dot{U}_i$ можна визначити, задаючи струми вузлів ЕМ:

$$J_i = \frac{\dot{S}_{pi}}{\sqrt{3}\dot{U}_i}, \quad (10)$$

де $\dot{S}_{pi}$ – розрахункова потужність навантаження та генерування у вузлі з РДЕ.

Лінійна модель нормального режиму, що отримана як результат представлення навантаження та генерування вузлів ЕМ у вигляді розрахованих задаючих струмів, еквівалентна нелінійній моделі електричної мережі для даного моменту часу [4]. Як приклад, розглянемо найпростішу схему розподільної електричної мережі (рис. 1), в якій здійснюється адресна передача потужності $\dot{S}_{ao}$ від РДЕ, наприклад, малої ГЕС (вузол 3) до споживача електроенергії (вузол 4). Навантаження вузлів ЕМ задається незмінними за модулем та фазою струмами, визначеними згідно (10).

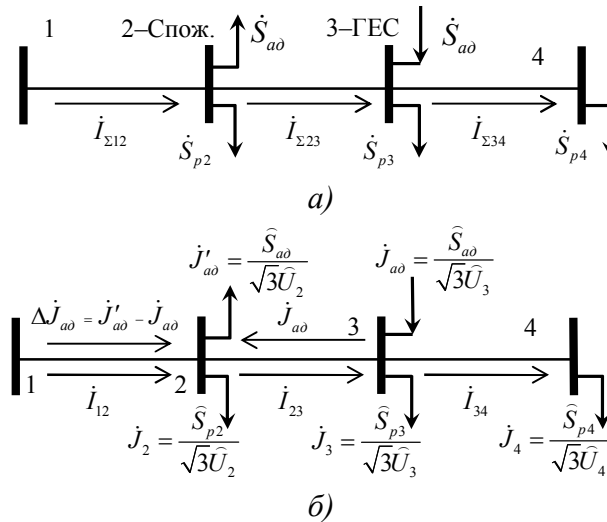


Рис. 1. Схема адресного перетоку потужності

Згідно з методом накладання струм в лінії 2-3 $\dot{I}_{\Sigma 23}$ можна подати у вигляді зустрічно скерованих часткових струмів $\dot{I}_{23}$ та $\dot{J}_{ad}$, що зумовлені, відповідно, навантаженнями споживачів ЕМ та адресним перетоком потужності. Для даного випадку частковий струм $\dot{I}_{23} = \dot{J}_3 + \dot{J}_4$. Таким чином, втрати потужності у даній ЛЕП будуть:

$$\Delta \dot{S} = 3 \cdot |\dot{I}_{\Sigma 23}|^2 \cdot \dot{Z}_{23} = 3 \cdot |\dot{I}_{23} - \dot{J}_{ad}|^2 \cdot \dot{Z}_{23}$$

або

$$\Delta \dot{S} = 3 \cdot \left[(I'_{23} - J'_{ad})^2 + (I''_{23} - J''_{ad})^2 \right] \cdot \dot{Z}_{23},$$

де I' , I'' – активна та реактивна складові часткових струмів.

Останній вираз можна звести до вигляду, коли значення втрат потужності в лінії 2-3 від усіх часткових струмів будуть визначатися:

$$\Delta \dot{S}_{23} = 3 \cdot \left[I'^2_{23} \left(1 - \frac{J'_{ad}}{I'_{23}} \right) + J'^2_{ad} \left(1 - \frac{I'_{23}}{J'_{ad}} \right) + I''^2_{23} \left(1 - \frac{J''_{ad}}{I''_{23}} \right) + J''^2_{ad} \left(1 - \frac{I''_{23}}{J''_{ad}} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{23},$$

або від навантажень ЕМ та адресного перетоку потужності окремо:

$$\Delta \dot{S}_{23} = \Delta \dot{S}_{23_нав} + \Delta \dot{S}_{23_ad};$$

$$\Delta \dot{S}_{23_нав} = 3 \cdot \left[I'^2_{23} \left(1 - \frac{J'_{ad}}{I'_{23}} \right) + I''^2_{23} \left(1 - \frac{J''_{ad}}{I''_{23}} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{23}; \quad (11)$$

$$\Delta \dot{S}_{23_ad} = 3 \cdot \left[J'^2_{ad} \left(1 - \frac{I'_{23}}{J'_{ad}} \right) + J''^2_{ad} \left(1 - \frac{I''_{23}}{J''_{ad}} \right) \right] \cdot \dot{Z}_{23}.$$

Останній вираз можна узагальнити на довільну кількість віток на шляху між учасниками адресного перетоку потужності (малою ГЕС та заданим споживачем). Для втрат активної потужності матимемо такий вираз:

$$\Delta P_{ad} = 3 \sum_{i \in M_{kj}} \left[J'^2_{ad} \left(1 - \frac{I'_i}{J'_{ad}} \right) + J''^2_{ad} \left(1 - \frac{I''_i}{J''_{ad}} \right) \right] \cdot R_i, \quad (12)$$

де i – номер вітки електричної мережі; M_{kj} – множина віток схеми ЕМ на шляху між учасниками адресного перетоку потужності.

З (12) видно, що втрати потужності в ЕМ від часткового струму J_{a0} , зумовленого передачею потужності малої ГЕС, залежить не тільки від значення його складових, але і від значень інших часткових струмів, що протікають вітками ЕМ. Міру залежності адресних втрат від параметрів поточного режиму ЕМ характеризують коефіцієнти взаємовпливу:

$$\mu'_i = -\frac{I'_i}{J'_{a0}}; \quad \mu''_i = -\frac{I''_i}{J''_{a0}}. \quad (13)$$

Коефіцієнти взаємовпливу приймають значення в залежності від значення та напрямку часткових струмів, що протікають в i -й вітці. Нульові значення відповідають відсутності у даній вітці часткових струмів, крім J_{a0} . З урахуванням (13) вираз для визначення втрат потужності в ЕМ від адресної передачі потужності малої ГЕС може бути переписаний у такому вигляді:

$$\Delta P_{a0} = 3 \sum_{i \in M_{kj}} \left[J'^2_{a0} (1 + \mu'_i) + J''^2_{a0} (1 + \mu''_i) \right] \cdot R_i. \quad (14)$$

Наведений метод дозволяє визначити втрати потужності, зумовлені адресною передачею електроенергії електричними мережами від РДЕ до заданого споживача, а за наявності відповідного інформаційного забезпечення перейти до оперативного контролю вказаної складової втрат електроенергії в ЕМ.

Висновки

- Розосередження генерування електроенергії в розподільних електричних мережах змінює перетоки потужності в них, що впливає на параметри режиму, зокрема, на втрати електроенергії. Виділити втрати в мережах від РДЕ з сумарних втрат можна, використавши коефіцієнти розподілу втрат у вітках. Останні показують, яку частку в сумарних втратах в i -й вітці складає протікання по ній потужності від кожного вузла, в тому числі і від РДЕ.
- З використанням коефіцієнтів розподілу втрат у вітках електричної мережі визначаються також втрати потужності від адресних потоків потужності від РДЕ до споживачів. В складних електричних мережах використовується матриця коефіцієнтів розподілу втрат, яка визначається за результатами розрахунків ustalених режимів. В радіальних електричних мережах адресні втрати потужності можуть визначатися за спрощеною методикою, в основу якої покладена лінеаризована модель нормального режиму ЕМ.

Список літературних джерел

1. Кириленко О.В., Трач І.В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації //Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 3-7.
2. Стогний Б., Павловский В. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний //Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 5. – С. 26-31.
3. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Втрати потужності в електроенергетичних системах від транзитних перетікань //Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 3. – С. 26-33.
4. Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Burykin O.B. Electroenergy Systems Interference Analysis //Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET'05. – Lviv, Ukraine. – 2005. – P. 215-218.

УДК 621.316.1

П.Д. Лежнюк^{*}, д-р техн. наук**В.В. Кулик**^{*}, канд. техн. наук**А.Л. Поліщук**^{**}, заст. директора**В.Ю. Сидоренко**^{*}, магістрант^{*}Вінницький національний технічний університет, ^{**}Вінницькі міські електричні мережі, м. Вінниця, Україна

ФОРМУВАННЯ ЗАХОДІВ З КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ПІДСТАВІ НЕЧІТКОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Робота присвячена аналізу особливостей визначення місць встановлення та потужностей додаткових джерел реактивної потужності (ДРП) у розподільних електричних мережах за комплексним критерієм оптимальності. Представлено методику розв'язання вказаної задачі, що базується на проведенні багатокритеріального аналізу з врахуванням кількісних та якісних показників ефективності. На підставі аналізу чутливості втрат потужності показано, що технічні та організаційні обмеження щодо встановлення ДРП можуть призводити до суттєвого зниження потенційного ефекту від компенсації реактивної потужності.

Вступ

Через складність електричних мереж (ЕМ), істотно нерівномірний графік відпуску електроенергії споживачам, велику кількість перемикачів, що виконуються для підтримання працездатності ЕМ та забезпечення безперервного живлення споживачів, визначення втрат електроенергії у таких мережах є достатньо складною задачею [1-3]. Очевидно, що більш складною задачею є планування та реалізація заходів з підвищення ефективності функціонування ЕМ.

Досвід експлуатації ЕМ 10/0,4 кВ показує, що протягом останніх років за рахунок впровадження ряду організаційних та технічних заходів було досягнуто значне зниження балансових втрат. Для виконання даного завдання, в основному, використовувалися організаційно-технічні заходи, скеровані на впорядкування енергообліку та розрахунків за корисно відпущеною електроенергією.

Розроблення технічних заходів, що скеровані на вдосконалення процесів передачі та розподілу електроенергії, вимагає більш глибокого аналізу. Тут необхідною є організація по-елементних розрахунків втрат електроенергії, які дозволяють відтворити реальну картину і об'єктивно структурувати втрати. Це, в свою чергу, дає можливість встановити дійсні причини підвищених втрат і розробити адекватні заходи щодо їх зменшення.

З аналізу електроощадних заходів у розподільних електричних мережах відомо, що одним з найбільш ефективних є встановлення додаткових джерел реактивної потужності, які, зменшуючи відповідні перетоки по ЛЕП та силових трансформаторах, забезпечують зменшення втрат та підвищення якості електроенергії. Однак ефективне розроблення заходів з компенсації реактивної потужності потребує розроблення нових та вдосконалення існуючих розрахункових алгоритмів, які б враховували не тільки особливості передачі електроенергії розподільними мережами, а й конструктивні та експлуатаційні їх особливості.

Впровадження додаткових ДРП вимагає значних капітальних вкладень, що можуть бути залучені лише у випадку забезпечення їх достатньої економічної ефективності. Отже, необхідно визначати послідовність встановлення на кожному фідері 10(6)/0,4 кВ ДРП, що забезпечує максимальну техніко-економічну ефективність функціонування ЕМ по завершенні окремих етапів їх реконструкції. Розв'язок даної задачі має носити системний характер, тобто потребує попереднього аналізу технічного забезпечення умовно-незалежних ЕМ 10(6)/0,4 кВ (окремих районів електромереж), формування узагальненого критерію ефективності електроощадних заходів та прийняття, на його підставі, оптимального рішення у вигляді послідовності елементів електричних мереж, що

підлягають реконструкції (оснащенню ДРП).

Аналіз чутливості втрат потужності в розподільних мережах до зміни потоків реактивної потужності

Розглянувши режим роботи розподільної електричної мережі (ЕМ) в довільний момент часу, за відомих потужностей навантаження $\dot{S}_i = P_i + jQ_i$ та напруг у вузлах $\dot{U}_i$ можна визначити задаючі струми вузлів ЕМ:

$$\dot{J}_i = \frac{(P_{Pi} - jQ_{Pi}) + jQ_{KVi}}{\sqrt{3}\dot{U}_i} = \dot{J}_{Pi} + \dot{J}_{KVi}, \quad (1)$$

де P_{Pi} , Q_{Pi} – розрахункові активна та реактивна потужності навантаження (генерації), що враховують власну потужність навантаження та зарядну потужність в суміжних лініях, Q_{KVi} – потужності встановлених компенсуювальних пристроїв.

Лінійна модель нормального режиму, що отримана за рахунок представлення навантаження та генерації вузлів ЕМ у вигляді розрахованих задаючих струмів, буде цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для даного моменту часу.

Згідно з методом накладання через довільну ділянку ЕМ будуть протікати певним чином спрямовані часткові струми $\dot{I}_i$, що зумовлені навантаженням окремих ТП 10/0,4 кВ, тобто відповідними задаючими струмами $\dot{I}_i = \dot{J}_i$. Таким чином, втрати потужності у j -ій ділянці можна подати як

$$\Delta \dot{S}_k = 3 \cdot |\dot{I}_k|^2 \cdot \dot{Z}_k = 3 \cdot \left| \sum_{i \in N_k} \dot{I}_i \right|^2 \cdot \dot{Z}_k, \quad (2)$$

де k – номер вітки електричної мережі; N_k – множина вузлів ЕМ, що отримують живлення по даній вітці; $\dot{Z}_k$ – повний опір k -ї вітки; або для дійсної площини:

$$\Delta \dot{S}_k = 3 \cdot \left[\left(\sum_{i \in N_k} I'_i \right)^2 + \left(\sum_{i \in N_k} I''_i \right)^2 \right] \cdot \dot{Z}_k, \quad (3)$$

де I' , I'' – дійсні та уявні складові часткових струмів.

Після виділення з уявних складових струмів, які зумовлені додатковими джерелами реактивної потужності (КУ), втрати потужності в ЕМ після встановлення КУ можна подати у вигляді двох складових:

$$\Delta \dot{S}_{\Sigma_KV} = \Delta \dot{S}_{\Sigma} - \delta \dot{S}_{KV}, \quad (4)$$

перша з яких є втратами потужності в ЕМ до встановлення КУ, а друга – визначає міру зменшення втрат за рахунок їх встановлення.

Виділивши складову $\delta \dot{S}_{KV}$ з (3) та виконавши ряд перетворень, можна отримати вирази, що характеризують величини зменшення втрат в ЕМ від встановлення КУ у окремих вузлах ЕМ:

$$\delta \dot{S}_k(I''_{KVi}) = 3I''_{KVi}^2 \left[2 \frac{\sum_{j \in N_k} I''_{pj}}{I''_{KVi}} - \sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} \frac{I''_{KVj}}{I''_{KVi}} - 1 \right] \dot{Z}_k, \quad (5)$$

де I''_{KV} – реактивні складові струмів, зумовлені дією КУ; I''_p – реактивні складові струмів навантаження.

З (5) видно, що зменшення втрат потужності в поздовжній частині лінії електропередач від встановлення i -го КУ залежить не тільки від значення його струму, але і від

значень розрахункових струмів навантаження та струмів від інших КУ, що протікають даною лінією. Дана обставина обов'язково має враховуватися для ефективного вибору місць встановлення та потужностей пристроїв компенсації реактивної потужності. Величину даного впливу можна охарактеризувати коефіцієнтами чутливості:

$$\gamma_k^+(I_{KVi}^{\prime\prime}) = 2 \sum_{j \in N_k} \frac{I_{pj}^{\prime\prime}}{I_{KVi}^{\prime\prime}}; \quad \gamma_k^-(I_{KVi}^{\prime\prime}) = \sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} \frac{I_{KVj}^{\prime\prime}}{I_{KVi}^{\prime\prime}}. \quad (6)$$

Вказані коефіцієнти можуть приймати довільні значення в залежності від величини та напрямку розрахункових струмів навантаження та струмів КУ, що протікають k -ою ЛЕП і зумовлені перетоками реактивної потужності до (від) окремих ТП 10/0,4 кВ. При цьому, $\gamma_k^+ > 0$ вказують на наявність позитивного ефекту від встановлення КУ, $\gamma_k^- > 0$ – на величину його зменшення за рахунок впливу КУ у суміжних вузлах (ТП 10/0,4 кВ).

З урахуванням (6) вираз для визначення сумарного ефекту зменшення втрат потужності у ЕМ від встановлення КУ у i -му вузлі ЕМ може бути переписаний у такому вигляді:

$$\delta \dot{S}_{\Sigma}(I_{KVi}) = \sum_{k \in M_j} \delta \dot{S}_k(I_{KVi}) = \sum_{k \in M_j} \left[3I_{KVi}^{\prime\prime 2} (\gamma_k^+(I_{KVi}^{\prime\prime}) - \gamma_k^-(I_{KVi}^{\prime\prime}) - 1) \dot{Z}_k \right], \quad (7)$$

де M_j – множина віток електричної мережі.

Виходячи з коефіцієнтів чутливості (6), можна підібрати фрагмент електричної мережі та ТП 10/0,4 кВ, для яких встановлення КУ буде максимально ефективним, а використовуючи (7) – підібрати потужність КУ, що забезпечить максимальний ефект зменшення втрат у заданому режимі та електроенергії за певний проміжок часу.

Багатокритеріальний аналіз ефективності розташування джерел реактивної потужності

Визначальною умовою оптимального вибору місць встановлення КУ за наведеним вище методом є можливість встановлення ДРП на довільній підстанції, а також відсутність суттєвих змін схеми ЕМ протягом певного проміжку часу. Неможливість останнього у реальних умовах експлуатації розподільних ЕМ призводить до певних ускладнень у методиці вибору місць встановлення та оптимальних потужностей КУ і вимагає проведення ряду імітаційних розрахунків з можливими змінами нормальної схеми ЕМ.

Для вирішення поставленої проблеми доцільно використовувати методику багатокритеріального аналізу, яка запропонована в [4] і базується на відомому методі аналізу ієрархій Сааті [5] та теорії прийняття рішень за схемою Белмана-Заде.

Зазначена методика складається з таких основних етапів:

- 1) визначення множини елементів (варіантів), які потребують багатокритеріального аналізу та множини критеріїв, за якими він буде проводитися;
- 2) побудова на базі експертної інформації матриць парних порівнянь за кожним частинним критерієм;
- 3) розрахунок векторів частинних критеріїв у вигляді нечітких множин, які задані за допомогою функцій приналежності;
- 4) ранжування варіантів на основі перетину нечітких множин – часткових критеріїв.

Відповідно до поставленої мети – підвищення ефективності передачі та розподілу електроенергії у електричних мережах 10(6) кВ за рахунок впровадження додаткових ДРП – ієрархічну структуру критеріїв, за якими пропонується проводити ранжування фрагментів мереж (фідерів) 10(6) кВ за техніко-економічною доцільністю встановлення ДРПЄ, подано в табл. 1.

Таблиця 1

Перелік критеріїв для аналізу придатності фідерів 10(6) кВ до встановлення ДРП

Найменування критерію	Позначення	Діапазон, крок
<i>Чутливість втрат</i>		
Коефіцієнт чутливості	γ_k^+	[0-100], %
Коефіцієнт зменшення чутливості	γ_k^-	[0-100], %
<i>Матеріальні (матеріальне забезпечення)</i>		
Відносна кількість ТС	$\eta_{СТ}$	[0-100], 10%
Відносна кількість ТН	$\eta_{ТН}$	[0-100], 10%
Відносна кількість пристроїв збору інформації	$\eta_{ПЗІ}$	[0-100], 10%
Відносна кількість лічильників ЕЕ	$\eta_{Л}$	[0-100], 10%
<i>Експлуатаційні</i>		
Наявність відповідного обслуговуючого персоналу	$\eta_{ОП}$	[ЛО]*
Довжина головної ділянки фідера	$L_{гд}$	[відстань у км]
Кількість вузлів фідера	N_B	[ЛО]
Наявність персоналу, що має навички обслуговування мікропроцесорних пристроїв	η_K	[ЛО]
<i>Природні</i>		
Наявність природних або технічних факторів, що унеможливають встановлення ДРП	$\eta_{ТУ}$	[0-100], 10%
<i>Технічні</i>		
Відносна кількість потужних споживачів	$\eta_{ПС}$	[0, 100], 10%
Відносна кількість відповідальних споживачів	$\eta_{ВС}$	[0, 100], 10%
<i>Комерційні</i>		
Відносний показник розрахунків за відпуск ЕЕ	η_B	[50, 100], 5%
Відносне значення звітних ТВЕ	$BЗТВЕ$	[0, 50], 5%
Відносна кількість споживачів, які зменшують ТВЕ	$\eta_{ЗЗ}$	[0, 100], 10%

*ЛО – лінгвістична оцінка

Побудова матриць парних порівнянь Сааті відбувається після проведення фахівцями відповідних служб оцінювання кожного з фідерів 10(6) кВ розподільних електричних мереж за кожним з поданих критеріїв (відповідно до їх компетенції). Дана матриця має наступний вигляд:

$$A^I = \begin{bmatrix} a_{11}^I & a_{12}^I & \dots & a_{1n}^I \\ a_{21}^I & a_{22}^I & \dots & a_{2n}^I \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}^I & a_{n2}^I & \dots & a_{nm}^I \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де елемент $a_{ij}^I = \frac{r_i}{r_j}$ – рівень переваги, який представляє собою відношення рангів фідерів v_i та v_j за 9-ти бальною шкалою Сааті [5].

За алгоритмами, наведеними в [4, 5], проводиться розрахунок часткових критеріїв у вигляді нечітких множин:

$$\tilde{c}_l = \left\{ \frac{\mu^l(v_1)}{v_1}, \frac{\mu^l(v_2)}{v_2}, \dots, \frac{\mu^l(v_n)}{v_n} \right\}, \quad (9)$$

де $\mu^l(v_i)$ – ступень приналежності фідерів v_i до нечіткої множини; $\tilde{c}_l$ – критерій якості аналізу.

Перетин нечітких множин (9) дає в результаті нечітку множину, елементами якої є мінімальні функції приналежності кожної з нечітких множин $\tilde{v}_i$:

$$\tilde{D} = \tilde{c}_1 \cap \tilde{c}_2 \cap \dots \cap \tilde{c}_m, \quad (10)$$

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{\min_{l=1,m} \mu^l(v_1)}{v_1}, \frac{\min_{l=1,m} \mu^l(v_2)}{v_2}, \dots, \frac{\min_{l=1,m} \mu^l(v_n)}{v_n} \right\}$$

Визначення максимальної функції приналежності (агрегування) нечіткої множини $\tilde{D}$ (10) дає можливість отримати перший фідер 10(6) кВ у черзі встановлення додаткових джерел реактивної потужності за усіма критеріями (табл. 1):

$$D = \arg \max(\mu_D(v_1), \mu_D(v_2), \dots, \mu_D(v_n)).$$

Враховуючі, що всі критерії є нерівнозначними, для отримання адекватного розв'язку поставленої задачі ранжування фідерів 10(6) кВ доцільно використовувати метод вагових коефіцієнтів [4].

Нехай $w_1, w_2, \dots, w_m$ – коефіцієнти відносної важливості критеріїв $c_1, c_2, \dots, c_m$ такі, що $w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1$. Для визначення коефіцієнтів w_j , необхідно сформулювати матрицю парних порівнянь важливості критеріїв $c_j \in C$, аналогічну (8), та використати один з запропонованих методів [4, 5], наприклад, метод власних значень.

Після розрахунку коефіцієнтів важливості w_j вираз (10) набуде вигляду

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{\min_{l=1,m} [\mu^l(v_1)]^{w_1}}{v_1}, \frac{\min_{l=1,m} [\mu^l(v_2)]^{w_2}}{v_2}, \dots, \frac{\min_{l=1,m} [\mu^l(v_n)]^{w_m}}{v_n} \right\} \quad (11)$$

Виходячи з того, що кількість критеріїв 16, тобто матриця порівнянь, буде мати розмір (16×16), а складання її експертом з ряду причин є доволі трудомісткою операцією, пропонується формувати її за принципом ієрархічності: спочатку проводиться порівняльний аналіз (визначення вагових коефіцієнтів) окремих груп критеріїв ω_g (6 груп), а потім критеріїв кожної групи ω_{gi} ($g = \overline{1, h}$, а $j = \overline{1, k}$, де k – кількість критеріїв в i -ій групі), тобто $n = \sum_{i=1}^h k_i$. На цій підставі вагові коефіцієнти визначаються так:

$$w_i = \omega_g \cdot \omega_{gi}.$$

Внаслідок аналізу за інтегральним показником ефективності встановлення додаткових ДРП $\tilde{D}$ фрагменти електричних мереж 10(6) кВ ранжуються за сукупністю запропонованих критеріїв (табл. 1) з урахуванням важливості кожного з критеріїв. Отже, отримане таким чином рішення можна вважати ефективним з технічної точки зору і, разом з тим, максимально адаптованим до реалізації.

Приклад визначення місць встановлення та потужностей КУ в розподільних мережах

Для визначення місць встановлення КУ, що забезпечить максимальний ефект зменшення втрат, було застосовано програмний комплекс «ВТРАТИ-10», за допомогою якого обчислено коефіцієнти чутливості втрат та місця встановлення КУ різних номінальних потужностей для фрагменту Вінницьких міських електричних мереж. При цьому враховувалося як реактивне споживання даних ТП, так і вплив КУ на втрати у фідерах 10 кВ (7). За результатами розрахунків для кожного компенсуючого пристрою з заданого переліку було обрано ТП 10/0,4 кВ, встановлення на якій забезпечувало б максимальний ефект зменшення втрат потужності та електроенергії (табл. 2). Ефект зменшення втрат був оцінений шляхом проведення імітаційних розрахунків (табл. 3).

Таблиця 2

Схема розташування КУ для забезпечення максимального ефекту

за зменшенням втрат електроенергії в ЕМ (схема I)				за комплексним критерієм ефективності (схема II)			
Підстанція	Фідер	ТП 10/0,4 кВ	Q _{куНН} , квар	Підстанція	Фідер	ТП 10/0,4 кВ	Q _{куНН} , квар
ТП «Нова»	Ф-113	ТП-496	200	ТП «Нова»	Ф-113	ТП-496	200
ТП «Нова»	Ф-111	ТП-292	70	ТП «Нова»	Ф-111	ТП-292	70
ТП «Нова»	Ф-106	ТП-297	70	ТП «Північна»	Ф-204	ТП-429	70
ТП «Західна»	Ф-167	ТП-260	60	ТП «Західна»	Ф-167	ТП-260	60
ТП «Промислова»	Ф-265	ТП-234	60	ТП «Нова»	Ф-111	ТП-74	60
...	...	...	...	...	...	...	...
ТП «Нова»	Ф-113	ТП-205	40	ТП «Західна»	Ф-167	ТП-369	40
ТП «Нова»	Ф-113	ТП-587	40	ТП «Нова»	Ф-106	ТП-113	40
...	...	...	...	...	...	...	...
ТП «Нова»	Ф-106	ТП-12	30	ТП «Західна»	Ф-167	ТП-630	30
ТП «Нова»	Ф-106	ТП-225	30	ТП «Західна»	Ф-167	ТП-650	30
...	...	...	...	...	...	...	...

Як видно з результатів розрахунку (табл. 3, схема I), подібне розташування КУ дозволить забезпечити зменшення втрат у межах 110 тис. кВт·год на місяць, або біля 10 % від сумарних втрат електроенергії в ЕМ 10 кВ.

Таблиця 3

Результати аналізу ефективності розстановки КУ за критерієм зменшення втрат електроенергії в ЕМ

Живильні підстанції ЕМ	Зменшення втрат потужності протягом розрахункового періоду				Зменшення енергетичного ефекту від додаткових джерел реактивної потужності	
	Розташування ДРП за схемою I		Розташування ДРП за схемою II			
	кВт год	%	кВт год	%	кВт год	%
Всі підстанції	-110342	-10,7	-96705,0	-9,3	13637,0	12,4
ТП «Західна»	-13502	-7,1	-15858,8	-8,4	-2356,8	-17,5
ТП «Промислова»	-9042,36	-4,7	-8477,9	-4,4	564,5	6,2
ТП «Нова»	-75400,8	-30,4	-65944,7	-26,6	9456,1	12,5
ТП «Центральна»	-2721,36	-2,5	0,0	0,0	2721,4	-
ТП «Південна»	-4717,92	-2,9	-763,4	-0,5	3954,5	83,8
ТП «Північна»	-4946,34	-6,8	-5634,8	-7,7	-688,5	-13,9
ТП «Технологічна»	0,0	0,0	0,0	0,0		

Примітка. Розташування додаткових джерел реактивної потужності виконувалося за критерієм мінімуму втрат потужності (схема I) та максимуму комплексного показника ефективності $\tilde{D}$ (схема II)

Однак на практиці виявилось, що встановлення конденсаторних установок за розробленою схемою (табл. 2, схема 1) не може бути практично реалізоване через відсутність технічних умов для розміщення ДРП на окремих трансформаторних підстанціях (ТП) 10/0.4 кВ. Останнє зумовлене конструктивними особливостями комплектних ТП, а також їх балансовою приналежністю.

Для вирішення проблеми, задіявши експертів зі служби кабельних ЛЕП, служби підстанцій та диспетчерської служби Вінницьких міських мереж, було виконано дослідження щодо формування комплексного критерію ефективності розташування ДРП. На його підставі сформовано новий перелік місць встановлення КУ (схема II) (табл. 2).

Результати аналізу енергетичної ефективності такої схеми розташування ДРП подано у табл. 3. Їх порівняння з аналогічними (схема I) дозволяє стверджувати, що обмеження місць встановлення КУ суттєво зменшують ефект компенсації реактивної потужності по Вінницьких міських мережах на більш, ніж 12 %. Однак, врахування технічних та економічних обмежень на стадії формування електроощадного заходу дозволило зменшити накладні витрати, пов'язані з монтажем, налагодженням, випробуваннями, введенням в експлуатацію (біля 14.2 %), а також експлуатаційні видатки (біля 3.5 %) за рахунок, в основному, скорочення переліку трансформаторних підстанцій, що підлягали оснащенню ДРП.

Висновки

- Використання методу аналізу чутливості втрат електроенергії в ЕМ до встановлення КУ різних номінальних потужностей, а також імітаційних розрахунків з метою врахування можливих змін нормальної схеми ЕМ дозволяє формувати близькі до оптимальних варіанти розташування КУ на ТП 10/0,4 кВ з огляду на зменшення технічних втрат електроенергії та режиму напруг в ЕМ 0,4 кВ.
- Відсутність технічних умов для розміщення КУ на окремих трансформаторних підстанціях 10/0.4 кВ може призводити до істотного зниження ефективності компенсації реактивної потужності. Отже, враховуючи світові тенденції у даному напрямку зменшення втрат електроенергії, доцільним є оснащення комплектних ТП встановленою потужністю 100 кВА та більше додатковими шафами для встановлення додаткових ДРП.
- На підставі методу аналізу ієрархій Сааті та теорії прийняття рішень Белмана-Заде запропоновано метод багатокритеріального аналізу та формування оптимальної послідовності впровадження засобів компенсації реактивної потужності.

Список літературних джерел

1. Пейзель В.М., Степанов А.С. Расчеты технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ // *Электричество*. – 2002. – № 3. – С. 10-15.
2. Сподин О.И. Анализ возможных решений усовершенствования учета электроэнергии и обслуживания бытовых потребителей, снижения операционных затрат. Предложения оптимального решения // *Электрические сети и системы*. – 2006. – № 3. – С.65-73.
3. Праховник А.В., Коцар О.В., Прокопеч В.І. Сучасні принципи побудови АСКОЕ суб'єктів ОРЕ та АСКОЕ споживачів в умовах енергоринку України // *Енергетика та електрифікація*. – 2006. – № 4. – С. 2-7.
4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные системы. – Винница: Універсум – Вінниця, 1999. – 320 с.
5. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М: Радио и связь. – 1991. – 224 с.

УДК 621.311

М.М. Мальований, голова правління
 ВАТ ЕК «Чернігівобленерго», м. Чернігів, Україна

ПРІОРИТЕТНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ВАТ ЕК «ЧЕРНІГІВ ОБЛЕНЕРГО», СПРЯМОВАНІ НА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОСЛУГ З ПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Приведено основні пріоритетні напрямки розвитку енергетичної компанії «Чернігівобленерго» задля покращення якості послуг з постачання електричної енергії споживачам.

Вступ

В 1995 році в ході реорганізації енергетичної галузі на базі чотирьох підприємств: Чернігівської ТЕЦ та трьох підприємств електричних мереж – Центрального, Північного та Прилуцького, було створено енергопостачальну компанію «Чернігівобленерго». В цьому ж році, після затвердження статуту, Компанія отримала назву «Державна акціонерна енергопостачальна компанія «Чернігівобленерго». Після проведення приватизації у вересні 1998 року, на загальних зборах акціонерів була затверджена нова назва підприємства – Відкрите акціонерне товариство енергопостачальна компанія «Чернігівобленерго» (ВАТ ЕК «Чернігівобленерго»).

На сьогоднішній день ВАТ ЕК «Чернігівобленерго» силами технічного персоналу 25 структурних підрозділів (22 районів електричних мереж, Чернігівських міських електромереж та двох підприємств високовольтних електричних мереж) виконує експлуатацію електричних мереж напругою 0,4 – 110 кВ, до складу яких входять:

Підстанції:	110 кВ – 38 шт; 35 кВ – 128 шт; 10 кВ – 8429 шт.
Повітряні лінії:	110 кВ – 1221,9 км; 35 кВ – 2462,5 км; 10-6 кВ – 12812,1 км; 0,4 кВ – 18173,3 км.
Кабельні лінії:	10-6 кВ – 909 км; 0,4 кВ – 626,5 км.

Інформація про технічний стан об'єктів електричних мереж ВАТ ЕК «Чернігівобленерго» у відповідності до [1], станом на 1.01.2010 приведена у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники надійності елементів ЛЕП

Енергооб'єкти	Всього	Технічний стан			
		добрий	задовільний	незадовільний	непридатний
ПЛ 110кВ, км/%	1221,9	1054,9/86,3	150/12,3	17/1,4	
ПЛ 35кВ, км/%	2462,5	2151,9/87,4	270/11,0	38,1/1,5	2,6/0,1
ПЛ 10-6кВ, км/%	12812,1	4931,6/38,5	7289,8/56,9	478,4/3,7	112,3/0,9
ПЛ 0,4кВ, км/%	18173,3	5506,5/30,3	9858,3/54,2	1861,1/10,2	947,4/5,2
КЛ 10-6кВ, км/%	909	343,6/37,8	430,7/47,4	57,1/6,3	77,6/8,5
КЛ 0,4кВ, км/%	626,5	288,4/46,0	274,9/43,9	26/4,2	37,2/5,9
ТП 10/0,4кВ, шт/%	8429	3090/36,7	4195/49,8	934/11,1	210/2,5

Для покращення технічного стану об'єктів електричних мереж та підвищення ефективності їх роботи Компанія приділяє значну увагу реконструкції та модернізації існуючого обладнання, впровадженню новітніх технологій.

Серед основних напрямків такої роботи слід відзначити наступні:

- реконструкція ПЛ 0,4 кВ з самоутримними ізолюваними проводами;
- заміна фізично та морально застарілих трансформаторів 110 – 35 кВ на нові сучасні трансформатори, з більш якісними характеристиками;
- заміна застарілих систем релейного захисту на підстанціях 110 – 35 кВ на нові, більш сучасні;
- впровадження сучасної системи телемеханіки та зв'язку на підстанціях 110 – 35 кВ;
- заміна зношених та повністю амортизованих КТП 10/0,4 кВ на нові з установкою трансформаторів, що мають кращі експлуатаційні характеристики;
- заміна масляних вимикачів 35 – 10 кВ на вакуумні.

Слід зазначити, що вперше в Україні лінія із самоутримними ізолюваними проводами була побудована у 1996 році в Чернігівській області в селі Олишівка. Її довжина складає 14,1 км.

Повітряні лінії електропередач з самоутримними ізолюваними проводами мають ряд переваг у порівнянні з ПЛ 0,4 кВ з неізолюваними проводами:

- вища експлуатаційна надійність, що забезпечується відсутністю коротких замикань через перехреснення проводів, дотику проводів до дерев, накидів, ушкодження ізоляторів;
- істотно зменшується електрична небезпека експлуатації за рахунок зниження однофазних замикань на землю, розривів проводів і неможливістю безпосереднього контакту із струмоведучими частинами ліній;
- зменшення на 30% навантаження від ожеледі та вітрових навантажень на опори ПЛ;
- зменшення майже в три рази реактивного опору, внаслідок чого встановлюється кращий режим напруги, збільшується пропускна здатність лінії, зменшуються втрати електроенергії;
- запобігання крадіжок електроенергії;
- зниження витрат на розчищення трас повітряних ліній від дерев та порослі.

Як відомо, основними характеристиками, що визначають технічний рівень силових трансформаторів, є втрати електроенергії, матеріалоємність, якість виготовлення та надійність. Трансформатори, що пропрацювали понад 25 років, морально застаріли і мають підвищенні втрати електроенергії на перемагнічування.

На зростання технологічних втрат електроенергії (ТВЕ) має вплив те, що в чотирипровідних електричних мережах України переважно використовуються трансформатори із схемою з'єднання обмоток Y/Y_n (зірка – зірка-нуль). Але ці, найдешевші у виготовленні трансформатори, в експлуатації економічні тільки при симетричному навантаженні фаз. Реально, в мережах з великою кількістю однофазних споживачів, рівномірність їх підключення в часі пофазно порушується і втрати електричної енергії в таких трансформаторах різко зростають. Це зростання обумовлене виникненням потоків нульової послідовності в магнітних системах трансформаторів зі схемою з'єднання обмоток Y/Y_n (зірка – зірка-нуль), які обумовлені струмами небалансу, що протікають в нульовому провідникові мережі. Ці потоки носять характер потоків розсіювання. Неминучим наслідком нерівномірності навантаження фаз є різкий перебік системи фазних напруг (зміщення нульової точки) та, як наслідок, збільшення втрат в лініях 0,4 кВ.

Тому в компанії прийнято рішення проводити заміну трансформаторів 10/0,4 кВ на трансформатори з симетруючими обмотками.

На даний час в Компанії на підстанціях 35-110 кВ експлуатується 1638 масляних вимикачів, із них 436 вимикачів, що складає 27 % від загальної кількості, відпрацювали в мережах більше 25 років.

В той же час, на підстанціях 35-110 кВ Компанії успішно експлуатується 972 вакуумних вимикачів.

Вони мають механічний ресурс 50-100 тисяч циклів, що в середньому в 10 разів перевищує відповідні показники масляних вимикачів.

Вакуумні вимикачі надійні в роботі і дозволяють телемеханізувати процеси керування приєднаннями підстанції.

Система телемеханіки, що була впроваджена на підприємстві в попередні роки, базувалась на телемеханічних пристроях і контролерах, які по ряду вимог до експлуатаційних параметрів не відповідали показникам якості функціонування сучасних систем телемеханіки.

Враховуючи необхідність підвищення якості управління технологічними процесами на енергооб'єктах підприємства, було прийнято рішення по розробці та впровадженню сучасної комплексної автоматизованої системи диспетчерсько-технологічного управління на базі обладнання ABB та програмного комплексу MicroSCADA.

Впровадження АСДТУ ВАТ ЕК «Чернігівобленерго» розпочалося з Чернігівських МЕМ в 2004 році.

На даний момент автоматизована система диспетчерсько-технологічного управління впроваджена в Чернігівських МЕМ, Ніжинському, Прилуцькому, Ічнянському, Борзнянському, Бобровицькому, Бахмацькому та Чернігівському РЕМ. Всього телемеханізовано 65 підстанцій та впроваджено 7 оперативно-інформаційних комплексів MicroSCADA. Також створено 3 сучасні диспетчерські пункти з активними диспетчерськими щитами, які підключенні до системи MicroSCADA і працюють в автоматичному режимі.

Кінцевою метою впровадження системи MicroSCADA є створення комплексної АСДТУ, яка охопить всі енергооб'єкти Компанії, що дозволить оперативно управляти електрообладнанням як у нормальному, так і в аварійному режимі, знизити час на ліквідацію аварії та прийняття адекватного рішення згідно стану електромереж та обладнання, знизити ризик тяжких аварій, застерегти від несанкціонованого втручання сторонніх осіб в роботу обладнання та спроби крадіжки обладнання. В результаті збільшиться строк дії основного обладнання шляхом оптимізації його використання та підвищиться надійність електропостачання користувачів.

Установка разом із вакуумним вимикачем швидкодіючого мікропроцесорного захисту дозволяє знизити ступінь селективності з 0,5 до 0,25 секунд.

Це, в свою чергу, дозволяє знизити пошкодження обладнання, що знаходиться у зоні захисту, і втрати потужності при протіканні струмів короткого замикання в мережах.

Впровадження вакуумних вимикачів дозволить економити електроенергію, яка використовувалась для обігріву комірок з масляними вимикачами.

Сучасному підприємству, яке прагне розвиватися та бути конкурентноспроможним, необхідно організувати єдиний інформаційний простір для роботи всіх підрозділів, що особливо актуально для великих підприємств енергетичної галузі. Надійність зв'язку та досконалість систем комунікацій в середині компанії визначають оперативність управлінських рішень, особливо, якщо мова йде про територіально розподілену компанію, якою і є ВАТ ЕК «Чернігівобленерго».

В 2004 році Компанія почала створювати на базі нового, сучасного обладнання світових лідерів комунікаційного обладнання корпоративну мережу зв'язку та передачі

даних на базі радіорелейних ліній. Для забезпечення злагодженої роботи всіх підрозділів компанії була впроваджена корпоративна мережа на базі радіорелейних ліній та станцій супутникового зв'язку. За цей період було побудовано 10 прольотів радіорелейних ліній, які об'єднали десять районів області в єдину систему зв'язку. У десяти віддалених районах встановлені супутникові системи зв'язку, які також об'єднані в єдину корпоративну мережу.

Організовані виноси IP-телефонії в трьох районах області.

В компанії встановлена центральна комутаційна станція на базі цифрової АТС, а по районах встановлено 15 цифрових АТС, завдяки яким всі підрозділи Компанії об'єднано в єдину корпоративну мережу зв'язку та забезпечено надійним і безперебійним зв'язком.

Для забезпечення зв'язком оперативно-виїздних та лінійних бригад використовується понад 500 сучасних радіостанцій.

Компанія не зупиняється на досягнутому та впроваджує нові сучасні технології в сфері телекомунікацій та зв'язку.

Висновки

Одним з основних пріоритетних напрямків розвитку ВАТ ЕК «Чернігівобленерго» є створення комплексної АСДТУ, яка охопить всі енергооб'єкти.

Список літературних джерел

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38-20 кВ з повітряними лініями електропередачі. – К.:ОЕП «ГРІФРЕ», 2005. – 45 с.

УДК 621

В.В. Назаров, д-р. техн. наук

БАТ ЕК «Хмельницькобленерго», м. Хмельницький, Україна

ГОЛОВНА ІДЕЯ ЕНЕРГО-ЕКОНОМІЧНОГО ПЛАНУ ДЛЯ УКРАЇНИ

Приведена головна ідея формування екологічно улаштованого, соціотехнічного укладу життєдіяльності людини задля зменшення впливу на навколишнє середовище.

Минуле сторіччя «подарувало» нам повчальний, а тому вельми важливий чинник. Чинник повсюдно нераціонального використання науково-технічних досягнень, провокований фінансово-спекулятивними (а іншими вони і не можуть бути) ринковими сунками.

В цілому, багато чого із скоєного нами у ХХ столітті свідчить лише про те, як не слід жити і господарювати, чого не слід «тиражувати», примножувати прийдешнім поколінням.

Наочним критерієм «ефективності» нашої техніко-економічної діяльності, до прикладу – у сфері енергетики, міг би стати коефіцієнт, що характеризує повноту використання первинного енергетичного потенціалу природного ресурсу [1]. За деяким виключенням, той коефіцієнт не перевищує і 5 %. А це означає, що енергоресурси – вугілля, природний газ, нафта, ядерне паливо використовуються вельми примітивно. По-перше, у виробництві, по-друге, у споживанні електричної і теплової енергії. Факт збитковості сучасної енергетики загальновідомий та додаткових пояснень не потребує.

Разом з тим, в енергетичній галузі маємо певні позитивні перспективи, з числа яких слід виділити успіхи у створенні ефективних джерел енергії для розподіленої генерації, широке впровадження яких сприяло б здійсненню задуму найвигіднішого децентралізованого виробництва (когенерація) з максимально корисним споживанням (коутілізація) електричної та теплової енергії. Когенерація-коутілізація, як єдиний процес, повинна б сприйматися стратегічним напрямом розвитку систем енергопостачання. Та ми із завидною наполегливістю продовжуємо планувати, проектувати, споруджувати дисгармонійні, беззахисно вразливі стихійними явищами електроенергетичні системи за марнотратними технологіями минулого століття.

Достатньо нагадати: тільки електричні станції, переважна більшість з яких функціонують за конденсаційним циклом, марно викидають в природне середовище на кожний мегават електричної енергії (потужності) два мегавати теплової, збуджуючи теплове забруднення біосфери, що по силі руйнівної дії на довкілля та глобальний клімат може суперничати з викидами парникових газів.

В українському (як і, загалом, у планетарному) енергетичному балансі частка розподіленої когенерації-коутілізації від атомних станцій малих і середніх потужностей могла б до 2050 року скласти не менше 50 %, плюс 25 % – джерела нетрадиційної енергетики, 25 % – станції великої потужності, задіяні в процесах концентрованого споживання енергії, наприклад, для виробництва якісних металів, водню, хімічної продукції.

Практичне втілення означеної ідеї виглядає цілком реальним за допомогою Нового Енерго-Економічного Плану – Комплексного Державного Документа (НЕЕП-КДД) України. Плану, який окреслив би, перед усім іншим, умови оптимальної реконструкції економічного і технологічного укладів у напрямках забезпечення гармонізованого, комфортного життя (у найширшому розумінні) особи та суспільства [1]. До речі, такий план для нашої країни розробити, а, тим більше, здійснити науковий супровід виконання, принципово не здатні ні європейські, ні заокеанські консультанти. Чи не до снаги вирішення поставленої задачі недавно створеному Державному комітетові України з питань науково-технічного та інноваційного розвитку у співпраці з головним науково-технічним управлінням Міненерго (вкрай необхідна нова ланка у його системі), підпо-

рядкувавши дії чиновництва від економіки та енергетики спільним рішенням цих двох органів.

Отут, для здійснення НЕЕП-КДД, і знадобилися б крупні, масштабні інвестиції інноваційного характеру! Та звідки інвестиції, хто інвестор? Питання не даремне. Адже авансований у виробництво будь-якого товару матеріальний і фінансовий капітал (інвестиції) – це результат раніше уречевленої, розумової та фізичної праці конкретних творців інтелектуальних і матеріальних цінностей. Звідси, єдиним джерелом інвестицій є частина вилученої вартості реалізованого товару – робоча сила. Зрештою, при будь-яких варіантах інвестування за все платить саме трудящий люд, а не олігархи, банки, бюджети, інші експропріатори (незалежно від нашого бажання прислужитися владі та магнатам, правий К. Маркс). Так чому б не створити для цілей інноваційного інвестування спеціальний, достатньо потужний суспільний фонд інтелектуального і технологічного розвитку, *віддавши забуттю збиткову для країни систему інвестицій та іноземних кредитів, без якої ми хибно не уявляємо свого сучасного буття.*

Зрозуміло, робота у сфері будівництва нової енергетики потребує не одного року, навіть не одного десятиліття. На тривалий перехідний період, у якому слід здійснити оптимальну реконструкцію як самої енергетики, так і, загалом, техніко-технологічного укладу, необхідно задовольнити енергетичні потреби країни. Одним з напрямів (не торкаючись інших) рішення цієї задачі є продовження терміну експлуатації діючих атомних станцій. Дві третини українських блоків у близькій перспективі подолають межу вичерпання ресурсу. І тут очевидна небезпека силового варіанту у вигляді вказівки: не відключати! Але ще в 1992 році [2] пропонувалося розглянути можливість обмеження максимальної робочої потужності ядерних блоків до 0,7 номінальної, що у відповідності основним положенням теорії надійності та з додатковими технічними заходами забезпечило б збільшення їх терміну експлуатації не менше, ніж на 15 років. Таке обмеження могло бути компенсовано не за рахунок додаткового завантаження ТЕС, а завдяки впровадженню енергетично раціональних технологій господарювання. До того ж, згадане зменшення максимальної робочої потужності дозволило б експлуатувати АЕС у базовій частині навантажень енергосистеми та, зокрема, виключити необхідність будівництва ГАЕС – однієї з найбільш витратних енерготехнологій.

У тій же статті, коли на повну силу розгортався громадський рух супротивників АЕС, сказано: «якщо до другої половини XXI століття потужність сонячних, вітрових і аналогічних установок (необхідність їх освоєння незаперечна) досягне 15-20 %, то все ж таки основна кількість споживаної енергії вироблятиметься АТЕЦ. Тому до 2050 року альтернативи атомній енергетиці не буде. Але є альтернатива енергетиці кінця XX сторіччя». І ця альтернатива – розподілена когенерація-коутілізація.

З числа окремих конкретних заходів переходу до нових енергетичних технологій на прикладі Хмельницької АЕС [3] також пропонувалося хоча б розглянути варіант використання для добудови третього та четвертого блоків «чистого» реактора (на паливі без ізотопу урану-238) потужністю 500 МВт електричних та двохвального турбоагрегату 2x250 МВт на кожний блок. Такий крок дозволив би, на додаток до ряду позитивних моментів, отримати головне: уникнути властивості реакторам, що зараз експлуатуються, напрацювання надшкідливих ізотопів трансплутонієвого ряду. Аналогічний блок (третій) слід було передбачити на заміну першого після вичерпання ним уже подовженого ресурсу. Наголошувалося на доцільності відновлення та посилення співробітництва з організаціями російського атомного відомства, які на початок уже поточного століття мали вагомий напрацювання саме у зазначених вище енерготехнологіях (і зовсім не для того, щоб нав'язати Україні ще два ВВЕР-1000). Зверталася увага й на те, що у висновках спеціальної комісії АН України на початку 90-х (біля 20 років тому) зазначалося:

перевищення потужності ХАЕС понад 2000 МВт електричних є небезпечним для довкілля півночі Хмельницької області.

Однак, концептуальні помилки застарілої союзної енергетичної програми [2], як видно, опинилися в основі усіх подальших намірів енергетичного будівництва. Об'єктивно оцінюючи українську енергетичну політику останніх років, можемо небезпідставно спрогнозувати: з 99-процентною вірогідністю так буде й надалі. Образно кажучи, Україна (стосується і Росії, що володіє величезними, здавалося б, невичерпними запасами енергоресурсів) вже накинула енергетичну петлю на свою шию. Залишилося прибрати з-під ніг стілець. А чи не краще, все ж таки, скинути петлю?

Та для того, щоб звернути зі шляху руйнації (в суспільно-економічних умовах, які зародилися в Україні та уже зміцніли упродовж останніх 10-15 років) до життєдайного творення, потрібна наукова ідея нового устрою буття людини – суспільно-економічного та техніко-технологічного укладів. Така ідея закладена та запропонована до подальшого опрацювання у еконатурології – науковій системі, у просторі якої здійснюється органічне єднання соціальних і природничих, технічних наук з метою отримання та практичного використання знань про біопозитивну коеволюцію соціуму та природного середовища [4].

Причини виникнення названої наукової системи обумовлені істинно глобальною проблемою – здійснення оптимальної реконструкції технологій життєдіяльності. Реконструкції, що запобігає подальшому руйнуванню біосфери (точніше, біогеосфери) з неминучим зворотним зв'язком та відповідною реакцією природи на антропогенне втручання в процеси її внутрішнього розвитку. Адже ми опинилися перед загрозою вичерпання життєво важливих ресурсів, з переліку яких слід особливо виділити, окрім енергетичного, питну воду, родючий ґрунт, флору, тропосферу. За межею незворотності – знищення природного середовища (означає самознищення людини, в усякому разі, виду *homo sapiens*).

Становище ускладнюється й тим, що повсюдно пануючі ринкові економічні відносини не сприяють вирішенню згаданої вище проблеми. Як підсумок, маємо високу ймовірність лавиноподібного посилення загальної цивілізаційної кризи, найсерйознішої за всю попередню історію людства. Неозоре, примітивне використання природних ресурсів з метою задоволення всеїдних матеріальних запитів (техногенний чинник) катастрофічно зростаючої чисельності популяції людей (чинник перенаселення) – нищівна сутність нашого існування на планеті Земля. А окремі паліативні заходи (скорочення викидів парникових газів, енергозбереження ...) створюють лише видимість зрушень на краще. До того ж, відомі, навіть новітні економічні, еколого-економічні теорії (екологічна економіка, економіка сталого розвитку, економіка природокористування) базуються на споживацьких законах ринку, перешкоджаючи корінній зміні мотивів життя соціуму.

Навпаки, еконатурологія як наукова система, виходячи з аналізу вад сучасної цивілізації марнотратства, інтегрує знання про соціальні та технологічні сфери практики людини у складі напрямів: загальна теорія соціотехнічної макросистеми (СТМ) сталого інтелектуального розвитку, техноресурсологія, техноенергологія. У ролі ланок, що пов'язують три частини еконатурології та усередині них, виступають міждисциплінарні науки. А витоки інтелектуального, духовного наповнення всього наукового комплексу формуються основоположними філософськими знаннями.

Історія розвитку науки свідчить про допустимість, а зараз і необхідність, її (науки) переходу на новий, діалектично обґрунтований виток міждисциплінарної інтеграції. Та деякий позитивний зсув, що намітився тут останніми роками, гальмується відсутністю реконструктивних ідей в науках соціальних. Бо, якими б не були успіхи в області природничих та технічних наук, без їх узгодженості, сприйняття соціальними науками, а

звідси і суспільством, результат використання цих успіхів буде близький до того, що маємо.

Мета наукової єдності: створення теорії СТМ (складової частини загальної теорії соціотехнічної макросистеми), розробка практичних заходів здійснення еконатурологічного (на місце економічного) зростання, що гарантує можливість задоволення оптимізованих суспільних потреб, виключаючи руйнацію природного середовища та забезпечуючи повноцінну життєдіяльність духовно і фізично здорової людини. Спрямованість до моральної досконалості – ось необхідна умова становлення, а також принципова відмінність від капіталізму (гроші – спекуляція – споживання) і комуно-соціалізму (вилучення – ділення – зрівнялівка) інтелектуально зрілої соціотехнічної макросистеми. Тобто, суспільства, де на першому плані турбот – випереджуючий розвиток нашої духовної та матеріальної культури (в якнайповнішому філософському розумінні).

Зміст соціотехнічної макросистеми принципово відрізняється від змісту (за відомими поглядами) соціотехносу, який подається у якості особливого технократичного утворення, де у диполі людина-машина верховодить машина, підпорядковуючи та руйнуючи внутрішній духовний світ людини, зводячи її до стану homo-zombi. Напроти, соціотехнічна макросистема, що зростає на принципах еконатурології та являє собою ядро нового укладу нашого буття, розвиває і підсилює етично-інтелектуальні, гуманітарні (на заміну пануючим – меркантильно-споживацьким) начала культури народів, від рівня якої залежать обрані шляхи соціально-економічного і техніко-технологічного розвитку.

Техноресурсологія, техноенергологія – це ресурсологія та енергологія техносфери на відміну від понять, що пов'язуються з науками про ресурси і енергетику людини. Техноресурсологія – область знань про ресурси Землі та навколишнього космосу. Техноенергологія – знання про виробництво та перетворення видів енергії.

У сфері експлуатації природних ресурсів, як правило, розглядаються два варіанти природокористування: раціональне (покликане задовольнити зростаючі потреби людини, але з найменшими ресурсними втратами) і нераціональне (задовольнити ті ж потреби, незважаючи на втрати ресурсів). *Техноресурсологія та техноенергологія ставлять принципово іншу мету: мінімізувати самі потреби людства в макросистемі еконатурологічно оптимального комфорту нашого буття.*

У відомому девізі сучасних екологів «мислити глобально, діяти локально» (метод дедукції – від загального до часткового) є цікавий, з позицій еконатурології, підтекст: без системно-стратегічного підходу до аналізу та синтезу окремого як частки загального не може бути позитивних конкретно-практичних дій. А з цього підтексту неважко дійти висновку: принципово недосяжні так бажані результати у техніці та технологіях без відповідних змін у ієрархічно вищій, більш загальній, суспільно-економічній системі (СЕС). Тому однією з глибинних наших помилок є намагання вирішувати проблеми розвитку продуктивних сил, нехтуючи станом СЕС, змістом її законів, тісним взаємозв'язком еволюційних процесів, з одного боку, у сфері техніки і технологій, а з іншого, – у економічних (виробничих) відносинах.

Відповідно вимогам еконатурології та першим начеркам економічної теорії СТМ приховані закони невідшкодованої вартості природних ресурсів, вилученої вартості реалізованого товару – робочої сили та всесильні закони ринкової економіки (попиту і пропозицій) замінюються законом об'єктивної вартості ресурсів природи і робочої сили, що й визначає вартість усіх інших вторинних (похідних) товарів.

Сказане вище розкриває дійсну сутність економічних зв'язків держави та суспільства: у кінцевому рахунку, єдиний податкоутворюючий товар – це все та ж реалізована робоча сила. Зважаючи на даний фактор – економічну аксіому, яка, на жаль, всіляко вуалюється та замовчується, у соціотехнічній макросистемі, що стало розвивається на базі

уже нових економічних відносин, взагалі не йдеться про податки як такі. Тут із повної (підкреслюю, – повної, а не крихт, отримуваних зараз трудящими та ще й з подальшими фіскальними і комерційно-гендлярськими поборами) заробітної плати кожного працівника проводяться відрахування до трьох фондів: державного управління, інтелектуального розвитку, соціального забезпечення, а сама держава виступає в ролі гаранта максимально досяжної об'єктивності формування та витрачання суспільних фондів (на заміну політичним і економічним іграм та сумнозвісного державного бюджету – основного знаряддя тих ігор). Як наслідок, економіка макросистеми сталого інтелектуального розвитку сприймається єдиною реальною альтернативою постмодерністському варіанту руйнівної фінансово-спекулятивної капіталізації практично усіх сфер суспільного життя (без фундаментальних реформ у економічній системі мова про нову енергетику безпредметна).

Принциповими особливостями такої економіки є те, що:

- природні ресурси (включно, земля: незалежно від призначення право на використання її ділянок здійснюється орендою) знаходяться у суспільній власності;
- право власності на засоби виробництва не надає права утворення додаткової вартості;
- обсяги виробництва товарної продукції підконтрольні та координуються оптимізованою (в інтересах суспільства) плановою системою;
- зовнішньоекономічна діяльність є прерогативою держави;
- найменша та найвища заробітні плати усіх громадян (особисті винагороди за виконану роботу при повному 7-годинному робочому дні) не виходять за межі відношення 1:7 (вищі, але не «захмарні», винагороди можуть мати місце за видатні досягнення у науках, мистецтвах, спорті);
- в країні діє лише один державний банк і лише йому надано право інноваційного кредитування народного господарства, юридичних та фізичних осіб;
- грошовий обіг здійснюється тільки! у безготівковому варіанті через введену електронну грошову одиницю (его);
- відсутня фінансово-комерційна таємниця (усі статки фізичних та юридичних осіб відкриті для громадської спостережної ради і державного наглядового органу).*

* За умов реалізації означених засад діяльності економічної системи додатково: виявляються непотрібними інститути ринкової економіки (фондові ринки, посередницькі фірми, товарні, фінансові біржі, комерційні банки ...); унеможливаються корупція, «відкати», спекуляція; вирішуються проблеми «конвертації» зарплат та пенсійного забезпечення. Отут і виникає риторичне запитання: а навіщо нам така економіка – без корупції, «відкатів», спекуляцій – звичних та уже, мабуть, невід'ємних складових українського життя.

У сфері взаємин між людьми визначальною є свобода як усвідомлена необхідність із незаперечним наслідком: свобода однієї людини або спільноти людей закінчується там, де цією людиною або спільнотою порушуються права іншої людини або спільноти людей.

Отже, конкретні, суто техніко-технологічні питання енергетики XXI сторіччя концептуально слід розглядати як похідні від ГОЛОВНОЇ ІДЕЇ – ФОРМУВАННЯ ЕКОНАТУРОЛОГІЧНО УЛАШТОВАНОГО, СОЦІОТЕХНІЧНОГО УКЛАДУ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ. А шляхи побудови відповідної макросистеми вимушено пролягають через жорстку, але принципово іншу, у порівнянні з відомими тоталітарними режимами, політичну диктатуру, – диктатуру інтелекту, патріотизму, честі, совісті, компетентності.

Пора усвідомити й те, що у сфері організації соціуму повно дієздатною повинна стати державна влада, а не громадське (в українському варіанті, комерційно-підприємницьке) самоврядування, яке іноді сприймається панацеєю. Колектив, община, область діяльності у будь-яких іпостасях організовуються (якщо пощастить) владною особою, а не колегіально. Тому зараз, як ніколи, нам потрібні суворі дисципліна та порядок (фетиш ринкових свобод, посилені спотвореною демократією, фатально помилковий і руйнівний), мужність, тверда воля, рішучість влади, здатної, керуючись вищими етичними принципами, реалізувати розгорнуту концепцію новітньої економічної політики суспільства сталого інтелектуального розвитку.

Робота зі створення наукових (економічних і технологічних) основ формування та функціонування соціотехнічної макросистеми мала б зайняти чільне місце серед об'єктивно актуальних завдань світової, найперше української, науки. Саме Україна потенційно, з попелу духовної розрухи, особливо початку ХХІ сторіччя, все ж здатна відкрити нову еру в історії людства. От чи буде на те воля суспільства та влади?

Список літературних джерел

1. Назаров В.В. Стратегия развития энергетики. Философский аспект //Новини енергетики. – 2010. – № 3. – С. 13-18.
2. Назаров В.В. О концепции развития энергетики //Енергетика та електрифікація. – 1992. – № 2. – С. 23-26.
3. Назаров В.В. Экономический базис устойчивого развития и энергетическая безопасность Украины //Енергоінформ. – 2001. – № 25. – С. 12-16.
4. www.econaturologia.com.ua

УДК 621.313.32

А.О. Омельчук, канд. техн. наук**В.О. Мосейчук, О.І. Рябчук, А.В. Скидан**, магістранти

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СПОЖИВАЧІВ

Наведені зауваження автора щодо постановки та вирішення задач компенсації реактивної потужності в електричних мережах, зокрема, з використанням синхронних двигунів. Розглянуто доцільність їх використання спільно з низьковольтними конденсаторними установками в електричних мережах підприємств.

В технологічних процесах підприємств відносно активне навантаження синхронних двигунів (СД) $\beta = P/P_{cd}$ знаходиться в межах 0,5...1,0 в.о. (відносних одиниць) (де P – потужність, споживана СД номінальної потужності P_{cd} з мережі, кВт). Під час регулювання напруги, підведеної до СД, це дозволяє використовувати його в режимі компенсації реактивної потужності (КРП) [1-5].

Оптимальна величина генерованої СД реактивної потужності визначається техніко-економічними розрахунками з урахуванням активного навантаження СД та реактивного навантаження мережі споживача, теплового режиму СД та питомих втрат активної потужності в СД. Із зменшенням номінальної потужності і частоти обертання СД величини питомих втрат значно зростають.

При використанні СД виключно для компенсації реактивної потужності питомі втрати активної потужності достатньо великі – в декілька разів більші, ніж при використанні СД в електроприводі. Це пояснюється, по-перше, тим, що в такому режимі всі втрати в двигуні, рівні втратам холостого ходу, розглядаються як витрати активної потужності на вироблення реактивної, а по-друге, СД без активного навантаження (як і генератори) не можуть в зв'язку з розмагнічуючою реакцією якоря видати реактивну потужність, рівну їх повній номінальній потужності. При цьому гранична реактивна потужність не-навантаженого СД становить в залежності від його конструкції лише 60...80 % його повної номінальної потужності.

При обґрунтуванні параметрів засобів КРП в мережі споживачів (рисунок 1), наприклад, низьковольтних конденсаторних установок (НКУ), до якої приєднані і високовольтні СД, доцільно розглянути їх використання в режимі КРП, оскільки, по-перше, це не вимагає початкових витрат на встановлення засобів КРП і, по-друге, при роботі з випереджаючим коефіцієнтом потужності повна потужність СД $S_{ном.СД}$, яка визначає його вартість, зростає в значно меншій мірі, ніж його компенсуюча здатність (таблиця 1).

Для цього необхідно знати межу економічно доцільного використання НКУ і СД для КРП (з урахуванням обмежень щодо перевантаження його обмоток ротора і статора) та їх залежність від параметрів мережі та режимів її роботи.

Таблиця 1

Залежність компенсуючої здатності СД від його повної потужності

Номінальний коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	1,0	0,9	0,85	0,8
Повна потужність, $S_{ном.СД}$, %	0	11	17	25
Компенсуюча здатність, $(Q_{СД}/P_{ном.СД}) \cdot 100$, %	0	48	62	75

Критерієм визначення такої межі можуть бути приведені витрати, що включають, з одного боку, вартість додаткових втрат активної потужності в СД від генерації реактивної потужності ΔP_{cd} та втрати активної потужності в елементах мережі, що з'єднує СД і споживачів (місце встановлення НКУ) і, з другого боку, сумарні витрати на КРП за допомогою НКУ (вартість НКУ, плата за споживання некомпенсованої реактивної енергії, втрати активної потужності в НКУ та експлуатаційні витрати).

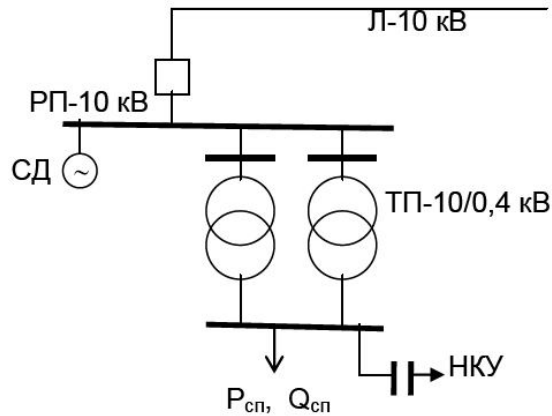


Рис.1. Пояснювальна схема електричної мережі

Вартість додаткових втрат активної потужності в СД в режимі генерації реактивної потужності складає

$$\Delta P_{cd_n} \cdot (D1 \cdot \alpha + D2 \cdot \alpha^2) \cdot T \cdot C_{роз}, \quad (1)$$

де ΔP_{cd_n} – втрати в СД при номінальному режимі його роботи, кВт; T – тривалість роботи СД протягом року в залежності від кількості змін на підприємстві, год; $\alpha = Q/Q_{cd}$ – коефіцієнт завантаження СД реактивною потужністю, в.о.; Q – скомпенсована двигуном реактивна потужність, кВАр; Q_{cd} – номінальна реактивна потужність СД, кВАр, $D1$, $D2$ – коефіцієнти втрат активної потужності в СД від генерації реактивної, які представлені в таблиці 2 середніми значеннями в залежності від швидкості СД [1].

Таблиця 2

Залежність коефіцієнтів втрат активної потужності в СД від швидкості СД

Частота обертання СД, н, хв ⁻¹	D1, в.о.	D2, в.о.
250	0,15	0,11
500	0,13	0,1
1000	0,1	0,08

Вартість НКУ можна представити апроксимуючою залежністю від її потужності Q з коефіцієнтами апроксимації $a=75,414$ грн/кВАр і $b=3398$ грн:

$$K = a \cdot Q + b \quad (2)$$

Оскільки в електричній мережі СД і НКУ розділяє ТП-10/0,4 кВ з навантаженням споживачів P_{cn} , Q_{cn} , то необхідно враховувати вплив цих засобів компенсації на втрати активної енергії в силових трансформаторах ΔWm_q номінальною потужністю S_m , кВт:

$$Wm_q = \frac{P_k}{N_m} \cdot \left(\frac{Q_{cn} - Q}{S_m} \right)^2 \cdot T \cdot C_{роз}, \quad (3)$$

де ΔP_{κ} – втрати потужності короткого замикання, кВт; N_m – кількість силових трансформаторів, шт; $C_{роз}$ – роздрібний тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

Крім цього, при використанні НКУ необхідно враховувати вартість втрат активної потужності від некомпенсованої реактивної потужності, що обумовлених мінімальною потужністю ступені НКУ та втратами в самих конденсаторах

$$\Delta Q_{\min} T \cdot D \cdot C_{\text{онм}} + Q \cdot \Delta p \cdot T \cdot C_{\text{роз}}, \quad (4)$$

де D – економічний еквівалент реактивної потужності (ЕЕРП), кВт/кВАр; $C_{\text{онм}}$ – середній тариф оптового ринку на електроенергію, грн/кВт·год; $\Delta Q_{\min}$ – мінімальна потужність ступені НКУ, кВАр; Δp – питомі втрати активної потужності в конденсаторах НКУ, кВт/кВАр.

З урахуванням наведеного визначається економічний коефіцієнт реактивного завантаження СД α_e , що розмежовує зони використання СД і НКУ:

$$\alpha_e = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A \cdot C}}{2A}, \quad (5)$$

де

$$\left. \begin{aligned} A &= Q_{\text{сд}} C_{\text{роз}} \left(D^2 \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\text{tg} \varphi_{\text{н}}} - \frac{P_{\kappa} Q_{\text{сд}}}{N_{\text{т}} S_{\text{т}}^2} \right); \\ C &= - \left(\frac{b(e + E_e)}{T} + Q_{\min} C_{\text{опт}} D \right); \\ B &= Q_{\text{сд}} C_{\text{роз}} \left(D \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\text{tg} \varphi_{\text{н}}} + \frac{2 Q_{\text{сп}} P_{\kappa}}{N_{\text{т}} S_{\text{т}}^2} - \frac{a(e + E_e)}{C_{\text{роз}} T} - p \right), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де e , E_e – номінальна ставка дисконту і експлуатаційних відрахувань, в.о.; $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД СД; $\text{tg} \varphi_{\text{н}}$ – номінальний коефіцієнт реактивної потужності.

Для вузла навантаження мережі (рисунок 1) з параметрами: потужності навантаження ТП становлять $P_{\text{сн}}=1600$ кВт і $Q_{\text{сн}}=1300$ кВАр, кількість силових трансформаторів $N_m=2$ номінальною потужністю $S_m=1000$ кВА; активна та реактивна потужності СД $P_{\text{сд}}=1250$ кВт, $Q_{\text{сд}}=650$ кВАр; $\text{tg} \varphi_{\text{н}}=0,5$; $\eta_{\text{н}}=0,95$; $D=0,05$ кВт/кВАр; $C_{\text{роз}}=0,26$ грн/кВт·год; $C_{\text{онм}}=0,11$ грн/кВт·год; $\Delta p=0,0015$ кВт/кВАр.

Як видно з таблиці 1 і рисунка 2, величини економічних реактивних завантажень СД α_e найбільше різняться у випадку однозмінного підприємства і зменшуються із збільшенням кількості змін N підприємства.

Для забезпечення надійної роботи СД необхідно враховувати наявність оптимальної зони струмів збудження, при якій мають місце мінімальні втрати активної потужності, які не створюють перегрівання обмоток статора і ротора. В період великих і максимальних навантажень доцільно підтримувати режим перезбудження, що забезпечить роботу СД в режимі генерації реактивної потужності.

Таблиця 3

Залежність величини економічного реактивного завантаження СД α_e з активним завантаженням СД $\beta=1$ від швидкості обертання СД і змінності роботи підприємства

Кількість змін роботи підприємства	Економічні навантаження СД, α_e , (в.о.) при швидкостях обертання, n , хв^{-1}		
	250	500	1000
1	0,236	0,291	0,452
2	0,086	0,096	0,117
3	0,063	0,069	0,081

$\alpha_e N$, в.о.

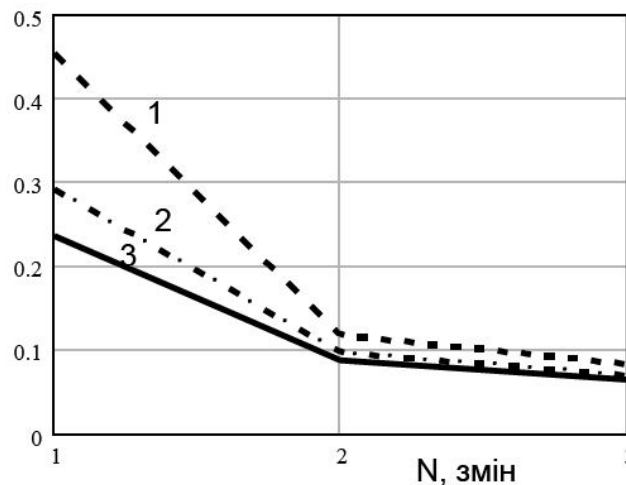


Рис.2. Залежності економічного реактивного завантаження СД $\alpha_e N$ від змінності роботи підприємств N при швидкостях СД: 1— $n=1000 \text{ хв}^{-1}$; 2 — $n=500 \text{ хв}^{-1}$; 3 — $n=250 \text{ хв}^{-1}$

В режимі генерації СД реактивної потужності його реактивне завантаження обмежується умовами нагрівання обмоток статора $\alpha_{ст.дон}$ і ротора $\alpha_{р.дон}$ [2]:

$$\alpha_{ст.дон} \leq \frac{\sqrt{I - \varepsilon^2 \cdot \cos^2 \varphi_{ном}}}{\sin \varphi_{ном}}; \quad \alpha_{р.дон} \leq \frac{\sqrt{e^2 - \varepsilon^2 \cdot x_d^2 \cdot \cos^2 \varphi_{ном}} - 1}{x_d \cdot \sin \varphi_{ном}}, \quad (7)$$

де x_d — реактивний опір СД за поздовжньою віссю, в.о.; $\varphi_{ном}$ — кут зсуву фаз між струмом і напругою в номінальному режимі; $\varepsilon^2 = \cos^2 \varphi_{ном} + (x_d + \sin \varphi_{ном})^2$ — коефіцієнт.

Ці допустимі завантаження СД реактивною потужністю мало залежать від реактивного опору за поздовжньою віссю x_d [2], а більше залежать від активного завантаження β СД. В режимі активного недовантаження ($\beta < 1$) більш жорсткі обмеження обумовлені умовами нагрівання обмоток ротора СД $\alpha_{р.дон}$, а при перевантаженні СД активною потужністю ($\beta > 1$) більш обмеження будуть обумовлені уже умовами нагрівання обмоток статора СД $\alpha_{ст.дон}$ (рисунки 3-5).

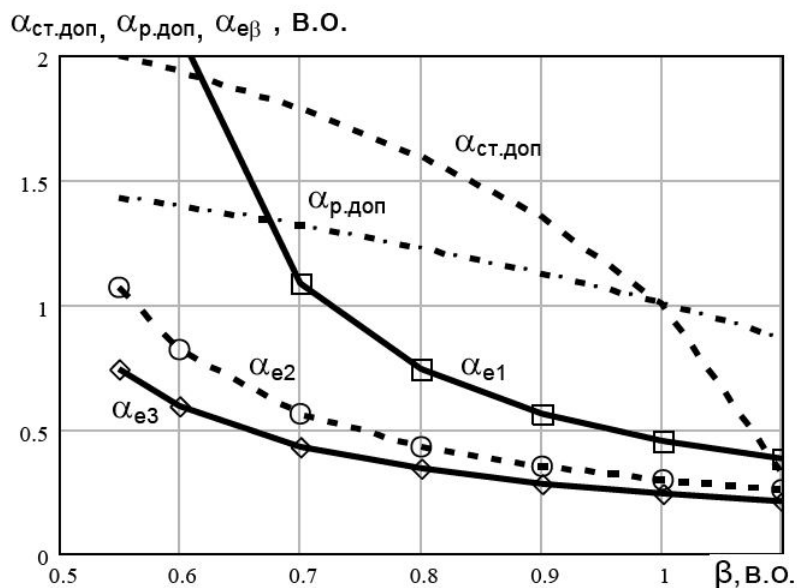


Рис.3. Залежності допустимих $\alpha_{\text{ст.доп}}$ і $\alpha_{\text{р.доп}}$ та економічних $\alpha_{\text{е}\beta}$ реактивних навантажень СД від активного навантаження β для однозмінних підприємств при швидкостях СД: $\alpha_{\text{е1}} - n=1000 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha_{\text{е2}} - n=500 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha_{\text{е3}} - n=250 \text{ хв}^{-1}$

Як видно з рисунка 3, для однозмінних підприємств економічні реактивні навантаження СД тільки для тихохідних СД $\alpha_{\text{е1}}$ обмежуються допустимими навантаженнями: $\alpha_{\text{р.доп}}$ (при $\beta < 0,67$) і $\alpha_{\text{ст.доп}}$ (при $\beta < 0,62$).

Для більш швидкісних СД економічні реактивні навантаження $\alpha_{\text{е2}}$, $\alpha_{\text{е3}}$ менші допустимих навантажень.

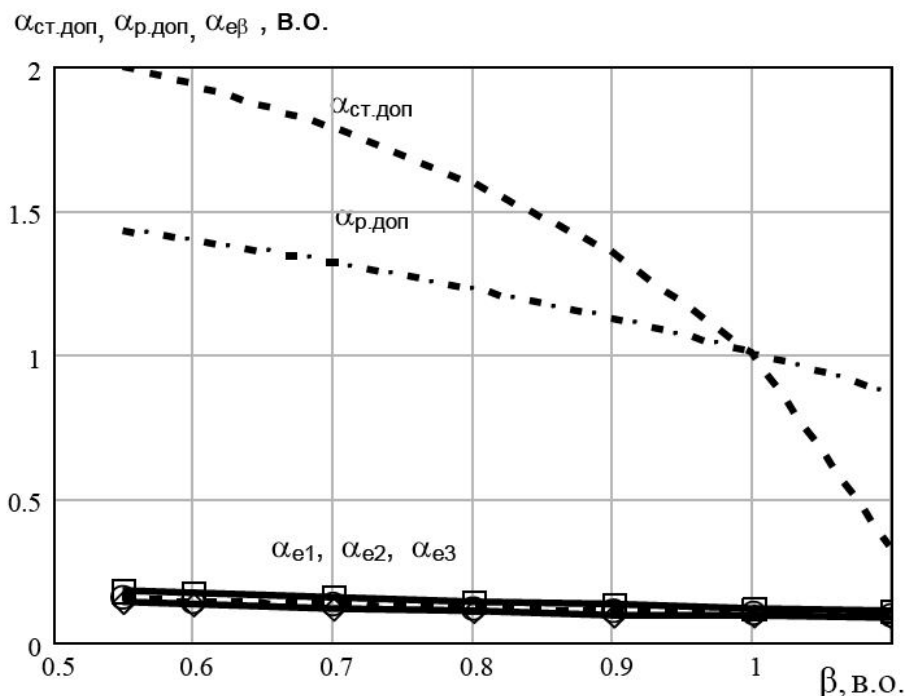


Рис. 4. Залежності допустимих $\alpha_{\text{ст.доп}}$ і $\alpha_{\text{р.доп}}$ та економічних $\alpha_{\text{е}\beta}$ реактивних навантажень СД від активного навантаження β для двозмінних підприємств при швидкостях СД: $\alpha_{\text{е1}} - n=1000 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha_{\text{е2}} - n=500 \text{ хв}^{-1}$; $\alpha_{\text{е3}} - n=250 \text{ хв}^{-1}$

Як показали результати розрахунків, для двозмінних підприємств (рисунк 4) економічні реактивні завантаження СД практично не залежать від частоти обертання СД n і активного їх завантаження β і набагато менші допустимих реактивних навантажень (таблиця 4). Це вказує на низьку економічну ефективність використання СД таких підприємств для КРП.

Таблиця 4

Залежність економічного реактивного завантаження α_e від активного навантаження β різних за потужністю СД швидкістю 500 хв^{-1} для двозмінного підприємства

Активне навантаження СД β , в.о.	Економічні реактивні навантаження α_e (в.о) для різних за потужністю (кВт) СД						
	500	800	1000	1250	1600	2500	4000
0,6	0,32	0,21	0,17	0,14	0,111	0,072	0,046
0,8	0,26	0,17	0,14	0,11	0,09	0,059	0,037
1,0	0,22	0,14	0,12	0,096	0,076	0,049	0,031
1,1	0,2	0,13	0,11	0,089	0,07	0,046	0,029

Окремі результати розрахунків, які наведені в таблиці 4, показують, що із зростанням потужності СД економічне реактивне навантаження α_e зменшується приблизно в 7 разів, незалежно від β , а при збільшенні активного навантаження β економічне реактивне навантаження α_e зменшується приблизно в 1,5 рази, незалежно від потужності СД. До того ж, межі змін цих економічних реактивних навантажень вказують на низьку ефективність використання СД для КРП низьковольтних споживачів.

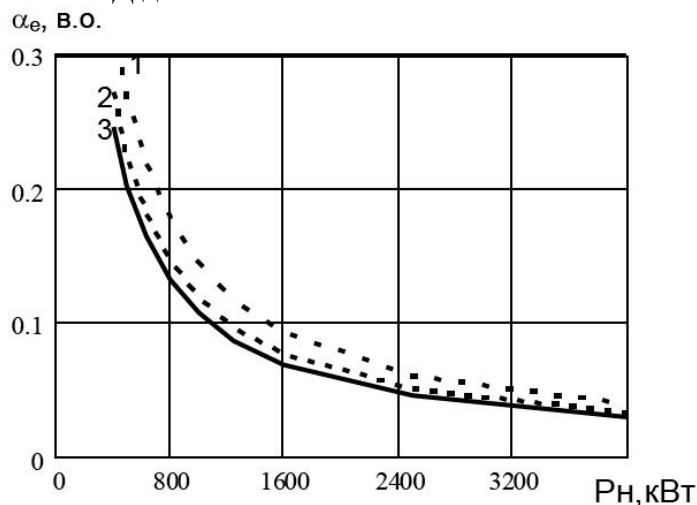


Рис.5. Залежності економічних реактивних завантажень α_e від потужності СД двозмінного підприємства при активному завантаженні $\beta=1$ і різних швидкостях СД:
 $1 - n=1000 \text{ хв}^{-1}$; $2 - n=500 \text{ хв}^{-1}$; $3 - n=250 \text{ хв}^{-1}$

Збільшення кількості змін роботи підприємства (рисунк 2), як і збільшення потужності СД (таблиця 3, рисунок 5) призводить до зменшення і так незначної величини економічного реактивного завантаження СД.

Короткочасне перевантаження СД в режимі компенсації реактивної потужності не розглядається, тому що не є характерним для цього режиму, а застосовується для забезпечення стійкості вузла навантаження (форсування збудження), зниження коливань реактивної потужності і напруги в мережі з різкозмінним навантаженням, тощо.

В період мінімальних навантажень СД може працювати з меншою компенсаційною здатністю і навіть в режимі споживання реактивної потужності з мережі, що обмежується умовами статичної стійкості [3].

Отже, компенсаційна доцільність і можливість СД при визначенні параметрів НКУ повинна враховуватись наступним чином. Знаючи відносне активне навантаження СД β , визначають відносне економічне реактивне завантаження СД α_e і порівнюють його з допустимими навантаженнями СД за умовами нагрівання обмоток ротора $\alpha_{p.don}$ і статора $\alpha_{ст.don}$, якщо воно не перевищує цих допустимих навантажень, тобто

$$\alpha_e \leq \alpha_{p(ст).don}, \quad (8)$$

тоді абсолютне економічно доцільне реактивне навантаження СД визначають, як:

$$Q_{e.cd} = \alpha_e \cdot Q_{cd}, \text{ кВАр}. \quad (9)$$

Якщо ж відносне економічне реактивне навантаження СД α_e більше одного з допустимих, тобто:

$$\alpha_e > \alpha_{p.don} \quad \text{або} \quad \alpha_e > \alpha_{ст.don}, \quad (10)$$

то абсолютне економічно доцільне (і допустиме) реактивне навантаження СД визначають за меншим із допустимих навантажень ($\alpha_{p.don}$ або $\alpha_{ст.don}$):

$$Q_{e.cd} = \alpha_{p(ст).don} \cdot Q_{cd}, \text{ кВАр}. \quad (11)$$

Тоді потужність НКУ $Q_{вкУ}$ для компенсації споживаної реактивної потужності визначається як різниця між споживаною реактивною потужністю і генерованою високовольтним СД:

$$Q_{вкУ} = Q_{сн} - Q_{e.cd}, \text{ кВАр}. \quad (12)$$

Висновки

1. Під час вирішення задачі компенсації реактивної потужності на підприємствах з високовольтними СД для обґрунтування параметрів НКУ необхідно знати величину економічного реактивного завантаження СД. При цьому необхідно враховувати і допустиме реактивне завантаження СД, обумовлене нагріванням обмоток ротора і статора.
2. Для СД однозмінних підприємств межі економічного реактивного завантаження мають більші величини і більшу залежність від активного завантаження та швидкості СД, ніж дво- і тризмінних підприємств (рисунк 3).
3. Для СД багатозмінних підприємств економічні завантаження мають порівняно малі значення і практично не залежать від частоти обертання і активного завантаження СД, що вказує на низьку економічну ефективність використання цих СД для КРП споживачів (рисунк 4).
4. Із зменшенням номінальної потужності і номінальної швидкості СД величини питомих втрат значно зростають, що пояснює зменшення економічного реактивного завантаження СД, а отже, і меншу ефективність використання малопотужних і тихохідних СД для КРП.
5. Наявність силових трансформаторів та інших суміжних елементів мережі між СД і НКУ робить малоефективним використання СД для КРП низьковольтних споживачів внаслідок втрат активної потужності (3) в цих елементах.
6. Знаючи економічне α_e та допустимі $\alpha_{p.don}$, $\alpha_{ст.don}$ реактивні навантаження СД, за меншим з них згідно (9), (11) визначають абсолютну величину генерованої СД в мережу реактивної потужності і згідно (12) необхідну потужність НКУ.

Список літературних джерел

1. Омельчук А.О. Щодо компенсації реактивної потужності синхронними двигунами споживачів //Енергетика и электрификация. – 2005. – № 3. – С. 32-35.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей /Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Щербаков Е.Ф., Петров В.М. Оптимизация потерь мощности в электрических сетях и синхронных двигателях при использовании их для компенсации реактивной мощности //Промышленная энергетика. – 1997. – № 5. – С. 40-42.
4. Вершинин П.П., Бугаенко А.П., Цыганок А.Г. Повышение эффективности использования синхронных двигателей для компенсации реактивных нагрузок //Промышленная энергетика. – 1989. – № 8. – С. 22-24.
5. Омельчук А.А., Раевский В.Ф. Энергосбережение в электрических сетях энергетических компаний //Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – № 4. – С. 17-21.
6. Омельчук А.О. Щодо участі синхронних двигунів у компенсації реактивної потужності /А.О. Омельчук, С.М. Волошин, А.В. Петренко /Промелектро. – 2010. – № 1. – С. 46-51.

УДК 621.316.1

И.В. Пентегов, д-р техн. наук**В.М. Безручко**, инженер**А.Л. Приступа**, канд. техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ВЫБОР МЕСТ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ФИЛЬТРА ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ К РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВЫСОТНЫХ АДМИНИСТРАТИВНЫХ И ОФИСНЫХ ЗДАНИЙ

Представлены основные подходы при расчете и выборе мест присоединения фильтра токов нулевой последовательности к распределительной сети высотных административных и офисных зданий с учетом критериев: фильтрации высших гармоник тока нулевой последовательности; подавления высших гармоник напряжения нулевой последовательности; изменение потерь, вызванных токами гармоник нулевой последовательности в распределительной сети.

Введение

Большинство оборудования, которое используется в административных и офисных зданиях, построено с использованием импульсных источников питания с бестрансформаторным входом и представляют собой нелинейные нагрузки, генерирующие в сеть высшие гармоники тока. Суммарный эффект от этих нагрузок может проявляться в искажении напряжения, которое воздействует на другое оборудование, питающееся от той же сети. На трехфазную сеть с нулевым проводом особое влияние оказывают высшие гармоники тока, кратные трем (3, 9, 15,...), определяющие высокие значения суммарного коэффициента гармоник тока THD_I (Total Harmonic Current Distortion) и напряжения THD_U (Total Harmonic Voltage Distortion), генерируемые однофазными нагрузками. В трехфазной системе фаз гармоники токов прямой и обратной последовательностей по нулевому проводнику не протекают, следовательно, не вызывают падения напряжения и дополнительных потерь электроэнергии в нейтрали, в отличие от гармоник токов нулевой последовательности (НП), возникающих из-за несимметричного распределения нагрузок между фазами и гармоник, кратных трем. В подавляющем большинстве случаев гармоники, кратные трем, в трехфазных цепях совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Все гармоники нулевой последовательности суммируются в проводнике нейтрали. В результате, даже при симметричной загрузке фаз значение тока в нейтрали может превышать значения фазных токов. Например, при фазных токах, равных 37 А, ток нейтрали может составлять 55 А [1]. Вследствие этого нейтраль трехфазных сетей может перегреваться вплоть до воспламенения. Положение усугубляется ещё и тем, что в существующих сетях используется провод нейтрали меньшего поперечного сечения, чем сечение фазных проводов. Токи нулевой последовательности приводят к дополнительным потерям не только в нейтрали, но и в трансформаторах и электрических машинах, к нагреву конденсаторов и кабелей распределительной сети и другим негативным эффектам. Кроме того, гармоники токов НП увеличивают искажение формы кривой напряжения, отрицательно влияя на электромагнитную совместимость нагрузок. Для борьбы с токами НП широкое распространение получили разработанные в Институте электродинамики НАН Украины автотрансформаторные фильтры токов нулевой последовательности (ФТНП) с соединением обмоток в зигзаг [2-3], а также предложенные авторами фильтры [4].

На сегодняшний день нет четких рекомендаций по выбору мест присоединения ФТНП к распределительной сети высотных административных или офисных зданий. Поэтому целесообразно проведение исследований для определения мест присоединения ФТНП для конкретной сети здания, при подключении к которым ФТНП будет обладать наибольшей эффективностью. Это позволит выбирать ФТНП с минимальными

требованиями к параметрам, а следовательно, минимальной стоимостью, что является актуальной задачей.

Наиболее предпочтительная точка присоединения ФТНП к сети должна определяться на основании анализа основных параметров режима сети. Поэтому выбор производится с учетом различных критериев, в качестве которых можно привести следующие.

- 1) Фильтрация высших гармоник тока НП для разгрузки нулевого проводника.
- 2) Подавление высших гармоник напряжения НП для повышения качества электроэнергии.
- 3) Изменение потерь, вызванных токами гармоник НП в распределительной сети.

Выбор схемы замещения низковольтной сети с нелинейными нагрузками

В высотных зданиях с большим количеством этажей выполняют один, два (или более) стояка (магистральных шинопроводов, идущих от трансформаторной подстанции (ТП) на первом этаже и до последнего этажа). В особых случаях применяют варианты размещения трансформаторной подстанции между этажами здания. В таком случае шинопроводы низкого напряжения расходятся вверх и вниз по зданию. Однако, последний вариант связан с большими техническими сложностями (подъем трансформатора, использование только сухих трансформаторов, создание высоковольтного ввода в здание, построение систем принудительной вентиляции и т.д.) [5].

В статье для упрощения рассмотрим исполнение здания с одним стояком. Составим схему замещения сети для расчета токов в нулевом рабочем проводнике в номинальном режиме. Для расчетов воспользуемся традиционной моделью, основанной на использовании однолинейной схемы замещения, в которой нелинейная нагрузка каждого этажа здания задаётся источником тока высших гармоник. Данный подход является традиционным для определения искажения синусоидальности кривой напряжения для низковольтных распределительных сетей [6, 7].

При построении схем замещения и расчетах примем ряд допущений: нагрузка в здании однотипна и распределена равномерно по этажам; нагрузка в фазах на каждом этаже симметрична, поэтому в нулевой провод попадают только гармоники токов НП.

Рассмотрим случай использования одного ФТНП для фильтрации гармоник токов НП. Схема замещения распределительной сети m -этажного здания при условии подключения ФТНП на k -том этаже представлена на рисунке 1.

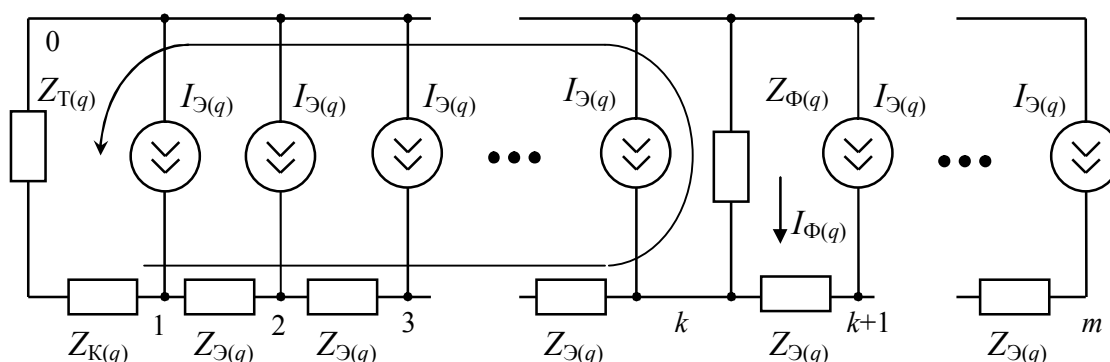


Рис. 1. Однолинейная схема замещения сети НН с одним ФТНП

На рисунке даны обозначения: $Z_{T(q)}$ – полное сопротивление трансформатора для q -той гармоники тока НП, $Z_{T(q)} = R_T + j \cdot q \cdot X_T$; X_T – реактивное сопротивление трансформатора токам НП основной частоты; $Z_{K(q)}$ – полное сопротивление участка трансформатор-первый этаж для q -той гармоники НП $Z_{K(q)} = R_K + j \cdot q \cdot X_K$; X_K – реактивное сопротивление участка трансформатор-первый этаж токам НП основной частоты. Необходимо отметить, что в сопротивление $Z_{K(q)}$ входит сопротивление шинопровода участка

трансформатор-первый этаж, измерительных трансформаторов тока и автоматических выключателей. $Z_{\Sigma(q)}$ – полное сопротивление шинпровода между этажами для q -той гармоники НП, $Z_{\Sigma(q)} = R_{\Sigma} + j \cdot q \cdot X_{\Sigma}$; X_{Σ} – реактивное сопротивление шинпровода между этажами токам НП основной частоты. $I_{\Sigma(q)}$ – ток q -той гармоники одного этажа.

Приведенная схема замещения несколько отличается от традиционных схем замещения, приведенных в работах [6,7]. Это связано с тем, что в традиционных схемах необходимо пересчитывать параметры схемы замещения (сопротивление кабеля, трансформатора и т.д.) на ток одной фазы. Представленная схема замещения ориентирована на операции с током нулевого рабочего проводника (далее в статье нулевого проводника), другими словами, с утроенным током нулевой последовательности фазы. Поэтому увеличение сопротивления нулевого проводника в схеме замещения не происходит, а сопротивление фазного проводника уменьшается в 3 раза.

Необходимо отметить, что данный подход не учитывает изменение тока нелинейных потребителей при изменении качества и амплитуды напряжения, однако позволяет определить место присоединения ФТНП к сети, в которой он будет обладать наибольшей эффективностью, без оценки мощности потребителей и доли нелинейных нагрузок. Это в значительной степени упрощает расчеты по сравнению с существующими методиками [2] и позволяет получить приемлемую для практики точность.

Определение точки присоединения ФТНП к сети для наиболее эффективной разгрузки нулевого проводника от гармоник токов нулевой последовательности

Рассмотрим распределительную сеть высотного здания при условии присоединения одного ФТНП к сети. Составим уравнения для расчета схемы замещения сети (рис. 1) и определения места установки фильтра.

Составим систему уравнений, используя метод контурных токов. Таким образом, найдем токи в элементах схемы замещения без фильтра. При присоединении фильтра образуется дополнительный контур. Для схемы замещения сети (рис. 1), при условии отключенного ФТНП от сети ($Z_{\Phi} = \infty$), ток в нулевом проводнике на межэтажных участках:

$$I_{\text{МЭ без } \Phi(q)}(n) = I_{\Sigma(q)} \cdot (m - n + 1), \quad (1)$$

где n – номер межэтажного участка (1 – трансформатор-первый этаж; 2 – 1-2 этаж, 3 – 2-3 этаж, и т.д.).

При присоединении фильтра образуется дополнительный контур. Из метода контурных токов получим результирующие токи в элементах:

$$I_{\text{МЭ}(q)}(n) = \begin{cases} I_{\Sigma(q)} \cdot (m - n + 1) - I_{\Phi(q)}(k) & \text{при } 1 \leq n \leq k; \\ I_{\Sigma(q)} \cdot (m - n + 1) & \text{при } n > k, \end{cases} \quad (2)$$

где $I_{\Phi(q)}$ – ток контура с фильтром; k – этаж, на котором подключен ФТНП.

Ток $I_{\Phi(q)}$ найдем из соображений, что при появлении контура с током $I_{\Phi(q)}$ падение напряжения на участке от трансформатора до фильтра уменьшится на величину, равную произведению тока $I_{\Phi(q)}$ на полное сопротивление элементов схемы замещения, и будет равно напряжению на фильтре:

$$U_{01(q)} + U_{1k(q)} - I_{\Phi(q)} \cdot [Z_{T(q)} + Z_{K(q)} + Z_{\Sigma(q)} \cdot (k - 1)] = I_{\Phi(q)} \cdot Z_{\Phi(q)}, \quad (3)$$

где $U_{01(q)}$ – падение напряжения q -той гармоники на участке 0 – 1; $U_{1k(q)}$ – падение напряжения q -той гармоники на участке от первого этажа до этажа установки фильтра.

Найдем падение напряжения на элементах схемы замещения. При отключенном $Z_{\Phi(q)}$ напряжение на межэтажных участках $U_{01(q)} = I_{\Sigma(q)} \cdot m \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)})$; $U_{12} = I_{\Sigma(q)} \cdot (m - 1) \cdot Z_{\Sigma(q)}$; $U_{23} = I_{\Sigma(q)} \cdot (m - 1 - 1) \cdot Z_{\Sigma(q)}$; $U_{34(q)} = I_{\Sigma(q)} \cdot (m - 2 - 1) \cdot Z_{\Sigma(q)}$; ...

$$U_{(n-1)n(q)} = I_{\Sigma(q)} \cdot (m - n + 1) \cdot Z_{\Sigma(q)}. \quad (4)$$

Исходя из этого, можно записать падение напряжения на всей длине магистрального шинопровода от первого до последнего этажа:

$$U_{1m(q)} = I_{\Sigma(q)} \cdot Z_{\Sigma(q)} \cdot m \cdot (m-1)/2. \quad (5)$$

Тогда напряжение на участке от 1 этажа до этажа установки фильтра:

$$U_{1k(q)} = U_{1m(q)} - U_{km(q)} = I_{\Sigma(q)} \cdot Z_{\Sigma(q)} \cdot [m \cdot (m-1) - (m-k) \cdot (m-k-1)]/2 = \\ = I_{\Sigma(q)} \cdot Z_{\Sigma(q)} \cdot (2m \cdot k - k^2 - k)/2. \quad (6)$$

Подставив (5) в (3) и выразив $I_{\Phi(q)}$ получим:

$$I_{\Phi(q)}(k) = I_{\Sigma(q)} \frac{m \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)}) + Z_{K(q)} \cdot (2m \cdot k - k^2 - k)/2}{Z_{\Phi(q)} + Z_{T(q)} + Z_{K(q)} + Z_{T(q)} \cdot (k-1)}. \quad (7)$$

Для определения места установки ФТНП для критерия разгрузки нулевого проводника от тока НП необходимо найти значение параметра k – этажа, на котором будет присоединен ФТНП к сети, при котором максимальное значение тока гармоник НП на межэтажных участках будет минимальным.

При отключенном фильтре гармоники тока НП, генерируемые нелинейной нагрузкой, замыкаются через трансформатор, поэтому максимальное значение тока в нулевом проводнике будет на участке сети трансформатор-первый этаж. А при условии включенного фильтра максимум тока может находиться на участках: трансформатор-первый этаж и на межэтажных промежутках вблизи фильтра, т.к. гармоники тока НП, генерируемые нелинейной нагрузкой, замыкаются не только через трансформатор, но и фильтр. Для того, чтобы найти величину максимального тока в нулевом проводнике, необходимо сравнить токи на выше указанных участках.

Для примера рассмотрим высотное 25 этажное офисное здание с питанием от пристроенной двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами ТМЗ-1000/10. Параметры трансформаторов $Z_{T(q)} = 1,3 + j \cdot q \cdot 8,9$ мОм [8]. По этажам здания проложен шинопровод ШМА4-1250 с параметрами $r_1 = 0,034$ мОм/м, $x_1 = 0,016$ мОм/м, $r_{НП} = 0,054$ мОм/м, $x_{НП} = 0,053$ мОм/м [9]. Параметры фильтра $Z_{\Phi} = 10 + j \cdot q \cdot 5$ мОм [10]. Длина шинопровода от трансформаторов до стояка 20м, высота этажа 3,8м [5].

Величина третьей гармоники тока является наибольшей среди гармоник НП и определяет действующее значение тока в нулевом проводнике. Большинство методик по определению сечения нулевого проводника сети основываются лишь на расчетах величины третьей гармоники. Поэтому в дальнейшем для примера будем производить расчеты для третьей гармоники. Необходимо отметить, что приведенные формулы позволяют определять величины и других гармоник НП.

Согласно выше представленным формулам (1)-(7), построим график зависимости максимальной величины третьей гармоники тока в нулевом проводнике при подключении фильтра на различных этажах (рисунок 2). Значение тока третьей гармоники в нулевом проводнике на графике показано в процентах от максимального при подключении ФТНП возле трансформатора.

Из рисунка 2 видно, что установка фильтра на 16 этаже позволит наиболее эффективно разгрузить нулевой проводник шинопровода от тока третьей гармоники. Следует отметить, что для других параметров сети и фильтра зависимость на рисунке 2 будет иметь другой вид. Как видно из формул, величина $I_{MAX(q)}^*$ не зависит от величины тока этажа здания, из чего следует, что положение точки в сети, при присоединении к которой ФТНП будет обладать наибольшей эффективностью для разгрузки нулевого проводника от q -той гармоники, не зависит от доли нелинейных нагрузок.

Для найденной точки присоединения фильтра к сети построим графики величины третьей гармоники тока на межэтажных участках (рисунок 3). Величина тока на графике указана в относительных единицах, $I_{MЭ(q)}^* = |I_{MЭ(q)}|/|I_{\Sigma(q)}|$.

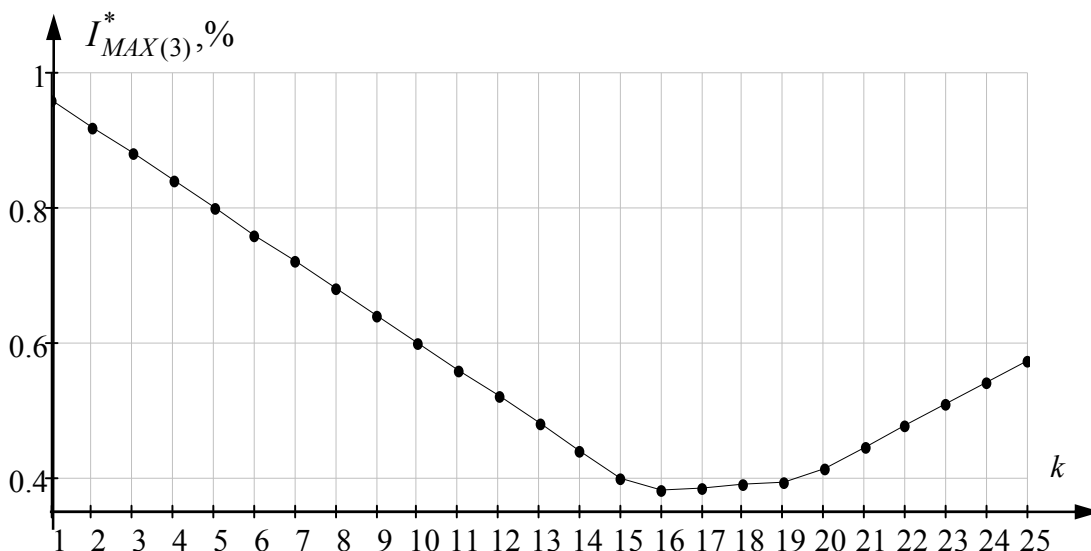


Рис. 2. Зависимость тока третьей гармоники в нулевом проводнике от этажа размещения фильтра

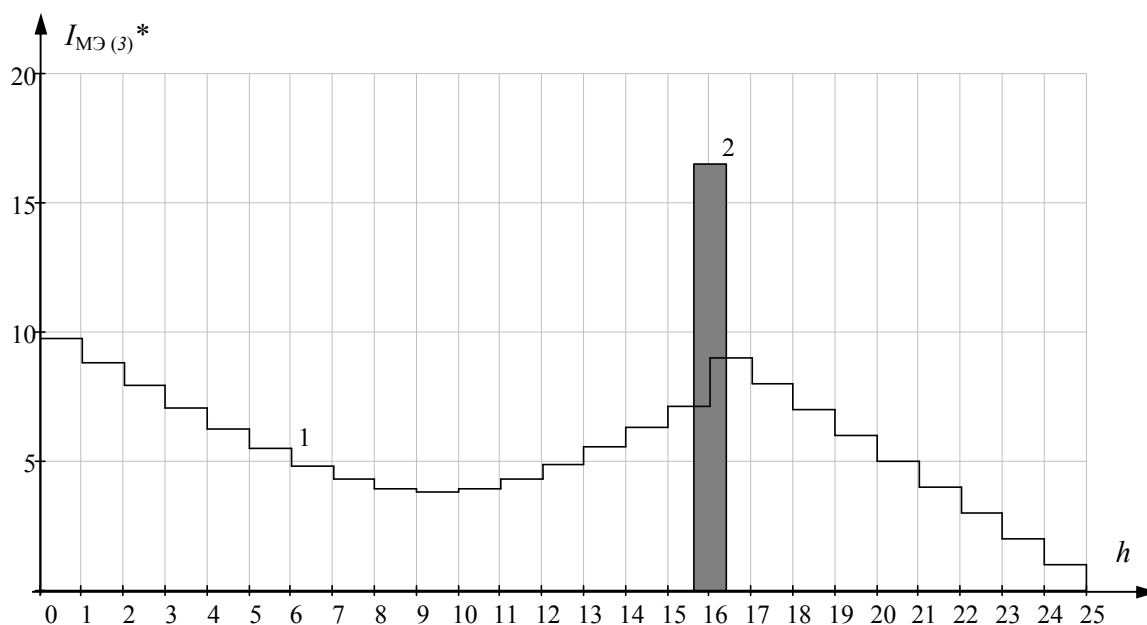


Рис. 3. Величина тока третьей гармоники в нулевом проводнике шинпровода на междуэтажных участках: 1 – при установке ФТНП на 16 этаже; 2 – ток третьей гармоники в фильтре

Из рисунка 3 видно, что при установке фильтра на 16 этаже удается уменьшить величину третьей гармоники тока на участке от трансформатор-фильтр более, чем в 2 раза. Как видно из рисунка, при установке ФТНП не образуется явного токораздела (точка в сети, находящаяся между трансформатором и ФТНП, для которой характерен нулевой ток в нулевом проводе, а по краям ток направлен в разные стороны: слева ток течет в трансформатор, справа – только в ФТНП). Это происходит из-за того, что комплексные сопротивления токам НП трансформатора и фильтра обладают различными углами.

Определение точки присоединения фильтра к сети для уменьшения искажений напряжения, вызванных гармониками тока НП

Уменьшение искажения напряжения при подключении к сети ФТНП можно оценивать исходя из величины напряжения каждой гармоники $U_{(q)}$ или величины коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, вызывающего гармоники тока.

Запишем напряжения гармоник НП на распределительном щите каждого этажа здания (ЭРЩ):

$$U_{\text{ЭРЩ}(q)}(h) = I_{T(q)} \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)}) + \sum_{n=2}^h I_{MЭ(q)} \cdot Z_{Э(q)}, \quad (8)$$

где h – номер этажа здания.

В значении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения наибольший и определяющий вклад среди гармоник НП вносит третья гармоника. Поэтому улучшение качества напряжения можно оценить по величине напряжения третьей гармоники. Для рассмотренного выше высотного здания по формулам (1)-(10) построим зависимость максимального по этажам здания напряжения третьей гармоники (рисунок 4). На графике напряжение $U_{\text{ЭРЩ}(3)}^*$ представлено в процентах от максимального напряжения при установке ФТНП непосредственно возле трансформатора.

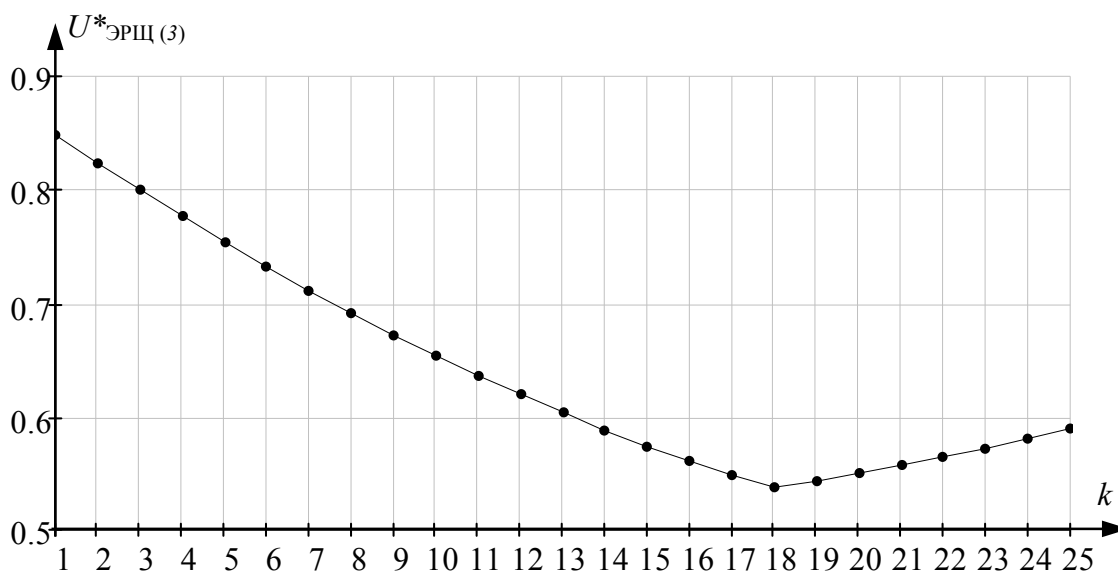


Рис. 4. Изменение третьей гармоники напряжения в зависимости от этажа, на котором может подключаться фильтр

Из рисунка 4 видно, что за счет изменения места установки ФТНП можно значительно повысить его эффективность. Таким образом, для наиболее эффективного снижения напряжения третьей гармоники необходимо размещать ФТНП на 18 этаже, при этом максимальное значение третьей гармоники напряжения может быть уменьшено на 40 и более процентов. Однако следует отметить, что при увеличении качества электрической энергии происходит увеличение токов гармоник. Поэтому эффект может быть значительно ниже.

Изменение потерь, вызванных токами нулевой последовательности, при присоединении фильтра токов нулевой последовательности к сети

При выборе места присоединения ФТНП к распределительной сети важно учитывать изменение потерь электроэнергии, вызванных гармониками тока.

Потери в сети от гармоник НП при отключенном ФТНП от сети:

$$\Delta P_{\text{безФ}(q)} = \Delta P_{\text{Ш}(q)} + \Delta P_{T(q)}, \quad (9)$$

где $\Delta P_{\text{Ш}(q)}$ – потери в шинном проводе; $\Delta P_{T(q)}$ – потери в трансформаторе.

Потери в сети от гармоник НП при установке одного ФТНП:

$$\Delta P_{(q)} = \Delta P_{\text{Ш}(q)} + \Delta P_{T(q)} + \Delta P_{\text{Ф}(q)}, \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{Ф}(q)}$ – потери в фильтре.

Величину потерь от гармоник НП можно определить для выше оговоренного приближения: нагрузки на этажах одинаковы и равномерно распределены по фазам. Таким образом, из условия ортогональности синусоидальных функций потери в сети от гармоник НП при отключенном ФТНП от сети:

$$\Delta P_{\text{безФ}(q)} = \sum_{n=2}^m |I_{\text{МЭ}(q)}(n)|^2 \cdot R_{\Sigma} + |I_{\text{Т}(q)}|^2 \cdot (R_{\text{Т}} + R_{\text{К}}). \quad (11)$$

Потери в сети от гармоник НП при установке одного ФТНП:

$$\Delta P_{(q)} = \sum_{n=2}^m |I_{\text{МЭ}(q)}(n)|^2 \cdot R_{\Sigma} + |I_{\text{Т}(q)}|^2 \cdot (R_{\text{Т}} + R_{\text{К}}) + |I_{\text{Ф}(q)}|^2 \cdot R_{\text{Ф}}. \quad (12)$$

Особый интерес вызывает величина изменения потерь в сети при установке ФТНП $\Delta P_{(q)}^* = \Delta P_{(q)} / \Delta P_{\text{безФ}(q)} \cdot 100\%$. Для рассмотренного высотного здания построим величину изменения потерь в сети, вызванных третьей гармоникой НП в зависимости от этажа размещения ФТНП (рисунок 5). Необходимо отметить, что данный подход не учитывает изменение тока нелинейных потребителей при изменении качества и амплитуды напряжения при установке ФТНП. При учете увеличения тока нелинейными нагрузками при улучшении качества напряжения величина потерь увеличится.

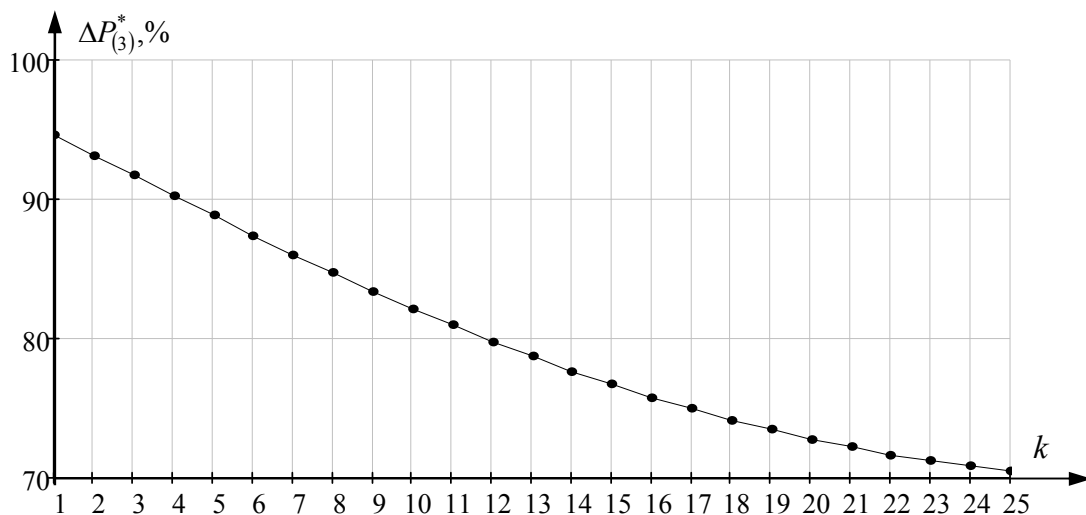


Рис. 5. Изменение потерь в сети, вызванных третьей гармоникой тока НП, в зависимости от места установки ФТНП

Из рисунка 5 видно, что наименьшие потери в сети будут при установке фильтра на верхнем этаже. Необходимо отметить, что при установке фильтра не всегда наблюдается уменьшение потерь. Поэтому при многокритериальной оценке важно учитывать величину изменения потерь.

Приведенные в статье рассуждения и расчеты можно повторить для других конструкций распределительной сети (наличия двух и более стояков), а также для случая установки в здании двух и более ФТНП.

Установка в сети двух ФТНП может быть целесообразна в случаях, если применение двух фильтров меньшей мощности и большего сопротивления токам НП является более дешевым по сравнению с применением одного с большей мощностью и меньшим сопротивлением токам НП или, если один ФТНП не позволяет добиться требуемых значений параметров режима сети.

Выводы

Для высотных административных и офисных зданий предложена методика определения места присоединения ФТНП к сети, в котором фильтр будет обладать наибольшей эффективностью для критериев: фильтрации высших гармоник тока нулевой последовательности; подавления высших гармоник напряжения нулевой последовательности и учета изменения потерь, вызванных токами гармоник нулевой последовательности в распределительной сети.

Список литературных источников

1. Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть //Современные технологии автоматизации – СТА. – № 2. – 1997. – С. 104-108.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
3. Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.
4. Пентегов И.В. Сравнительный анализ трехфазных фильтров токов нулевой последовательности автотрансформаторного и трансформаторного типа /И.В. Пентегов, С.В. Рымар И.В. Волков, В.М. Безручко, Б.Б. Ларченко, Г.С. Кривенко, М. Levin //Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки, Ч. 3. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – С. 49-56.
5. Росс Д. Проектирование систем ОВК высотных общественных многофункциональных зданий /Дональд Росс. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 166 с. – Перевод изд.: HVAC Design Guide for Tall Commercial Buildings /Donald E. Ross. Atlanta, 2004.
6. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
8. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – Л.: Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1988. – 176 с.
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ
10. Technical Data Sheet. for Neutral Current Eliminator of MIRUS International Inc. – 2005. Режим доступа [http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20\(NCE%20Tech%20Sheet\).pdf](http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20(NCE%20Tech%20Sheet).pdf)

УДК 621.311

В.А. Перетятко, инженер

ОАО ЭК «Черниговоблэнерго», г. Чернигов, Украина

ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Приведены общие сведения о принципах и средствах регулирования напряжения. Дан краткий обзор наиболее распространенных устройств автоматики РПН. Приведена информация об опыте эксплуатации РПН и некоторых их характерных неисправностях. Предложена авторская схема защиты от опасного повышения напряжения в результате неправильной работы привода.

Отклонения уровня напряжения от номинального значения, как в сторону повышения, так и в сторону понижения отрицательно сказываются на работе большинства потребителей электроэнергии: приводит к ухудшению условий работы оборудования, снижению производительности механизмов, сокращению срока службы электрооборудования, браку продукции [1]. Действующими государственными стандартами качества электроэнергии допускается отклонение напряжения у потребителей не более $\pm 10\%$ [2].

Напряжение на шинах низшего напряжения приемной подстанции (рисунок 1) определяется по выражению:

$$U_n \approx \left(U_\varepsilon - \frac{PR + QX}{U'_n} \right) \frac{1}{n_T}, \quad (1)$$

где U_n – напряжение на шинах высшего напряжения приемной подстанции;

U_ε – напряжение на шинах генератора;

R, X – активное и реактивное сопротивления питающей линии и трансформатора;

P, Q – активная и реактивная мощности, передаваемые по линии;

n_T – коэффициент трансформации силового трансформатора.

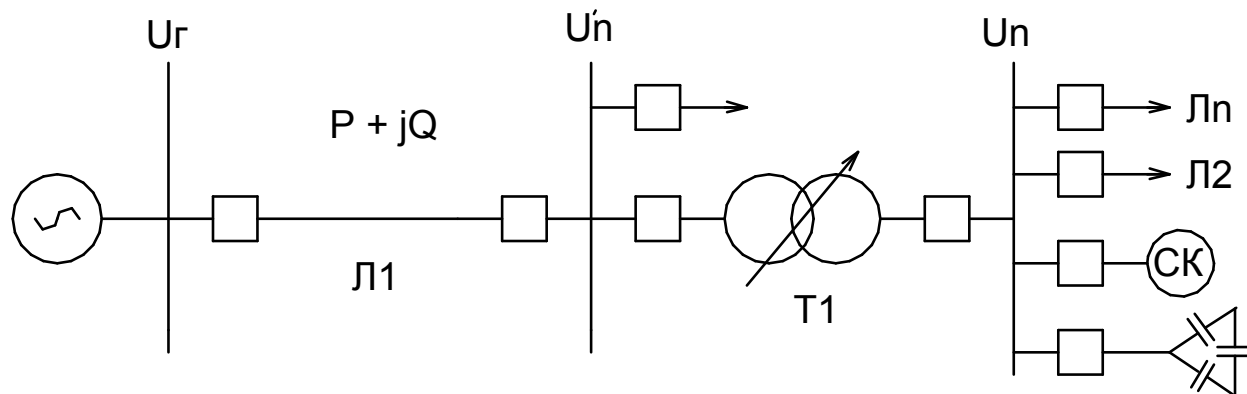


Рис. 1. Схема, поясняющая методы регулирования напряжения на шинах у потребителя

На основании выражения (1) можно сделать заключение, что изменить напряжение у потребителя U_n можно:

- изменением напряжения на шинах генератора ($\pm 5\% U_n$);
- изменением коэффициента трансформации n_T трансформатора, установленного на подстанции;
- изменением реактивной мощности Q , передаваемой по линии, что может осуществляться:
 - регулированием возбуждения синхронных компенсаторов или электродвигателей;
 - включением и отключением батарей конденсаторов, установленных на подстанции.

В настоящее время при присоединении промышленных потребителей техническими условиями, как правило, предусматривается компенсация реактивной энергии на месте ее выработки, т.е. на шинах потребителя. Обмен энергией, в этом случае, будет происходить между индуктивностью нагрузки и емкостью компенсирующих установок. При этом по линии между нагрузкой и источником энергии будет передаваться только некомпенсированная часть реактивной энергии (рисунок 1).

Одним из основных средств поддержания требуемого уровня напряжения на шинах подстанций является регулирование напряжения силовых трансформаторов путем изменения коэффициента трансформации.

По принципу действия различают устройства, позволяющие производить переключение числа витков обмоток силовых трансформаторов без возбуждения (ПБВ) и устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Как известно, устройства ПБВ предназначены для регулирования уровня напряжения в небольших пределах ($\pm 5\%$) только на полностью отключенных от сети силовых трансформаторах.

Основную роль в поддержании уровня напряжения в заданных пределах играют устройства РПН (регуляторы напряжения под нагрузкой), имеющие более широкий диапазон регулирования и позволяющие в больших пределах изменять коэффициент трансформации работающих трансформаторов.

Устройство РПН состоит из следующих основных частей:

- переключательное устройство;
- привод РПН;
- устройство автоматики.

Принцип переключения устройством РПН отпаяк обмоток трансформатора под нагрузкой показан на рисунке 2. В качестве примера, наглядно поясняющего принцип работы РПН, пошагово показана работа подвижных контактов (K1, K, K2) переключательного устройства с токоограничивающими резисторами при переключении из положения «n» в положение «n+1».

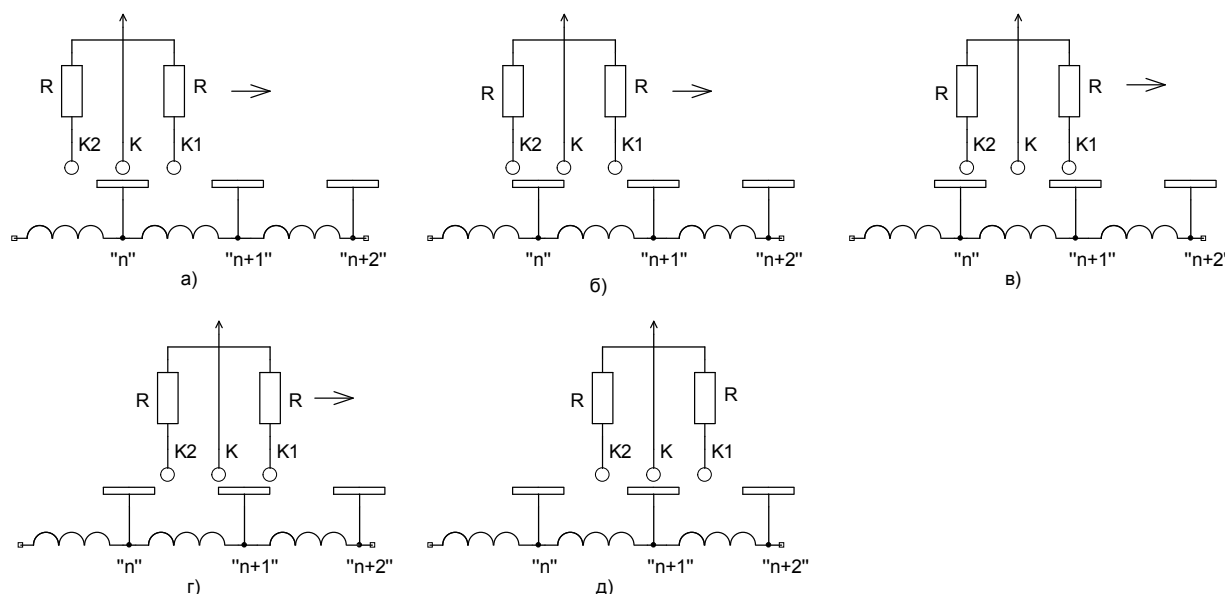


Рис. 2. Принцип переключения отпаяк обмотки трансформатора под нагрузкой

На таком принципе выполнен переключатель тонкого регулирования быстродействующего переключательного устройства типа РНТА-35/320, используемого в силовых трансформаторах общего назначения напряжением 35-110 кВ мощностью до

16 МВА [3]. Переключатель тонкого регулирования помещен в отдельном герметичном баке, заполненном трансформаторным маслом, которое не должно сообщаться с маслом в баке силового трансформатора.

Устройства РПН имеют широкий диапазон регулирования (например: $\pm 9 \times 1,78 \%$) и позволяют в больших пределах изменять коэффициент трансформации работающих трансформаторов. Контактные РПН находятся в отдельном от бака трансформатора отсеке, заполненном трансформаторным маслом.

Для приведения в действие переключающих устройств РПН служат специальные приводные механизмы – электроприводы РПН. Наибольшее распространение в республике получили отечественные приводы типа ПДП-4У и болгарские типа МЗ-4.

Электромоторный привод РПН предназначен для ступенчатого переключения отпаек обмоток трансформатора. Привод РПН обеспечивает такие режимы управления:

- местное (кнопками на приводе);
- дистанционное (ключом со щита управления);
- автоматическое (устройством автоматического регулирования напряжения трансформатора (АРНТ));
- ручное (механическое переключение при помощи специальной рукоятки на приводе).

Ручное управление РПН применяется при его наладке, при отсутствии питающего напряжения или при неисправности электромоторного привода.

Из условий безопасности персонала, переключение устройства РПН трансформатора, находящегося под напряжением, вручную с места (рукояткой или кнопками привода РПН) запрещено [1]. Во время переключений РПН нахождение персонала вблизи трансформатора запрещается. В случае обнаружения неисправностей устройства РПН, или его приводного механизма, устранять их необходимо при отключенном трансформаторе.

На трансформаторах 35-110 кВ широкое распространение получили устройства РПН болгарского производства. Для управления переключающими устройствами серии РС используется быстродействующий привод РПН типа МЗ-4. Для четкой остановки привода в нормальном положении применяется электродинамическое торможение электродвигателя, путем закорачивания выводов фазных обмоток его статора при помощи специального магнитного пускателя. Заводом-изготовителем предусмотрена возможность аварийной остановки привода РПН типа МЗ-4 в любой момент цикла переключения.

Основными причинами неправильной работы приводов РПН являются:

- задержка на отпадение («залипание») магнитных пускателей схемы РПН вследствие их загрязнения и загустения смазки торцов магнитопроводов;
- подгорание контактов магнитных пускателей;
- ухудшение торможения электродвигателя;
- нарушение работы нормальной работы блок-контактов привода РПН вследствие их окисления, разрегулировки, износа или поломки.

При таких неисправностях возможен так называемый «непрерывный ход» привода РПН: получив команду «Прибавить» («Убавить») на одно переключение, привод без остановки идет до крайнего положения.

Так как время переключения на одно положение современных быстродействующих приводов РПН составляет от 0,4...0,6 с (РНТА-35) до 4,5 с (МЗ-4), при появлении таких неисправностей оперативный персонал физически не может вовремя выявить и быстро остановить переключения.

При этом возможно опасное повышение (понижение) напряжения на шинах подстанции и у потребителей. Последствия таких неисправностей (технические и юридические) могут быть очень серьезными.

Профилактикой против появления подобных неисправностей является периодическая ревизия магнитных пускателей и механической части привода РПН.

Первые проявления неисправностей привода РПН могут быть своевременно выявлены при периодическом опробовании работы РПН. 10-ти кратный прогон привода РПН между крайними положениями для снятия оксидной пленки с силовых контактов рекомендуется производить не реже, чем 1 раз в год [3].

Так как исключить вероятность появления подобных неисправностей РПН практически невозможно, то для защиты от них необходимо предусматривать специальные меры. Одной из них может быть замена штатной схемы торможения электродвигателя привода РПН закорачиванием фаз на более эффективное и надежное конденсаторное торможение (рисунок 3). Емкость конденсаторов выбирается таким образом, чтобы потребляемый электродвигателем ток не изменился по величине, но имел емкостной характер.

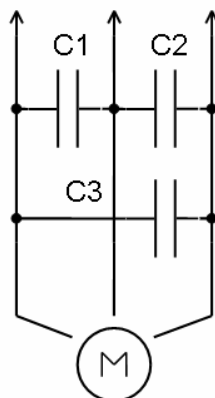


Рис.3. Схема конденсаторного торможения электродвигателя

Автором разработана, опробована на практике и уже внедрена на ряде подстанций Северных высоковольтных электросетей (СВЕС) простая и эффективная схема (рисунок 4) защиты от опасного повышения напряжения, действующая на остановку привода путем отключения питания. Защита срабатывает по двум факторам, однозначно выявляющих неисправность: высокое (но еще допустимое) напряжение на шинах и переключение привода РПН в сторону повышения напряжения. В этом случае защита без выдержки времени действует на отключение автоматического выключателя питания привода РПН при помощи штатного независимого расцепителя.

Из дополнительных элементов для выполнения схемы этой защиты понадобится только реле напряжения с высоким (не менее 95 %) коэффициентом возврата, указательное реле для фиксации факта срабатывания защиты и накладка – коммутационный аппарат для возможности ее вывода из работы.

Согласно требованиям правил технической эксплуатации (ПТЭ), устройства РПН должны быть в работе, как правило, с автоматическим управлением, а отказ от его применения должен быть обоснован. По решению технического руководителя энергообъекта допускается установка неавтоматического режима регулирования напряжения, если колебания напряжения в сетях находятся в пределах, удовлетворяющих требования потребителей электроэнергии. Причиной отказа от автоматики может быть неисправность РПН, толчковая нагрузка, приводящая к недопустимо частому переключению РПН, истощение ресурса переключателя, необходимость его ревизии или замены масла.

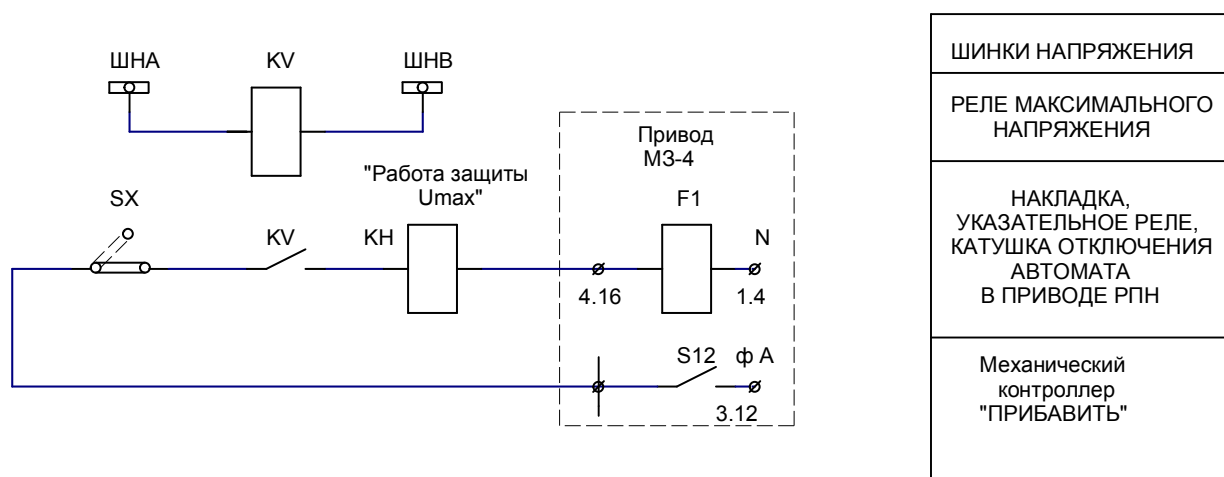


Рис. 4. Схема защиты от опасного повышения напряжения вследствие неисправности привода РПН

Упрощенная схема, наглядно поясняющая работу устройства АРНТ и его внешние связи, представлена на рисунке 5.

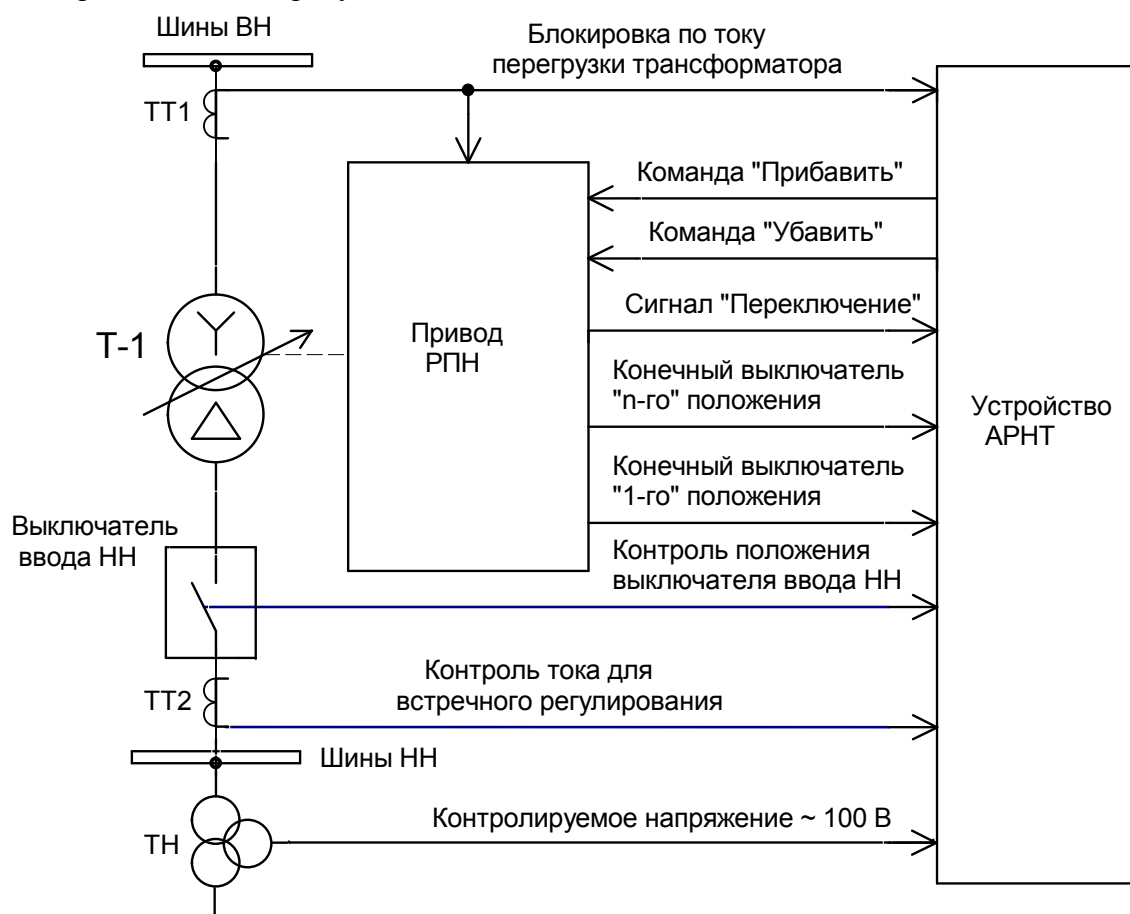


Рис. 5. Схема, поясняющая принцип работы автоматики РПН

Устройство АРНТ контролирует уровень напряжения на шинах посредством измерительного трансформатора. При отклонении уровня напряжения от заданного, определяемого уставкой по напряжению и уставкой по «зоне нечувствительности», устройство АРНТ выдает приводу РПН соответствующие команды на переключение, для приведения его к норме. Исполнение команды и исправность привода РПН устройство АРНТ контролирует по сигналу «Переключение», формируемому приводом.

При переходе привода в крайнее положение («1-е» или «n-е») привод РПН формирует для устройства АРНТ сигнал запрета регулирования в данном направлении.

При перегрузке трансформатора формируется сигнал запрета регулирования для привода РПН и для АРНТ.

Устройство АРНТ контролирует уровень напряжения на шинах посредством измерительного трансформатора. При отклонении уровня напряжения от заданного устройство АРНТ выдает приводу РПН соответствующие команды на переключение для приведения его к норме. Исполнение команды и исправность привода РПН устройство АРНТ контролирует по сигналу «Переключение», формируемому приводом.

При переходе привода в крайнее положение («1-е» или «n-е») привод РПН формирует для устройства АРНТ сигнал запрета регулирования в данном направлении.

Автоматическое регулирование так же блокируется при недопустимо низкой температуре масла (-25°C) в баке РПН.

При отключении выключателя ввода НН формируется сигнал запрета для АРНТ, так как нарушается связь между регулируемым трансформатором и контролируемым напряжением.

«Зона нечувствительности» (рисунок 6) необходима для предотвращения излишних переключений РПН при небольших колебаниях напряжения. Нормальным считается число переключений РПН до 20 – 24 в сутки.

Для реализации «встречного» регулирования напряжения (рисунок 7) на устройство АРНТ подается ток нагрузки. Правда, ввиду сложности расчета и выполнения уставок «встречное» регулирование не получило широкого распространения в распредсетях.



Рис. 6. Задание уставок по напряжению устройства автоматики РПН

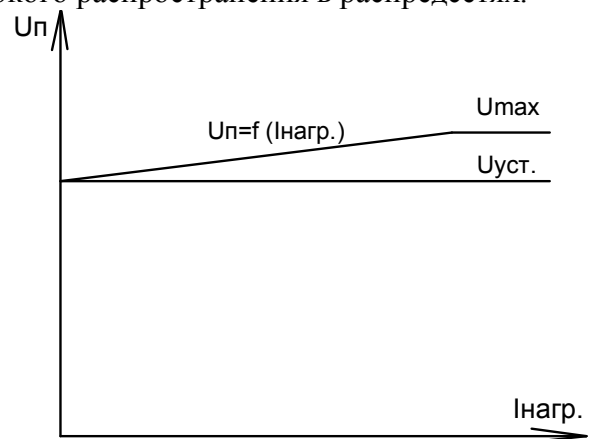


Рис. 7. Встречное регулирование напряжения с ограничением по максимальному напряжению

С 1974 г. отечественные заводы, выпускающие трансформаторы, комплектовали их автоматическими регуляторами напряжения типа АРТ-1Н (БАР) (рисунок 8). Транзисторные устройства, выпускаемые Рижским опытным заводом «Энергоавтоматика», хорошо себя зарекомендовали, и благодаря высокой ремонтпригодности, они до настоящего времени продолжают составлять основную часть парка устройств автоматики РПН.

К недостаткам устройства АРТ-1Н можно отнести:

- ненадежную элементную базу;
- недостаточную информативность;
- выдачу одной ложной команды «Прибавить» при отключении контролируемого напряжения и блокировку устройства, требующую вмешательства обслуживающего персонала.



Рис. 8. Устройство автоматики РПН типа АРТ-1Н (БАР)

В 80-х годах на смену устаревшим устройствам АРТ-1Н Рижский опытный завод «Энергоавтоматика» начал выпуск более совершенных микроэлектронных устройств автоматики РПН типа АРТ-1М (рисунок 9). Устройства отличались высокой надежностью, имели достаточно информативную светодиодную индикацию, удобные органы задания уставок, встроенный блок малогабаритных реле-повторителей для контроля блок-контактов привода РПН. В отличие от АРТ-1Н, они исключали выдачу ложных команд при неисправности цепей контролируемого напряжения и автоматически возобновляли работу после восстановления напряжения.

После развала СССР на Украине был освоен выпуск отечественного устройства автоматики РПН типа ЭРНТ-1 на базе АРТ-1М.

До настоящего времени КП «НКП «Искра» (г. Запорожье) продолжает выпуск усовершенствованной модификации микроэлектронного устройства автоматики типа ЭРНТ-1М (рисунок 10). Устройство функционально отличается наличием органов ручного управления приводом РПН, нескольких дополнительных сигнальных светодиодов, выносом на лицевую панель гнезд контрольных точек и подстроечных резисторов, а также использованием оптовходов вместо входных реле-повторителей.



Рис. 9. Микроэлектронное устройство автоматики РПН типа АРТ-1М

Несмотря на то, что устройства автоматики старых типов без замечаний выполняют функцию автоматического регулирования, они не могут обеспечить требуемую надежность работы РПН в автоматическом режиме. Они способны выявлять только неисправности привода РПН типа «Привод не пошел» (не выполняет команд) и «Застревание» (превышение допустимого времени переключения); при этом блокируется дальнейшая выдача команд и запускается сигнализация. К сожалению, устройства АРТ-1Н, АРН-1М и ЭРНТ-1М такую неисправность привода РПН, как «непрерывный ход» не выявляют. Сигнал «идет переключение» имеет перерывы, а время переключения РПН на одно положение при этом не превышает предельно допустимое. Поэтому, при таком дефекте АРНТ не блокируется, а привод РПН будет переключаться до конечного положения, и напряжение на шинах подстанции, а, следовательно, и у потребителей может превысить допустимые пределы.



Рис. 10. Микроэлектронное устройство автоматики РПН типа ЭРНТ-1М

Поэтому, для исключения опасного повышения (понижения) напряжения при неисправности привода РПН, необходимо предусматривать специальную защиту, действующую на его остановку путем отключения питающего напряжения (если это позволяет конструкция привода).

В 2005 году компания «Энергомашвин» приступила к разработке микропроцессорного устройства для автоматического управления РПН типа УЗА-10В.4. Устройство предназначено для автоматического управления электроприводом РПН силового трансформатора, а также для контроля и дистанционного управления РПН с рабочего места диспетчера, при включении УЗА-10В.4 в локальную сеть посредством порта RS-485. Протокол обмена – MODBUSTMRTU.



Рис. 11. Микропроцессорное устройство автоматики РПН УЗА-10В.4

Внешние цепи устройства УЗА-10В.4 максимально адаптированы к типовым схемам управления РПН, поэтому оно может быть использовано как для комплектации новых трансформаторов, так и для замены старых устройств автоматического регулирования. Отличительной особенностью УЗА-10В.4 является наличие нескольких встроенных защит от неисправностей привода РПН (в том числе и «непрерывного хода») и от опасного повышения напряжения.

Устройство УЗА-10В.4 прошло опытную эксплуатацию в ряде энергокомпаний, в том числе службе РЗА СВЭС компании «Черниговоблэнерго». После устранения полученных замечаний и доводки устройства по результатам испытаний, начиная с 2008 года, начался серийный выпуск УЗА-10В.4.

Создание этого устройства является ярким примером преимущества сотрудничества с отечественным производителем, оперативно учитывающим запросы потребителей и замечания эксплуатации.

Принимая во внимание возрастающий спрос на микропроцессорные устройства автоматики РПН, начиная с 2010 года фирмой ПРЕМКО (Украина) начат выпуск аналога

УЗА-10В.4 – устройства ZX 410, полностью повторяющего все характеристики своего предшественника.



Рис. 12. ZX 410 – аналог устройства УЗА-10В.4 производства компании ПРЕМКО

В 2010 году компанией РЗА СИСТЭМЗ (г. Киев) начат выпуск нового микропроцессорного устройства автоматики РПН типа РС83-В4 (рисунок 13). Микропроцессорные устройство РС83-В4 предназначено для выполнения функций автоматики РПН силовых трансформаторов подстанций, функции защиты от ненормальных режимов работы РПН, а также сигнализации и телемеханики.



Рис. 13. Устройство автоматики РПН фирмы РЗА Системз типа РС83-В.4

Устройство РС83-В4 разработано с учетом опыта эксплуатации ранее выпускавшихся блоков автоматики РПН и отличается от аналогов расширенным набором функций, повышенной информативностью и удобным пользовательским интерфейсом.

РС83-В4 обеспечивает ручное (от кнопок на лицевой панели), автоматическое и дистанционное (по каналам связи) управление приводом РПН силовых трансформаторов (или группой приводов) в импульсном режиме выдачи команд, контроль работы РПН и исправности элементов схемы.

Так как производители оборудования релейной защиты стремятся укомплектовать своими устройствами все виды присоединений подстанций, к выпуску своего устройства автоматики РПН готовятся ПО «Киевприбор» (МРЗС-05М-15), «Киевский электро-технический завод» ТМ РЕЛСiС и др.

По данным министерства энергетики Украины в настоящее время износ распределительного комплекса достигает примерно 66 % [4]. Большая часть силовых трансформаторов находятся в эксплуатации больше 25 лет и уже отработала свой ресурс. При этом значительно возрастает вероятность проявления неправильной работы привода РПН и нарушения работы системы автоматики.

Ввиду участвовавших случаев неправильной работы РПН вследствие физического износа и неудовлетворительного состояния механической части устройств, и их тяже-

лых последствий, а также выхода со строя устройств автоматики устаревших типов, РПН большинства трансформаторов были переведены в режим ручного управления.

Со становлением рыночных отношений, постепенным ростом нагрузок и повышением актуальности требований к качеству электроэнергии, появилась острая необходимость восстановления автоматического регулирования РПН.

Современные микропроцессорные устройства автоматики РПН не только реализуют функцию автоматического регулирования напряжения, имеют большую информативность и целый ряд дополнительных функций и возможностей, но и могут диагностировать неправильную работу системы автоматики и привода РПН и обеспечить эффективную защиту от нее, действующую на запрет регулирования и остановку привода РПН.

При применении микропроцессорных устройств автоматики необходимо учитывать дополнительные требования к их электромагнитной совместимости, состоянию подстанции контура заземления и защите от помех.

Выводы

1. Одним из основных условий обеспечения надежного электроснабжения потребителей электроэнергией требуемых параметров качества является надлежащее техническое состояние энергетического оборудования.
2. Силовые трансформаторы являются очень дорогостоящим оборудованием, и замена отработавших свой ресурс трансформаторов может растянуться на достаточно длительный период. Для обеспечения надежной работы РПН в этих условиях необходимо использовать дополнительные меры, препятствующие опасному повышению (понижению) уровня напряжения, вследствие возможной неправильной работы привода РПН.
3. При использовании устройств автоматики РПН старых типов необходимо предусматривать дополнительные внешние защиты и эффективные блокировки, исключающие возможность опасного повышения (понижения) напряжения.
4. При применении микропроцессорных устройств автоматики РПН необходимо обязательно предусматривать дополнительные меры по обеспечению их электромагнитной совместимости.
5. Современные микропроцессорные устройства автоматики РПН имеют целый ряд дополнительных защит и блокировок, что позволяет использовать их не только для комплектации новых трансформаторов, но и для замены устройств автоматики старых типов и обеспечения безаварийной работы РПН старых трансформаторов.

Список литературных источников

1. Современные средства релейной защиты распределительных сетей. Гловацкий В.Г., Пономарев И.В. Электронная версия 6, 2006 г.
2. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов. И.Я. Якобсон. – Библиотечка электромонтера. Выпуск 573. – Москва, Энергоатомиздат, 1985 г.
4. Энергетика світу та України. Цифри та факти. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2005. – 404 с.

УДК 658. 261: 621.316

В.И. Скоробогатова, д-р техн. наук

Черниговский государственный технологический университет

ПРИНЦИПЫ ОЦЕНИВАНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПО ДЛИТЕЛЬНОМУ НАГРЕВУ

Представлены результаты анализа качества отображения энергетических состояний действующих электрических сетей систем электроснабжения промышленных предприятий с точки зрения длительного нагрева и потерь электроэнергии по оценкам параметров состояний, которые вычислены согласно существующим нормативным принципам. Вскрыты причины искажения результатов оценивания.

Физическую сущность любой технической задачи отражают одно или несколько ключевых понятий и определений. Именно ими предопределяется логика, методология решения задачи и обуславливается допустимый уровень методической погрешности конечных результатов. В задаче оценивания действующих электрических сетей (ДЭС) по длительному нагреву таким понятием является «расчетная электрическая нагрузка элемента ДЭС по длительному тепловому действию» (далее по тексту «электрическая нагрузка ДЭС»).

В литературе встречается множество терминов, синонимичных понятию «электрическая нагрузка ДЭС», а именно: «электрическая нагрузка по допустимому нагреву», «расчетная нагрузка», «получасовой максимум», «греющий максимум» и др. [1, 2]. Все эти термины, как и «электрическая нагрузка ДЭС», не стандартизованы по определению.

Учитывая, что в настоящее время нормативным руководством для практического оценивания электрических нагрузок по длительному тепловому действию в ДЭС являются Указания по расчету электрических нагрузок в промышленных установках [3], именно их следует рассматривать в качестве нормативного документа по терминам и определениям, соответствующим конечным результатам оценивания (электрическим нагрузкам ДЭС).

В подразделе «Определения и обозначения основных величин» Указаний [3] представлены два определения электрической нагрузки. Первое выражено через ее составляющую по активной мощности, названную «расчетная активная мощность», и изложено в следующей редакции: «... расчетная активная мощность соответствует такой длительной нагрузке током, которая эквивалентна ожидаемой изменяющейся нагрузке по наиболее тяжелому тепловому действию (максимальной температуре) или тепловому износу изоляции проводника или трансформатора». Второе определение представлено через максимальные значения составляющих электрической нагрузки (по мощностям) и в целом (по току) и изложено в такой редакции: «... расчетные максимальные значения активной, реактивной, полной мощностей или тока представляют собой наибольшие из соответствующих средних величин за некоторый промежуток времени (например, 10, 15, 30 минут)».

Сравнивая оба определения, нетрудно заметить, что физическую сущность расчетной электрической нагрузки по тепловому воздействию на элементы электрической сети в большей степени отражает первое определение. Это объясняется тем, что критерием оценивания нагрузки в нем является максимум полного тока. Но полные токи при этом предлагается оценивать как линейно интегрированные величины, не увязывая пределы интегрирования ни с конструктивными особенностями нагреваемых токами элементов, ни с условиями окружающей их среды. То есть, согласно Указаниям [3] пределы интегрирования для всех элементов сети однозначны и равны 30 минутам.

Обоснование однозначности интегрирования представлено в самой работе и словесно выражено так: «... отсутствуют нормы теплового износа изоляции токоведущих частей электрооборудования»; «... полчаса близки к трем постоянным времени нагрева часто применяемых проводников малых и средних сечений»; «... для единообразия расчетной методики определения нагрузок элементов электрической сети».

Во втором определении электрической нагрузки ее составляющие (по мощностям) соотнесены не с наибольшей длительной нагрузкой по току, а с наибольшими линейно интегрированными оценками их самих. Пределы интегрирования в этом определении также не зависят ни от конструктивных особенностей элементов, ни от окружающей их среды, но в отличие от первого определения, они не однозначны и приравнены «... некоторому промежутку времени (например, 10, 15, 30 минут)» [3].

Как видно, налицо семантическая несогласованность обоих определений электрической нагрузки и это проявляется, в первую очередь, в неадекватности критериев оценивания. Логично предположить, что авторы работы [3] исходили из следующих предположений: законы изменения мощностных составляющих оцениваемой электрической нагрузки тождественны по монотонности; напряжение электрической сети, если и изменяется, то согласно принципу электротехники (т.е. изменяется обратно пропорционально нагрузке). Вряд ли можно найти другое объяснение наличия в одной методике двух различных трактовок одного и того же оцениваемого параметра.

Поскольку законы изменения исходных параметров энергетических состояний электрических сетей априори не известны на стадии их проектирования, то такого рода предположения имеют право на существование. Что же касается действующих электрических сетей, то эти предположения требуют выполнения процедуры идентификации. В противном случае возможны ситуации, когда интегральные оценки электрической нагрузки элемента ДЭС по току и по мощностям не совпадут во времени, т.е. будет иметь место нарушение принципа адекватности между нагревом элемента и его математической оценкой.

Так, получасовая нагрузка по активной мощности двух трехжильных силовых кабелей АСБ сечением 185 мм^2 , передающих электрическую энергию от понизительной подстанции ФПС1 Запорожского алюминиевого комбината к распределительной подстанции 10 кВ КП-2, согласно первому определению электрическая нагрузка составляет 5164 кВт, а согласно второму – 6471 кВт. Как видно, вторая оценка превышает первую более, чем на 25 %.

Получасовая нагрузка по реактивной мощности одного из силовых трансформаторов ГПП М1 комбината «Запорожсталь» серии ТРДН-63000-150/6,3 согласно первому и второму определениям составляет 8640 и 12240 кВАр соответственно, т.е. вторая оценка превышает первую более, чем на 40 %.

Приведенные выше оценки электрических нагрузок по длительному нагреву намеренно взяты из систем электроснабжения, графики нагрузок которых достаточно равномерны и значимо заполнены. С ростом неравномерности графиков нагрузок расхождение в оценках одной и той же электрической нагрузки значительно увеличивается.

В настоящее время при интегральном оценивании электрических нагрузок ДЭС пользуются принципом получасового усреднения исходных параметров энергетических состояний электрических сетей (для всех типов электроустановок). В Правилах [4] этот принцип закреплен как нормативный. Так, в главе 1.3 Правил сказано, что «... при проверке на нагрев принимается получасовой максимум тока, который представляет собой наибольший из средних получасовых токов». И там же приведены численно не равные допустимые температуры нагрева проводников разных типов и назначений (при фиксированных значениях температуры окружающей среды и напряжения).

Согласно теории нагрева полная теплоемкость электроустановки пропорциональна температуре его перегрева относительно окружающей среды [5]. Этот факт позволяет рассматривать в качестве обоснования утверждение, что тепловое воздействие одной и той же по величине электрической нагрузки на отличающиеся по конструкции и материалу электроустановки не может быть одинаковым, как и в ситуации с электроустановками, находящимися в разных окружающих средах. То есть принцип однотипного (получасового) усреднения исходных параметров энергетических состояний ДЭС противоречит физическим основам теории нагрева.

Так, для указанных выше силовых кабелей АСБ (3х185) продолжительность времени минимального интервала усреднения, обусловленная их допустимой нагрузкой, конструкцией и условиями окружающей среды, равна примерно 80 минутам, что превышает получасовую продолжительность более, чем в 2,5 раза. Обмоткам высокого напряжения трансформатора ТРДН-63000-150/6,3 соответствует минимальный по времени интервал усреднения, продолжительность которого более чем в 2 раза превышает получасовой и равна примерно 70 минутам.

Таким образом, приведенные в Указаниях [3] определения электрической нагрузки семантически не тождественны и противоречат физико-технической сущности нагрева проводника электрическим током. Объясняется это неучтенным фактором функционально-параметрической связи между электрической нагрузкой и конструктивно-эксплуатационными параметрами нагреваемых электроустановок.

Оценивание установившихся режимов проектируемых и действующих электрических сетей систем электроснабжения, как известно, не ограничивается расчетами электрических нагрузок по длительному нагреву электроустановок. В него входят расчеты прогнозируемых и фактических нагрузочных потерь электроэнергии (прежде всего, активной ΔW_a). Для этого применяется одно из трех математических выражений [6]:

$$\Delta W_a = I_p^2 \cdot R \cdot \tau_p, \quad (1)$$

$$\Delta W_a = \frac{R}{U^2} (P_p^2 \cdot \tau_p + Q_p^2 \cdot \tau_Q), \quad (2)$$

$$\Delta W_a = I_{ск}^2 \cdot R \cdot T, \quad (3)$$

где I_p , P_p , Q_p – оценки получасовых максимумов электрической нагрузки участка сети по току, активной и реактивной мощностям соответственно;

τ_p , τ_Q , T – продолжительность времени максимальных потерь по активной и реактивной мощностям и продолжительность в целом установившегося режима соответственно;

R – активное сопротивление участка электрической сети с нагрузкой $I_p(P_p, Q_p)$;

U – номинальное напряжение;

$I_{ск}$ – оценка среднеквадратической электрической нагрузки участка сети по току.

Несмотря на электротехническую тождественность выражений (1) – (3), оценки потерь электроэнергии по каждой из них будут разными из-за информационных и методических погрешностей.

Методическая погрешность в выражениях (1) и (2) обусловлена детерминированностью оценок нагрузки, ее стационарностью (распространением оценок нагрузки с получасового интервала времени на интервал продолжительностью τ), неопределенностью оценок τ_p , τ_Q из-за многофакторной стохастичности (по энергопотреблению, по продолжительности нагрузки, по регулируемому эффекту нагрузки, по неопределенности структурного состояния системы электроснабжения).

Наличие в выражении (3) оценки электрической нагрузки $I_{ск}$ как интегральной величины не снижает методическую погрешность вычисления Δw_a из-за представления в нем электрической нагрузки в виде дискретных и детерминированных графиков с детерминированной продолжительностью параметра T .

Таким образом, существующие нормативные принципы оценивания установившихся режимов действующих электрических сетей требуют пересмотра как не обеспечивающие должного качества результатов оценивания энергетических состояний.

Список литературных источников

1. Шидловский А.К., Вагин Г.Я., Куренный Э.Г. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
2. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках //Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок Тяжпромэлектропроекта. – 1968. – № 6. – С. 3-17.
4. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
5. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
6. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем /Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Казанцев В.Н. и др. /Под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

УДК 621.311.11

В.І. Скоробогатова, д-р техн. наук**Т.В. Горбань**, асистент

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ТОПОЛОГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЯК ФАКТОР ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Формування електричної мережі з врахуванням топологічного фактору дозволяє досягти енергозберігаючого ефекту під час проектування нових та реконструкції діючих електричних мереж.

Вступ

Розподільним електричним мережам України характерні 20-ти відсоткові технологічні витрати електроенергії на транспортування, тоді як економічно обґрунтованими визнані 6-7 %. Витрати електричної енергії в установках електричної мережі обумовлені вихідними параметрами усталених режимів електричної мережі та параметрами електричної мережі, які функціонально залежать від її топології (просторового розміщення вузлів мережі з геометрією зв'язків між ними) [1, 2].

Наближення до раціонального рівня технологічних витрат електроенергії на транспортування можливе і під час проектування електричних мереж, і під час реконструкції діючих. Зниженню технологічних витрат електричної енергії в установках електричної мережі під час її проектування сприяють раціональні електричні зв'язки між вузлами району мережі з вимогою щодо спрямування вузлів електричної мережі до її енергетичних центрів (ЕЦ). Але цій обставині надається недостатньо уваги [3].

Врахування вищезначеного фактора потребує чіткого визначення змістового сенсу терміну ЕЦ району електричної мережі. Під ЕЦ району електричної мережі пропонується враховувати точку плану, в якій матиме місце глобальний екстремум критеріальної функції, що використовується, при дотриманні наступних вимог: врахування функціонально-енергетичної двоїстості вузлів мережі, впливу на нагрівання струмопровідних частин електроустаткування реактивної складової електричного навантаження, можливості варіювання конструктивних параметрів мережі, динаміки аварійних режимів роботи мережі при варіюванні її топології.

Методи та результати

На кафедрі електричних систем і мереж Чернігівського державного технологічного університету протягом декількох років ведуться дослідження, спрямовані на розробку методології розв'язання топологічної задачі електричної мережі (ТЗЕМ) з урахуванням енергозберігаючого фактора. В основу методології покладено імітаційне моделювання електричної мережі з варіюванням топології, що сприяє забезпеченню адекватності рішення ТЗЕМ технічній та економічній сутності об'єкта моделювання в цілому. Технологія моделювання формалізована у вигляді комплексу взаємозв'язаних алгоритмів електроенергетичних задач з програмною реалізацією для ПК. В неї закладено врахування факторів ТЗЕМ, які вилучені в існуючих підходах до її розв'язання, а саме: функціонально-енергетична двоїстість вузлів електричної мережі, динаміка аварійних режимів, варіювання параметрів електричної мережі та електричних зв'язків між вузлами мережі.

Розроблена технологія була апробована на ряді віртуальних та діючих об'єктів. Нижче приведені результати, отримані для електричної мережі напругою 10 кВ, виконаної кабельними лініями з алюмінієвими жилами. Вузлом, шуканим за раціональною топологією, є розподільна підстанція. Електрична мережа має дворівневу структуру з зовнішнім джерелом живлення та одним вузлом розподільної мережі. Моделювання елек-

тричної мережі дозволило виявити, що при переміщенні за планом електричної мережі шуканого за раціональною топологією вузла спостерігається зменшення величини усталеного значення струму короткого замикання та, як наслідок, зміна параметрів розподільної електричної мережі (рисунок 1).

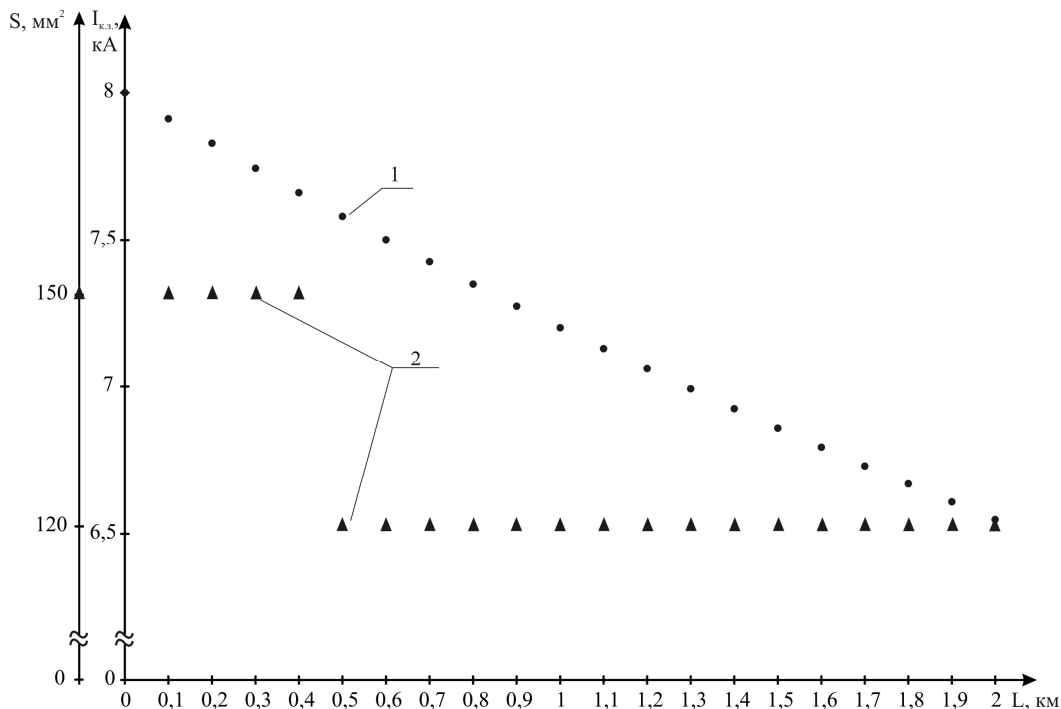


Рис. 1. Графіки залежності усталеного значення струму короткого замикання ($I_{к.з.,1}$) та перетину жил кабельних ліній (S , 2) від віддаленості (L) вузла, шуканого за раціональною топологією, від джерела живлення

Крім того, в результаті моделювання було виявлено, що зі зміною параметрів електричної мережі змінюються значення критеріальних функцій, критеріальні функції перестають бути опуклими (рисунки 2-3), тобто є багатоекстремальними на множині допустимих розв'язків.

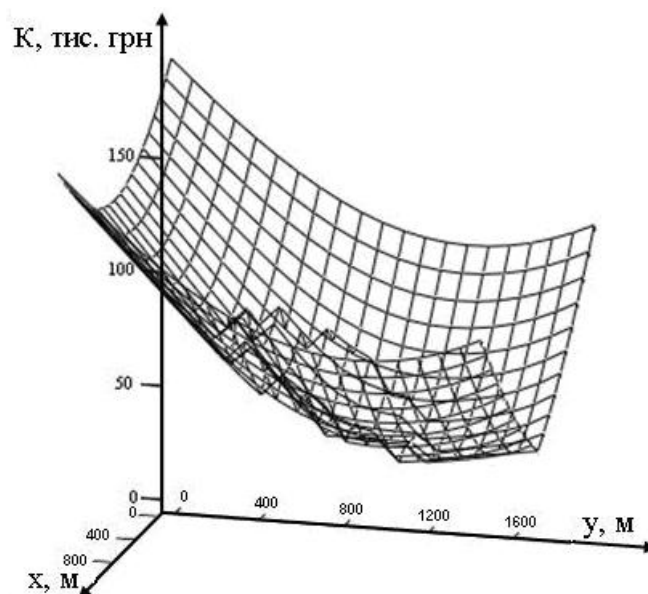


Рис. 2. Графік залежності приведеної до року вартості одноразових капіталовкладень (K) від віддаленості вузла, шуканого за раціональною топологією, від джерела живлення

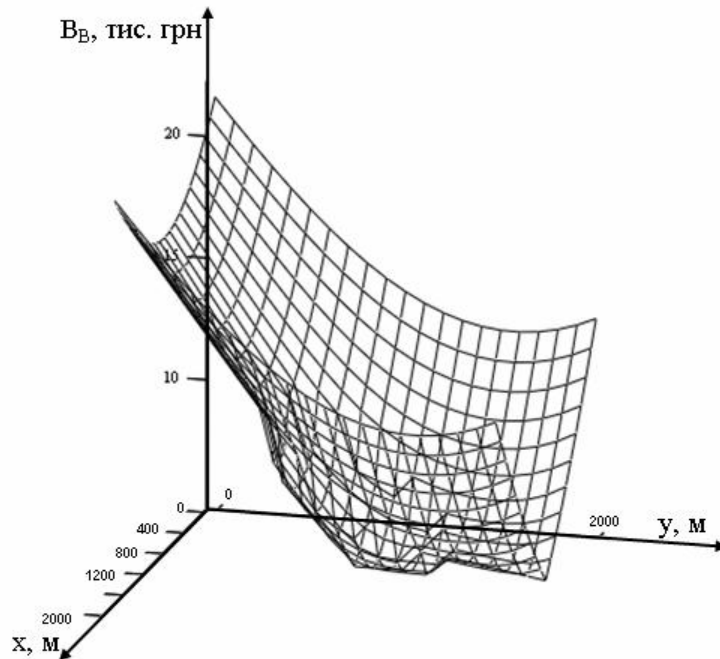


Рис. 3. Графік залежності приведеної до року вартості втрат активної електроенергії (B_v) в кабельних лініях від віддаленості вузла, шуканого за раціональною топологією, від джерела живлення

Поява локальних мінімумів пов'язана з різкою зміною параметрів розподільної мережі через дискретність перетину жил кабелів (рисунок 4). Тому використання класичних методів оптимізації для ТЗЕМ не гарантує отримання оптимального розв'язку.

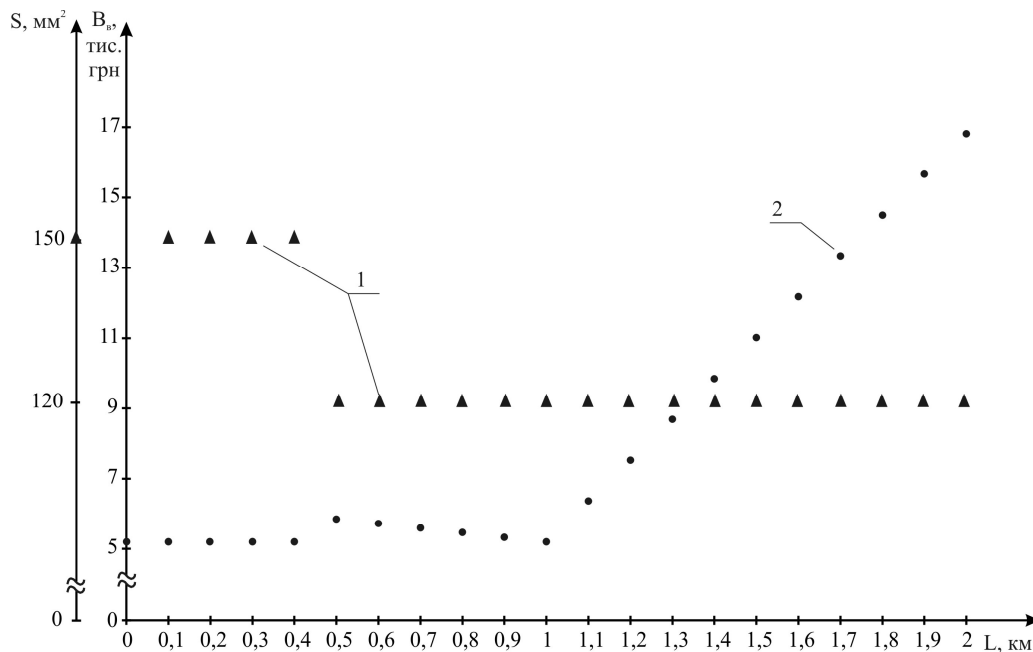


Рис. 4. Графіки залежності приведеної до року вартості втрат активної електроенергії (B_v , 2) та перетину жил кабельних ліній (S , 1) від віддаленості (L) вузла, шуканого за раціональною топологією, від джерела живлення

Нижче наведені результати застосування розробленої технології моделювання до діючої електричної мережі м. Славутич. Електрична мережа має дворівневу структуру з зовнішнім джерелом живлення перетворювальною підстанцією 330/110 кВ (ПС «Славутич») та вісьмома вузлами (ТП 1, ТП 2, ..., ТП 8) розподільної мережі. Розподільна

електрична мережа напругою 10 кВ виконана кабельними лініями з алюмінієвими жилами. В таблиці 1 наведені координати та навантаження вузлів електричної мережі за допустимим нагрівом по струму.

Таблиця 1

Координати та навантаження вузлів діючої електричної мережі

Позначення вузла	Координати вузла по осі		Навантаження вузла за допустимим нагрівом по струму, А
	0-X, км	0-Y, км	
ПС «Славутич»	0	0,135	23,35
ТП 1	1,050	0,240	4,90
ТП 2	1,800	0,650	14,71
ТП 3	1,850	0,750	6,75
ТП 4	2,400	0,650	19,23
ТП 5	3,100	0,300	5,74
ТП 6	3,300	0,600	85,71
ТП 7	3,600	2,800	43,25
ТП 8	4,725	0,100	72,15

Моделювання електричної мережі з переміщенням діючої перетворювальної підстанції 110/10 кВ «Місто» за планом мережі дозволило виявити, що при розташуванні підстанції в ЕЦ району електричної мережі, знайденому за приведеною до року вартістю втрат активної електроенергії в передаючих елементах мережі, спостерігається зниження технологічних витрат електроенергії в 2 рази в порівнянні з витратами, обумовленими існуючим розташуванням підстанції. Моделювання електричних зв'язків між вузлами мережі при існуючому розташуванні підстанції «Місто» дозволило досягти зниження технологічних витрат на 7 % за рахунок перерозподілу навантажень між вузлами мережі.

Висновки

В результаті моделювання електричної мережі було виявлено, що при переміщенні за планом електричної мережі шуканого за раціональною топологією вузла спостерігається зменшення величини усталеного значення струму короткого замикання та, як наслідок, зміна параметрів розподільної електричної мережі. В зв'язку з цим критеріальні функції перестають бути опуклими, тобто є багатоекстремальними на множині допустимих розв'язків. Отже, застосування класичних методів оптимізації для ТЗЕМ неможливе без попередньої оцінки критеріальних функцій на опуклість. Апробація розробленої технології виявила її ефективність при застосуванні до діючих електричних мереж.

Список літературних джерел

1. Глазунов А.А., Лещинская Т.Б., Шведов Г.В. Многокритериальная оптимизация параметров глубоких вводов в системах электроснабжения городов с учетом неопределенности развития электрических нагрузок. – М.: Агроконсалт, 2005. – 112 с.
2. Киреева Э.А., Цырук С.А. Электроснабжение жилых и общественных зданий //Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – Выпуск 8 (80). – 96 с.
3. Скоробогатова В.І., Горбань Т.В. Аналіз існуючих методів оцінювання енергетичного центру електричної мережі //Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2007 – № 30. – С. 122-125.

УДК 620.179

С.Ю. Шевченко, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

В.В. Волохін, канд. техн. наук

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

О.І. Ганус, канд. техн. наук

Акціонерна компанія «Харківобленерго», м. Харків, Україна

МЕРЕЖА ВІДОМЧИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТЕОПОСТІВ ЯК ОСНОВА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БОРОТЬБИ З ОЖЕЛЕДНО-ПАМОРОЗЕВИМИ УТВОРЕННЯМИ

Стаття присвячена обґрунтуванню необхідності створення мережі метеопостів як засобу контролю та видалення ожеледно-паморозевих утворень на лініях електропередавання. Розроблено рекомендації щодо побудови мережі відомчих автоматизованих метеопостів, які включають в себе пропозиції по створенню основних вузлів МВАМ, програмного забезпечення та схем обробки інформації.

Вступ

Як показав аналіз, проведений у роботах [1-4], для підвищення ефективності боротьби з ожеледно-паморозевими утвореннями (ОПУ) необхідно комплексно вирішувати питання як попередження, так і безпосередньо видалення ОПУ на конструкціях повітряних ліній електропередавання (ПЛ).

Метод рішення

Основою комплексного підходу є розробка мережі відомчих автоматизованих метеопостів (МВАМ), що забезпечить:

- безперервний моніторинг метеообстановки на об'єктах енергетики;
- обробку метеоданих з видачею рекомендації з організаційно-технічних заходів, спрямованих на боротьбу з ОПУ на ПЛ.

Система автоматизованих метеопостів повинна виконувати наступні функції:

- збір інформації з метеодатчиків, встановлених безпосередньо на енергетичних об'єктах (автоматичних метеопостах);
- аналіз метеоданих з видачею рекомендацій з організаційно-технічних заходів, спрямованих на боротьбу з ожеледдю на ПЛ;
- ведення бази даних кліматичної інформації на рівні підстанції, енергосистеми;
- відображення інформації із кліматичних параметрів і формування звітних форм;
- конфігурування та налагодження програмних і апаратних засобів;
- контроль функціонування каналів зв'язку з метеопостами, власних апаратних і програмних засобів, формування і передачу діагностичної та службової інформації.

Структура комплексу технічних засобів МВАМ повинна включати 3 рівні (рисунк 1):

- нижній рівень – рівень збору та первинної обробки метеоданих. Рівень реалізується власне автоматизованими метеопостами;

- середній рівень – рівень обробки даних для інформаційного забезпечення персоналу оперативного керування на підстанціях і передачі даних на верхній рівень. Рівень може бути реалізований у рамках існуючих АСУ ТП ПС й інфраструктури телемеханічної мережі НЕК «Укренерго»;

- верхній рівень – рівень обробки, зберігання й накопичення статистичних баз даних, що надходять з усієї території електричних мереж.

Збір метеоданих проводиться автоматичними метеопостами, укомплектованими датчиками:

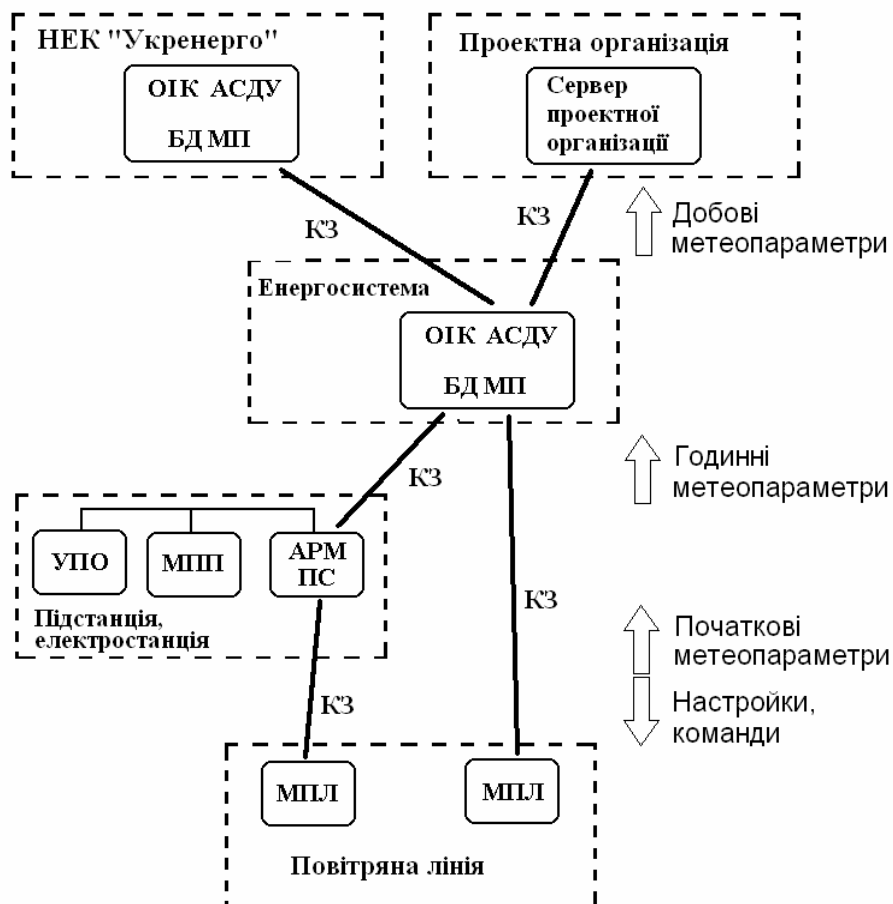
- температури;

атмосферного тиску;
 відносної вологості;
 швидкості вітру;
 напрямку вітру;
 льодоутворення.

Аналіз існуючих технічних засобів контролю появи ОПУ [2] показав, що на сьогодні всі розглянуті способи й пристрої не відповідають вимогам, які повинні бути пред'явлені до такого роду датчиків, і надалі вони потребують істотної доробки.

До складу комплексу технічних засобів рівня збору метеоданих також повинне ввійти обладнання для зв'язку з підстанцією. Інформація з датчиків повинна передаватися на рівень контролю й аналізу метеоданих, який розміщений на підстанції.

Програмно-технічний комплекс (ПТК) підстанції повинен вирішувати завдання збору й аналізу даних з метеопостів, зберігання інформації про «екстремальні кліматичні умови» у статистичній базі даних. На основі аналізу кліматичної обстановки повинні видаватися рекомендації з організаційно-технічних заходів, спрямованих на боротьбу з ожеледдю на ПЛ.



ОІК АСДУ – оперативно-інформаційний комплекс автоматизованої системи диспетчерського управління; МПП – метеопост підстанції; УПО – установка плавки ожеледі; АРМ ПС – автоматизоване робоче місце оперативного персоналу підстанції; МПЛ – метеорологічний пост ПЛ; КЗ – канал зв'язку; БД МП – статистична база даних метеопараметрів.

Рис. 1. Структурна схема MBAM

До складу технічних засобів рівня контролю та аналізу метеоданих повинні ввійти сервер бази даних реального часу, сервер статистичної бази даних.

Рівень нагромадження статистичної інформації включає ПТК диспетчерського пункту енергосистеми та ПТК Центрального диспетчерського пункту НЕК. Завданням ПТК цього рівня є збір, узагальнення та зберігання статистичної інформації, що надходить від підстанцій.

Автономні метеопости в складі системи повинні задовольняти наступним вимогам:

- можливість передачі метеоданих по фізичних каналах зв'язку;
- великий період автономної роботи (період між обслуговуваннями);
- високий ступінь захищеності устаткування від впливів навколишнього середовища (включаючи електромагнітне поле);
- захищеність від несанкціонованого доступу до датчиків (вандалізму);
- висока точність вимірювання.

До складу програмного забезпечення (ПЗ) повинні увійти:

1. ПЗ сервера бази даних реального часу, що вирішує завдання:
 - організації збору інформації з автоматичних метеопостів;
 - аналіз метеоданих;
 - запис у статистичну базу даних інформації про «екстремальні кліматичні умови»;
 - контроль стану устаткування рівня збору даних і ліній зв'язку;
 - відображення на дисплеї в автоматичному режимі й на запит оператора інформації про кліматичні умови в поточний або заданий період;
2. ПЗ сервера статистичної бази даних, що вирішує завдання:
 - нагромадження й зберігання інформації про «екстремальні кліматичні умови»;
 - подання статистичної інформації у вигляді екранних форм;
 - документування статистичної інформації на друкувальному пристрої (принтер) за запитом оператора [3,5,6].

Висновки

1. Ефективність будь-якого способу попередження та боротьби з ОПУ значно зростає при наявності достовірної інформації про метеопараметри й інтенсивність ОПУ в реальному масштабі часу.
2. Основою підвищення ефективності управління боротьби з ОПУ є розробка й створення відомчої мережі автоматизованих метеопостів для електричних мереж і систем України.
3. Наступним етапом підвищення ефективності є розробка й впровадження автоматизованих систем керування боротьбою з ОПУ, яка включає систему відомчих метеопостів.

Список літературних джерел

1. Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Оцінка можливості використання даних державних метеостанцій для контролю стану об'єктів електричних мереж //Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 21 – С. 143-147.
2. Лебединський І.Л., Шевченко С.Ю., Волохін В.В. Способы и устройства предупреждения гололедно-изморозевых образований //Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 2. – С. 21-25.
3. Волохін В.В. Современный подход к решению задачи раннего обнаружения гололедно-изморозевых образований //Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск:

- Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 44. – С. 31-38.
4. Мірошник О.О. «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» //Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – 2005. – № 1. – С. 5-8.
 5. Левченко И.И. Система телеизмерения гололёдных нагрузок на воздушных линиях электропередачи 330-500 кВ //Электрические станции. – 1999. – № 12. – С. 32-34.
 6. Волохін В.В. Метод та пристрій контролю ожеледно-паморозевих утворень для підвищення експлуатаційних характеристик ліній електропередавання: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.13 – Харків, 2010. – 20 с.

УДК 621.311

О.В. Шутенко, канд. техн. наук**Д.Н. Баклай**, инженер

Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», г. Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

На примере пробивного напряжения трансформаторных масел проиллюстрирован алгоритм статистического анализа результатов периодического контроля состояния трансформаторных масел. Проанализированы особенности дрейфа пробивного напряжения в условиях длительной эксплуатации и влияние загрузки трансформаторов на интенсивность старения масел. Приведен метод для оценки степени старения масел, в котором граничные значения показателей не постоянны, а являются функцией времени, загрузки трансформаторов, сорта и качества масел, заливаемых в бак трансформаторов.

Постановка проблемы

В настоящее время в Украине от 70 до 80 % [1, 2] силовых высоковольтных трансформаторов отработали или приближаются к нормативному сроку службы 25 лет. Замена устаревшего оборудования, в силу экономических причин, проводится крайне медленно и поэтому в ближайшее время в эксплуатации будут находиться трансформаторы, отработавшие свой ресурс. В сложившихся условиях обеспечение эксплуатационной надежности и продление срока службы таких трансформаторов является задачей государственной важности. Одним из путей решения данной задачи является совершенствование методов диагностики высоковольтных трансформаторов. Известно [1], что около 20 % всех повреждений трансформаторов связаны с ухудшением свойств масел. При этом следует учитывать, что продукты окисления масел (пузырьки газов, влага, кислоты, гидроперекиси) могут служить как причиной возникновения процессов ионизационного старения, так и негативно сказываться на состоянии основной изоляции трансформаторов. В связи с этим задача раннего обнаружения трансформаторов с аномальным старением масла является крайне актуальной.

Анализ публикаций

В настоящее время контроль состояния трансформаторного масла в Украине производится по комплексу показателей качества и нормативам, регламентируемым в [3]. При этом граничные значения показателей качества масла никак не связаны с продолжительностью эксплуатации и одинаковы на всем временном промежутке, поэтому невозможно определить состояние масла в интервале допустимых значений. Используемые за рубежом различными энергетическими компаниями [4] более сложные многоуровневые системы контроля более совершенны, однако также не лишены недостатков. Так, система контроля, принятая компанией S.D. Myers (США), имеет три характерные области: область приемлемых значений показателей качества масла, область ухудшенных значений показателей качества и область неприемлемых показателей качества. Однако данные границы также не связаны ни с длительностью, ни с условиями эксплуатации трансформаторов. Таким образом, существующая система контроля не позволяет выявить трансформаторы с аномальным старением масла на ранней стадии, т.е. еще до того, как эти показатели достигли своих граничных значений, что является весьма существенным недостатком.

Цель статьи

В статье описан метод оценки степени старения трансформаторных масел, который учитывает как особенности дрейфа показателей масел, так и внешние факторы, воздействующие на масла в процессе эксплуатации.

Метод решения задачи

Известные на сегодняшний день алгоритмы распознавания состояния сложных технических систем основываются на использовании обучающих выборок (совокупности образцов с априорно известным диагнозом). В качестве такой выборки использовались результаты периодических испытаний трансформаторных масел по Донецкой, Луганской, Полтавской, Сумской, Харьковской областям Украины, а также АР Крым. Всего были проанализированы результаты наблюдений по 249 трансформаторам напряжением 110 кВ и номинальной мощностью от 6,3 до 63 МВА. Общий объем выборки составил 17463 значения. Перечень используемых показателей и объем выборочных значений приведен в таблице 1.

Таблица 1

Перечень показателей качества трансформаторного масла, количество временных рядов и объем выборочных значений

№ п.п.	Показатель качества масла	Объем выборочных значений	
		Количество рядов	Количество значений
1	Температура вспышки	230	3746
2	Кислотное число	231	3741
3	Пробивное напряжение	231	3723
4	tgδ при 20 °С	31	268
5	tgδ при 70 °С	49	397
6	tgδ при 90 °С	60	570
7	Цвет масла	121	2108
8	Содержание водорастворимых кислот	46	1191
9	Влагосодержание масла	73	1635
10	Удельный вес масла	6	70
11	Содержание механических примесей	1	9
12	Содержание осадка	1	5
Всего		1080	17463

Представив результаты наблюдений в виде временных рядов, математическую модель состояния объекта контроля можно записать в виде многомерного вектора показателей:

$$\vec{x}(t) = \vec{G}(t) + \vec{\eta}(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где $\vec{G}(t)$ – систематическая составляющая, характеризующая в объекте необратимые изменения;

$\vec{\eta}(t)$ – обратимые изменения;

$\xi(t)$ – погрешность измерительных средств контроля.

Для снижения влияния шумовых компонент $\bar{\eta}(t)$ и $\xi(t)$ анализируемый массив данных был подвергнут процедуре тестовой фильтрации [5]. На первом этапе фильтрации из исходного массива данных были удалены временные ряды показателей, имеющих искаженный знак коэффициента парной корреляции показателя на время эксплуатации. Модель старения трансформаторного масла базировалась на отрицательных значениях коэффициентов корреляции для температуры вспышки и пробивного напряжения трансформаторного масла и на положительных – для всех остальных. Все временные ряды, для которых это условие не соблюдалось, считались искаженными и удалялись из массива исходных данных.

На втором этапе фильтрации из исходного массива были удалены стационарные временные ряды, для которых шумовые компоненты $\bar{\eta}(t)$ и $\xi(t)$ значимо превышали систематическую составляющую $\bar{G}(t)$. Для выявления стационарных временных рядов показателей использовался однофакторный регрессионный анализ. Математическая модель имеет вид:

$$Y_i = b_0 + b_1 t_i + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где Y_i – значение показателя в i -й момент времени;

t_i – текущее значение времени эксплуатации;

b_0 и b_1 – коэффициенты регрессионного уравнения, подлежащие определению;

ε_i – значение остатков (невязок).

Ряд считался стационарным, если расчетное значение F -статистики не превышало табличное значение, при основной гипотезе $H_0: \beta=0$ (угловой коэффициент регрессии равен нулю, т.е. линия тренда параллельна оси времени). Уровень значимости $\alpha=0,05$; число степеней свободы $N-2$, где N – объем выборочных значений. Наглядно результаты фильтрации иллюстрирует рисунок 1, на котором приведены зависимости пробивного напряжения трансформаторных масел до и после фильтрации.

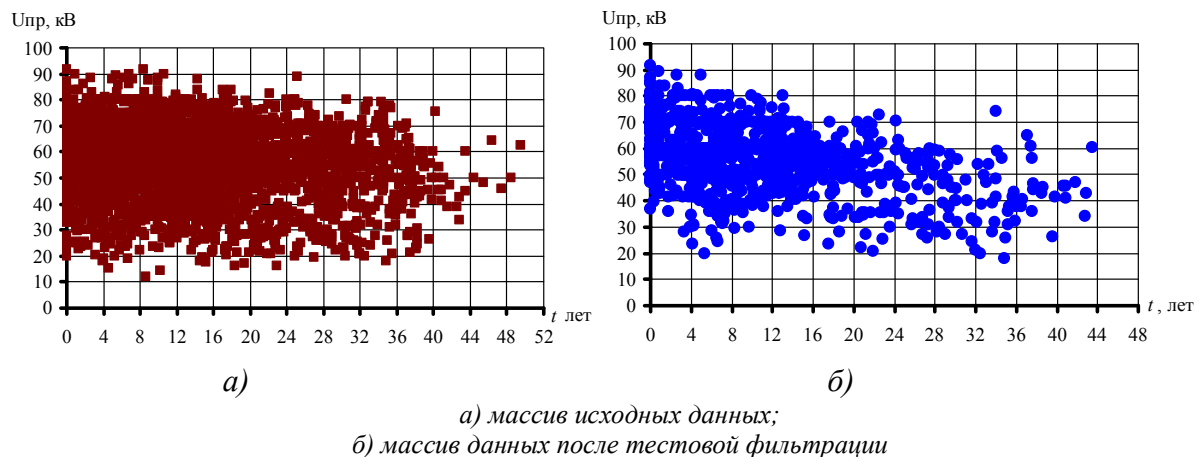


Рис. 1. Зависимости пробивного напряжения трансформаторных масел от длительности эксплуатации

В процессе эксплуатации исследуемые трансформаторы находились в различных условиях как по режимам работы, так и по качеству заливаемых масел. В результате значения показателей качества масла изменяются с разной скоростью. Ковариационный анализ временных рядов показателей качества показал наличие как мультипликативного, так и аддитивного смещения между рядами показателей масла [6]. Другими словами, временные ряды показателей качества – неоднородны. Для формирования однородных подмножеств показателей в условиях отсутствия информации о режимах работы

трансформаторов предложено использовать критерий максимума значений корреляционного отношения [7]:

$$\eta_{y/x} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_j} (\tilde{y}_{ij} - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

где N – объем выборки;

$\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \tilde{y}_{ij}$ – условное среднее, полученное для значений x_i при $j = \overline{1, m_j}$;

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ – общее среднее по всем экспериментальным точкам;

$\tilde{y}_{ij}$ – результаты наблюдений в i -й экспериментальной точке.

Количество временных рядов n , объем выборочных значений N , значения коэффициента парной корреляции ρ_{y-t} и значения прямого $\eta_{t/y}$ и обратного $\eta_{y/t}$ корреляционного отношения для различных массивов данных приведены в таблице 2.

Таблица 2

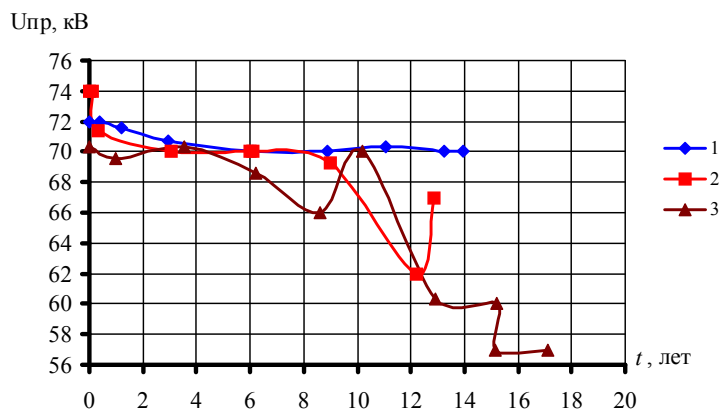
Значения корреляционного отношения и коэффициента парной корреляции для массивов данных пробивного напряжения масел на разных этапах обработки

Показатель качества масла	Массив	n	N	Коэффициент парной корреляции ρ_{y-t}	Корреляционное отношение	
					$\eta_{t/y}$	$\eta_{y/t}$
Пробивное напряжение трансформаторных масел	Ma	231	3723	-0,154	0,255	0,234
	Mr	124	1704	-0,384	0,421	0,414
	Mf	66	937	-0,461	0,544	0,502
	M-1	9	113	-0,902	0,922	0,920
	M-2	12	103	-0,873	0,893	0,878
	M-3	11	119	-0,853	0,908	0,891
	M-4	6	68	-0,702	0,868	0,769
	M-5	5	78	-0,813	0,915	0,852
	M-6	19	383	-0,820	0,861	0,873

Здесь Ma – массив исходных данных; Mr – массив исходных данных после отсева временных рядов с искаженным знаком коэффициента парной корреляции; Mf – массив исходных данных после отсева стационарных временных рядов; M-1 - M-6 – массивы данных, полученные из массива Mf по критерию максимума корреляционного отношения.

Графически процедуру формирования однородных подмножеств данных иллюстрирует рисунок 2. Из рисунка 2 видно, что снижение пробивного напряжения трансформаторных масел происходит с различной скоростью. В связи с этим возникает необходимость выполнить анализ факторов, влияющих на интенсивность дрейфа показателей качества масел в условиях длительной эксплуатации.

грузки трансформаторов. Наглядно такое влияние иллюстрирует рисунок 4, на котором приведены зависимости пробивного напряжения масла от времени эксплуатации для трех трансформаторов АК «Харьковоблэнерго».

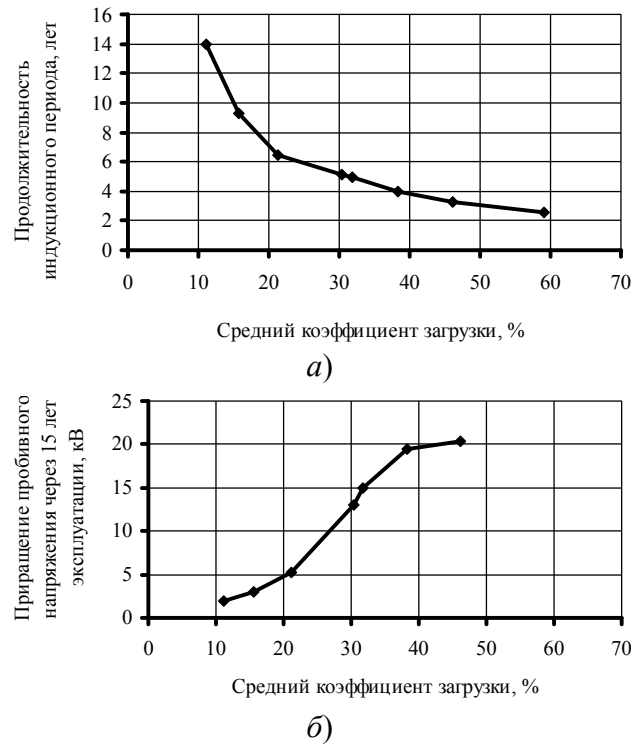


- 1 – трансформатор ПС «Орджоникидзе» Т-2, АК «Харьковоблэнерго»;
2 – трансформатор ПС «Павлово поле» Т-2, АК «Харьковоблэнерго»;
3 – трансформатор ПС «Селекционная» Т-1, АК «Харьковоблэнерго»

Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от длительности эксплуатации

Данные трансформаторы на протяжении последних 13 лет эксплуатации имели следующие значения средних нагрузок: ПС «Селекционная» Т-1 кз = 59 %, ПС «Павлово поле» Т-2 кз = 35 %, и ПС «Орджоникидзе» Т-2 кз = 11 %. Сравнивая значения нагрузок и расположение кривых на рисунке 4 видим, что интенсивность снижения пробивного напряжения увеличивается по мере роста нагрузки трансформаторов. К аналогичным выводам можно прийти, если проанализировать зависимость продолжительности индукционного периода пробивного напряжения от нагрузки трансформаторов [9], которая приведена на рисунке 5, а. С ростом нагрузки с 10 до 20 % продолжительность индукционного периода снижается на 8 лет. Это может быть объяснено тем, что с увеличением рабочей температуры изоляции интенсивность процессов старения увеличивается и, следовательно, увеличивается концентрация продуктов, снижающих прочность масла. Зависимость приращения пробивного напряжения трансформаторного масла через 15 лет эксплуатации от нагрузки приведена на рисунке 5, б. Период 15 лет в данном случае обусловлен исключительно тем, что большинство из анализируемых трансформаторов АК «Харьковоблэнерго», для которых временные ряды пробивного напряжения прошли процедуру фильтрации, имеют наработку менее 25 лет. Как видно из рисунка, за 15 лет эксплуатации среднее значение пробивного напряжения масел при 10 % нагрузки снизилось на 2 кВ, а при 30 % нагрузки – на 13 кВ.

Наличие функциональной связи между показателями качества масел, длительностью эксплуатации и нагрузкой трансформаторов позволяет использовать детерминистические методы для оценки степени старения масел. Полученные подмножества однородных данных можно рассматривать как функции времени, представляющие собой эталонные траектории, описывающие изменения значений показателей во времени. При таком подходе оценка степени старения масла сводится к сравнению действительных и эталонных траекторий [10].



а) зависимость продолжительности индукционного периода пробивного напряжения масла от среднего коэффициента загрузки;

б) зависимость приращения пробивного напряжения масла через 15 лет эксплуатации от среднего коэффициента загрузки

Рис. 5. Влияние загрузки трансформаторов на интенсивность дрейфа пробивного напряжения трансформаторного масла

Каждая эталонная траектория B_λ , определяемая некоторым множеством признаков в пространстве признаков, будет занимать определенную область, которую можно характеризовать величиной диаметра D_λ этого множества. Диаметром множества можно, в частности, считать наибольшее расстояние между двумя его точками, т.е. величину, пропорциональную мере множества в i -м временном сечении:

$$D_\lambda(i) = \gamma D_{B_\lambda}(i), \quad (4)$$

$$D_{B_\lambda}^2(i) = \sum_{s=1}^k \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N [\xi_{sr}(i) - \bar{\xi}_{\lambda s}(i)]^2, \quad (5)$$

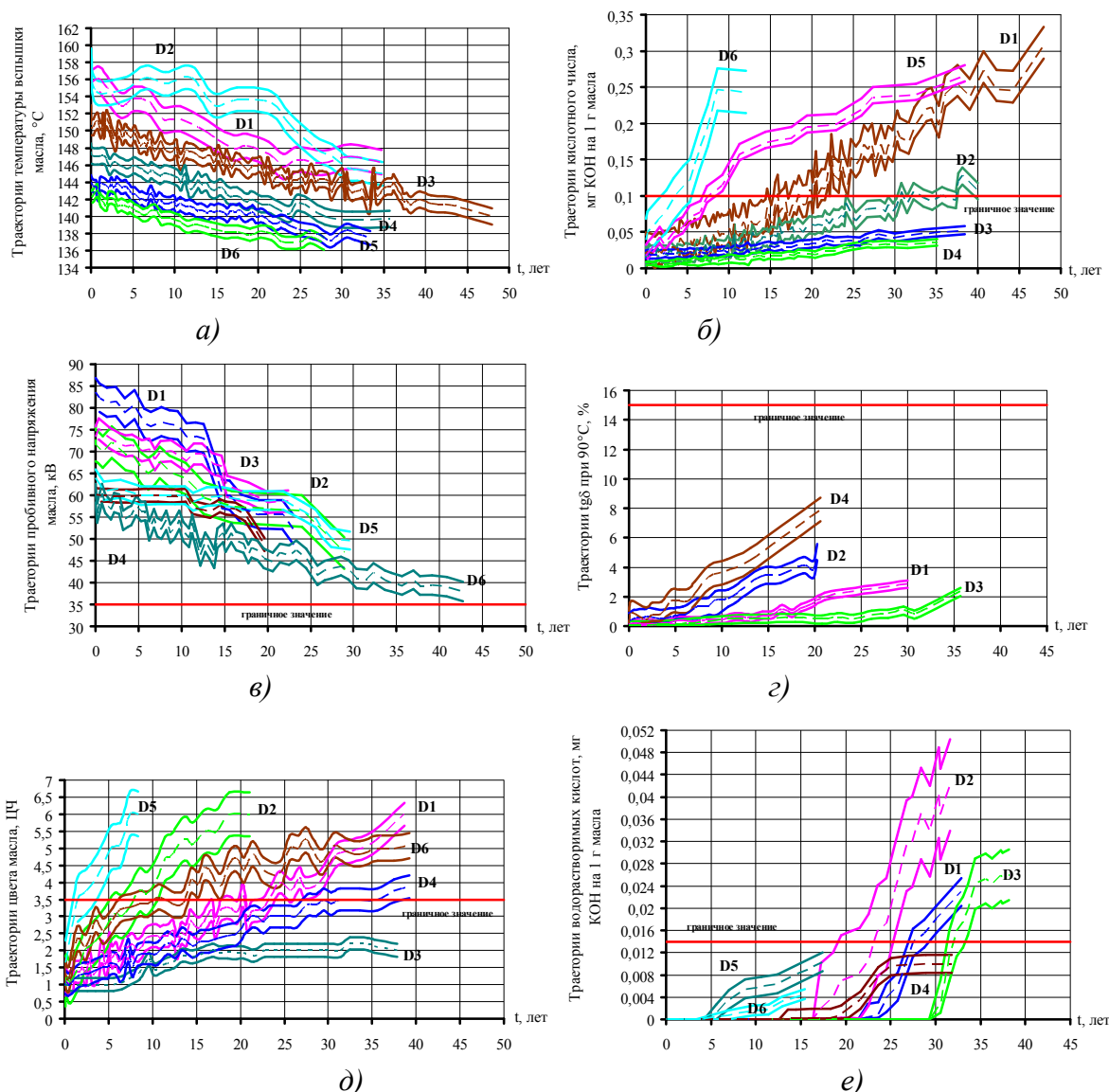
где $D_{B_\lambda}^2(i)$ – мера множества B_λ в i -й момент времени,

N – число траекторий, принадлежащих B_λ ;

$\bar{\xi}_{\lambda s}$ – центр множества B_λ по s -му параметру:

$$\bar{\xi}_{\lambda s} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \xi_{\lambda sr}. \quad (6)$$

Коэффициент γ зависит от закона распределения точек множества в пространстве признаков и точности, с которой желательно определить границу множества B_λ . На рисунке 6 приведены рассчитанные траектории для некоторых показателей качества масел.



а) траектории температуры вспыха масел; б) траектории кислотного числа масел; в) траектории пробивного напряжения масел; г) траектории тангенса угла диэлектрических потерь масел; д) траектории цвета масел; е) траектории содержания в масле водорастворимых кислот

Рис. 6. Рассчитанные траектории показателей качества трансформаторных масел

Общая процедура оценки степени старения трансформаторных масел, заключается в следующем. Диагностируемый временной ряд показателя трансформаторного масла проверяется на принадлежность одновременно трем траекториям. При этом первая траектория имеет среднюю загрузку, равную средней загрузке диагностируемого трансформатора, вторая – ближайшую большую, третья – ближайшую меньшую. Если диагностируемый ряд принадлежит первой траектории, то старение масла считается нормальным. В том случае, когда диагностируемый ряд принадлежит траектории с более высокой загрузкой, то вне зависимости от того, превысило значение показателя граничное значение или нет, старение считается аномальным и рекомендуется применить меры по ингибированию процессов старения (замена силикагеля, сушка, добавка антиокислительных присадок, регенерация масла и т.д.). Если же диагностируемый временной ряд показателя принадлежит траектории с меньшей загрузкой, то выясняются причины, по которым произошло снижение значения показателя. Т.е. является ли сниже-

ние значения показателя следствием оперативного вмешательства персонала или же произошла ошибка при отборе проб масла и проведении испытаний.

В качестве диагностической меры расстояния будем использовать величину L , характеризующую расстояние между диагностируемой траекторией и центрами ближайших эталонных траекторий. Поскольку распознавание проводится по каждому из показателей в отдельности, то можно использовать евклидово пространство, и тогда расстояние между точкой a на диагностируемой траектории и центром эталонной траектории точкой x в i -й момент времени определяется как:

$$L_{(v)}(x, a) = \left(\sum_{j=1}^N |x_j - a_j|^v \right)^{\frac{1}{v}}, \quad (7)$$

где v – мера расстояния.

Диагностируемая траектория относится к одной из эталонных, если выполняется условие:

$$L_i = \min, \text{ то } x \in D_i. \quad (8)$$

Очевидно, что надежность распознавания в этом случае будет тем выше, чем меньше расстояние L по сравнению с другими расстояниями. Это можно охарактеризовать коэффициентом распознавания:

$$o_i = \frac{1/L_i}{\sum_{k=1}^n 1/L_k}. \quad (9)$$

Величина ξ_i играет роль, сходную с вероятностью диагноза, т.к. $\sum_{i=1}^n \xi_i = 1$. Распознавание в соответствии с условием (9) считается надежным, если $\xi_i > \xi_0$, где ξ_0 – заранее выбранный уровень распознавания.

Выводы

1. Результаты периодического контроля состояния трансформаторных масел могут быть использованы в качестве обучающей выборки только при условии предварительной статистической обработки. Приведен алгоритм статистического анализа, который позволяет выделять подмножества нестационарных, однородных временных рядов показателей при отсутствии информации о режимах работы трансформаторов.
2. Установлено, что в зависимости от условий эксплуатации изменение показателей качества масел может происходить по различным сценариям. Приведены характерные сценарии для дрейфа пробивного напряжения трансформаторных масел.
3. Показано влияние загрузки трансформаторов на интенсивность старения масел. Увеличение загрузки с 10 до 20 % приводит к снижению продолжительности индукционного периода (время в течение которого значение показателя значительно не изменяется) пробивного напряжения масел на 8 лет. За 15 лет эксплуатации, среднее значение пробивного напряжения масел снижается при 10 % загрузки на 2 кВ, а при 30 % загрузки – на 13 кВ.
4. Предложен метод для оценки степени старения масел, в котором в отличие от существующих методов, граничные значения показателей не постоянны, а являются функцией длительности эксплуатации, загрузки трансформаторов, сорта и качества масел, заливаемых в бак трансформаторов.
5. Использование не постоянных границ показателей позволяет выявить трансформаторы с аномальным старением масла еще на раннем этапе, когда значения показателей находятся в области допустимых значений, что в свою очередь, позволяет продлить ресурс не только жидкой, но и основной изоляции трансформаторов.

Список литературных источников

1. Меры по повышению эффективности диагностики состояния трансформаторного оборудования: (материалы IX Симпозиума «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030. Перспективные технологии электроэнергетики») [Электронный ресурс] /В.В. Соколов – М.: CD-изд-во «ТРАВЭК», 2007 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – Систем. требования: Pentium – 266; 32 Mb RAM; CD-ROM Windows 98/2000/NT/XP – IX Симпозиум «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030».
2. Калашников В.Д., Гаврилец М.Я. Решение проблемы продления срока службы силовых трансформаторов 35-110 кВ в ОАО «Крымэнерго» //Электрические сети и системы. – 2005. – № 2. – С. 14-20.
3. Норми випробування електрообладнання: СОУ – Н ЕЕ 20.302:2007 – Офіц. вид. – К.: ОЕП ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с.
4. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М. «Издательство НЦ ЭНАС» 2002 – 216 с.
5. Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с.
6. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В., Аулова Н.В. Оценка статистической однородности временных рядов показателей качества трансформаторного масла //Вестник НТУ «ХПИ». Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – № 21. – С. 12-19.
7. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний //Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 4. – С. 42-50.
8. Липштейн Р.А. Трансформаторное масло – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
9. Шутенко О.В. Исследование влияния режимов работы трансформаторов на интенсивность старения масла //Енергетика та електрифікація – Київ, 2008 – № 8. – С. 54-59.
10. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалеvский А.В., Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское Радио, 1974. – 224 с.

УДК 621.313.333.1

Ю.О. Денисов, д-р. техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПУЛЬСАЦІЙНА НЕСТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВІ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА З СИНУСОЇДАЛЬНОЮ ШИРОТНО- ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Отримана передатна функція автономного інвертора з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією, на підставі чого знайдені умови субгармонічної стійкості електропривода змінного струму з різними регуляторами.

Вступ

В замкнених системах силової електроніки втрата стійкості найчастіше відбувається на частотах, які в кілька разів нижче, ніж частота основної гармоніки. Таку нестійкість звичайно називають пульсаційною – субгармонічною. Причина її появи пов'язана з специфікою виконання силової частини перетворювача та системи керування. Критерії субгармонічної стійкості систем з керованими випрямлячами (КВ) і широтно-імпульсними перетворювачами (ШІП) одержали достатнє висвітлення [1], [2], [3], однак субгармонічна стійкість систем електроприводу змінного струму до теперішнього часу не досліджена. Причиною цього є те, що уявлення автономного інвертора або ж перетворювача частоти у вигляді динамічних ланок системи є проблематичним. Найчастіше таке уявлення зводиться до постійного коефіцієнту передачі на основній гармоніці; в цьому випадку не враховується частотна залежність між виходом перетворювача і його інформаційним входом. Такий підхід до уявлення передатної функції перетворювача частоти має місце у фундаментальній роботі [4]. Ця робота написана давно, однак до теперішнього часу системи електроприводу змінного струму аналізують по основній гармоніці. Такий підхід виключає врахування впливу специфіки силової частини автономного інвертора і його системи керування на стійкість системи електроприводу змінного струму. Наша робота пропонує новий підхід до отримання передатної функції автономного інвертора. Покажемо його суть на прикладі системи електроприводу змінного струму, що виконаний на основі однофазного мостового автономного інвертора напруги (АІН) з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Методи та результати

Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) такого електропривода наведена на рис 1,

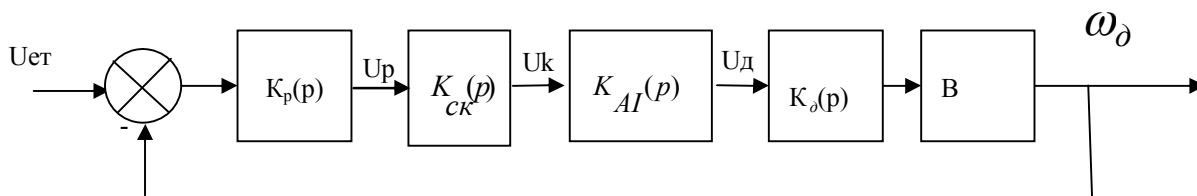


Рис.1. Система електропривода змінного струму

де $K_p(p)$, $K_{ск}(p)$, $K_{AI}(p)$, $K_{\delta}(p)$ – передатні функції регулятора, системи керування,

автономного інвертора, двигуна змінного струму, В-випрямляч, який враховує специфіку електромеханічного перетворювача змінного струму. На його вхід надходить

змінна напруга від АІН, а на виході присутня частота обертання однобічного напрямку. Вищевказана специфіка враховується включенням у структурну схему САР випрямляча В.

Для рішення завдань аналізу субгармонічної стійкості системи рис. 1 у загальному вигляді необхідно одержати передатну функцію перетворювача. На вхід транзисторів АІН від системи керування надходить сигнал у вигляді сукупності імпульсів, що модульовані за тривалістю. Закон модуляції синусоїдальний. Порядок формування напівхвилі змінної напруги за синусоїдальним законом показаний на рис. 2.

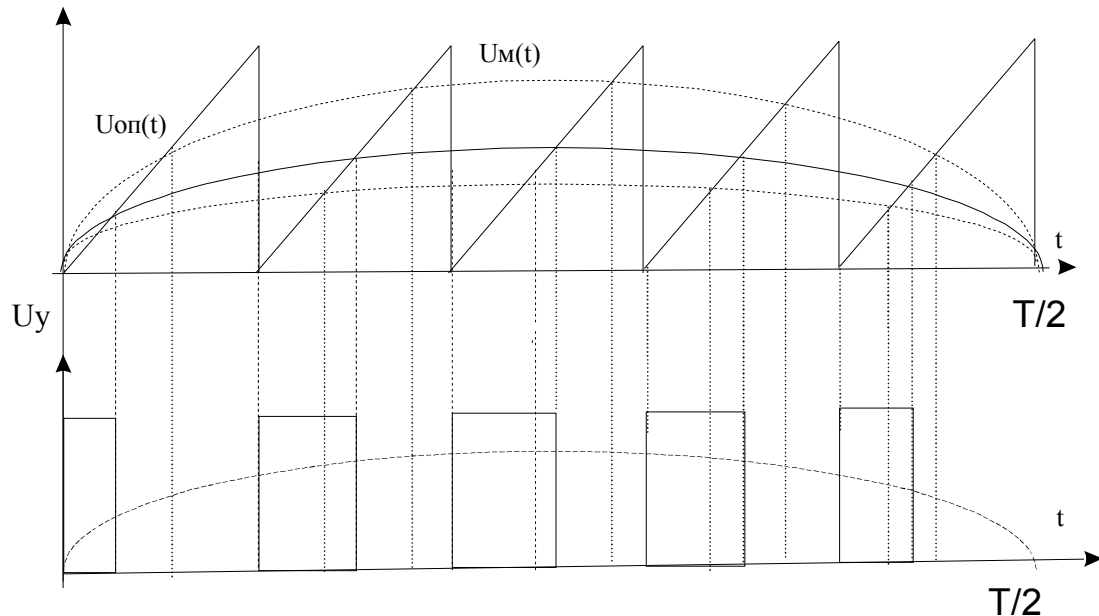


Рис. 2. Формування напівхвилі змінної напруги

Система керування АІН містить у собі генератор опорної напруги, що змінюється пилоподібно $U_{оп}(t)$, що має частоту ω_n , і генератор напруги $U_M(\omega t) = U_{Mn} \sin \omega_M t$, що модулює. Для усунення можливого биття між несучою частотою та частотами, що модулюються, це співвідношення повинне бути не менш десяти.

Для забезпечення точності керування генератор напруги, що змінюється пилоподібно повинен мати високу лінійність і стабільність частоти. Оскільки несуча частота висока, то забезпечення її стабільності не викликає труднощів. Що ж стосується частоти, що модулює, яка визначає частоту основної гармоніки напруги на двигуні змінного струму, то вона невисока. Для малопотужних двигунів, змінного струму, що використовуються як виконуючі в системах, що стежать, частота живлячої напруги не перевищує сотень герців. Таку низьку частоту зробити стабільною неможливо. Вирішити це завдання можна на основі формування квазисинусоїди напруги, що модулює, шляхом додавання відповідної кількості функції Уолша зі своїми ваговими коефіцієнтами. Генератор функцій Уолша синхронізується імпульсами від дільника частоти, на вхід якого надходять високочастотні імпульси від генератора, частота якого застабілізована кварцем. Така система описана в [3], вона дозволяє одержувати стабільну за частотою напругу, що модулює. Сигнал зворотного зв'язку, що надходить на вхід системи керування від регулятора, складається з напруги, що модулює. У результаті змінюється положення контактних точок, тривалість імпульсів на виході системи керування змінюється. Очевидно, що сигнал, що надходить від регулятора, не є синусоїдальним, тому в динаміці закон модуляції вихідної напруги АІН за синусоїдальним законом порушується. Для усунення такої ситуації на вихід регулятора можна включати цифровий фільтр

[5], що дозволяє зберегти заданий закон модуляції. Надалі при аналізі будемо мати на увазі наявність такого фільтра в системі.

З врахуванням цього знайдемо передатну функцію АІН з синусоїдальної ШІМ. По суті знаходження передатної функції АІН зводиться до пошуку передатної функції системи керування, тому що силова частина АІН виконує функцію підсилювача потужності широтно-модульованих імпульсів, що надходять на її вхід від системи керування. Для одержання передатної функції АІН скористаємося традиційною методикою аналізу нелінійних систем, зокрема, методикою знаходження описуючої функції нелінійної ланки. Для її одержання спочатку знаходять його статичну характеристику. Для цього будують залежність вихідної напруги від вхідної. В результаті встановлюють тип нелінійності, що властива конкретній нелінійній ланці, а потім здійснюють його гармонічну лінеаризацію, обмежуючись установленням залежності вихід-вхід по основній гармоніці. Аналіз виконується в образах Фур'є по системі тригонометричних функцій. У нашому підході до знаходження передатної функції АІН з синусоїдальною ШІМ пропонується будувати залежність вихідного широтно модульованого сигналу, а точніше його спектральних складових, від амплітуди сигналу, що модулює. Причому, спектр ШІМ сигналу пропонується знаходити в системі функцій Уолша, які за своєю формою адекватні модульованим по ширині імпульсам напруги. Оскільки перетворення Фур'є справедливе для будь-якої системи базисних функцій, то при обчисленні коефіцієнтів Уолша під інтегралом присутнє множення прямокутного імпульсу постійної амплітуди й прямокутної функції Уолша.

Інтеграл цього множення, незалежно від тривалості імпульсу, завжди буде приводити до лінійної або ж до кусочно-лінійної залежності, що визначається частотою проходження відповідної функції Уолша. У роботі [3] для випадку з ШІМ-1, коли зміна амплітуди сигналу, що модулює, відбувається з постійною тактовою частотою (момент спрацьовування імпульсного елемента відомий заздалегідь), отримані залежності амплітуд функцій Уолша широтно-модульованого сигналу одиничної амплітуди щодо вхідного сигналу. Результати розкладання показали, що при однополярній ШІМ за синусоїдальним законом у спектрі Уолша вихідної напруги АІН функції $Sal(2, \theta)$, $Sal(4, \theta)$, $Cal(2, \theta)$ відсутні, а функції $Cal(1, \theta)$ $Cal(3, \theta)$ мають другі або треті порядки малості, тому їх можна не враховувати. Найбільшою в спектрі є функція $Sal(1, \theta)$, що при зміні відносного вхідного сигналу в діапазоні (0-1) змінюється лінійно з тангенсом нахилу, який дорівнює 0,6.

Результати показують, що ШІМ – 1 послідовності імпульсів за синусоїдальним законом зводиться до амплітудно-імпульсної модуляції першого роду функції $Sal(1, \theta)$ з постійним коефіцієнтом підсилення імпульсного елемента K_i^{S1} .

Тому передатна функція АІН з ШІМ є передатна функція формуючого елемента еквівалентної імпульсної системи і являє собою Лапласові зображення функції $Sal(1, \theta)$, тобто

$$K_{AI}(p) = K_i^{S1} \frac{1 - 2e^{-0.5pT} + e^{-pT}}{p},$$

де T – період комутації АІН.

Навантаженням інвертора є однофазний синхронний двигун ДСП-262, передатна функція якого за керуванням

$$K_q = \frac{K_\delta}{p(pT_{em} + 1)},$$

де $K_\delta = \frac{\omega_{\delta.н.}}{u_{\kappa.н.}} \frac{M_\Pi}{M_\Pi - M_H}$ — статичний коефіцієнт підсилення за керуванням,

$u_{к.н.}, M_H, \omega_{д.н.}$ — діюче значення номінальної напруги керування, момент і частота обертання двигуна,
 M_{II} — пусковий момент,

$T_{ем} = J \frac{\omega_{д.н.}}{M_{II} - M_H}$ — електромеханічна постійна двигуна,

J — момент інерції.

Передатна функція наведеної безперервної частини розглянутої системи електроприводу із пропорційним регулятором ($K_p(p) = K_p$) має вигляд:

$$W_{НБЧ}(p) = K_p K_i^{s1} \frac{1 - 2e^{-0.5pT} + e^{-pT}}{p} \frac{K_d}{p(pT_{ем} + 1)}$$

Переходячи до відносного комплексного змінного $q = pT$, одержимо:

$$W_{НБЧ}(q) = K_0 \frac{1 - 2e^{-0.5q} + e^{-q}}{q} \frac{\beta}{q(q + \beta)} \quad (1)$$

де $K_0 = K_i^{s1} K_d K_p T, \beta = \frac{T}{T_{ЕМ}}$.

Піддаючи (1) модифікованому z -перетворенню, одержимо передатну функцію розімкнутої системи електроприводу з АІН, вихідна напруга якого модулюється за законом синусоїдальної ШІМ.

$$K_p^*(z, \varepsilon) = K_0 [A_1 \varepsilon + A_2 + A_3 \frac{z - 2e^{-0.5\beta} + 1}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta\varepsilon}], \quad (2)$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 0.5$$

$$K_p^*(z, \varepsilon) = K_0 [A_1(1 - \varepsilon) - A_2 + A_3 \frac{z - 2ze^{0.5\beta} + 1}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta\varepsilon}], \quad (3)$$

$$0.5 \leq \varepsilon \leq 1$$

У виразах (2), (3)

$A_1 = 1, A_2 = -\frac{1}{\beta}, A_3 = \frac{1}{\beta}$ — лишки для відповідних полюсів передатної функції наведеної безперервної частини. Характеристичне рівняння замкнутої системи має вигляд:

$$1 + K_p^*(z, -0) = 0,$$

де $K_p^*(z, -0)$ — значення передатної функції розімкнутої системи в момент спрацювання імпульсного елемента.

Припустимо, що імпульсний елемент фіксує ліве значення передатної функції, одержуємо, що

$$K_p^*(z, -0) = z^{-1} K_p^*(z, 1).$$

З врахуванням (3) маємо

$$K_p^*(z, -0) = K_0 \left[\frac{A_2}{z} - A_3 \cdot \frac{z - 2ze^{0.5\beta} + 1}{z(z - e^{-\beta})} e^{-\beta\varepsilon} \right] \quad (4)$$

Знаки доданків в (4) ураховують наявність у системі випрямляча.

Підставляючи в (4) значення A_2, A_3 , після відповідних перетворень одержуємо

$$K_p^*(z, -0) = K_0 \frac{-(1 - e^{-0.5\beta})^2}{\beta(z - e^{-\beta})}.$$

З огляду на те, що $z = e^{j\bar{w}} = \cos \bar{w} + j \sin \bar{w}$, де $\cos \bar{w} = \cos^2 0.5\bar{w} - \sin^2 0.5\bar{w}$;
 $j \sin \bar{w} = 2j \sin 0.5\bar{w} \cos 0.5\bar{w}$,

одержуємо $z = \cos^2 0.5\bar{\omega} + j \sin 0.5\bar{\omega} (j \sin 0.5\bar{\omega} - \cos 0.5\bar{\omega})$.

Розглядаючи умови стійкості на основній субгармоніці, відносна частота якої $\bar{\omega}$, одержуємо, що на цій частоті $Z = -1$, тому

$$K_p^*(1, -0) = K_0 \frac{-(1 - e^{-0.5\beta})^2}{\beta(1 + e^{-\beta})}.$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи:

$1 + K_0 \frac{1 - e^{-0.5\beta}}{\beta(1 + e^{-\beta})} = 0$, звідки одержуємо умову стійкості системи електропривода на основній субгармоніці.

$$K_0 \leq \frac{\beta ch 0.5\beta}{2sh^2 0.25\beta} \quad (5)$$

Розглянемо умови субгармонійної стійкості системи електроприводу змінного струму з інтегральним регулятором, передатна функція наведеної безперервної частини якої:

$$K_{ПБЧ}(q) = \frac{K_0}{T_i} (1 - 2e^{-0.5q} + e^{-q}) \frac{\beta}{q^3(q + \beta)}, \quad (6)$$

де:

$$K_0 = K_i^{S1} K_0 T, \quad \bar{T}_i = \frac{T_i}{T}, \quad T_i \text{ — постійна часу інтегратора.}$$

Вираз (6) відповідно до теореми розкладання має вигляд:

$$K_{ПБЧ}(q) = \frac{K_0}{T_i} (1 - 2e^{-0.5q} + e^{-q}) \left(\frac{A_1}{q^3} + \frac{A_2}{q^2} + \frac{A_3}{q} + \frac{A_4}{q + \beta} \right), \quad (7)$$

де $A_1 = 1, A_2 = -\frac{1}{\beta}, A_3 = \frac{1}{\beta^2}, A_4 = -\frac{1}{\beta^2}$.

Піддаючи (7) модифікованому Z-перетворенню, одержимо передатну функцію розімкненої імпульсної системи:

$$K_p^*(z, \varepsilon) = \frac{K_0}{T_i} \left[A(\varepsilon) + \frac{zm + n}{z - 1} + A_4 \frac{z - 2ze^{0.5\beta} + 1}{z - e^{-\beta}} e^{-\beta\varepsilon} \right], \quad (8)$$

$$0.5 \leq \varepsilon \leq 1,$$

де:

$$A(\varepsilon = 1) = 0.5T^2 - A_3; m = -0.25T^2, n = 0.5T^2$$

Для моменту спрацьовування імпульсного елемента

$$K_p^*(z, -0) = z^{-1} K_p^*(z, 1)$$

Після відповідних перетворень із урахуванням випрямляча В одержуємо:

$$K_p^*(z, -0) = \frac{K_0}{T_i} \frac{za + b}{z^2 - z(1 + e^{-\beta}) + e^{-\beta}}, \quad (9)$$

де: $a = \frac{(1 - e^{-0.5\beta})^2 - 0.25\beta^2 T^2}{\beta^2},$

$$b = \frac{0.25e^{-\beta} \beta^2 T^2 - (1 - e^{-0.5\beta})^2}{\beta^2}.$$

Розділивши чисельник і знаменник (9) на Z, одержуємо:

$$K_p^*(z, -0) = \frac{K_0}{T_i} \frac{a + z^{-1}b}{z - (1 + e^{-\beta}) + z^{-1}e^{-\beta}}, \quad (10)$$

З урахуванням формули Ейлера ($z = \cos \bar{w} + j \sin \bar{w}$) знаменник (10)
 $z - (1 + e^{-\beta}) + z^{-1}e^{-\beta} = 2j \sin 0.5\bar{w}[(1 + e^{-\beta})j \sin 0.5\bar{w} + (1 - e^{-\beta}) \cos 0.5\bar{w}]$,
 а його чисельник $a + z^{-1}b = \cos^2 0.5\bar{w} + j \sin 0.5\bar{w}(j \sin 0.5\bar{w} - 2 \cos 0.5\bar{w})$.

На частоті основної субгармоніки ($\bar{w} = \pi$) передатна функція розімкненої системи для моменту спрацьовування імпульсного елемента

$$K_p^*(\pi, 1) = \frac{K_0}{T_i} \frac{a - b}{-2(1 + e^{-\beta})}$$

Характеристичне рівняння замкнутої системи на частоті основної субгармоніки :

$1 + \frac{K_0}{T_i} \frac{(a - b)}{-2(1 + e^{-\beta})} = 0$, з якого одержуємо умови її стійкості на цій субгармоніці:

$$K_0 \leq \frac{\beta^2 Ch 0.5\beta}{2Sh^2 0.25\beta} \bar{T}_i$$

На рис.3 представлені криві, що показують області стійкості розглянутої системи електропривода на частоті основної субгармоніки.

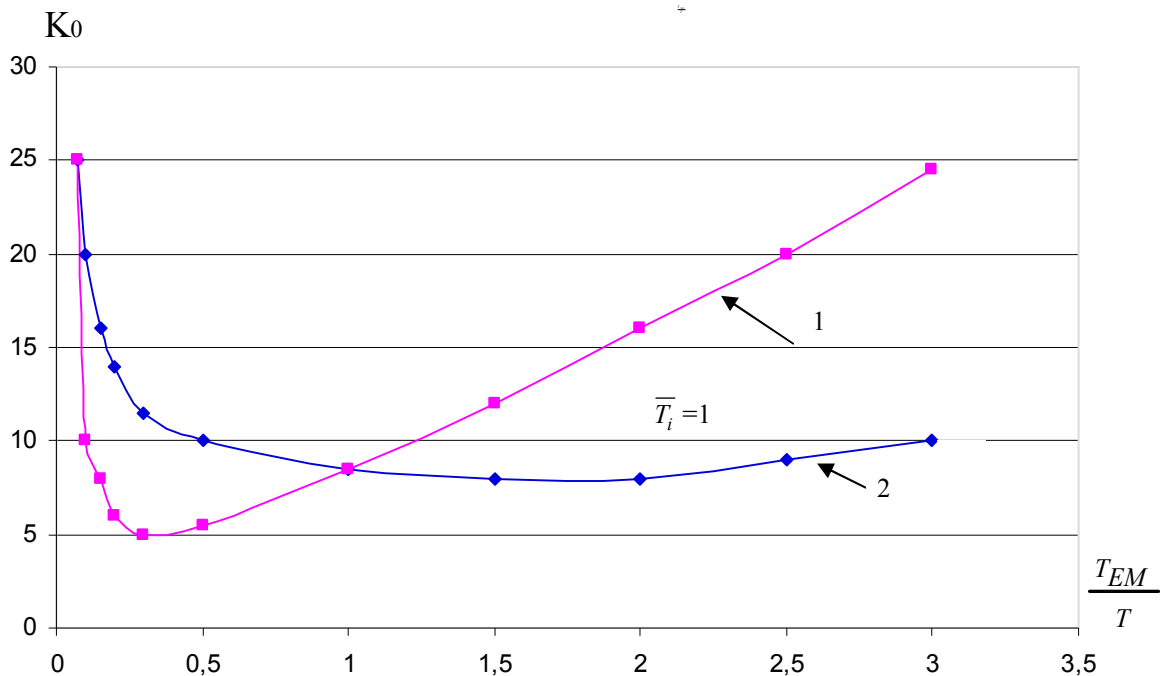


Рис. 3. Области стійкості системи електропривода на частоті основної субгармоніки

Крива 1 відповідає наявності в системі пропорційного, а крива 2 – інтегрального регуляторів. З наведених кривих видно, що якщо $T_{EM} \ll T$, то система з «і» регулятором при відповідних значеннях його постійної інтегрування буде більш стійка на основній субгармоніці, ніж система з пропорційним регулятором. Реальне співвідношення $\frac{T_{EM}}{T}$ завжди більше одиниці. Наприклад, у системі електропривода з двигуном АДП-262, у якого $T_{EM} = 0.017 \text{сек}$, а частота комутації $f = 500 \text{Гц}$ співвідношення $\frac{T_{EM}}{T} = 8.5$. Очевидно, що така система з інтегральним регулятором має невисокий запас стійкості на основній субгармоніці, якщо $\bar{T}_i = 1$.

У цьому випадку підвищення запасу стійкості при збереженні астатизму системи можна досягти за рахунок збільшення $\overline{T_i}$ або ж використання пропорційно-інтегрального регулятора. Наведена методика є універсальною, вона дозволяє виконати аналіз областей стійкості електропривода й для цього випадку.

Висновки

Запропоновано нове подання АІН з синусоїдальною ШІМ як динамічної ланки системи, що враховує, на відміну від методу основної гармоніки, дискретність його дії й специфіку системи керування.

Врахування цих особливостей АІН дозволило виконати аналіз умов появи пульсаційної нестабільності системи електропривода змінного струму з пропорційними й інтегральними регуляторами. Аналіз показав, що за рахунок вибору відповідного значення постійної інтегрування можна забезпечити необхідний запас стійкості системи електропривода на основній субгармоніці.

Список літературних джерел

1. Шипило В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. – М.: Энергия, 1969. – 400 с.
2. Под ред. Жуйкова В.Я. Замкнутые системы преобразования электрической энергии. – Киев: Техника, 1989. – 320 с.
3. Денисов А.И., Зволинский В.М., Руденко Ю.В. Вентильные преобразователи в системах точной стабилизации. – Киев: Наукова думка, 1995. – 250 с.
4. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
5. Денисов А.И., Гордиенко В.В., Бобор Н.И. Коррекция выходных параметров автономного инвертора напряжения в переходных режимах. – Электричество, № 1, 1994. – С. 53-58.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.396.2.019.4 : 621.391.254

В.В. Казимир, д-р техн. наук

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

С.В. Зайцев, канд. техн. наук

Управління Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації, м. Чернігів, Україна

Б.В. Горлинський

Департамент експертизи у сфері криптографічного захисту інформації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації, м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕКОДУВАННЯ ТУРБО КОДІВ ПО МОДИФІКОВАНОМУ АЛГОРИТМУ *MAX LOG MAP*

Вперше запропонована математична модель модифікованого алгоритму Max Log Map. Застосування математичної моделі під час моделювання статистичних характеристик завадозахищеності безпроводних технологій дозволяє отримати такі самі характеристики, як і при застосуванні алгоритму Log Map, але при цьому кількість елементарних операцій, необхідних для здійснення процедури декодування, зменшується. Крім того, в порівнянні з відомим алгоритмом Max Log Map, статистичні характеристики завадозахищеності краці

Вступ

На сьогоднішній день розвиток безпроводних технологій перебуває на етапі вибору стандарту для реалізації концепції мобільних систем четвертого покоління (4G). Боротьба розгорнулася між запропонованим Інститутом інженерів по електротехніці й електроніці (IEEE) сімейством стандартів 802.16 (*WiMax*) і прийнятим міжнародним партнерським об'єднанням 3GPP стандартом *LTE* (від англійського *Long-Term Evolution*). Обидва ці стандарти основані на базі *IP*-технологій і відрізняються високими швидкостями передачі даних.

Аналіз принципів побудови засобів мобільного зв'язку для покоління 4G свідчить про те, що в цих засобах радіозв'язку на фізичному рівні планується в якості модуляції сигналу застосовувати адаптивні спектрально-ефективні види модуляції, такі як ФМ-М та КАМ-М, адаптивні коригувальні коди – турбо коди (ТК), ортогонально-частотне розділення каналів *OFDMA* (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) та технології просторової обробки сигналів *MIMO* (*Multiple-input multiple-output*) [1-4].

Аналіз досліджень і публікацій

Відомо декілька підходів до підвищення завадозахищеності систем з ТК.

Підходи [5-7] полягають в оптимізації перемешувача в структурі ТК. У цьому випадку енергетичний вигравш відбувається при відношенні сигнал-завада в області “порога помилок” ТК.

Інший підхід [8] полягає в застосуванні додаткових біт по завершенню кодування блока даних з метою примусового переведення решітчастої діаграми рекурсивного систематичного згорткового коду (РСЗК) ТК у початковий стан. При цьому забезпечується енергетичний вигравш в 0,1-0,3 дБ.

Відомий метод [9] враховує інформацію про стан каналу зв'язку при декодуванні ТК. Енергетичний вигравш при цьому складає 0,1-0,2 дБ.

Підвищити завадозахищеність ЗРЗ можна шляхом використання багатокомпонентних ТК. В системах радіозв'язку з ТК принцип використання багатокомпонентних ТК

досліджений не в повній мірі, тому що використання багатокомпонентних ТК вимагає затримки під час обробки прийнятих інформаційних блоків, однак, у зв'язку з останніми досягненнями в галузі мікропроцесорної техніки це стає досить реальним [10].

Постановка завдання

Метою статті є розробка математичної моделі декодування багатокомпонентних ТК з метою покращення статистичних характеристик завадозахищеності засобів радіо-зв'язку для мобільних систем зв'язку четвертого покоління 4G.

Виклад основного матеріалу

Передбачається, що канал зв'язку гаусівський і має ідеальну імпульсну характеристику $h_c(t)=1$, внаслідок чого сигнал спотворюється тільки присутністю флуктуаційних шумів і навмисних завад.

На рис. 1, 2 показані структурні схеми кодера та ітеративного декодера ТК відповідно при паралельному з'єднанні двох РСЗК.

Схема кодера турбо коду використовує РСЗК зі швидкістю $1/n$ виду: $(1, g_1/g_0, \dots, g_{n-1}/g_0)$, де g_0 – поліноміальний генератор зворотнього зв'язку, а $g_1, \dots, g_{n-1}$ – поліноміальні генератори прямих зв'язків. Кожен РСЗК виконує кодування інформаційної послідовності по своїй діаграмі, структура якої залежить від поліноміальних генераторів РСЗК [10, 11].

У моделі кодера ТК використовується псевдовипадковий, S -випадковий, блоковий і діагональний перемежувачі/деперемежувачі [9].

Послідовність на виході кодера ТК має вигляд: $\bar{X} = (\bar{X}^C, \bar{X}^П)$, де $\bar{X}^C = \bar{U}$ – систематичний вихід кодера, а $\bar{X}^П = (\bar{X}^{П1}, \bar{X}^{П2})$ – перевірочний вихід кодера ТК. При цьому $\bar{X}^{П1} = (\bar{X}^{П11}, \dots, \bar{X}^{П1v})$ – перевірочний вихід РСЗК 1, $\bar{X}^{П2} = (\bar{X}^{П21}, \dots, \bar{X}^{П2v})$ – перевірочний вихід РСЗК 2, v – загальна кількість перевірочних символів кожного РСЗК кодера ТК.

Демодульована послідовність символів подається на декодери 1 і 2 (рис. 2): $\bar{Y}^1 = (L_c \bar{Y}^{C1}, L_c \bar{Y}^{П1})$ – для декодера 1, де $\bar{Y}^{П1} = (\bar{Y}^{П11}, \dots, \bar{Y}^{П1v})$, L_c – параметр каналної “надійності”. Відповідно $\bar{Y}^2 = (L_c \bar{Y}^{C2}, L_c \bar{Y}^{П2})$ – для декодера 2, де $\bar{Y}^{П2} = (\bar{Y}^{П21}, \dots, \bar{Y}^{П2v})$. $\bar{Y}^{C1} = \bar{Y}^C$, $\bar{Y}^{C2} = \bar{Y}^C$ – послідовності систематичних символів з урахуванням відповідної операції перемеження.

Розглядається такт роботи в момент часу t .

Дійсне представлення “м'якого” рішення або логарифмічне відношення функцій правдоподібності (ЛВФП) поза декодером визначається виразом [10,11]

$$L(x_t | y_t) = \ln \frac{P(y_t | x_t = +1)}{P(y_t | x_t = -1)} + \ln \frac{P(x_t = +1)}{P(x_t = -1)} = L_a(x_t) + L(y_t | x_t), \quad (1)$$

де $L(y_t | x_t)$ – ЛВФП y_t , яке одержується шляхом виміру y_t на виході каналу при чергуванні умов, що може бути переданий $x_t = +1$ або $x_t = -1$, а $L_a(x_t)$ – апіорне ЛВФП біта даних x_t . Для спрощення позначень рівняння (1) може бути переписане таким чином [10,11]:

$$L'(x_t) = L_c(y_t) + L_a(x_t). \quad (2)$$

Тут $L_c(y_t)$ означає, що член ЛВФП виходить у результаті каналних вимірів, зроблених у приймачі. Для систематичних кодів ЛВФП на виході декодера дорівнює наступному [10, 11]:

$$L(x_t) = L'(x_t) + L_c(x_t). \quad (3)$$

У цьому виразі $L'(x_t)$ – ЛВФП поза демодулятором (на вході декодера), а $L_e(x_t)$ – «зовнішнє» ЛВФП, що представляє зовнішню інформацію, що впливає з процесу декодування. З рівнянь (2) і (3) вихідне ЛВФП декодера прийме вид:

$$L(x_t) = L_c(y_t) + L_a(x_t) + L_e(x_t). \quad (4)$$

Знак $L(x_t)$ є твердим рішенням про символ x_t , а модуль $|L(x_t)|$ – ступенем надійності (правдоподібності) цього рішення.

Декодер 1 у відповідності зі своїм алгоритмом виробляє «м'які» рішення про декодовані символи (вихідне ЛВФП), які складаються з трьох частин [10,11]:

$$L^1(x_t^C) = L_c \cdot y_t^{C1} + L_a^1(x_t^C) + L_e^1(x_t^C),$$

де x_t^C – систематичний символ кодера ТК.

При цьому «зовнішня» інформація декодера 1 про символ x_t^C , що є апіорною для декодера 2 (з урахуванням операції перемежіння), прийме вид [10,11]

$$L_e^1(x_t^C) = L_a^2(x_t^C) = L^1(x_t^C) - L_a^1(x_t^C) - L_c \cdot y_t^{C1}.$$

Другий елементарний декодер, одержавши апіорні відомості про інформаційні символи, робить аналогічні обчислення, визначаючи свою «зовнішню» інформацію про символ x_t^C [11]:

$$L_e^2(x_t^C) = L_a^1(x_t^C) = L^2(x_t^C) - L_a^2(x_t^C) - L_c \cdot y_t^{C2},$$

яка надходить на вхід декодера 1 наступної ітерації декодування.

Після виконання необхідної кількості ітерацій або у випадку примусової зупинки ітеративної процедури декодування виносяться рішення про декодовані символи:

$$x_t^C = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L(x_t^C) \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } L(x_t^C) < 0 \end{cases}.$$

Як відомо, декодування символів ТК відбувається по діаграмі відповідного РСЗК, при цьому обчислюється перехідна рекурсія, пряма рекурсія, зворотна рекурсія, ЛВФП на виході декодера та параметр «зовнішньої» інформації [11]. Розглянемо особливості обчислення вихідного ЛВФП для декодера 2, використовуючи алгоритм декодування *Мар*.

Позначимо попередній стан діаграми $S_{t-1} = s'$, а поточний – $S_t = s$. На рис. 3 показаний приклад діаграми для РСЗК виду (1, 7/5). Для кожного переходу діаграми обчислюється перехідна рекурсія $\gamma_t(s', s)$ зі стану s' в стан s по формулі [11]:

$$\gamma_t(s', s) \sim \exp \left[\frac{1}{2} \cdot \left(x_t^C \cdot (L_a^2(x_t^C) + L_c \cdot y_t^{C2}) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right) \right],$$

де $x_t^C, x_t^{\Pi 2i}, i \in (1, v)$ – відповідно систематичний символ кодера ТК і перевірочні символи РСЗК 2 до проходження каналу з флуктуаційним шумом і навмисними завадами; $y_t^C, y_t^{\Pi 2i}, i \in (1, v)$ – систематичний символ кодера ТК і перевірочні символи РСЗК 2 після проходження каналу з флуктуаційним шумом і навмисними завадами; $L_a^2(x_t^C)$ – апіорна інформація другого декодера; L_c – параметр каналної «надійності»; v – кількість перевірочних символів РСЗК, $v = q - 1$, де q – загальна кількість символів РСЗК (систематичний і перевірочні).

Для кожного стану діаграми визначається пряма рекурсія $\alpha_t(s)$ (починаючи з початку блока – при прямому обчисленні) по формулі [11]: $\alpha_t(s) = \sum_{s'} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \gamma_t(s', s)$, де $\tilde{\alpha}_{t-1}(s')$ – нормована пряма рекурсія $t - 1$ такту. Підсумовування виконується по всіх попередніх станах s' , для яких існує перехід у поточний стан s .

Одержавши прямі рекурсії для всіх станів даного такту, обчислюється параметр нормалізації, що визначається сумою даних рекурсій [11]:

$$\sum_s \alpha_t(s) = \sum_s \sum_{s'} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \gamma_t(s', s).$$

З урахуванням параметра нормалізації вираз прямої рекурсії прийме вид [11]:

$$\tilde{\alpha}_t(s) = \frac{\sum_{s'} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \gamma_t(s', s)}{\sum_s \sum_{s'} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \gamma_t(s', s)}.$$

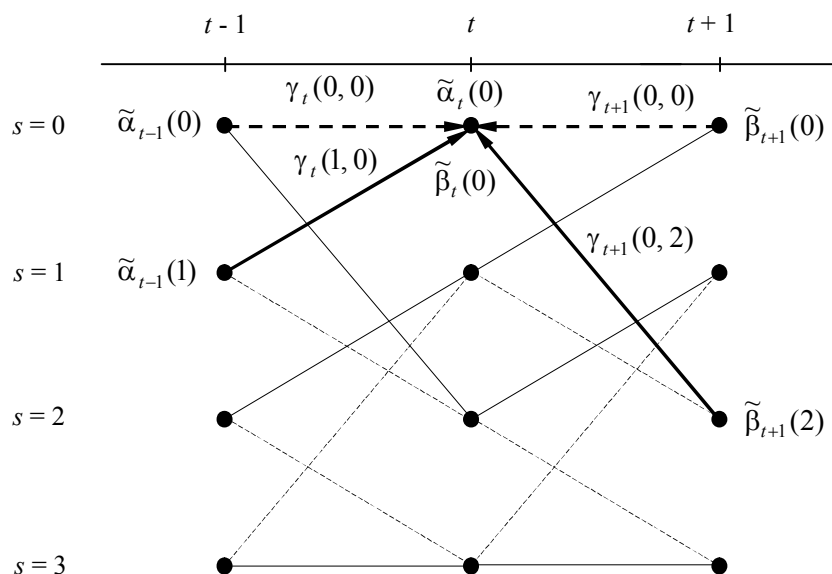


Рис. 3. Діаграма РСЗК виду (1, 7/5)

Для кожного стану діаграми визначається зворотна рекурсія $\tilde{\beta}_{t-1}(s')$, починаючи з кінця блока при зворотньому обчисленні, по формулі [11]:

$$\beta_{t-1}(s') = \sum_s \tilde{\beta}_t(s) \cdot \gamma_t(s', s),$$

де $\tilde{\beta}_t(s)$ – нормована зворотна рекурсія такту t . Підсумовування відбувається по всіх поточних станах s , у які існує перехід з попереднього стану s' .

З урахуванням параметра нормалізації, отриманого при обчисленні прямої рекурсії, вираз зворотної рекурсії прийме вид [11]:

$$\tilde{\beta}_{t-1}(s') = \frac{\sum_s \tilde{\beta}_t(s) \cdot \gamma_t(s', s)}{\sum_s \sum_{s'} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \gamma_t(s', s)}.$$

В [11] показано, що ЛВФП на виході декодера 2 може бути записане в наступному виді:

$$L^2(x_t^C) = \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=+1}} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \tilde{\beta}_t(s) \cdot \gamma_t(s', s)}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=-1}} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \tilde{\beta}_t(s) \cdot \gamma_t(s', s)} =$$

$$= \log \frac{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=+1}} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \tilde{\beta}_t(s) \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot x_t^C \cdot (L_a^2(x_t^C) + L_c \cdot y_t^{C2}) \right] \cdot \exp \left[L_c \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right]}{\sum_{\substack{(s',s) \\ u_t=-1}} \tilde{\alpha}_{t-1}(s') \cdot \tilde{\beta}_t(s) \cdot \exp \left[\frac{1}{2} \cdot x_t^C \cdot (L_a^2(x_t^C) + L_c \cdot y_t^{C2}) \right] \cdot \exp \left[L_c \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right]}.$$

Алгоритм *Max Log Map* заснований на деяких перетвореннях над алгоритмом *Map* і використанні апроксимації [11].

Для одержання перехідної, прямої і зворотної рекурсії даного алгоритму необхідно прологарифмувати відповідні рекурсії алгоритму *Map*: $A_t(s) = \ln \tilde{\alpha}_t(s)$, $B_t(s) = \ln \tilde{\beta}_t(s)$, $\Gamma_t(s', s) = \ln \gamma_t(s', s)$, а також використати апроксимацію: $\ln \left(\sum_{i=1}^n e^{a_i} \right) \approx \max_{i=1..n} a_i$ [11].

З урахуванням цих перетворень основні рекурсії будуть мати вигляд [11]:

$$\Gamma_t(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left(x_t^C \cdot (L_a^2(x_t^C) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right);$$

$$A_t(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}(s') + \Gamma_t(s', s)];$$

$$\tilde{A}_t(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}(s') + \Gamma_t(s', s)] - A_t^{\max}(s);$$

$$B_{t-1}(s') \approx \max_{s'} [\tilde{B}_t(s) + \Gamma_t(s', s)];$$

$$\tilde{B}_{t-1}(s') \approx \max_{s'} [\tilde{B}_t(s) + \Gamma_t(s', s)] - A_t^{\max}(s),$$

де $A_t^{\max}(s) \approx \max_s (\max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}(s') + \Gamma_t(s', s)])$ – параметр нормалізації. У виразі прямої рекурсії максимізація виконується по всіх попередніх станах s' , для яких існує перехід у поточний стан s , а для зворотної – по всіх поточних станах s , у які існує перехід з попереднього стану s' . Параметр нормалізації визначається максимальним значенням прямих рекурсій по всіх станах.

ЛВФП обчислюється по наступній формулі [11]:

$$L^2(x_t^C) \approx \max_{\substack{(s', s) \\ u_t=+1}} [\tilde{A}_{t-1}(s') + \Gamma_t(s', s) + \tilde{B}_t(s)] - \max_{\substack{(s', s) \\ u_t=-1}} [\tilde{A}_{t-1}(s') + \Gamma_t(s', s) + \tilde{B}_t(s)].$$

Параметр «зовнішньої» інформації обчислюється аналогічно алгоритму *Map*.

Структурна схема моделі кодера та декодера трьохкомпонентного ТК показана на рис. 4 та 5 відповідно. Розглянемо особливості, якими буде володіти модель декодера трьохкомпонентного ТК, структурна схема якого зображена на рис. 5. Розглядається алгоритм *Max Log Map*.

Як і у випадку двохкомпонентного ТК, трьохкомпонентні декодери працюють послідовно. Особливістю декодування трьохкомпонентного ТК, на відміну від двохкомпонентного, є те, що апріорна інформація для компонентного кодера формується як сума не двох (рис. 5), а трьох складових: каналного відліку систематичного біта, а також значень ЛВФП, отриманих двома попередніми компонентними декодерами (якщо потрібно, то з попередньої ітерації).

Основні рекурсії для першого, другого та третього декодера n -ї ітерації декодування будуть мати наступний вигляд:

$$\Gamma_t^{1,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left(x_t^C \cdot (L_a^{1,n}(x_t^C) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right);$$

$$\Gamma_t^{2,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left(x_t^C \cdot (L_a^{2,n}(x_t^C) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right);$$

$$\Gamma_t^{3,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left(x_t^C \cdot (L_a^{3,n}(x_t^C) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right);$$

$$A_t^{1,n}(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{1,n}(s') + \Gamma_t^{1,n}(s', s)];$$

$$\tilde{A}_t^{1,n}(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{1,n}(s') + \Gamma_t^{1,n}(s', s)] - A_t^{1,n \max}(s);$$

$$\begin{aligned}
A_t^{2,n}(s) &\approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{2,n}(s') + \Gamma_t^{2,n}(s', s)]; \\
\tilde{A}_t^{2,n}(s) &\approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{2,n}(s') + \Gamma_t^{2,n}(s', s)] - A_t^{2,n \max}(s); \\
A_t^{3,n}(s) &\approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{3,n}(s') + \Gamma_t^{3,n}(s', s)]; \\
\tilde{A}_t^{3,n}(s) &\approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{3,n}(s') + \Gamma_t^{3,n}(s', s)] - A_t^{3,n \max}(s); \\
B_{t-1}^{1,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{1,n}(s) + \Gamma_t^{1,n}(s', s)]; \\
\tilde{B}_{t-1}^{1,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{1,n}(s) + \Gamma_t^{1,n}(s', s)] - A_t^{1,n \max}(s); \\
B_{t-1}^{2,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{2,n}(s) + \Gamma_t^{2,n}(s', s)]; \\
\tilde{B}_{t-1}^{2,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{2,n}(s) + \Gamma_t^{2,n}(s', s)] - A_t^{2,n \max}(s); \\
B_{t-1}^{3,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{3,n}(s) + \Gamma_t^{3,n}(s', s)]; \\
\tilde{B}_{t-1}^{3,n}(s') &\approx \max_{s'} [\tilde{B}_t^{3,n}(s) + \Gamma_t^{3,n}(s', s)] - A_t^{3,n \max}(s).
\end{aligned}$$

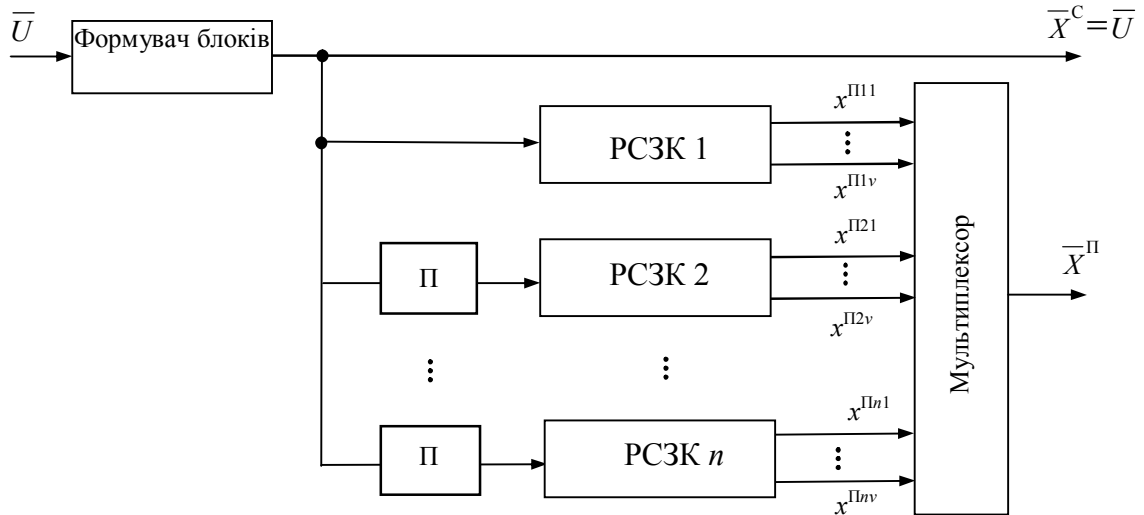


Рис. 4. Структурна схема багатокомпонентного декодера ТК

Для першого, другого, третього декодера вихідне ЛВФП обчислюється по формулах відповідно:

$$\begin{aligned}
L^{1,n}(x_t^C) &\approx \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{1,n}(s') + \Gamma_t^{1,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{1,n}(s)] - \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{1,n}(s') + \Gamma_t^{1,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{1,n}(s)]; \\
L^{2,n}(x_t^C) &\approx \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{2,n}(s') + \Gamma_t^{2,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{2,n}(s)] - \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{2,n}(s') + \Gamma_t^{2,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{2,n}(s)]; \\
L^{3,n}(x_t^C) &\approx \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{3,n}(s') + \Gamma_t^{3,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{3,n}(s)] - \max_{(s',s)} [\tilde{A}_{t-1}^{3,n}(s') + \Gamma_t^{3,n}(s', s) + \tilde{B}_t^{3,n}(s)].
\end{aligned}$$

Перший декодер, використовуючи «вихідне» ЛВФП, апріорні ЛВФП з другого та третього декодера попередньої ітерації та інформацію з каналу, визначає «зовнішню» інформацію про символ x_t^C :

$$L_e^{1,n}(x_t^C) = L^{1,n}(x_t^C) - L_a^{2,n-1}(x_t^C) - L_a^{3,n-1}(x_t^C) - L_c \cdot y_t^{C2}. \quad (6)$$

Другий декодер для визначення «зовнішньої» інформації про символ x_t^C використовує «вихідне» ЛВФП, апіорне ЛВФП з третього декодера попередньої ітерації та апіорне ЛВФП з першого декодера поточної ітерації, а також інформацію з каналу зв'язку:

$$L_e^{2,n}(x_t^C) = L^{2,n}(x_t^C) - L_a^{3,n-1}(x_t^C) - L_a^{1,n}(x_t^C) - L_c \cdot y_t^{C2}. \quad (7)$$

Третій елементарний декодер, одержавши апіорні відомості про інформаційні символи з першого та другого декодера, а також використовуючи вихідне ЛВФП та інформацію, прийняту з каналу, визначає свою «зовнішню» інформацію про символ x_t^C :

$$L_e^{3,n}(x_t^C) = L^{3,n}(x_t^C) - L_a^{2,n}(x_t^C) - L_a^{1,n}(x_t^C) - L_c \cdot y_t^{C2}. \quad (8)$$

Далі необхідно «зовнішнє» ЛВФП помножити на параметр p , в результаті вирази (6)-(8) зміняться відповідно на:

$$L_e^{*1,n}(x_t^C) = L_e^{1,n}(x_t^C) \cdot p;$$

$$L_e^{*2,n}(x_t^C) = L_e^{2,n}(x_t^C) \cdot p;$$

$$L_e^{*3,n}(x_t^C) = L_e^{3,n}(x_t^C) \cdot p.$$

На рис. 6. показаний графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}}$ від відношення сигнал-завада $h_j^2 = E_b / G_j$ (E_b – енергія біта), отриманий в результаті імітаційного моделювання.

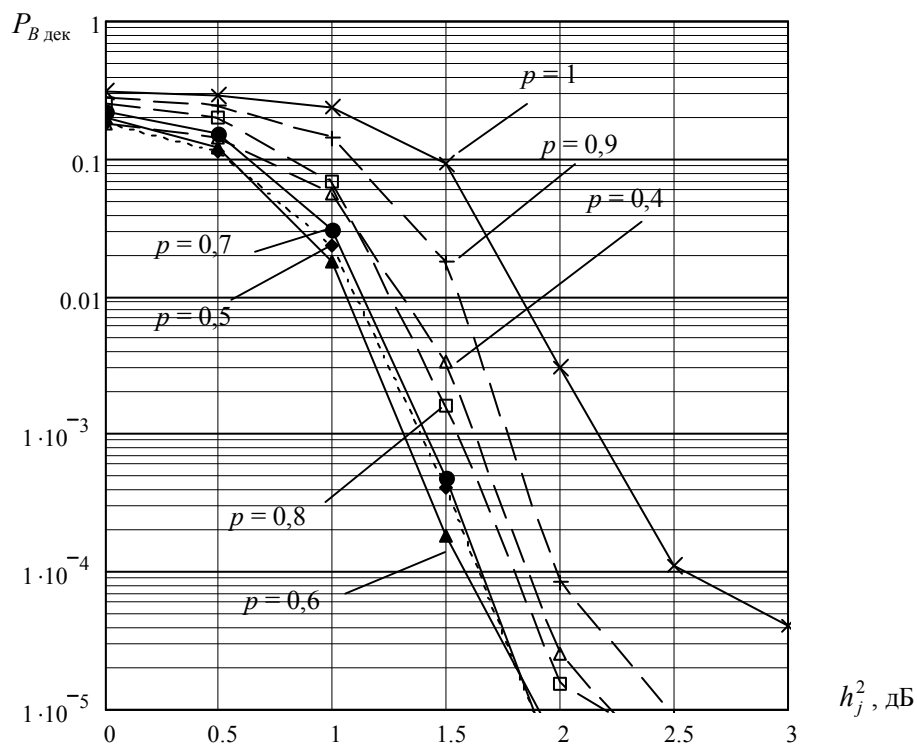


Рис. 6. Графік залежності $P_{B \text{ дек}}$ від відношення сигнал-завада h_j^2 для різних коефіцієнтів p

Використовуються різні коефіцієнти p , модуляція ФМ-2, ТК з трьома компонентними кодерами (декодерами), псевдовипадковим перемежувачем, кількістю біт в прийнятому блоці $N = 1000$, алгоритмом декодування *Max Log Map*, 8 ітерацій декодування, швидкістю кодування ТК $R = 1/3$ при впливі шумової загороджувальної завади з спектральною щільністю потужності завади G_j і флуктуаційного шуму з спектральною щільністю потужності шуму G_0 .

Використання параметра $p = 0,6$ в алгоритмі декодування дозволяє підвищити ефективність застосування запропонованої математичної моделі декодування до 1 дБ в порівнянні з використанням параметра $p = 1,0$.

Висновки

1. Отримано нову математичну модель декодування двох- та трьохкомпонентних турбо кодів, яка може бути застосована в розробці технологій безпроводного доступу з турбо кодами.

2. Результати імітаційного моделювання статистичних характеристик завадозахищеності технологій безпроводного доступу з багатокомпонентними турбо кодами показали, що використання запропонованої математичної моделі дозволяє покращити їх статистичні характеристики завадозахищеності.

3. Напрямок подальших розробок вважається дослідження статистичних характеристик завадозахищеності технологій безпроводного доступу з технологією *МІМО*.

Список літературних джерел

1. Holma N. HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications /N. Holma, A. Toskala. – John Wiley & Sons, 2006. – 268 p.
2. Peng F. Adaptive Modulation and Coding for IEEE 802.11n /F. Peng, J. Zhang, W. Ryan //Wireless Communications and Networking Conference, 11-15 March 2007. – 2007. – P. 656-661.
3. IEEE 802.16. Broadband Wireless Metropolitan Area Network (WirelessMAN) [Electronic resource] //Mode of access: <http://standards.ieee.org/getieee802/802.16.html>. – Title from the screen.
4. Ergen M. Mobile Broadband. Including WiMax and LTE /M. Ergen – Springer, 2009. – 513 p.
5. Пат. WO2007059389 A2, H04J11/00. Method and apparatus for interleaving within a communication system /Kaith B., Yufei B., Brian C.; заявл. 14.11.05; опубл. 24.05.07, World Intellectual Property Organization.
6. Пат. WO2008057906 A2, H03M13/27. Turbo interleaving for high data rates /Yongbin W., Jing S., Prasad M.; заявл. 01.11.06; опубл. 15.05.08, World Intellectual Property Organization.
7. Пат. KR20020031721, H03M13/29. Device for decoding turbo code using channel information and method thereof /Geun K., Seop L.; опубл. 03.05.02, World Intellectual Property Organization.
8. Пат. EP1906536 A2, H03M13/29. Tail-biting turbo-code for arbitrary number of information bits /Zong S., Tak L; заявл. 28.09.06; опубл. 02.04.08, European Patent Application, Bulletin 2008/14.
9. Пат. на корисну модель 43111, МПК H03M 13-37. Пристрій підвищення завадо захищеності систем з турбокодами при низьких значеннях відношення сигнал-шум в каналі /Зайцев С.В., Лівенцев С.П., Кувшинов О.В.; заявл. 05.08.08; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.
10. Особенности декодера турбокода в программируемых радиостанциях при воздействии помех /С.П. Ливенцев, С.В. Зайцев, С.В. Кныр [и др.] //Зв'язок. – 2007. – № 2. – С. 31-35.
11. Woodard J. Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview /J. Woodard, L. Hanzo //IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2000. – Vol. 49, No. 6. – P. 2208-2232.

УДК 004.942

П.Г. Бивойно, канд. техн. наук**Т.П. Бивойно**, асистент**М.М. Сисосва**, магістрант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ПРИКЛАДНА ПРОГРАМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Представлено опис прикладної програми, у якій була реалізована методика, що дозволяє шляхом моделювання оцінювати характер перехідного процесу для середньої довжини черги та його тривалість. Програма створена на основі фреймворку SimulationJava, який вирішив задачі створення імітаційних моделей систем масового обслуговування, синхронізації їх роботи у єдиному часовому просторі та забезпечив автоматизацію проведення експериментів, візуалізацію ходу експерименту, регресійний та дисперсійний аналіз отриманих результатів.

Постановка проблеми

Існуючі методи дослідження систем масового обслуговування (СМО) зазвичай пов'язані із дослідженнями сталого режиму системи. Проте, у деяких випадках найбільшу цікавість для практики являє поведінка системи у перехідному режимі. Так, наприклад, коефіцієнт завантаження комп'ютерної мережі банку суттєво зростає наприкінці робочого дня, коли усі відділення починають передавати звіти про результати роботи за день. Внаслідок цього у системі починається перехідний процес, але тривалість роботи у такому режимі незначна і система може навіть не встигнути досягти сталого режиму. У цьому випадку інформація про перехідний процес дає можливість правильно визначити параметри системи, що забезпечать надійну роботу при наявності короткочасних перевантажень. Інформація про тривалість перехідного процесу може бути корисною і при вивченні сталих режимів, оскільки дозволяє визначити момент часу, з якого слід почати збирати інформацію про сталий режим.

Але дослідження перехідних процесів навіть у детермінованих динамічних системах не завжди є тривіальною задачею. А при дослідженні СМО завдання ускладнюється стохастичністю процесів. Окрім того, методика дослідження перехідного процесу суттєво залежить від параметру СМО, для якого визначається перехідний процес. Наприклад, середня довжина черги змінюється у часі, тому досліджувати треба функцію часу, а тривалість чекання у черзі є функцією номера транзакції і досліджувати треба низку значень.

Існуючі методи теорії масового обслуговування надають можливість аналітичного дослідження марківських СМО та подібних до них [1] Основна увага при цьому приділяється оцінюванню ймовірностей станів ланцюга Маркова. Нижче наведено систему рівнянь (1), що описує зміни цих ймовірностей у часі для простої марківської СМО:

$$\begin{cases} \frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda_k + \mu_k)P_k(t) + \lambda_{k-1} \cdot P_{k-1}(t) + \mu_{k+1} \cdot P_{k+1}(t), k \geq 1 \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_0 P_0(t) + \mu_1 \cdot P_1(t) \\ \sum_{k=0}^{\infty} P_k(t) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

де t - час; k – номер стану ланцюга Маркова (кількість транзакцій у системі); $P_k(t)$ – ймовірність k -го стану; λ_k – інтенсивність появи транзакцій на вході системи;

μ_k – інтенсивність обслуговування транзакцій.

Особливість наведеної системи рівнянь полягає у тому, що кількість транзакцій у системі необмежена ($k \rightarrow \infty$). Рішення цієї системи для сталого режиму, коли усі похідні дорівнюють нулю, не викликає труднощів. Але спроба знайти аналітичне рішення для перехідного режиму проблематично. Про це може засвідчити цитата з [1]: «вираз є таким, що найбільш бентежить. Доводиться зробити висновок, що модель простої СМО, яка нас цікавить... приводить до незручного вираження залежностей стану системи від часу. Як наслідок, можна чекати тільки ще більших складнощів ... при спробі знайти часові характеристики СМО.» Все ж використання чисельних методів для розв'язання цієї системи рівнянь при заданих початкових умовах і обмеженою довжиною черги дозволяє знайти параметри перехідного режиму роботи такої СМО.

Таким чином, можна констатувати, що аналітичний підхід надає можливість досліджувати перехідні процеси марківських СМО за допомогою чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь. Але на практиці зустрічаються не лише марківські СМО, і у цих випадках аналітичний підхід стає безсилим навіть для дослідження сталих режимів роботи.

Продуктивною альтернативою аналітичним методам дослідження в наш час є методи імітаційного моделювання, які широко використовується для дослідження сталих режимів роботи будь-яких СМО. Що стосується дослідження перехідних процесів шляхом моделювання, то воно до недавнього часу стримувалося обмеженими можливостями комп'ютерів, бо визначення параметрів перехідного процесу потребує отримання і обробки великої кількості реалізацій цього процесу у зв'язку із стохастичністю процесів у СМО. Суттєве зростання потужності комп'ютерів в наш час надає можливість впритул підійти до дослідження перехідних процесів у СМО. Успішне вирішення цього завдання залежить від вибору методики дослідження та засобів реалізації цієї методики. Дослідження перехідних процесів в СМО шляхом моделювання потребує обробки великої кількості статистичних даних, тому, перш за все, слід визначити найбільш ефективний спосіб накопичення цієї інформації. Не менш важливим є і питання вибору ефективного способу побудови імітаційної моделі та засобів автоматизованого проведення імітаційних експериментів і обробки отриманих результатів.

Методика оцінки параметрів перехідного процесу для середньої довжини черги

Зміни значення середньої довжини черги під час перехідного процесу можна зафіксувати тільки шляхом усереднення по реалізаціях. Якщо досліджувати одну реалізацію, то виявити будь-які закономірності неможливо (рисунк 1). Але маючи багато реалізацій процесу, ми можемо, усереднюючи розміри черги по реалізаціях для кожного моменту часу, виявити закономірності, що характерні для перехідного процесу. Чим більше реалізацій буде в розпорядженні дослідника, тим менш помітними будуть флуктуації, і тим більше виразно виявлятимуться закономірності перехідного процесу. Надійність результатів, отриманих при цьому, залежить тільки від потужності комп'ютера і часу, виділеного на проведення експериментів.

Отримати потрібну кількість реалізацій можна шляхом повторних запусків моделі або одночасного спостереження за багатьма паралельно працюючими моделями. Останній шлях здається більш ефективним, тому що вже у процесі моделювання є можливість стежити за параметрами перехідного процесу. Це має свої переваги, зокрема, зникає проблема визначення тривалості експерименту, процес моделювання може бути завершено, як тільки будуть знайдені параметри перехідного процесу.

Таким чином, можна запропонувати наступну методику оцінки параметрів перехідного процесу для середньої довжини черги. Створюється велика кількість однакових моделей, які одночасно стартують і паралельно працюють у віртуальному модельному часі, єдиному для всіх моделей. Кожна з моделей на невеликому відрізки часу (інтервал

накопичення або дискретизації) збирає поточну інформацію про довжину черги і наприкінці цього відрізка часу визначає середнє значення черги на цьому інтервалі, реалізуючи таким чином усереднення у часі (рисунк 1).

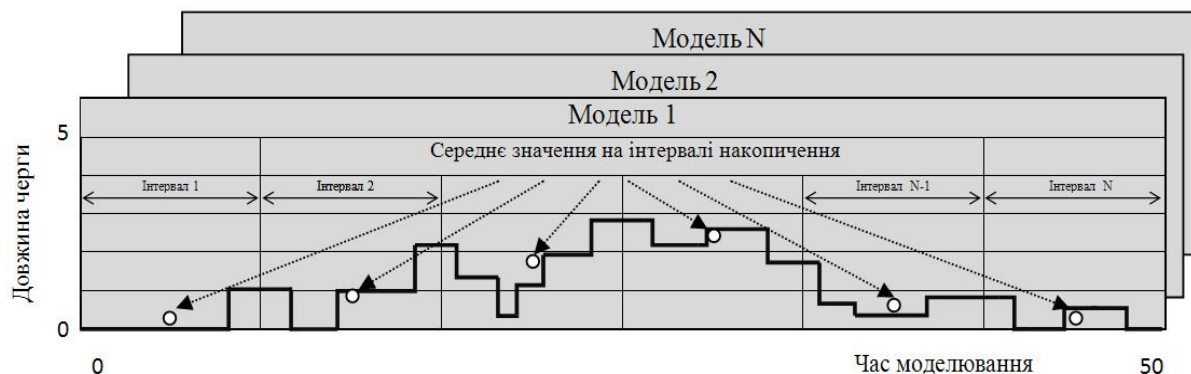


Рис. 1. Усереднювання значень довжини черги за часом у межах однієї реалізації

Послідовність цих середніх значень, отриманих у ході експерименту, не дає уявлення про характер перехідного процесу, але дозволяє провести дискретизацію процесу. Усереднення ж результатів, отриманих наприкінці кожного інтервалу накопичення по всіх реалізаціях, дозволяє отримати послідовність середніх значень довжини черги для кожного інтервалу, що дасть уявлення про характер перехідного процесу (рисунк 2). Інтервал накопичення може бути як завгодно малим, але в його суттєвому зменшенні нема потреби, якщо у перехідному процесі нема високочастотних складових.

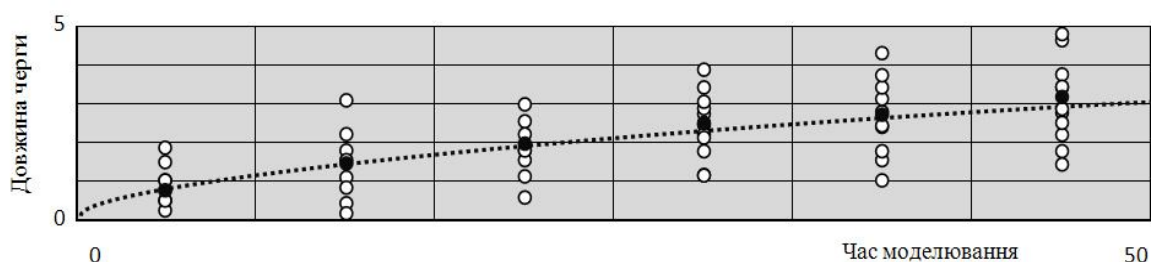


Рис. 2. Результати усереднювання середньої довжини черги по реалізаціях

Для отриманої послідовності можна знайти функцію регресії і таким чином отримати аналітичний опис перехідного процесу.

Реалізація методики оцінки параметрів перехідного процесу

Вибір засобів реалізації запропонованої методики залежить від мети моделювання. Метою експерименту будемо вважати отримання залежності тривалості перехідного процесу від коефіцієнта завантаження системи. При цьому процес дослідження має бути максимально автоматизований, тобто на вході прикладної програми, що реалізує план експерименту, має бути множина коефіцієнтів завантаження системи, а на виході ми маємо отримати залежність тривалості перехідного процесу від коефіцієнта завантаження.

Для того, щоб зробити вибір інструментарію для дослідження перехідних процесів в СМО, сформулюємо вимоги до моделі та прикладної програми, що забезпечить проведення експериментів та обробку результатів.

Вимоги до моделі:

- накопичувати інформацію про середні значення черги на інтервалі накопичення;
- надавати доступ до цієї інформації під час роботи моделі;
- здатність роботи одночасно з іншими моделями у єдиному часовому просторі.

Вимоги до прикладної програми:

- забезпечення одночасної роботи великої кількості моделей;
- наявність синхронного у часі контакту з усіма моделями з метою своєчасного отримання інформації про середні значення на інтервалах;
- можливість підключення засобів для отримання параметрів функції регресії для перехідного процесу та взаємодії з такими засобами;
- забезпечення автоматичного проведення серій однофакторних багаторівневих експериментів з моделлю;
- візуалізація результатів експерименту;
- можливість підбору функції регресії для отриманих результатів.

Наведений перелік вимог свідчить про те що в жорстких рамках таких широко відомих спеціалізованих пакетів комп'ютерного моделювання, як GPSS або SIMULINK [2], [3], реалізація такої прикладної програми неможлива.

Тому для реалізації проекту було вибрано фреймворк SimulationJava. Це фреймворк з відкритим кодом, який дозволяє швидко створювати імітаційні моделі, а також забезпечує дослідника засобами візуалізації процесу моделювання, автоматизації проведення експериментів, статистичної обробки результатів, включаючи дисперсійний та регресійний аналіз.

Програмний комплекс, що був реалізований на основі фреймворку SimulationJava, має багаторівневу архітектуру (рисунок 3). Кожна з підсистем нижчого рівня входить як складова частина підсистеми наступного рівня, але може функціонувати і самостійно.

Підсистема найнижчого рівня комплексу – це підсистема паралельного моделювання СМО. Вона реалізує викладену вище методику оцінки параметрів перехідного процесу. Центральним елементом системи є монітор, який за допомогою фабрики моделей створює задану кількість моделей, забезпечує їх одночасну роботу і синхронно у часі контактує з усіма моделями, отримуючи інформацію про середні значення довжини черги на інтервалах. Взаємодію з фабрикою моделей монітор реалізує через інтерфейс `IModelFactory`. Єдиний метод цього інтерфейсу `public IModel createModel(Dispatcher dispatcher)` забезпечує створення моделі, що реалізує інтерфейс `IModel` і працює під керуванням заданого диспетчера. Завдання диспетчера полягає у просуванні модельного часу і синхронізації роботи усіх компонентів моделі. Обмін інформацією з моделями відбувається через інтерфейс `ITransprocesable`, що має бути реалізований моделлю. Метод `public void initForTrans(double finishTime)` цього інтерфейсу має забезпечити підготовку моделі до роботи протягом заданого часу. Метод `public void resetTransAccum()` забезпечує ініціалізацію досліджуваного об'єкту на початку інтервалу накопичення, а метод `public double getTransResult()` забезпечує доступ до результату накопичення наприкінці інтервалу. Метод `public void setParameter(double parameter)` використовується для зміни налаштувань моделі. Наявність зазначених вище інтерфейсів надає можливість підключати до комплексу будь-які моделі, що реалізують такі інтерфейси.



Рис. 3. Архітектура програмного комплексу для проведення експериментів

Підсистема другого рівня використовується для визначення параметрів перехідного процесу. У нашому дослідженні таким параметром є тривалість перехідного процесу і цей параметр визначає спеціальний блок, що показаний на рисунку 3. Блок взаємодіє з підсистемою паралельного моделювання через інтерфейс IRegresable, що реалізує підсистема паралельного моделювання. Перший з методів цього інтерфейсу, `public double[] getTimeArray()`, повертає масив значень часу, з якими пов'язані середні значення черги. Другий метод `public double[] getResultArray()`, повертає масив відповідних середніх значень черги.

Попередній аналіз результатів роботи підсистеми паралельного моделювання показав, що для однофазних СМО характер перехідного процесу для середньої довжини черги можна представити аналітичною залежністю:

$$q(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \cdot q_{cm} \quad (2)$$

де $q(t)$ – залежність середньої довжини черги від часу;

q_{cm} – стає значення середньої довжини черги;

T – «стала часу» – параметр, який визначає тривалість перехідного процесу.

Завдання блоку визначення тривалості перехідного процесу полягає у визначенні параметрів q_{cm} і T для функції регресії (2), використовуючи для цього дані, що були отримані через інтерфейс IRegresable. Теоретично, сталий режим для залежності (2) настає лише в нескінченності, тому у якості тривалості перехідного процесу блок повертає значення, що дорівнює $3T$. За такий час середнє значення черги досягає 95 % від сталого значення.

Пошук параметрів функції регресії реалізується методом координатного спуску з використанням чисел Фібоначчі. Блок дозволяє використовувати у якості цільової функції або мінімум квадратів відхилень, або мінімум модулів відхилень. Попередні дослідження показали, що результати пошуку майже однакові для обох варіантів цільової функції.

Підсистема проведення серій однофакторних багаторівневих експериментів використовується для автоматизації проведення експериментів по визначенню залежності тривалості перехідного процесу від коефіцієнта завантаженості СМО. До складу підсистеми входить блок керування багаторівневим експериментом, що є об'єктом класу ExperimentControl фреймворку SimulationJava. Блок взаємодіє з підсистемою визначення параметрів перехідного процесу через інтерфейс IExperimentable і забезпечує проведення експериментів згідно з вказаними переліком значень фактора і кількістю повторень на рівні. Перший з методів інтерфейсу – IExperimentable, public void setFactor(double factor) – використовується для зміни налаштувань моделі. Другий метод – public double getResult() – повертає результат експерименту. Цей же інтерфейс реалізовано і для блоку визначення тривалості перехідного процесу (це не відображено на рисунку 3), що робить цей блок змінним. У разі необхідності представлення перехідного процесу іншою функцією регресії у програмному комплексі достатньо буде змінити цей блок.

Призначення останньої підсистеми програмного комплексу – визначити функцію регресії для даних, що надає попередня підсистема. Для пошуку функції регресії використовується блок регресійного аналізу, що є об'єктом класу RegresAnaliser, який входить до складу фреймворку SimulationJava. Блок взаємодіє з підсистемою проведення серій однофакторних багаторівневих експериментів через інтерфейс IRegresable. Процес визначення функції регресії відбувається напівавтоматично. Дослідник візуально аналізує множину отриманих результатів і вибирає із списку одну з можливих функцій. Блок визначає параметри функції регресії і перевіряє її на адекватність. У разі необхідності перелік можливих функцій регресії може бути збільшений шляхом перевизначення існуючих класів або створення нових, що успадковують клас RegresTester.

Інтерфейс користувача програмного комплексу, представлений на рисунку 4, призначений для доступу дослідника до налаштувань параметрів експерименту (значень фактора і кількості повторень експерименту на одному рівні), визначення параметрів моделі (вибір закону розподілу для заявок на обслуговування і обслуговуючих приладів), параметрів монітора (кількості паралельно працюючих моделей, інтервалу усереднювання і кількості таких інтервалів). Інтерфейс користувача надає також можливість візуального спостереження за ходом експерименту за допомогою діаграм.

Результати тестування програми

На рисунку 4 наведено результати одного з експериментів, який було проведено за допомогою програми. Для отримання залежності тривалості перехідного процесу від коефіцієнта завантаженості з параметрами експерименту, що наведені на рисунку 4, знадобилося 40 хвилин на комп'ютері з тактовою частотою 1.49 ГГц, та ОЗУ 256 МБ. Рисунок 4 демонструє, що реалізації перехідних процесів дещо відрізняються, але характер їх зберігається і має експоненціальний характер.



Рис. 4. Інтерфейс користувача програмного комплексу

Для комп'ютера з параметрами, що наведені вище, кількість паралельно працюючих моделей можна було збільшити до 5000. При цьому дисперсія результатів дещо зменшилась, але час проведення експерименту збільшився до 10 годин.

Висновки

Тестування створеного програмного продукту довело, що запропонована методика дослідження перехідних процесів для середньої довжини черги у СМО може бути реалізована на сучасному персональному комп'ютері.

Використання фреймворку SimulationJava спростило розробку програмного комплексу, який вирішив задачі створення імітаційних моделей СМО та синхронізації їх роботи у єдиному часовому просторі. Компоненти фреймворку забезпечили автоматизацію проведення експериментів, візуалізацію ходу експерименту, регресійний та дисперсійний аналіз отриманих результатів.

Експлуатація створеного програмного комплексу довела, що його можна використовувати для оцінки параметрів перехідних процесів у СМО. Архітектура комплексу дозволяє змінювати моделі, що досліджуються. Комплекс може бути доопрацьовано і включено до складу фреймворку SimulationJava. Застосування сучасних технологій розподілених обчислень може скоротити час на проведення експериментів.

Список літературних джерел

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. /Пер. И.И. Грушко; ред. В.И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с., ил.
2. Кузьменко В.М. Специальные языки программирования. Программные и инструментальные средства моделирования сложных систем. – Харьков, 2001. – 352 с.
3. Шрайбер Т. Дж. Моделирование на GPSS. – Машиностроение, 1980. – 593 с.

УДК 621.365.9:681.5.015:681.518.3

В.П. Войтенко, канд. техн. наук**М.А. Хоменко**, асистент**П.В. Рудіч**, магістрант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Сформульовано актуальну задачу практичної реалізації автоматичних і дистанційних режимів навчання штучної нейронної мережі при роботі з реальним об'єктом керування із застосуванням апаратних та програмних засобів комп'ютера і автономно. Запропоновано структуру замкненої цільової САК з опорною моделлю для номінального режиму оптимального керування за допомогою адаптивного мікропроцесорного регулятора з напівавтоматичним коригуванням параметрів моделі.

Вступ

Сучасні електротехнічні та електротехнологічні комплекси все в більшій мірі оснащуються засобами інтелектуального автоматичного керування, що суттєво підвищує конкурентоздатність даної продукції. Однак їхня насиченість високотехнологічним програмуємим обладнанням суттєво ускладнює процес налагодження, зумовлює занадто високі вимоги до персоналу, потребує багато часу на виконання пускових робіт і, врешті-решт, знижує економічну привабливість. Тому все більш актуальними стають такі специфічні вимоги до будь-якої нової продукції в галузі автоматизації виробничих процесів, як максимальна автономність не тільки на стадії експлуатації, але й хоча б часткова автоматизація і можливість дистанційної роботи під час пусконалагоджувальних робіт.

Теорія автоматичного керування (ТАК) має добре пророблені методи синтезу цифрових систем автоматичного керування (САК), які забезпечують високу якість регулювання (перехідного процесу, наприклад) в лінійних об'єктах керування (ОК) з відомими параметрами передаточної функції. Найкращі характеристики сьогодні мають САК, що містять опорні моделі в контурі керування (MRAC). Окрім інших переваг (якість регулювання), такі системи можна перетворити в адаптивні, якщо у відповідності до розроблених правил змінювати параметри моделі. Окремим і непростим питанням залишається визначення параметрів моделі (параметрична ідентифікація). В деяких випадках вони відомі від розробника, в інших – можуть бути отримані в результаті вимірів або випробувань з подачею спеціальних впливів на ОК (ідентифікаційні експерименти). Однак більшість реальних ОК (в тому числі – електротехнічні та електротехнологічні комплекси) мають нелінійну природу. Для них доволі часто невідомі не тільки параметри, але й вид моделі. Єдине, що на практиці звичайно доступне, – це можливість встановлення зв'язку між входом ОК та його виходом. Ефективне керування цими ОК лише з використанням традиційного для ТАК математичного апарату (лінійні та інтегральні перетворення) неможливе. Моделювання нелінійних ОК має власну особливу специфіку. Один з перспективних методів – використання штучних нейронних мереж (ШНМ), які є універсальними апроксиматорами і дозволяють з потрібною точністю моделювати динаміку практично будь-якого ОК [1].

Загальний підхід до вирішення проблеми ідентифікації в контексті ШНМ показаний в [2], проте, залишається невирішеним питання практичної реалізації автоматичних і дистанційних режимів навчання мережі при роботі з реальним ОК.

Подальшою метою досліджень постає розробка методів і експериментальної системи, які б дозволили виконувати фізичне моделювання широких класів реальних ОК для роботи в замкнених САК. Виявлені можливості ШНМ для моделювання нелінійних ОК

відкривають шлях до розробки практичних методів ідентифікації ОК за допомогою ШНМ та експериментальної перевірки на прикладах кількох ОК.

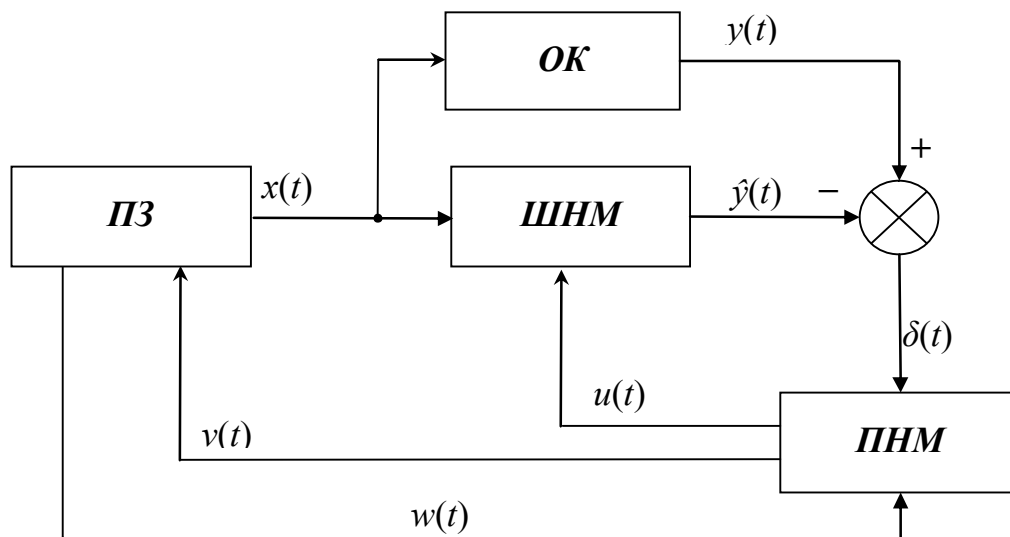
Розроблювана система має працювати в двох режимах:

1) створення, налагодження та перевірка моделі реального ОК в напіваавтоматичному режимі з застосуванням апаратних та програмних засобів персонального комп'ютера (ПК);

2) номінальний режим оптимального керування ОК за допомогою автономного від ПК адаптивного мікропроцесорного регулятора з напіваавтоматичним коригуванням параметрів моделі. Потребує інтенсивного використання сучасних промислових інтерфейсів.

Створення моделі ОК

Універсальні промислові регулятори мають забезпечувати високу якість керування широкими класами реальних ОК, що можуть бути представлені різними математичними моделями з невідомими на стадії виробництва регулятора параметрами. Процес створення адекватної моделі ОК може відбуватися відповідно до рисунку 1.



ПЗ – пристрій завдання; ПНМ – пристрій налагодження мережі; $x(t)$ – сигнал завдання; $y(t)$ – реакція ОК на завдання (перехідний процес); $\hat{y}(t)$ – реакція ШНМ на завдання (перехідний процес); $\delta(t)$ – помилка апроксимації (ідентифікації); $u(t)$ – сигнал коригування коефіцієнтів ШНМ; $w(t)$ – інформація про типові завдання на регулювання; $v(t)$ – інформація про завдання для ідентифікації

Рис. 1. Схема створення моделі ОК

Усі сигнали на рисунку 1 умовно представлені в неперервній формі, хоча під час розробки алгоритмів, програм та практичної реалізації треба використовувати дискретизовані за часом та квантовані за рівнем величини, що полегшить в подальшому створення прикладного програмного забезпечення вбудованого контролера.

ПЗ, по-перше, призначений для формування типових для даного ОК завдань на регулювання. Діапазон, швидкість та закон зміни визначаються конкретним застосуванням регулятора: це саме те, що прив'язує виготовлений та встановлений промисловий регулятор до потреб певного виробництва, технологічного процесу тощо, а розробника регулятора – до того, хто буде експлуатувати налаштовану систему. Якщо регулятор використовується для керування електричним двигуном, в якості параметрів завдання можуть поставати номінальні значення та діапазон зміни швидкості обертання валу, кута повороту ротора або величини лінійного переміщення тощо. Якщо ОК – електро-

під, ПЗ має задавати потрібну температуру (або закон її зміни) тощо. Необхідні параметри мають бути узгоджені в рамках технічного завдання до початку процесу пусконаладження.

Спираючись на визначену вручну структуру ШНМ, ПНМ змінює коефіцієнти мережі, намагаючись звести статичну та динамічну помилку ідентифікації $\delta(t)$ до технічно прийняттого значення:

$$\delta(t) = \|y(t) - y(t)\| < \Delta. \quad (1)$$

Друга важлива задача ПЗ зумовлена особливістю роботи на етапі створення моделі. Вона полягає в тому, що в процесі навчання ШНМ має також формувати завдання для забезпечення експерименту з ідентифікації ОК. Це формування виконується автоматично за допомогою ПНМ. Вид ідентифікуючих впливів не відомий розробнику регулятора і визначається потребами алгоритму навчання ШНМ, а також з урахуванням вищезгаданих типових завдань на регулювання.

В [4] вперше запропоновано принцип формування вибірки навчання, що передбачає подання на ОК імпульсних сигналів, амплітуда яких поступово приймає значення від максимально припустимого до мінімального значення. Такий вид сигналу рівномірно охоплює весь динамічний діапазон завдань, гармонійно вписується в множину можливих сигналів, що буде генерувати в наступному цифровий регулятор, і підкоряє навчання певній логіці.

Оскільки, як показано в [4], якість функціонування нейроконтролерів із структурами скритих шарів 3-3, 2-5, 5-2 мало різниться, то, виходячи з критерію мінімальності структури, для реалізації виберемо мережу з двома скритими шарами виду 3-3. Тобто, загальна структура мережі буде мати вигляд 2-3-3-1.

Найбільш адекватно поведінку динамічних об'єктів можуть відтворити рекурентні ШНМ реального часу. Однак, відповідно до рекомендацій [2], передбачаючи в подальшому використання отриманої моделі в складі реального промислового регулятора з обмеженими обчислювальними ресурсами та обсягом пам'яті, доцільно взяти за основу мережу прямого поширення з елементами затримки (на практиці – комірками пам'яті), які будуть зберігати часові послідовності вхідних векторів.

Першим завданням є моделювання роботи структури за рисунком 1. В якості ОК були взяті відомі моделі (двигун постійного струму, нагрівач тощо), які і вважалися реальними ОК. Це дає змогу зекономити час на фізичному моделюванні. Після визначення структури мережі [4] і [5] було проведене навчання ШНМ спочатку в ручному режимі за принципами, викладеними у [3]. Це дозволило сформувати все необхідне для подальших кроків з розробки ключового блока ПНМ.

На рисунку 2 проілюстровано роботу розробленої *Simulink*-функції, за допомогою якої створюється навчальна та тестова вибірки. Сигнал з амплітудно- та широтно-імпульсною модуляцією дозволяє рівномірно охопити весь робочий діапазон досліджуваної системи.

На другому етапі ПНМ був реалізований засобами *Matlab-Simulink*. В процесі дослідження були розроблені нові алгоритми, блоки та *S*-функції. У підсумку вдалося отримати співпадіння перехідних процесів в «реальному ОК» та в моделі за умови подання на їхні входи ідентичних типових для даного ОК завдань на регулювання.

Подальших зусиль потребує перевірка інваріантності моделі до зміни параметрів ОК та можливості підстроювання її параметрів. Підсумкове дослідження передбачає перехід до дійсно реальних ОК (двигунів, нагрівачів тощо) і постановки експериментів, коли персональний комп'ютер із середовища *Simulink* буде видавати завдання на регулювання через інтерфейс зв'язку на цільову плату з мікроконтролером і, одночасно, – на ШНМ в *Matlab* (в самому ПК) та виконувати навчання мережі в напівавтономному режимі (з людиною-оператором).

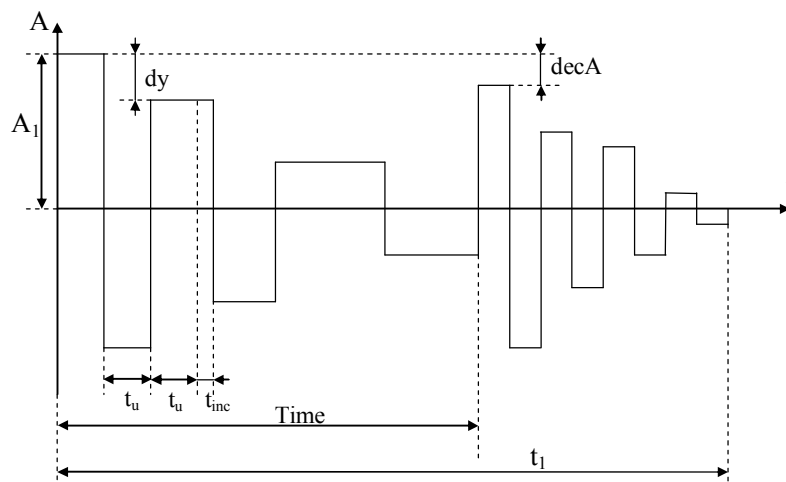
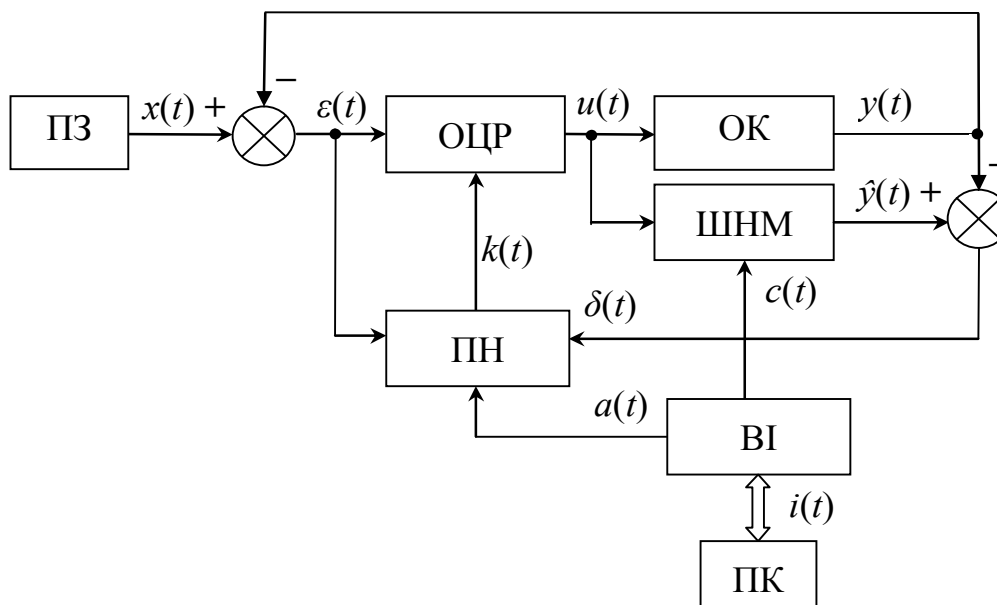


Рис. 2. Форма навчального сигналу

Номінальний режим оптимального керування

Після попереднього налаштування замкненої системи автоматичного керування – отримання моделі реального об'єкту керування – треба вийти на номінальний технологічний режим роботи. На рисунку 3 показано замкнену цільову САК з опорною моделлю, яку було визначено на попередньому етапі.



ОЦР – оптимальний цифровий регулятор; ПН – пристрій налаштування (адаптації) ОЦР; ВІ – вузол інтерфейсу; ПК – персональний комп'ютер; $\varepsilon(t)$ – помилка регулювання; $u(t)$ – регулюючий вплив; $k(t)$ – сигнал зміни коефіцієнтів; $a(t)$ – команда адаптації; $c(t)$ – команда корекції; $i(t)$ – сигнал дистанційного зв'язку.

Рис. 3. Замкнена САК з опорною моделлю

Номінальний режим оптимального керування ОК реалізується за допомогою автономного від ПК адаптивного мікропроцесорного регулятора з напівавтоматичним коригуванням параметрів моделі. Але, внаслідок здешевлення промислових комп'ютерів та їхнього широкого застосування в SCADA-системах, зовсім відмовлятися від ПК в ряді

випадків не є обов'язковим. Коригування моделі (адаптація) тепер може спиратися на потужність програмних засобів ПК і здійснюватися з використанням сучасних швидкісних інтерфейсів зв'язку з промисловим регулятором.

Розроблений метод ідентифікації можна представити в скороченому вигляді наступним чином.

1. Зняття амплітудної характеристики ОК.
2. Побудова прямої та інверсної моделі.
3. Подача на ОК тестових впливів та визначення реакції лінійної частини з нелінійним зворотним зв'язком.
4. Ідентифікація лінійної частини ОК з нелінійним зворотним зв'язком.
5. З'єднання лінійної частини ОК з нелінійним зворотним зв'язком та нелінійної частини прямої моделі.

На прикладі нелінійного ОК, який містить лінійну ланку, нелінійний елемент та зворотний зв'язок, на рисунку 4 наведені результати моделювання процесів ідентифікації для всіх режимів: реакція ОК та його моделі на вплив тестової вибірки.

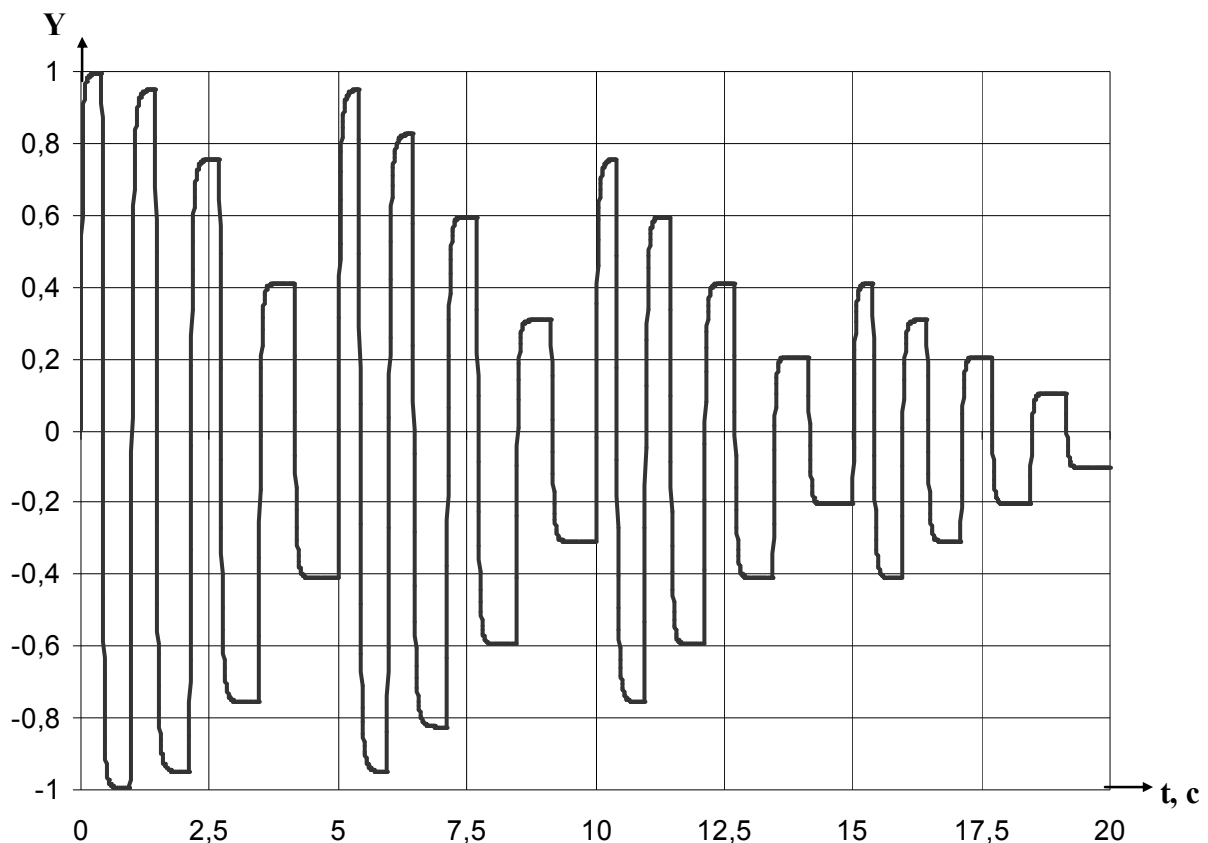


Рис. 4. Реакція ОК та його моделі на вплив тестової вибірки

З наведеної діаграми видно, що вихідні сигнали з ОК та його моделі співпадають з досить незначною помилкою, що свідчить про адекватність запропонованого алгоритму визначення моделі. Приведений метод ідентифікації можна застосовувати для ідентифікації ОК зі стаціонарними параметрами. Це має відбуватися поза межами основного технологічного процесу.

При визначенні навчальної вибірки для мережі необхідно слідкувати за тим, щоб навчаючий сигнал був такої величини, при якій нелінійний ОК не попаде до зони насичення та нечутливості. Це зумовлено тим, що при входженні в зону насичення та нечутливості, інверсна модель ШНМ не зможе дати однозначного відгуку. В цьому випадку для однакових вхідних впливів на виході інверсної моделі будуть присутні різні вихідні

сигнали. Якщо навіть усунути ці вибірки за допомогою спеціальної функції обробки та провести навчання ШНМ, все одно неможливо буде з'ясувати, який саме сигнал має бути на виході лінійної частини. Це може бути ціла множина функцій, які будуть описувати ідентифіковану систему в цілому. Використання запропонованого методу без попереднього аналізу перехідного процесу призведе до помилки ідентифікованого ОК відносно його моделі.

Висновки

1. Сформульовано актуальні задачі практичної реалізації автоматичних і дистанційних режимів навчання штучної нейтронної мережі під час роботи з реальним об'єктом керування, які мають працювати в двох режимах – із застосуванням апаратних та програмних засобів персонального комп'ютера і автономно.
2. Розроблений алгоритм створення, налагодження та перевірки моделі реального об'єкту керування в напівавтоматичному режимі із застосуванням апаратних та програмних засобів персонального комп'ютера.
3. Синтезовано структуру замкненої цільової САК з опорною моделлю для номінального режиму оптимального керування за допомогою автономного від комп'ютера адаптивного мікропроцесорного регулятора з напівавтоматичним коригуванням параметрів моделі.
4. Використання запропонованого методу ідентифікації має обмеження, що полягає в неприпустимості входження реального об'єкту до зони насичення та нечутливості під час ідентифікаційного експерименту і навчання ШНМ.

Список літературних джерел

1. Jeffrey T. Spooner, Manfredi Maggiore, Raúl Ordóñez, Kevin M. Passino. Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems: Neural and Fuzzy Approximator Techniques. John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 545 p.
2. В.П. Войтенко, М.А. Хоменко. Нейроидентификация в промышленных регуляторах //Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – Київ, 2008, Ч. 2. – С. 60-61.
3. В.П. Войтенко, М.А. Хоменко. Встраиваемая система позиционирования с нейрорегулятором //Технічна електродинаміка, тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – Київ, 2008, Ч. 1. – С. 71-74.
4. В.П. Войтенко, М.А. Хоменко. Синтез промышленного нейрорегулятора с улучшенной динамикой //Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – Київ, 2007, Ч. 3. – С. 50-55.
5. В.П. Войтенко, М.А. Хоменко. Принципы построения нейрорегулятора для управления промышленным объектом //Технічна електродинаміка, тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – Київ, 2006, Ч. 3. – С. 80-83.

УДК 004.056.5:004.057.42

В.В. Соломаха, ст. викладач**О.В. Верьовко**, магістрант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ЗАХИСТ АРИФМЕТИЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Представлена стохастична інформаційна технологія, яка дозволяє обробляти закодовану символічну інформацію, не розкодовуючи її. Це дає змогу забезпечити захист числової інформації під час виконання арифметичних операцій.

Постановка проблеми

Розвиток комп'ютерних систем, широке застосування локальних, територіальних і глобальних обчислювальних мереж відкритого типу підвищують вимоги до рівня захищеності інформації. Однак, незважаючи на вдосконалювання систем безпеки, вони в основному захищають інформацію при зберіганні й передачі, але не під час обробки: як правило, дані обробляються, а програми виконуються в явному, незахищеному виді. Саме під час обробки інформація найбільш уразлива для хакерів, програмних закладок («троянських коней») і вірусів. Для забезпечення комплексного захисту інформації під час її комп'ютерної обробки розроблена стохастична інформаційна технологія, яка представлена в роботах [1, 2].

Принципово новим елементом у даній технології є можливість обробляти закодовану символічну інформацію, не розкодовуючи її, причому кодування засноване на стохастичному перетворенні команд і даних, і коди періодично змінюються в ході експлуатації програми. Завдяки цьому гарантується (з будь-якою заданою ймовірністю помилки) виявлення спроб перекручування інформації і її корекція. Стохастичне кодування може застосовуватися не тільки під час реалізації інформаційно-логічних процедур, але й для захисту числової інформації під час виконання арифметичних операцій.

Короткий опис методу

Для чисел, з якими виконуються арифметичні дії, використовується не двійкове подання, як у звичайній реалізації, а символічне (двійково-десятькове). Відразу після введення в комп'ютер числова інформація піддається стохастичному перетворенню й далі зберігається, передається й обробляється тільки в закодованому виді: при обчисленнях використовуються стохастичні таблиці додавання, множення й вирахування перетворених чисел, що перебувають в оперативній пам'яті комп'ютера.

Під час обробки самі перетворені числа й таблиці, по яких здійснюються обчислення, періодично випадковим чином змінюються. Ступінь захищеності числової інформації й арифметичних дій з нею визначається ступенем захищеності й розмірністю стохастичних таблиць, які використовуються для кодування й розкодування даних.

Кодування чисел

Безпосередньо після введення числа в комп'ютер вправоруч і ліворуч від коми в ньому послідовно виділяються групи цифр по m розрядів (у неповні групи додається потрібне число нулів). Потім кожна група замінюється на унікальний стохастичний індекс довжиною L битів по кодовій таблиці, що містить такі індекси для всіх чисел від 0 до 99...9 (m разів), і число перетворюється в послідовність випадкових індексів.

Наприклад, число 125627,829 при використанні таблиці, фрагмент якої показаний у таблиці 1, буде перетворене в $I_{\xi+} I_{\xi12} I_{\xi56} I_{\xi27} I_{\xi} I_{\xi82} I_{\xi90}$.

Щоб можна було представити всі числа різними індексами, m і L повинні задовольняти співвідношенню

$$2^{L-1} \geq 10^m \quad \text{або}$$

$$L \geq \log_2 (10^m + 1) \approx m \log_2 10$$

У нашій прикладі $m=2$, а $L=8$.

Вибір значення m визначається необхідним рівнем захищеності числової інформації. Кодову таблицю можна заповнити $N=(10^m)!$ способами, отже, при $m=1$ для розкодування істинних значень чисел буде потрібно перебір $10!$ (3 628 800) при $m=2$ — $N=(10^2)! > 10^{100}$, а при $m=3$ — $N=(10^3)! > 10^{1000}$ варіантів. Тим самим, при $m=1$ ступінь захищеності (з огляду на можливості сучасної обчислювальної техніки) низький, у той час як при значеннях починаючи з 2, він цілком достатній [3, 4]. Оптимальне співвідношення захищеності й накладних витрат досягається при $m=2$.

Таблиця 1

Фрагмент стохастичної таблиці

0	$I_{\xi 0}$	10110101
01	$I_{\xi 01}$	01101110
02	$I_{\xi 02}$	11010101
03	$I_{\xi 03}$	10101110
04	$I_{\xi 04}$	00111010
05	$I_{\xi 05}$	10101011
06	$I_{\xi 06}$	00011101
...	...	...
98	$I_{\xi 98}$	01010011
99	$I_{\xi 99}$	11100101
00	$I_{\xi 00}$	01101011
+	$I_{\xi +}$	10101100
-	$I_{\xi -}$	01101001
,	$I_{\xi ,}$	10011101

Додавання й множення закодованих чисел виробляється по таблицях розміром $10^m \times 10^m$. Стовпці й рядки такої таблиці відповідають стохастичним індексам закодованих чисел, а в перетинанні отримується результат операції, записаний також в індексному виді. У таблиці 2 наведений фрагмент стохастичної таблиці множення при $m=2$.

Для вирахування використовується таблиця розміром $10^m \times 2 \times 10^m$, оскільки необхідно враховувати перенос старшого розряду з інших індексів при негативному результаті вирахування.

При підвищенні значення m необхідний об'єм пам'яті для таблиць різко зростає. Наприклад, при $m=2$ він складе близько 4×10^4 байт, а при $m=3$ – уже близько 5×10^6 байт. Правда, таблиці розміром $10^m \times 10^m$ і $10^m \times 2 \times 10^m$ можуть бути зведені до m таблиць розміром 10×10 або 10×20 . Але при цьому через ускладнення кодування й реалізації обчислень значно зростає час обробки.

Фрагмент стохастичної таблиці множення

$I_{\xi 07}$ $I_{\xi ji}$	$I_{\xi 07}$	$I_{\xi 25}$	$I_{\xi 05}$	$I_{\xi 10}$
$I_{\xi 05}$	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 35}$ 0110101111101101	$I_{\xi 01} \quad I_{\xi 25}$ 0110111001101100	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 25}$ 0110101101101100	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 50}$ 0110101110101111
$I_{\xi 25}$	$I_{\xi 01} \quad I_{\xi 75}$ 0110111010101011	$I_{\xi 06} \quad I_{\xi 25}$ 0001110101101100	$I_{\xi 01} \quad I_{\xi 25}$ 0110111001101100	$I_{\xi 02} \quad I_{\xi 50}$ 1101010110101111
$I_{\xi 96}$	$I_{\xi 06} \quad I_{\xi 25}$ 0001110110111111	$I_{\xi 24} \quad I_{\xi 00}$ 1010110001101011	$I_{\xi 04} \quad I_{\xi 80}$ 0011101011110101	$I_{\xi 09} \quad I_{\xi 80}$ 0001001101110111
$I_{\xi 03}$	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 21}$ 0110101100110011	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 75}$ 0110101110101011	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 15}$ 0110101111101111	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 36}$ 0110101110101010
$I_{\xi 10}$	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 70}$ 0110101111000101	$I_{\xi 02} \quad I_{\xi 50}$ 1101010110101111	$I_{\xi 00} \quad I_{\xi 50}$ 0110101110101111	...

Реалізація обчислень

Для виконання додавання, віднімання й множення кожне число представляється у вигляді суми індексів з урахуванням розрядності груп цифр, які індексуються.

Потім по відповідній таблиці визначається результат операції для кожного розряду; порозрядні результати складаються з використанням таблиці додавання, і в такий спосіб формується загальний результат в індексному вигляді. На рисунку 1 наведений приклад множення двох чисел по таблиці 2.

$$\begin{aligned}
 & I_{\xi+} I_{\xi 07} I_{\xi 48} I_{\xi 25} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 05} I_{\xi 96} = \\
 & = (I_{\xi+} I_{\xi 07} I_{\xi 00} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 48} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 25}) \cdot (I_{\xi+} I_{\xi 05} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 96}) = \\
 & = I_{\xi+} I_{\xi 07} I_{\xi 00} I_{\xi 00} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 05} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 48} I_{\xi 00} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 05} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 25} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 05} I_{\xi 00} + \\
 & + I_{\xi+} I_{\xi 07} I_{\xi 00} I_{\xi 00} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 96} + I_{\xi+} I_{\xi 48} I_{\xi 00} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 96} + I_{\xi+} I_{\xi 25} \cdot I_{\xi+} I_{\xi 96} = \\
 & = I_{\xi+} I_{\xi 35} I_{\xi 00} I_{\xi 00} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 02} I_{\xi 40} I_{\xi 00} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 01} I_{\xi 25} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 06} I_{\xi 72} I_{\xi 00} I_{\xi 00} + \\
 & + I_{\xi+} I_{\xi 46} I_{\xi 08} I_{\xi 00} + I_{\xi+} I_{\xi 24} I_{\xi 00} = \\
 & = 101011000110101111101101011010110110101101101011 + \\
 & + 1010110011010101101000010110101101101011 + \\
 & + 10101100011011100110110001101011 + \\
 & + 1010110000011101101111110110101101101011 + \\
 & + 10101100111011001101110010101100 + \\
 & + 10101100101011000110100101101001 = \\
 & = 1010110011101111001101001011110101101011 = \\
 & = I_{\xi+} I_{\xi 44} I_{\xi 59} I_{\xi 57} I_{\xi 00}
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Множення закодованих чисел

Ділення виконується «стовпчиком» із застосуванням таблиць множення, віднімання й додавання. Єдина відмінність від звичайного алгоритму полягає в тому, що як розряди виступають індекси, що замінюють групу з m цифр.

Висновки

Таким чином, результатом арифметичних операцій з кодованими числами виявляються точно так само закодовані числа; розрядність чисел може бути будь-якою. Перед

видачею результату користувачеві він перетвориться у звичайний символічний вигляд по таблиці, зворотній таблиці кодування.

Час виконання обчислень визначається кількістю звертань до стохастичних таблиць і часом виконання процедур типу реєстр—пам'ять, тобто, перебуває в лінійній залежності від розрядності числа. Звичайно, воно значно вище, ніж при використанні традиційної технології, але при апаратній реалізації описаної системи в спеціальному пристрої, що підключається до типового комп'ютера, розрив значно зменшиться. Програмна ж реалізація може ефективно застосовуватися в банківських, бухгалтерських та інших фінансових системах для виконання арифметичних дій з числовою інформацією, що має підвищений рівень конфіденційності.

Список літературних джерел

1. Насыпный В.В. Синтез систем обработки информации с защитой от программных закладок и вирусов /Насыпный В.В. – М.: Радио и связь, 1997. – 28 с.
2. Насыпный В.В. Комплексная защита компьютерных систем /Насыпный В.В. //Мир ПК, 1998. – № 3. – С. 68-69.
3. Диффи У., Хеллман М.Э. Защищенность и имитостойкость: Введение в криптографию /Диффи У. //ТИИЭР, 1979. – Т. 67, № 3. – С. 71-109.
4. П.Д. Зегжда. Теории и практика обеспечения информационной безопасности /П.Д. Зегжда. – М.: Радио и связь, 1996. – 126 с.

УДК 519.6

В.І. Зацерковний, канд. техн. наук**С.В. Кривоберець**, аспірант**Ю.С. Сімакін**, викладач

Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ ЕТАЛОННИХ МОДЕЛЕЙ ПРОСТОРОВИХ ОБ'ЄКТІВ ГІС ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГУЛЯРИЗУЮЧОГО ФУНКЦІОНАЛУ

Розглянута можливість застосування геоінформаційних систем та геоінформаційних технологій для оцінки стану природного середовища. Розроблена математична модель на базі регуляризуючого функціоналу для діагностування станів навколишнього середовища.

Постановка проблеми

Сучасні тенденції інформатизації в багатьох сферах суспільної діяльності не обминули і сферу управління охороною природного середовища, екологічної політики та надзвичайних ситуацій. Головною складовою інформаційного середовища, яке забезпечує обґрунтоване прийняття рішень в цих галузях, є географічна (просторово-координована) інформація. Геоінформаційні технології (ГІТ), що мають справу з цією інформацією, надають широкі можливості для аналізу та представлення її у зручному для користувача вигляді: карт, серій карт, атласів, графіків, діаграм, профілів тощо.

Використання ГІС дозволяє оперативно отримувати інформацію по запиту і відображувати її на картооснові, оцінювати стан екосистеми та прогнозувати її розвиток. Геоінформаційні дослідження під час прогнозування носять цільовий характер, що обумовлене задачами прогнозу і виявленими проблемами, розв'язання яких вимагає прогноз.

Проблема прогнозування через численність некерованих і слабо передбачуваних зовнішніх факторів – найбільш складна в геоінформатиці [1].

Прогнозне середовище характеризує зовнішні фактори по відношенню до об'єкту прогнозування. Розрізняють мікро- і макрозовнісне прогнозні середовища.

Зовнішнє мікросередовище представлено параметрами, що безпосередньо відносяться до об'єкту прогнозування і можливостям їх зміни або управління ними. Це можуть бути, наприклад, фактори забруднення навколишнього середовища виробничими відходами, склад яких можна змінювати кількісно і якісно, чим впливати на середовище.

Під макрозовнішнім середовищем розуміють сукупність великих суспільних і природних факторів, які впливають на об'єкти прогнозування і регулювати які неможливо або досить складно. Це середовище включає до свого складу політичні, правові, культурні, демографічні та природні фактори.

Ефективність функціонування ГІС в значному ступені визначається її математичним забезпеченням, під яким розуміють математичні моделі досліджуваних просторових об'єктів, представлених у вигляді, придатному для обчислень в комп'ютері, та алгоритми прогнозування зміни станів цих об'єктів і якістю пошарового тематичного наповнення бази метричних та атрибутивних даних. Це зумовлено тим, що при дослідженні будь-якого просторового об'єкта необхідно сформувати адекватну модель просторового об'єкта дослідження; сформувати відхилення параметрів стану просторового об'єкта дослідження; визначити перехід об'єкта дослідження в „несправний” стан; отримати управлінське (діагностичне) рішення.

Для формування відхилень параметрів стану досліджуваного просторового об'єкта в якості еталона можна прийняти: значення параметрів досліджуваного об'єкта, отриманих на його початковій стадії дослідження (експлуатації) в завідомо «справному» стані, перерахованих по формулах приведення; значення параметрів середньостатистичного

досліджуваного просторового об'єкта при стандартних умовах, отриманих по експериментальних даних; індивідуальну ідентифіковану нелінійну математичну модель залежностей контрольованих параметрів просторового об'єкта від зовнішніх умов і режимних параметрів (параметрів управління), отриману по експериментальних даних в початковий період дослідження (експлуатації), тощо; середньостатистичну ідентифіковану нелінійну математичну модель досліджуваного об'єкта ГІС, отриману шляхом обробки експериментальних даних; багаторежимну квазінелінійну індивідуальну ідентифіковану математичну модель досліджуваного об'єкта; багаторежимну квазілінійну ідентифіковану середньостатистичну математичну модель досліджуваного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Обраний напрям дослідження пов'язаний з реалізацією завдань постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про державну систему моніторингу довкілля» від 30.03.1998 р. № 391, Державної цільової екологічної програми проведення моніторингу навколишнього природного середовища, що затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 5.12.2007 р. № 1376; Закон України «Про екологічну мережу України» за станом на 24.06.2008, № 1864-IV, виконанням науково-дослідної роботи кафедри геодезії, картографії та землеустрою Чернігівського державного інституту управління і економіки спільно з Державним управлінням у сфері охорони навколишнього природного середовища в Чернігівській області.

Теоретико-методичні основи застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ в галузі природоохорони та землезнавства приведені в роботах С. Довгого, В. Лялька, В. Шестопалова, М. Якимчука та ін. Теоретичні засади та приклади імітаційного моделювання кризових ситуацій приведені в працях А. Прохорова, О. Додонова, О. Рогожина, А. Садівничого, О. Федоровича, О. Трофимчука, Л. Грекова, Г. Красовського, В. Ілюшко, М. Железняка, А. Тихонова [4]. Можливість створення на основі засобів системної динаміки та методу адаптивного балансу впливів (прийнята назва АВС-метод) моделей для оцінки геоекологічного стану навколишнього природного середовища розглянуті І. Тимченком, О. Федоровським, В. Якимчуком.

Узагальнення і систематизація робіт в галузі геоінформаційних технологій представлена в роботах А.В. Кошкарьова і В.П. Каракіна, А.А. Світличного, Б.С. Бусигіна, В.С. Тікунова, В.Я. Цветкова та ін. [2].

Постановка завдання

Метою роботи є розробка програмного забезпечення для проведення діагностики екологічного стану територій України та прогнозування можливих змін, викликаних антропогенним тиском на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження

Стрімкий розвиток обчислювальної техніки, космічних технологій і математичних методів обробки просторово-прив'язаних даних (геоданих) повністю змінили характер дослідницьких процесів в охороні природного середовища та аналізі надзвичайних ситуацій.

Моніторинг небезпечних природних явищ, що активізувались останнім часом, ускладнюється дефіцитом оперативної інформації про фактори, які впливають на них. Разом з тим, в останнє десятиліття відзначається значне зростання сучасних інформаційних технологій, серед яких, перед усім, треба виділити ГІТ і засоби дистанційного зондування Землі. Саме вони дають можливість наочно оцінити обстановку навколо місця аварії, розрахувати зону паводкового затоплення, просування фронту пожежі, поширення хімічного або радіоактивного забруднення. За їх допомогою можна автома-

тично підрахувати площі постраждалих ділянок, оцінити обсяги хімічних і радіоактивних осадів, виділити населені пункти та інші об'єкти досліджуваної території.

Можливість інтеграції ГІС та спеціалізованих додатків істотно розширює діапазон їх застосування. Сьогодні по такому шляху йде розробка моделей міграції забруднювачів в геологічному середовищі, атмосфері і гідросфері; паводкових ситуацій і розвитку екзогенних процесів.

Надзвичайно ефективним при використанні ГІС та ГІТ є комплексне дослідження навколишнього середовища. В основу дослідження закладений аналіз природного і соціального середовища як сукупності геоінформаційних об'єктів. Такий підхід приводить до появи нової технології – геоінформаційного прогнозування [2, 3], яке передбачає побудову моделей об'єкта прогнозування і середовища (прогнозного фону). Однак для цього необхідно провести комплекс спеціальних досліджень, які отримали назву геоінформаційних [1].

Ці дослідження представляють собою набір методів одержання інформації про об'єкти прогнозування і геоінформаційне середовище.

Під час постановки геоінформаційних досліджень ключовим аспектом визначення цілей дослідження є виявлення специфічних типів інформації, необхідної для ефективного вирішення задач прогнозування. При цьому цілі геоінформаційних досліджень можуть носити різний характер: *розвідницький* – дослідження спрямовані на збір попередньої інформації, призначеної для більш точного визначення проблем і перевірки гіпотез; *описовий* (дескриптивний) – дослідження спрямовані на опис реальної геоінформаційної ситуації, наприклад, демографічної; *казуальний* – дослідження спрямовані на виявлення причинно-слідчих зв'язків та обґрунтування відповідних гіпотез [1].

Одним з основних етапів роботи технології дослідницьких процесів в охороні природного середовища є створення простору описів непорушеного (еталонного) стану просторових об'єктів – сукупності картографічних шарів (ознак), що описують екологічний стан території і які відображають ті або інші аспекти досліджуваного явища або процесу.

На практиці під час проведення конкретного геоінформаційного дослідження зазвичай використовується не один, а різні типи досліджень, причому у довільній послідовності. Наприклад, на підставі описового дослідження може бути прийняте рішення про проведення розвідницького, результати якого можуть бути уточнені за допомогою казуального.

Виникаючи при практичному використанні ГІС задачі планування експерименту часто виходять за рамки класичного підходу і вимагають спеціального узагальнення з урахуванням особливостей розглянутих проблем. В реальних вимірах ресурси можуть бути істотно обмежені, а апіорна інформація недостатня для незміщеної оцінки функції регресії. В цих умовах доводиться рахуватися не тільки з випадковою помилкою наближення, а й з систематичною помилкою, викликаною неадекватністю прийнятої моделі. Вибір простору, в якому розшукується оцінка, доводиться здійснювати спільно з планом експерименту і методом оцінювання.

Крім того, при моделюванні і особливо при прогнозуванні стану об'єктів, явищ та процесів, варіаційних задачах, задачах інтерполяції та колокації, рішенні диференціальних рівнянь з частковими похідними, фотограмметричних вимірюваннях та ін., доволі часто доводиться мати справу з некоректно поставленими задачами [4], розв'язування яких приводить до вирішення слабо і дуже слабо зумовлених систем лінійних рівнянь. Число зумовленості сильно пов'язане з коефіцієнтом збільшення помилок вхідних даних і найчастіше обчислюється як відношення найбільшого та найменшого сингулярних чисел матриці: $c = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$. Саме тому пошук оптимальних методів і алгоритмів розв'язання таких задач, визначення їх обчислювальної стійкості є

надзвичайно актуальною задачею для ГПС.

Запишемо рівняння регресії в матричному вигляді:

$$W = UB, \quad (1)$$

де W – вектор-стовпець вихідних параметрів розмірності $(m \times 1)$;

U – матриця спостережень розмірності $(m \times n)$;

B – вектор коефіцієнтів відновлюваного полінома розмірності $(n \times 1)$.

Рішення системи (1) шукається шляхом мінімізації квадратичного функціоналу виду [2]:

$$F = (W - UB)^T (W - UB) + \alpha B^T B, 0 < \alpha \ll 1 \quad (2)$$

Функціонал (2) відносно компонент B є невід’ємно визначеною квадратичною формою і по кожній компоненті $\mathcal{B}_j$ вектора B при зафіксованих значеннях інших компонент має мінімум. Значення компоненти $\mathcal{B}_j$, що відповідає локальному мінімуму функціоналу F по цій компоненті, можна визначити з умови:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \mathcal{B}_j} \right) = 0 \quad (3)$$

Позначимо j -й стовпець матриці U через U_j :

$$U = [u_1 \dots u_k \dots u_j \dots u_n]^T,$$

а через B – вектор-стовпець, отриманий з вектора B шляхом обнуління в ньому j -ї компоненти:

$$B_j = [\mathcal{B}_1 \dots \mathcal{B}_{j-1}, 0, \mathcal{B}_{j+1} \dots \mathcal{B}_n]^T.$$

Тоді, з урахуванням умови (3) і прийнятих позначень, j -а компонента вектора B , яка відповідає мінімуму функціоналу F по цій компоненті, буде дорівнювати:

$$\mathcal{B}_j = \frac{(W - UB_j)^T U_j}{U_j^T U_j + \alpha} \quad (4)$$

Спрямовуючи параметр α до нуля [2], можна наблизити рішення системи до нормального.

Блок-схема алгоритму відновлення поліноміальної моделі наведена на рис. 1.

Послідовний циклічний перебір компонент вектора B_j триває до досягнення заданої величини зміни ΔF на декількох кроках або до моменту, коли функціонал (2) почне зростати через накопичення помилок округлення. Розглянутий обчислювальний процес є завжди стійким, збіжним і може служити основою для отримання рішення систем (1), що володіють заданими властивостями.

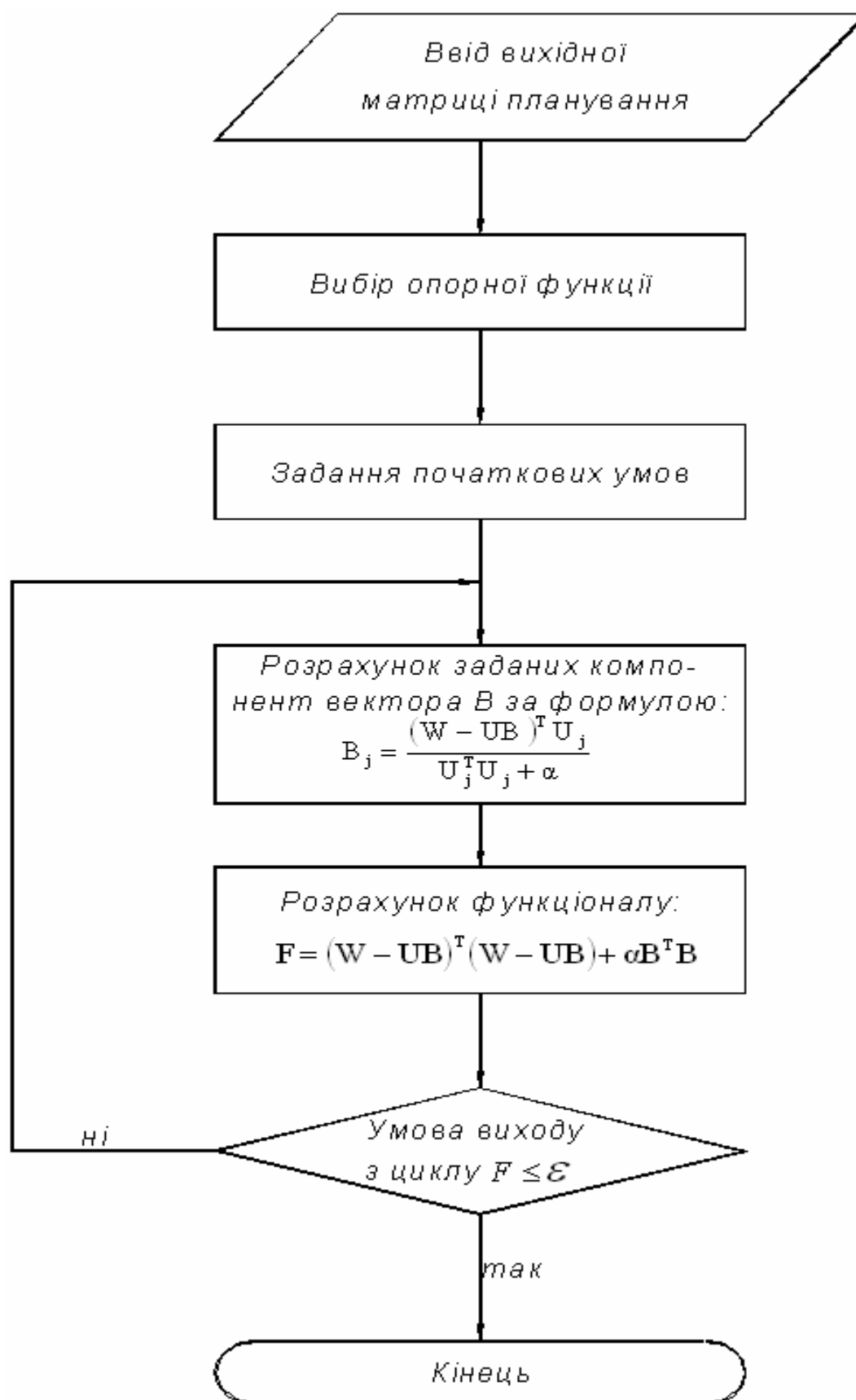


Рис.1. Блок-схема алгоритму відновлення поліноміальної моделі за допомогою регуляризуючого поліному

Для оцінки якості відновлення багатомірної регресії вирішувалася тестова задача. В якості опорної функції обраний поліном 3 ступеня:

$$w = \vartheta_1 u_1 + \vartheta_2 u_2 + \vartheta_3 u_3 + \vartheta_4 u_1^2 + \vartheta_5 u_2^2 + \vartheta_6 u_3^2 + \vartheta_7 u_1^3 + \vartheta_8 u_2^3 + \vartheta_9 u_3^3 + \vartheta_{10} u_1 u_2 + \vartheta_{11} u_1 u_3 + \vartheta_{12} u_2 u_3 + \vartheta_{13} u_1 u_2 u_3 \quad (5)$$

Значення коефіцієнтів ϑ_j опорної функції (5) представлені в табл. 1.

У відповідності з рекомендаціями теорії планування експериментів була складена матриця планування (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця планування

№	U_1	U_2	U_3	U_4
1	1.000	0.494	-0.368	7.8659
2	0.561	0.382	0.425	5.0625
3	-1.000	-0.220	-1.000	-5.126
4	0.705	-1.000	0.380	4.0704
5	-0.675	0.864	-0.098	-2.1412
6	0.113	0.344	0.120	1.019
7	0.325	0.692	1.000	2.2259
8	0.258	0.659	0.535	3.7693
9	-0.495	0.114	0.224	-1.804
10	-0.046	0.617	-0.414	-0.1212
11	0.396	1.000	-0.430	3.5319
12	0.750	0.125	0.034	5.3197
13	-0.059	0.806	0.394	1.6305
14	0.276	0.908	-0.790	1.6839
15	-0.088	0.862	0.147	1.0737

В подальшому, «забувши» вихідний поліном, відновлювалася його структура за допомогою МНК і регуляризуючого функціоналу. При відсутності помилок вимірів відгуків (w_i), як МНК, так і регуляризуючий функціонал дозволяють достатньо точно відновити структуру вихідного полінома – коефіцієнти відновлюваного полінома співпадають з вихідними коефіцієнтами (табл.2).

Однак, при накладенні на вихідні дані похибок ($\sigma_i = 1\%$) ефективність розглянутих методів виявляється істотно різною.

Результати розрахунків коваріаційної матриці відхилень коефіцієнтів відновлюваного полінома (5) при використанні МНК наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків

Номер коефіцієнта полінома	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Дійсні значення коефіцієнтів	4,8	0,2	1,3	1,8	0,9	1,0	1,03	0,8	0,9	1,1	0,4	0,4	1,6
Коефіцієнти відп. полінома без зашумлення	4,8	0,2	1,3	1,8	0,9	1,0	1,03	0,8	0,9	1,1	0,4	0,4	1,6
Коефіцієнти з зашумленням	4,8	0,2	1,3	1,8	0,9	1,0	1,03	0,8	0,9	1,1	0,4	0,4	1,6
Регуляризує функціонал	4,8	0,2	1,3	1,8	0,9	1,0	1,03	0,8	0,9	1,1	0,4	0,4	1,6
МНК	18,1	11,0	14,8	5,3	19,0	6,9	79,4	22,7	7,2	7,6	93,1	30,0	160
Регуляризує функціонал	1,8	1,35	1,68	2,05	1,37	2,21	1,67	1,31	1,75	2,20	1,84	2,03	5,15

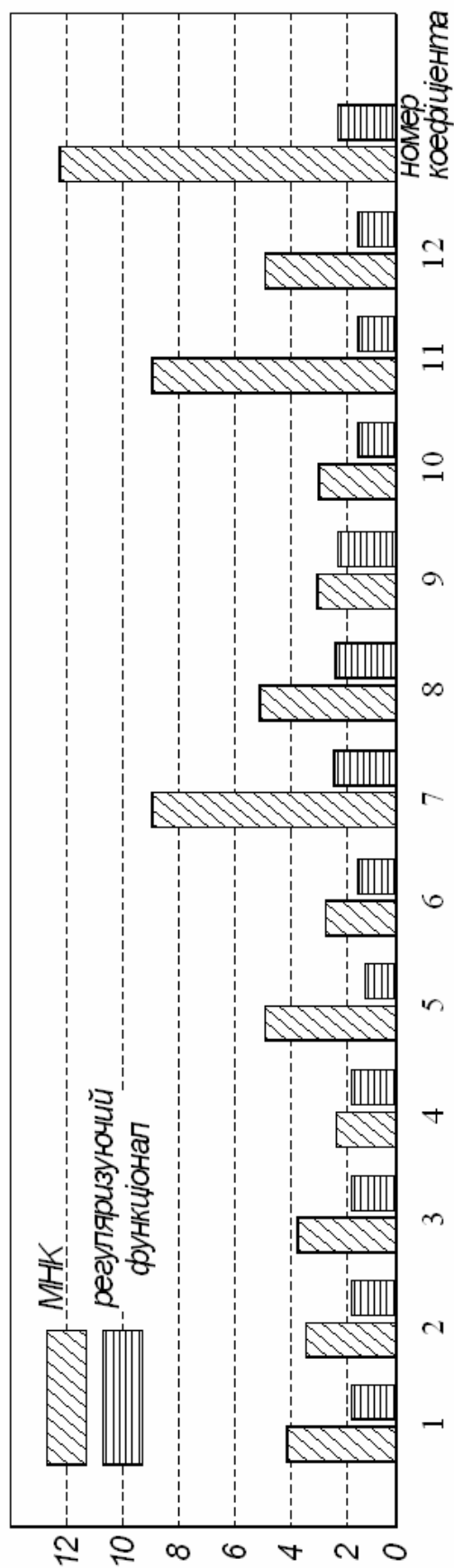
 $\sigma, \%$ 

Рис. 2. Графічна ілюстрація результатів розрахунків

Випадкова складова $\Delta B^{(i)}$, одержувана при рішенні за допомогою регуляризуючого функціоналу, дорівнює [4]:

$$\Delta B^{(i)} = Q^{-1} C^{(i)} C^{-1} Q^T U_{\Delta} W \quad (6)$$

Позначивши $P = Q^{-1} C^{(i)} C^{-1} Q^{-1} U^T$, знайдемо коваріаційну матрицю для оцінок рішень:

$$\Gamma = M \left[\Delta B^{(i)} (\Delta B^{(i)})^T \right] = M \left[(P_{\Delta} W) (P_{\Delta} W)^T \right] = P M \left[W_{\Delta} W^T \right] P^T$$

або

$$\Gamma = P \begin{bmatrix} \sigma_{w_1}^2 & . & . & . & \text{cov}(w_1 w_n) \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ \text{cov}(w_1 w_n) & . & . & . & \sigma_{w_n}^2 \end{bmatrix} P^T = P G P^T, \quad (7)$$

де G – коваріаційна матриця ΔW .

Результати розрахунків представлені в табл. 2 і на рис. 2. Як видно з цих рисунків, СКВ коефіцієнтів полінома, відновлених за допомогою регуляризуючого функціоналу, не перевищують 2...3 %. Наведений приклад ілюструє прийнятну обумовленість обчислювального процесу розробленого алгоритму.

Проте, недоліки, відзначені в [5], даним алгоритмом повністю усунути не вдається. Для швидкої організації вибору оптимальної структури відновлюваних поліномів необхідно максимально використовувати результати попередніх обчислень. Це можна досягти, використовуючи ортогональні багаточлени.

Висновки з даного дослідження

Розроблений алгоритм, реалізований авторами в пакеті прикладних програм РКОВБ, може бути рекомендований для моделювання в ГІС при порівняно невеликому числі аргументів.

Проте, недоліки, відзначені [5], даним алгоритмом повністю усунути не вдається. Для швидкої організації вибору оптимальної структури відновлюваних поліномів необхідно максимально використовувати результати попередніх обчислень. Це можна досягти, використовуючи ортогональні багаточлени.

Список літературних джерел

1. Цветков В.Я. Основы геоинформатики: Электронный учебник /В.Я. Цветков. – М-во общ. и проф. образования РФ. Центр информатизации, 1998. – 627 с.
2. Цветков В.Я. Методы прогнозирования в геоинформационных технологиях /В.Я. Цветков // Информатика-машиностроение. – 1999. – № 4. – С. 44-47.
3. Цветков В.Я. Особенности геоинформационного прогнозирования. Изд. вузов. /В.Я. Цветков //Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1999. – № 6. – С. 102-105.
4. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. Уч. пособие для вузов /А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
5. Зацерковний В.І. Методика створення еталонних моделей місцевості просторових об'єктів ГІС за допомогою комбінаторного алгоритму /В.І. Зацерковний, С.В. Кривоберець, Ю.С. Сімакін //Вісник ЧДТУ. Збірник. Серія «Технічні науки» № 45. – Чернігів: ЧДТУ, 2010 – С. 165-172.

УДК 004.274

О.В. Цулун, магістрант**А.І. Роговенко**, ст. викладач

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АРХІТЕКТУРА КРИПТОГРАФІЧНОГО АКСЕЛЕРАТОРА З МОЖЛИВІСТЮ ЗМІНИ КРИПТОГРАФІЧНОГО АЛГОРИТМУ

Проведено огляд існуючих криптографічних акселераторів. Запропонована архітектура криптографічного акселератора, яка дозволяє змінювати апаратно реалізовані криптографічні алгоритми, інтегрувати акселератор в процесорні системи з різними системними магістралями і забезпечує скорочення часу виконання криптографічних операцій.

Постановка проблеми

На даний час із збільшенням обсягу конфіденційної інформації, що передається через всесвітні мережі, зростанням вимог до швидкості шифрування, ресурсоемності криптографічних алгоритмів і появою різних комп'ютерних систем, що виконують шифрування, підвищуються вимоги, що висуваються до криптографічного акселератора [1]. Актуальними є задачі прискорення виконання криптографічних операцій; отримання з мінімальними часовими і апаратними витратами криптографічного акселератора з певним набором реалізованих криптографічних алгоритмів та його інтеграції у процесорні системи з різними системними магістралями.

У статті наводиться постановка і рішення задачі скорочення часу виконання криптографічних операцій; інтеграції криптографічного акселератора у різні процесорні системи, а також зміни криптографічних алгоритмів без зміни архітектури самого акселератора.

У роботі наведено вирішення актуальних прикладних задач, що дають суттєвий економічний ефект: зменшення витрат часових ресурсів на виконання криптографічної задачі; мінімальні апаратні і часові витрати на інтеграцію криптографічного акселератора в потрібну процесорну систему, а також на зміну криптографічних алгоритмів, реалізованих криптографічним акселератором.

Пропонуються архітектурні рішення, що дозволяють інтегрувати криптографічний акселератор у системи з різними системними магістралями і реалізовувати необхідні криптографічні алгоритми з мінімальними апаратними і часовими витратами, а для скорочення часу виконання криптографічної задачі використовувати її паралельне виконання на рівні обчислювального блоку.

Аналіз досліджень і основних публікацій

Проаналізувавши низку сучасних криптографічних пристроїв таких як Sun Crypto Accelerator 6000 [2], Broadcom BCM 5840 [3], Amphion Semiconductor CS5210-40 [4], Cryptonite [5], Cryptomaniac [6], HiFn 8200 Series Services Processor [7] можна зробити висновок що існуючі криптографічні акселератори не вирішують ряду поставлених завдань:

Завдання 1 – Прискорення виконання криптографічних задач шляхом паралельного виконання на рівні обчислювальних блоків.

Завдання 2 – Інтеграція криптографічного акселератора в різні процесорні системи.

Завдання 3 – Реалізація потрібного набору криптографічних алгоритмів.

Сучасні криптографічні акселератори не підтримують паралельне виконання криптографічних задач, або підтримують паралельне виконання на рівні кількох плат. Недоліком даного методу є значне використання ресурсів процесорної системи [2].

Існуючі рішення мають архітектурні особливості для прискорення виконання певного набору алгоритмів. При необхідності змінити алгоритми на інші потрібно змінювати всю архітектуру [3, 4, 5].

Криптографічні акселератори передбачають підключення лише до певних процесорних систем. Способи обміну даними з процесорними системами є неефективними, оскільки використовують значну частину часового ресурсу процесора [6, 7].

Наприклад, найбільш розповсюдженим є обмін через пам'ять криптографічного акселератору, який полягає у необхідності зовнішньої процесорної системи читати дані із своєї пам'яті та записувати дані у пам'ять криптографічного акселератору. Результат записується у пам'ять криптографічного акселератору, після чого зовнішня процесорна система повинна прочитати результат із пам'яті криптографічного акселератору. Недоліком даного способу обміну є затрата часових ресурсів зовнішньої процесорної системи на передачу криптографічної задачі акселератору та на отримання результату, затрата апаратних ресурсів на забезпечення криптографічного акселератору пам'ятю.

У роботі пропонується: прискорити виконання криптографічних задач і скоротити використання ресурсів процесорної системи за рахунок паралельного виконання задач на рівні обчислювальних блоків; забезпечити інтеграцію криптографічного акселератора в різні процесорні системи за рахунок змінюваного зовнішнього інтерфейсу і незмінного внутрішнього; забезпечити мінімальні витрати на отримання потрібного набору криптографічних алгоритмів за рахунок єдиного інтерфейсу підключення спеціалізованих обчислювачів до криптографічного акселератора.

Формування цілі статті

Метою є дослідження можливості зміни апаратно реалізованих криптографічних алгоритмів акселератора, а також його інтеграції в різні процесорні системи та скорочення часу виконання криптографічних операцій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Проведені дослідження для виявлення залежності кількості тактів на виконання криптографічної задачі від кількості банків буферів і обчислювальних блоків. Дослідження являли собою моделювання роботи криптографічного акселератора, що виконує шифрування блоку інформації 4048 байтів алгоритмом 3DES, при різній кількості обчислювальних блоків та банків буферів. Дослідження проводилися за допомогою пакету MATLAB, інструментів Simulink і Stateflow. Результати досліджень представлені на рисунку 1.

На данному рисунку результат I – кількість тактів на виконання шифрування при одному блоці 3DES з одним банком буферів. Результат II – кількість тактів на виконання шифрування при двох блоках 3DES з одним банком буферів. Результат III – кількість тактів на виконання шифрування при одному блоці 3DES з двома банками буферів. Результат IV – кількість тактів на виконання шифрування при двох блоках 3DES з двома банками буферів.

Виходячи з результатів досліджень, можна зробити висновок, що збільшення кількості обчислювальних блоків до двох призводить до зменшення числа тактів на виконання шифрування на 46 %.

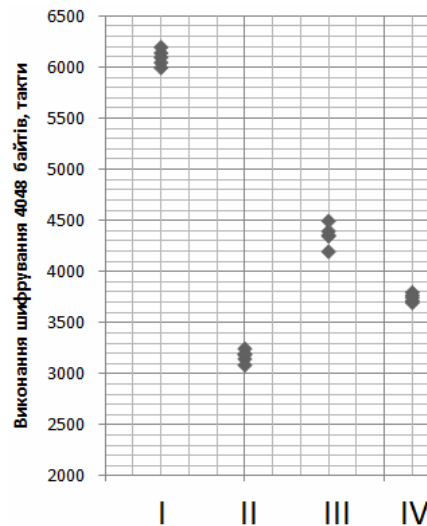


Рис. 1. Залежність кількості тактів на виконання криптографічної задачі від кількості банків буферів і обчислювальних блоків

При одному обчислювальному блоці криптографічного алгоритму і двох банках буферів досягається зменшення числа тактів на виконання шифрування на 25 %, що пояснюється відсутністю очікування обчислювальним блоком надходження даних.

При двох обчислювальних блоках і двох банках буферів зменшення числа тактів на виконання шифрування становить 38 %. Збільшення швидкодії виявляється менше, ніж при двох обчислювальних блоках і одному банку вхідних і вихідних буферів. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа обчислювальних блоків і банків буферів дані не встигають поступити в буфери своєчасно і обчислювальні блоки чекають їх надходження.

Звідси можна зробити висновок, що для виконання алгоритмів, які не можуть виконуватися паралельно, краще збільшити кількість банків буферів. Для алгоритмів, що можуть виконуватися паралельно, краще збільшити кількість обчислювальних блоків, при цьому кількість буферів збільшувати не варто.

Архітектура криптографічного акселератора представлена на рисунку 2.

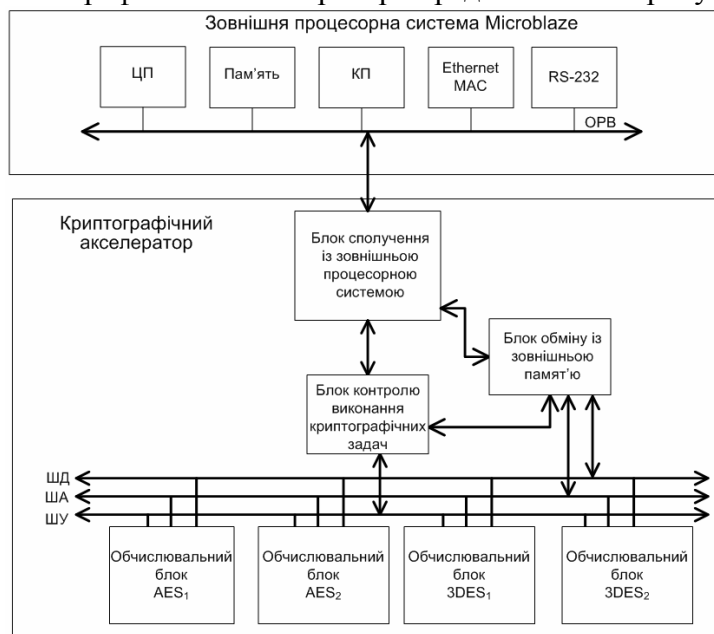


Рис. 2. Архітектура криптографічного акселератора

Прискорення виконання криптографічних задач може бути досягнуто в результаті їх паралельного виконання на рівні обчислювальних блоків і паралельного виконання однієї задачі кількома обчислювальними блоками.

Пропонується використовувати алгоритм контролю виконання задач, який буде опитувати стан кожного з обчислювальних блоків і на підставі отриманої інформації приймати рішення з яким з них взаємодіяти в даний момент і які операції виконувати.

Особливістю обчислювального блоку є контролер, який, виконуючи операції взаємодії з криптографічним акселератором, забезпечує незалежність обчислювачів від особливостей криптографічного акселератора і дозволяє зосередити архітектуру обчислювача на виконання алгоритму з найбільшим швидкодією.

Для забезпечення мінімальних витрат на отримання потрібного набору криптографічних алгоритмів використовуються обчислювальні блоки, що мають єдиний інтерфейс роботи з іншими блоками криптографічного акселератору.

Структура обчислювального блоку представлена на рисунку 3.

Скорочення використання ресурсів процесорної системи та прискорення обміну даними досягається використанням пам'яті зовнішньої процесорної системи для обміну даними та передачею команд у пам'ять криптографічного акселератора. Для запобігання конкуренції на шині використовуються двопортова пам'ять. Передача команд, обмін службовою інформацією відбувається через міст сполучення з шиною зовнішньої процесорної системи.

Структура взаємодії з зовнішньою процесорною системою представлена на рисунку 4.



Рис. 3. Структура обчислювального блоку

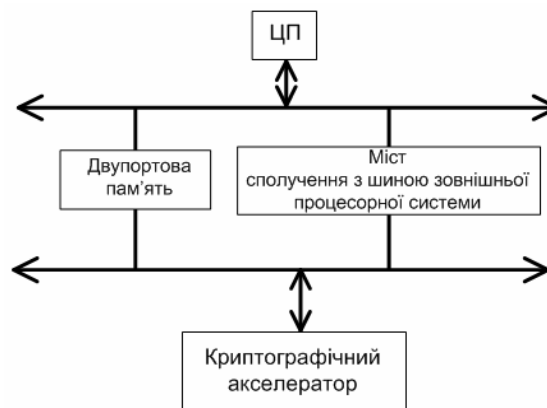


Рис. 4. Структура взаємодії з зовнішньою процесорною системою

Інтеграція криптографічного акселератора в різні процесорні системи реалізується шляхом заміни блоку сполучення із зовнішнім процесорною системою.

Структура блоку сполучення із зовнішньою процесорною системою представлена на рисунку 5.

Даний блок буде мати змінний зовнішній інтерфейс і незмінний внутрішній, а також забезпечуватиме перетворення адреса і даних, використовуваних у процесорній системі. Таким чином, для інтеграції в іншу процесорну систему достатньо змінити лише цей блок, зміни ніяк не відіб'ються на архітектурі інших блоків.

Для перевірки пропонованих рішень був реалізований криптографічний акселератор на мові VHDL. Була створена бібліотека обчислювальних блоків і блоків сполучення для інтеграції у софт процесори Microblaze і LEON3.

Залежність кількості тактів на шифрування блоку даних 4048 байтів 3DES алгоритмом від кількості обчислювальних блоків представлена на рисунку 6. На даному рисунку результат I – кількість тактів на виконання шифрування при одному блоці 3DES, результат II – кількість тактів на виконання шифрування при двох блоках 3DES, результат III – кількість тактів на виконання шифрування при трьох блоках 3DES. Виходячи з графіка, можна зробити висновок, що кількість тактів, необхідних на виконання шифрування блоку даних зменшилася на 46 % при двох обчислювальних блоках і на 59 % при трьох обчислювальних блоках.

Результати, отримані в процесі налагодження криптографічного акселератора на згаданих процесорах, підтверджують ефективність вищеописаних рішень.

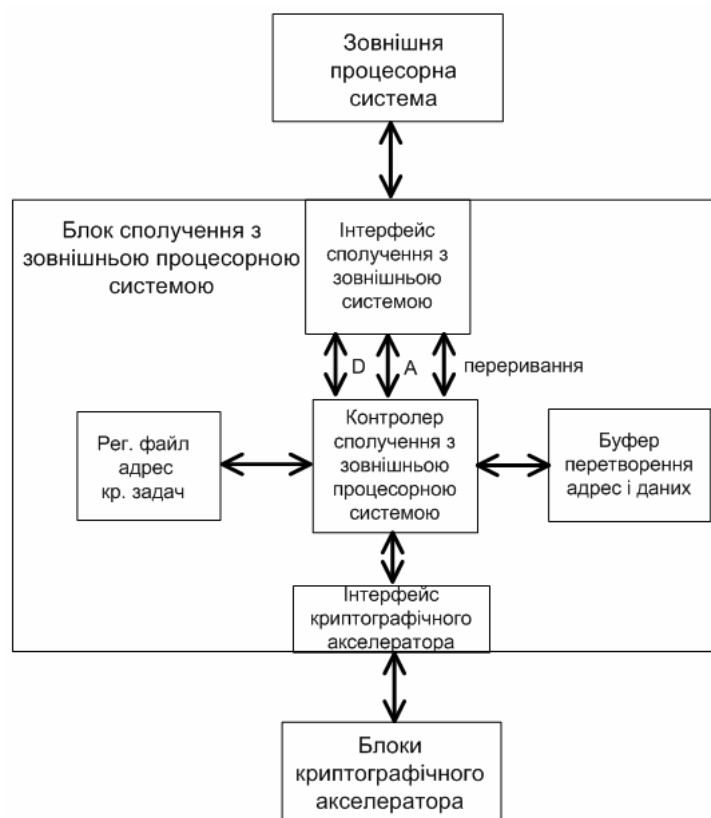


Рис. 5. Структура блоку сполучення із зовнішньою процесорною системою

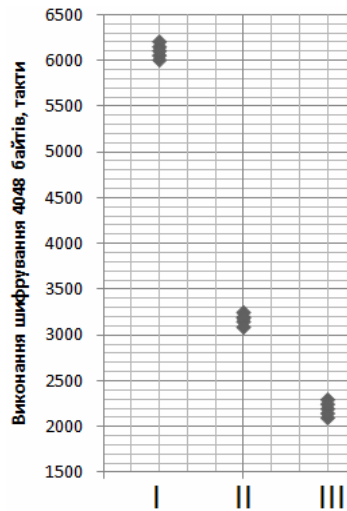


Рис. 6. Залежність кількості тактів на шифрування блоку даних 4048 байтів 3DES алгоритмом від кількості обчислювальних блоків

Висновки

Проведений огляд архітектурних особливостей існуючих криптографічних акселераторів, виявлено їх суттєві недоліки. Показана актуальність поставлених задач і запропоновані їх рішення. Запропонована архітектура криптографічного акселератора дозволяє зменшити число тактів на виконання криптографічної задачі за рахунок паралельного виконання на рівні обчислювальних блоків, а також завдяки алгоритму розподілу задач між обчислювальними блоками. Розроблена архітектура дозволяє інтегрувати криптографічний акселератор у різні процесорні системи та змінювати набір криптографічних алгоритмів з мінімальними часовими і апаратними витратами.

Список літературних джерел

1. Мухачев В.А., Хорошко В.А. Методы практической криптографии. – К.: ООО Полиграф-Консалдинг, 2005. – 500 с.
2. Crypto Accelerator 6000 PCI Express Adapter [//www.oracle.com/us/products/servers-storage/networking/036080.pdf](http://www.oracle.com/us/products/servers-storage/networking/036080.pdf).
3. Broadcom BCM 5840 Product Brief [//www.broadcom.com/collateral/pb/1250-PB11-R.pdf](http://www.broadcom.com/collateral/pb/1250-PB11-R.pdf).
4. Amphion Semiconductor Ltd. CS5210-40 High Performance AES Encryption Cores [//www.chipfind.net/datasheet/conexant/cs521040.htm](http://www.chipfind.net/datasheet/conexant/cs521040.htm).
5. Cryptonite. A Programmable Crypto Processor Architecture For High-Bandwidth Applications [//www.deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv.pdf](http://www.deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv.pdf).
6. Cryptomaniac: A fast flexible architecture for secure communication [//www.portal.acm.org/citation.cfm?id=379256](http://www.portal.acm.org/citation.cfm?id=379256).
7. 8200 Series Applied Services Processor Product Brief [//www.cn.exar.com/Files/Documents/8200_r3_ProductBrief.pdf](http://www.cn.exar.com/Files/Documents/8200_r3_ProductBrief.pdf).

МЕХАНОХІМІЯ

УДК 620.197.3

О.І. Сиза, д-р техн. наук**О.М. Савченко**, канд. техн. наук**Ю.В. Квашук**, аспірант**С.В. Гаценко**, ст. викладач

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ІНГІБІТОРНИЙ ЗАХИСТ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Досліджено протикорозійну ефективність інгібіторів корозії на основі продуктів переробки екологічно-безпечної рослинної сировини України – водні витяжки із зерен гірчиці і коріння хрону. Виявлено залежність протикорозійної активності досліджених рослинних добавок від їх концентрації у водопровідній воді. Максимальний ступінь захисту $Z = 93,8 \%$.

Постановка проблеми

Промисловість України нараховує декілька тисяч харчових підприємств. Ряд діючих підприємств і окремих цехів не відповідають сучасним вимогам і підлягають модернізації. Метали, що традиційно застосовуються для виготовлення обладнання, в робочих середовищах харчової промисловості в ряді випадків виявляються недостатньо корозійно-стійкими. Агресивність середовищ обумовлена використанням у харчових технологіях підвищених і низьких температур, високого тиску і вакууму, значних швидкостей потоків продукції, тривалої витримки середовищ у стані спокою, змін рН розчинів у широкому діапазоні і багатьма іншими факторами. Значну агресивність виявляють середовища оборотного водопостачання виробничих підприємств. В охолоджувальних водах накопичуються солі, органічні речовини, живі мікроорганізми і при їх вмісті більше 100 мг/л циркуляційні води стають корозійно-агресивним електролітом. У системах випадають важко розчинні сполуки, відбувається обростання стінок, що приводить не тільки до інтенсифікації корозійних процесів, але і погіршується тепловіддача, підвищується опір середовищу, що рухається, у зв'язку зі зменшенням вільного перетину труб. Відповідно зростає корозійно-ерозійний вплив агресивних середовищ і механічних навантажень на конструкційні матеріали і покриття, що призводить до передчасного виходу з ладу машин і агрегатів. Під час експлуатації харчового устаткування 80% ремонтного фонду витрачається на ліквідацію наслідків корозії металів, що складає близько 2 % від вартості основних виробничих фондів [1]. Втрати від корозії обумовлені також тим, що при розробці технологічних процесів, проектуванні устаткування, виготовленні і монтажі апаратури не завжди передбачаються протикорозійні заходи.

Прокородовані метали змінюють свій мікрорельєф, збільшуючи невикористані втрати цінної продукції, а також трудові витрати на очищення, мийку і дезинфекцію машин, апаратів, агрегатів, трубопроводів. Крім того, частки зруйнованого металу можуть потрапляти в продукцію, погіршуючи її смакові якості і санітарно-гігієнічні характеристики.

Тому підвищення довговічності і надійності машин і агрегатів харчових виробництв стає головною задачею спеціалістів не тільки Держагропрому, але і суміжних галузей науки і техніки. Рішення цих найважливіших проблем дозволить зробити значний крок вперед у корінному технічному переоснащенні харчової промисловості і забезпечити запити людей у продуктах харчування.

Аналіз досліджень і публікацій

Одним з перспективних шляхів вирішення проблеми захисту обладнання харчової промисловості є використання захисних інгібуючих композицій [1-8]. Так, дослідження інгібуючого ефекту відходів пивоварного виробництва показали, що при введенні в них оптимальних добавок NaOH і стабілізуючих мікродобавок можна одержати інгібітори корозії для устаткування і трубопроводів систем охолодження технологічних цехів харчових підприємств. Інгібітори істотно підвищують довговічність і надійність устаткування і трубопроводів в умовах корозійного впливу середовищ.

У США використовують пентанову кислоту для захисту металевої тари, у якій зберігають імбирне пиво й оцет. Аргінін оцтово-кислий (1 %) застосовують для запобігання корозії сталевих контейнерів з харчовими продуктами [8]. Інгібування питної води, відповідно до санітарних норм, проводять невеликими дозами гексаметафосфату натрію (4-5 мг/л) у розрафунку на фосфорний ангідрид [9].

Інгібітори корозії, незалежно від умов експлуатації, повинні мати високий ступінь захисту, бути технологічними, дешевими, відповідати санітарно-гігієнічним нормам, не повинні порушувати технологічний процес і створювати загрозу забруднення навколишньому середовищу.

Мета роботи

Розроблення ефективних інгібіторів корозії на основі продуктів переробки екологічно-безпечної рослинної сировини України для захисту систем апаратів і комунікацій, технологічного і допоміжного устаткування харчових підприємств.

Об'єкти і методи дослідження

Основним середовищем більшості харчових виробництв є питна вода. Існує безліч причин виходу з ладу трубопроводів і обладнання за рахунок внутрішньої корозії, основною з яких є висока корозійна агресивність води. Продукти корозії погіршують якість води і забруднюють внутрішню поверхню труб, зменшуючи їх пропускну здатність та знижуючи ефективність роботи арматури. Корозійна агресивність води спричинює підвищення рівня аварійності водопровідних мереж та є небезпечним фактором, який негативно впливає на здоров'я людини безпосередньо, за рахунок посилення процесів окиснення в організмі, також опосередковано, підвищуючи у воді вміст міді, свинцю та інших важких металів в результаті їх вимивання із трубопроводів. Інженерні методи забезпечення надійності систем водопостачання згідно Держстандарту передбачають застосування інгібіторів як один з основних протикорозійних заходів. Тому корозійні випробування проводили на зразках сталі гравіметричним та електрохімічним (потенціостат П-5827) методами у водопровідній питній воді при 291-293 К.

Поляризаційні криві (20 мВ/хв) були зняті від стаціонарного потенціалу на торцевого електроді ($S = 0,38 \text{ см}^2$) із відпаленої сталі 20. Дослідження проводили в скляній трьохелектродній комірці з розділеним катодним і анодним простором. За поляризаційними кривими визначали струм (I_a) та потенціал (E_a) корозії анодного процесу.

Коефіцієнт гальмування анодного процесу визначали за формулою:

$$\gamma_a = I_a / I'_a,$$

де I_a , I'_a – анодний струм у воді без інгібітора та з інгібітором відповідно, А/м².

Ступінь гальмування корозії інгібітором: $Z_{\text{кор}} = (1 - 1/\gamma_{\text{кор}}) \times 100\%$.

Статичні вагові дослідження проводили на зразках із Ст 3 у вигляді прямокутних пластинок розміром 50,3×22,3×3,2 мм і сталі 20 з розмірами 50×10×0,9 мм. Поверхню зразків послідовно шліфували на дрібнозернистому папері марок Р 240 – Р 1200, промивали в проточній воді і знежирювали. Після експозиції поверхню зразків звільняли від продуктів корозії, промивали проточною водою, висушували, знежирювали і зважували.

Швидкість корозії оцінювали за формулою:

$$K_m = (m_1 - m_2) / S \cdot \tau,$$

де: K_m – швидкість корозії, г/(м²·год); m_1 – маса зразка до випробування, г; m_2 – маса зразка після випробування, г; S – площа поверхні зразка, м²; τ – тривалість дослідження, години.

Ефективність захисної дії інгібітора корозії оцінювали ступенем захисту Z_m :

$$Z_m = [(K_m - K'_m) / K_m] \cdot 100, \%,$$

де K_m , K'_m – швидкість корозії за втратою маси металу без інгібітора та з інгібітором, відповідно, г/(м²·год).

Стандартну обробку експериментальних даних проводили для рівня ймовірності 0,95 при числі вимірів $n = 6$ [10].

Результати дослідження

Для вирішення поставленої мети – пошуку ефективних та екологічно безпечних інгібіторів корозії маловуглецевих сталей у водному середовищі – досліджено протикорозійну активність речовин, отриманих з водних витяжок із зерен гірчиці (ВГ) і коріння хрину (ВХ).

Оцінку протикорозійної активності речовин ВГ та ВХ за результатами електрохімічних досліджень при температурі 292 К наведено на рис. 1 та в табл. 1.

За поляризаційними кривими визначали струм корозії, коефіцієнт гальмування корозії та ступінь захисту в анодній області, де відбувається активне розчинення металу в результаті корозії.

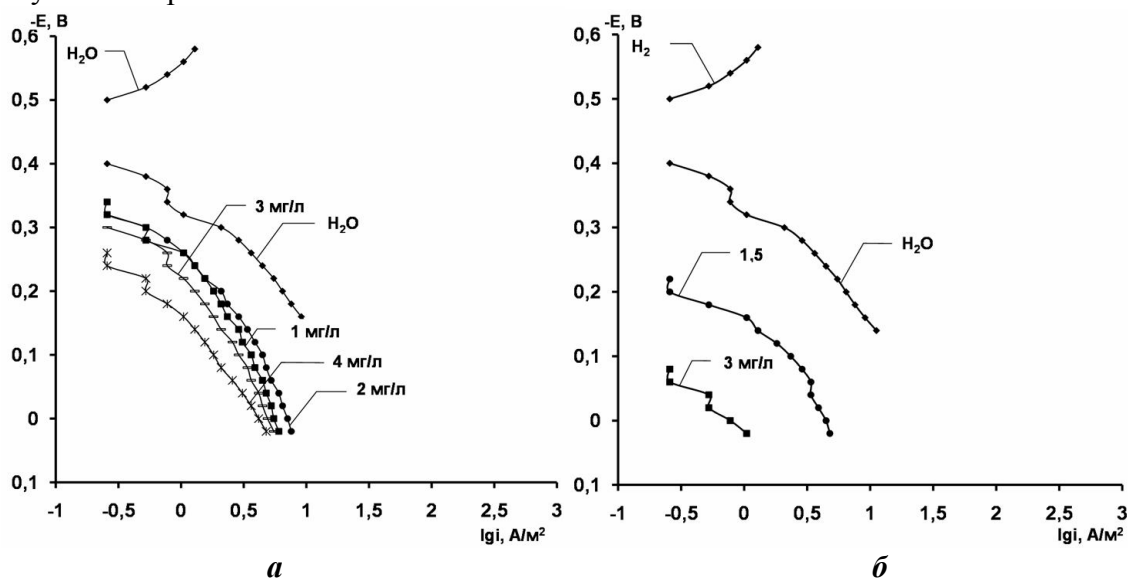


Рис. 1. Поляризаційні криві сталі 20 у воді при зміні концентрації інгібіторів: а– ВГ; б–ВХ

Таблиця 1

Залежність ступеня анодного захисту від концентрації інгібітора ВГ у водопровідній воді

Концентрація інгібітора, г/л	i_a	γ_a	$Z_a, \%$
1	1,82	3,63	72,47
2	2,09	3,16	68,38
3	1,29	5,12	80,48
4	0,66	10	90,02

Поляризаційні виміри показують, що речовини ВГ і ВХ є ефективними інгібіторами корозії. На анодній ділянці інгібітор ВГ активно гальмує процес розчинення металу. Ефективність інгібіторного захисту сталі 20 зростає відповідно від 72,47 % до 90,02 %

із збільшенням концентрації інгібітора до 4 мг/л. Інгібітор ВХ також ускладнює процес розчинення металу, зміщує початок анодних поляризаційних кривих до потенціалу -0,22 та -0,08 В (рис. 1, б). Спостерігаються короткотривалі періоди формування пасивного стану поверхні металу в анодній області при $E_a = -0,22$ В за концентрації інгібітора ВХ 1,5 мг/л, а при концентрації 3 мг/л є декілька періодів пасивації при потенціалі -0,08 В та -0,04 В. Дані інгібуючі добавки відносяться до органічних інгібіторів, що впливають на хід анодних реакцій. Дія органічних інгібіторів значною мірою обумовлена тим, що вони адсорбуються на поверхні металу і утворюють плівку, що ізолює цю поверхню від агресивного впливу середовища. Очевидно, вихід з пасивного стану обумовлений порушенням пасивуючої плівки при пониженні потенціалу анодного процесу розчинення металу.

Потенціостатичні вимірювання дозволяють оцінити ступінь захисту від електрохімічної корозії, але в реальних умовах має місце і хімічна корозія. Тому для визначення оптимальної концентрації інгібіторів використовували гравіметричний метод, що дає змогу оцінити сукупну дію електрохімічної і хімічної корозії. Оцінка швидкості корозії і ступеня захисту Ст 20 і Ст 3 за результатами гравіметричних досліджень наведена в табл. 2 і на рис. 2.

Таблиця 2

Протикорозійна активність інгібіторів у водному середовищі

Концентрація інгібітора, г/л	Δm , г	K_m , г/(м ² ·год)	Z_m , %
Інгібітор ВГ (Ст 20)			
Н₂O (при 291К)	0,01537	0,04576	—
0,5	0,01157	0,03443	24,76
1	0,00840	0,025	45,37
2	0,00785	0,02336	48,95
Н₂O (при 293 К)	0,02337	0,06957	—
3	0,00685	0,02039	70,69
4	0,00572	0,01704	75,51
6	0,00277	0,00826	88,13
7	0,00217	0,00647	90,7
8	0,00145	0,00432	93,79
9	0,00225	0,0067	90,37
10	0,00230	0,00685	90,15
Інгібітор ВХ (Ст 3)			
Н₂O (при 292 К)	0,02032	0,04705	—
1	0,01202	0,02784	40,83
2	0,00382	0,00885	81,19
4	0,00245	0,00567	87,95
6	0,00240	0,00555	88,19
8	0,00239	0,00547	88,37

З підвищенням концентрації інгібітора ВГ від 0,5 г/л до 8 г/л ступінь захисту Ст 20 зростає, досягаючи 93,79 %. З подальшим зростанням концентрації до 9-10 г/л ступінь захисту починає дещо зменшуватись. Отже, концентрацію інгібітора ВГ 8 г/л можна вважати оптимальною.

З підвищенням концентрації інгібітора ВХ до 4 г/л ступінь захисту Ст 3 у водному середовищі досягає 87,95 % і далі змінюється не суттєво.

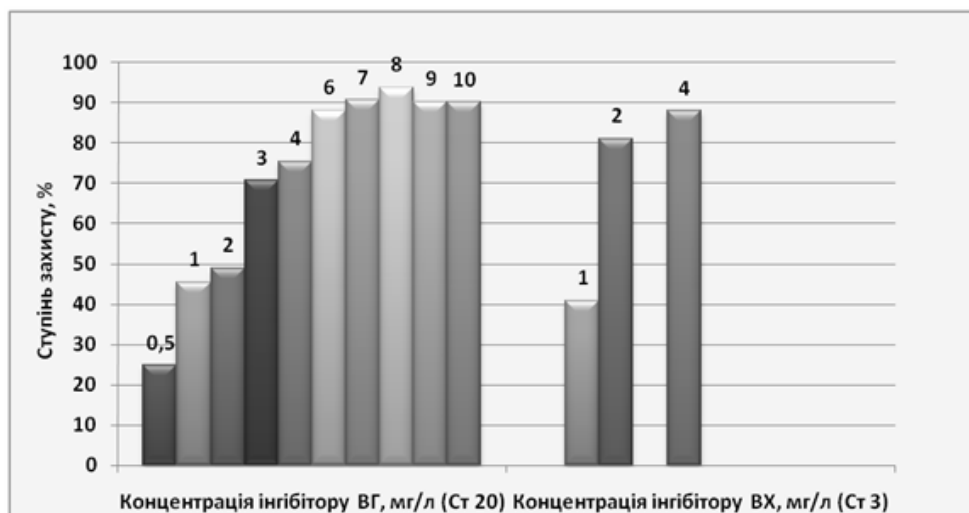


Рис. 2. Ступінь захисту сталі у воді залежно від концентрації інгібітора

Висновки

Запропоновано нові екологічно безпечні інгібітори корозії маловуглецевих сталей на основі водних витяжок із зерен гірчиці і коріння хрину. Виявлено залежність протикорозійної активності досліджених рослинних добавок від їх концентрації у водопровідній воді. Максимальні захисні властивості спостерігаються при застосуванні інгібітора на основі водної витяжки із зерен гірчиці: ступінь захисту $Z = 93,79\%$ при концентрації 8 г/л.

Список літературних джерел

1. Тищенко Г.П., Бурмістр М.В. Коррозія і захист від корозії в харчовій промисловості. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2002. – 461 с
2. Роменский Н.П., Супрунчук В.К., Прейс Г.А. Защита от коррозии оборудования пищевой промышленности. – Киев: Техника, 1981. – 152 с.
3. Тищенко Г.П., Трофимович А.Н. Повышение долговечности пищевого оборудования. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.
4. Ледовских В.М., Госалес Риготти Х.Д. Разработка азотсодержащих ингибиторов коррозии металлов на основе побочного продукта сахарного производства Кубы – воска //Защита металлов. – 1982. – Т. 18, № 3. – С. 466-469.
5. Савченко О.Н., Сизая О.И. Использование модифицированных растительных масел в противокоррозионной защите стали //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 4. – С. 14-18.
6. Сизая О.И., Савченко О.Н., Королев А.А. Исследование защитного действия противокоррозионных материалов на основе продуктов растительного происхождения //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 5. – С. 34-39.
7. Иванов Е.С., Иванов С.С. Ингибиторы коррозии металлов. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
8. Алцыбеева А.И., Левин С.З. Ингибиторы коррозии металлов. – Л.: Химия, 1968. – 262 с.
9. Розенфельд И.Л. Ингибиторы коррозии. – М.: Химия, 1977. – 352 с.
10. Gordon A., Ford R. The chemist's companion. – New York, 1972. – 541 p.

АНОТАЦІЇ

УДК 621.9.06: 621.9-112.5: 621.9-112.6

Чуприна В.М. Концептуальні засади повузлових динамічних досліджень металорізальних верстатів // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.6-15.

Розглянута актуальна проблема досліджень динаміки верстатів по частинах. На основі теорії множин з застосуванням методів діакоптики виконано теоретичне обґрунтування дослідження динамічних характеристик пружної системи верстату по характеристиках його вузлів. Наведено приклад знаходження динамічної характеристики верстату в формі амплітудно-фазово-частотних характеристик по характеристиках його шпиндельного вузла і несучої системи. Дані рекомендації щодо застосування даного методу для повузлових динамічних досліджень пружних систем верстатів.

Ил.:3, Бібліогр.: 12 назв.

УДК 621.9.06: 621.9-112.5: 621.9-112.6

Чуприна В.М. Концептуальные принципы поузловых динамических исследований металлорежущих станков // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.6-15.

Рассмотрена актуальная проблема исследования динамики станков по частям. На основе теории множеств с применением методов диакоптики выполнено теоретическое обоснование исследования динамических характеристик упругой системы станка по характеристикам его узлов. Приведен пример определения динамической характеристики станка в форме амплитудно-фазово-частотных характеристик по характеристикам его шпиндельного узла и несущей системы. Даны рекомендации по применению данного метода для поузловых динамических исследований упругих систем станков.

Илл.:3, Библиогр.: 12 назв.

UDC 621.9.06: 621.9-112.5: 621.9-112.6

Chupryna V.M. Conceptual Principles Development for Metal Cutting Tools Nodes Dynamic Studies // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.6-15.

The actual problem of the study of the metal cutting tools dynamic on parts is considered. On base theory of sets with using the diacoptics methods theoretical motivation of the study of the dynamic features of the metal cutting tool springy system on feature of its nodes the determination is executed. Determinations of the dynamic feature tool are cited an instance in the form amplitude-phase-frequency features on feature its spindle node and carrying systems. Recommendations on application of this method at nodes dynamic study of metal cutting tool springy systems are given.

Ill.: 3, Ref.: 12.

УДК 621.822.172:621.7.079

Федориненко Д.Ю. До питання визначення функції тиску в шпиндельних гідростатичних опорах // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.16-23.

Розглянуті питання розробки математичної моделі функції тиску а радіальних шпиндельних гідростатичних підшипниках. Запропонована залежність динамічного зазору від геометричних відхилень опорних поверхонь підшипника на основі ряду Фур'є.

Ил. 3. Бібліогр.: 11 назв.

УДК 621.822.172:621.7.079

Федориненко Д.Ю. К вопросу определения функции давления в шпиндельных гидростатических опорах // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.16-23.

Рассмотрены вопросы разработки математической модели функции давления в радиальных шпиндельных гидростатических подшипниках. Предложена зависимость динамического зазора от геометрических отклонений опорных поверхностей подшипника на основе ряда Фурье.

Ил. 3. Библиогр.: 11 назв.

UDC 621.822.172:621.7.079

Fedorinenko D.Y. To the Question of Pressure Function Determination in Spindle Hydrostatical Supports // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.16-23.

The questions of development of mathematical model of function of pressure in radial spindle hydrostatical bearings are considered. Dependence of dynamic gap on the geometrical rejections of underlayments of bearing on the basis of Furie row is offered

Ill. 3. Ref.: 11.

УДК 621.923.42

Рудик А.В. Перерозподіл навантажень при поздовжньому глибинному шліфуванні // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.24-28.

Наведені уточнені залежності для визначення питомих підведених об'ємів матеріалу заготовки до робочої поверхні абразивного інструменту вздовж його профілю при круглому глибинному шліфуванні. Отримана замкнена система залежностей характеризує перерозподіл навантаження по висоті круга.

Ил.:2, Бібліогр.: 6 назв.

УДК 621.923.42

Рудик А.В. Перераспределение нагрузки при продольном глубинном шлифовании // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.24-28.

Приведены уточненные зависимости для определения удельных подведенных объемов материала заготовки к рабочей поверхности абразивного инструмента вдоль его профиля при круглом глубинном шлифовании. Полученная замкнутая система зависимостей характеризует перераспределение нагрузки по высоте круга.

Илл.:2, Библиогр.: 6 назв.

UDC 621.923.42

Rudik A.V. Redistribution of Loading at the Longitudinal Deep Polishing // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.24-28.

The specified dependences for definition of the specific brought volumes of material of purveyance to the working surface of abrasive instrument along his profile at the round deep polishing are resulted. The received closed system of dependences describes the redistribution of loading on the height of circle.

Ill.: 2, Ref.: 6.

УДК 378:371.333

Полуян А.В., Пасов Г.В. Комп'ютерна перевірка однорідності дисперсій // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.29-38.

Розглянуто комп'ютерні програмні продукти перевірки однорідності дисперсій за критеріями Фішера, Кохрена, Бартлета, а також актуальність та необхідність застосування комп'ютерних технологій у навчальному процесі.

Бібліогр.: 11 назв.

УДК 378:371.333

Полуян А.В., Пасов Г.В. Компьютерная проверка однородности дисперсий // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.29-38.

Рассмотрены компьютерные программные продукты проверки однородности дисперсий по критериям Фишера, Кохрена, Бартлета, а также актуальность и необходимость внедрения компьютерных технологий в учебном процессе.

Библиогр.: 11 назв.

UDC 378:371.333

Poluyan A.V., Pasov G.V. Computer Check to Homogeneity Dispersion // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.29-38.

Considered computer program products of the check to homogeneity dispersion on Criteria of Fisher, Kohrena, Bartleta, as well as urgency and need of the introduction computer technology in educational process are considered.

Ref.: 11

УДК 621.822.3

Хоменко І.М., Кобринець А.К. Про розрахунок радіальних підшипників ковзання автотракторних двигунів // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.39-47.

Наведено методику розрахунку радіальних підшипників ковзання автотракторних двигунів і приклад розрахунку радіального підшипника ковзання двигуна СМД.

Табл. 2; Ил.1. Бібліогр. 3 назв.

УДК 621.822.3

Хоменко И.М., Кобринець А.К. О расчете радиальных подшипников скольжения автотракторных двигателей // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.39-47.

Приведена методика расчета радиальных подшипников скольжения автотракторных двигателей и пример расчета радиального подшипника скольжения двигателя СМД.

Табл. 2. Ил.1. Библиогр. 3 назв.

UDC 621.822.3

Khomenko I.M, Kobrynets A.K On the Calculation of Radial Bearings Automotive Engines // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.39-47.

The method of calculating radial bearings automotive engines, and a sample calculation of the radial bearing engine SMD are presented.

Tab. 2; il.1; ref. 3 items.

УДК 621.791.03

Зяxor I.B., Кучук-Яценко С.I., Харченко Г.К., Новомлинець О.О. Роль початкових стадій процесу зварювання тертям на формування структури з'єднань титану зі сталлю // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.48-54.

Досліджено особливості структури та фазового складу зони з'єднання титану з нержавіючою сталлю на початкових стадіях процесу зварювання тертям, експериментально та розрахунковим шляхом визначено температуру нагрівання зони контакту. Встановлено наявність інтерметалідного прошарку у зоні контактної взаємодії при часі зварювання менше 1 с, тобто до початку осевої і радіальної деформації заготовок.

Ил. 7. Бібліогр.: 9 назв. Табл. 2.

УДК 621.791.03

Зяxor И.В., Кучук-Яценко С.И., Харченко Г.К., Новомлинец О.А. Роль начальных стадий процесса сварки трением на формирование структуры соединений титана со сталью // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.48-54.

Исследованы особенности структуры и фазового состава зоны соединения титана с нержавеющей сталью, полученного на начальных стадиях процесса сварки трением, экспериментально и расчетным путем определена температура нагрева зоны контакта. Установлено наличие интерметаллической прослойки в зоне контактного взаимодействия при времени сварки меньше 1 с, т.е. раньше начала осевой и радиальной деформации заготовок.

Ил. 7. Библиогр.: 9 назв. Табл. 2.

UDC 621.791.03

Zahor I.V., Kuchuk-Atzenko S.I., Harchenko G.K., Novomlinetz O.O. The Role of the Initial Stages of Friction Welding Process on Formation of Structure of the Titan-steel Connections // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.48-54.

The structure and phase composition of friction welds between titanium and stainless steel were investigated. The contact zone heating temperatures were determined experimentally and by calculations. Intermetallic layer formation in the contact zone during the first second of friction welding process i. e. earlier than the samples axial shortening starting were determined.

Ил. 7. Ref.: 9. Tabl. 2.

УДК 621.791.04:669.018

Прибытько І.О., Петрушинець Л.В., Харченко Г.К., Фальченко Ю.В. Температурні напруження, що виникають під час миттєвого нагрівання контактуючих поверхонь // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.55-61.

Розрахунковим шляхом визначений характер зміни напруженого стану на границі прошарок-метал під час протікання реакції високотемпературного синтезу, що самопоширюється (СВС реакція), в процесі дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ). Запропоновано циклограму процесу ДЗВ, що враховує СВС реакцію як додаткове джерело активації процесу зварювання.

Ил. 7. Бібліогр.: 23 назв.

УДК 621.791.04:669.018

Прибытько И.А., Петрушинец Л.В., Харченко Г.К., Фальченко Ю.В. Температурные напряжения, возникающие при мгновенном нагреве контактирующих поверхностей // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.55-61.

Расчетным путем определен характер изменения напряженного состояния на границе раздела прослойка–металл во время протекания реакции самораспространяющегося высокотемпературного син-

теза (СВС реакция) в процессе диффузной сварки в вакууме (ДСВ). Предложена циклограмма процесса ДСВ, которая учитывает СВС реакцию как дополнительный источник активации процесса сваривания.

Ил. 7. Библиогр.: 23 назв.

UDC 621.791.04:669.018

Prybytko I.O., Petrushynets L.V., Kharchenko G.K., Falchenko Y.V. Thermal Stresses that Occur During Flash Heating of Contacting Surfaces // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.55-61.

By calculation method the change in stress state is determined at the boundary layer-metal during course of reaction of self-extending hightemperature synthesis (HTS reaction) in process diffusion welding in vacuum. A sequence diagram of the process of diffusion welding in vacuum, taking into account the thermal shock on the contacting surfaces as an additional source of activation of the welding process is proposed.

Ил. 7. Ref.: 23.

УДК 621.311.1

Баженов В.А. Питання оптимізації режимів електричних мереж по реактивній потужності та напрузі // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.62-66.

Розглянуті питання використання методу сполучених градієнтів для оптимізації усталених режимів електричних мереж сучасних енергосистем по реактивній потужності і напрузі. Пропонований метод реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів.

Ил. 0. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 621.311.1

Баженов В.А. Вопросы оптимизации режимов электрических сетей по реактивной мощности и напряжению // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.62-66.

Рассмотрены вопросы использования метода соединенных градиентов для оптимизации установившихся режимов электрических сетей современных энергосистем по реактивной мощности и напряжению. Предлагаемый метод реализован в пакете прикладных программ для персональных компьютеров.

Ил. 0. Библиогр.: 6 назв.

UDC 621.311.1

Bazhenov V.A. Reactive-power and Voltage Benchmarks for Optimization of Modes in Electric Power Networks // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.62-66.

Based on reactive-power and voltage benchmarks, a method of united gradients for optimization of steady-state modes in electric power networks is considered. The method is implemented in a program package for personal computers.

Ил. 0. Ref.: 6.

УДК 621.311

Бессараба П.І. Підвищення ефективності роботи електричних мереж за рахунок скорочення технологічних витрат електроенергії при її транспортуванні // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.67-69.

Розглянуто класифікацію технологічних витрат електроенергії та запропоновано комплекс заходів по зниженню величини технологічних витрат електроенергії.

Ил. 2. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621.311

Бессараба П.И. Повышение эффективности работы электрических сетей за счет сокращения технологических потерь электроэнергии при ее транспортировке // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.67-69.

Рассмотрена классификация технологических затрат электроэнергии, а также предложен комплекс мероприятий по снижению величины технологических затрат электроэнергии.

Ил. 2. Библиогр.: 5 назв.

UDC 621.311

Bessaraba P.I. Boosting Operational Efficiency of Electric Networks by Reducing Technological Losses of Electric Power // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.67-69.

A classification of technological losses of electric power is considered. Also, a set of actions to reduce technological losses of electric power is presented.

Ill. 2. Ref.: 5.

УДК 621.311

Бодунов В.М. Врахування метеорологічної інформації при прогнозуванні електричних навантажень // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.70-74.

Запропоновано модель прогнозування електричного навантаження комунально-побутових споживачів з врахуванням метеорологічної інформації з використанням класичного регресійного аналізу.

Ил. 3. Бібліогр.: 2 назв.

УДК 621.311

Бодунов В.Н. Учет метеорологической информации при прогнозировании электрических нагрузок // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.70-74.

Предложена модель прогнозирования электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей с учетом метеорологической информации с использованием классического регрессионного анализа.

Ил. 3. Библиогр.: 2 назв.

UDC 621.311

Bodunov V.M. Accounting for Meteorological Information in Predicting Electric Load // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.70-74.

A model to predict electric load of municipal consumers is built with the help of regression analysis.

Ill. 3. Ref.: 2.

УДК 621.311

Буйний Р.О., Зорін В.В., Квицинський А.О. Використання 4-х одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену для електропостачання споживачів I та II категорії за надійністю // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.75-81.

Для електропостачання споживачів I та II категорії за надійністю запропоновано використовувати одну кабельну лінію з резервною фазою, що дозволяє зменшити капіталовкладення в електричну мережу.

Ил. 6. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 621.311

Буйный Р.А., Зорин В.В., Квицинский А.А. Использование 4-х одножильных кабелей с изоляцией из зшитого полиэтилена для электроснабжения потребителей I и II категории по надежности // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.75-81.

Для электроснабжения потребителей I и II категории по надежности предложено использовать одну кабельную линию с резервной фазой, которая позволяет уменьшить капиталовложения в электрическую сеть.

Ил. 6. Библиогр.: 4 назв.

UDC 621.311

Buyni R.O., Zorin V.V., Kvitsynskyi A.O. Power Supply of I and II Reliability Category Users with Four Single-core Cross-linked Polyethylene Cables // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.75-81.

To implement power supply of I and II reliability category users, it is proposed to use a single cable line with a reserve phase. As a result, the required capital investment will be reduced.

Ill. 6. Ref.: 4.

УДК 621.3.012.6: 537.523.5: 535.341

Бушма А.И. Застосування досвіду моделювання дуг відключення в електричних мережах до комбінованого лазерно-дугового розряду // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.82-86.

Викладено досвід Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона по моделюванню динаміки електричної дуги зі змінною довжиною дуги, що обдувається або рухається. Узагальнена модель може застосовуватися для описання дуг вимикання в електричних мережах. Показано, що такий же підхід, а саме, безпосереднє врахування якогось енергетичного параметра, дозволяє одержати модель комбінованого лазерно-дугового розряду.

Ил. 0. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 621.3.012.6: 537.523.5: 535.341

Бушма А.И. Применение опыта моделирования дуг отключения в электрических сетях к комбинированному лазерно-дуговому разряду // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.82-86.

Изложен опыт Института электросварки им. Е.О. Патона по моделированию динамики электрической дуги с изменяющейся длиной, обдуваемой и движущейся дуги. Обобщенная модель может применяться для описания дуг отключения в электрических сетях. Показано, что такой же подход, а именно, непосредственный учет какого-либо энергетического параметра, позволяет получить модель комбинированного лазерно-дугового разряда.

Ил. 0. Библиогр.: 9 назв.

UDC 621.3.012.6: 537.523.5: 535.341

Bushma A.I. Application of Experience of Design of Arcs of Disconnecting in Electric Networks to the Combined Laser-arc Digit // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.82-86.

Experience of Paton Welding Institute is expounded on the design of dynamics of electric arc with changing length, blown and moving arc. The generalized model can be used for description of arcs of disconnecting in electric networks. It is shown that the same approach, namely, direct account of some power parameter, allows obtaining the model of the combined laser-arc discharge.

Ill. 0. Ref.: 9.

УДК 621.31.017

Дерзський В.Г., Скиба В.Ф. Багатофункціональний програмний комплекс для автоматизації електротехнічних розрахунків в розподільних мережах «ЕНЕРГОЛОКАТОР» // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.87-93.

Наведені можливості багатофункціонального програмного комплексу «ЕНЕРГОЛОКАТОР», який спрощує роботу інженерів електропостачальних і енергоаудиторських компаній, діяльність яких пов'язана з забезпеченням надійного та якісного електропостачання.

Ил.8. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621.31.017

Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Многофункциональный программный комплекс для автоматизации электротехнических расчетов в распределительных сетях «ЭНЕРГОЛОКАТОР» // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.87-93.

Приведены возможности многофункционального программного комплекса ЭНЕРГОЛОКАТОР, который упрощает работу инженеров электроснабжающих и энергоаудиторских организаций, деятельность которых связана с обеспечением надежного и качественного электроснабжения.

Ил. 8. Библиогр.: 5 назв.

UDC 621.31.017

Derzskiy V.G., Skiba V.F. Multifunctional Program Complex "ENERGOLOCATOR" for Automated Electrotechnical Evaluations of Distributive Electrical Networks // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.87-93.

Opportunities of multipurpose program complex the "ENERGOLOCATOR" which simplifies work of engineers of the electrosupplying and power auditor organizations which activity is connected with supply of a reliable and qualitative electrical supply are presented.

Ill. 8. Ref.: 5.

УДК 621.311

Зорін В.В. Вибір альтернативних варіантів ліній електропередавання напругою більше 1000В // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.94-99.

Розглянуто методи вибору перерізів проводів і жил кабелів за ринкових умов. Кількісний аналіз дозволив запропонувати уніфікацію стандартних перерізів для ліній електропередавання напругою 6-10 кВ з метою спрощення процесу проектування та експлуатації електричних мереж.

Ил.1. Бібліогр.: 8 назв.

УДК 621.311

Зорин В.В. Выбор альтернативных вариантов линий электропередачи напряжением выше 1000В // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.94-99.

Рассмотрены методы выбора сечений проводов и жил кабелей в условиях рыночной экономики. Количественный анализ позволил предложить унификацию стандартных сечений линий электропередачи напряжением 6-10 кВ с целью упрощения процесса проектирования и эксплуатации электрических сетей.

Ил. 1. Библиогр.: 8 назв.

UDC 621.311

Zorin V.V. Selecting Between Alternative Variants of Power Transmission Lines with Voltage of above 1000V // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.94-99.

Methods to select economical wire cross-sections and threads are discussed. A quantitative analysis allowed unification of standard cross-sections for transmission lines of 6-10 kV in order to simplify planning and operation of electric power networks.

Ill. 1. Ref.: 8.

УДК 621.311

Квицинський А.О. Щодо нової редакції глави 1.5 «облік електроенергії» правил улаштування електроустановок // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.100-103.

Наведено основні положення нової редакції глави 1.5 правил улаштування електроустановок України.

Ил. 0. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 621.311

Квицинський А.А. О новой редакции главы 1.5 правил устройства электроустановок // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.100-103.

Приведены основные положения новой редакции главы 1.5 правил устройства электроустановок Украины.

Ил. 0. Библиогр.: 7 назв.

UDC 621.311

Kvitsynskyi A.O. On a New Release of Chapter 1.5 «Account of electric power» of Electrical Installations Code // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.100-103.

Main provisions from the new version of the Chapter 1.5 of Electrical Installation Code are described.

Ill. 0. Ref.: 7.

УДК 621.316.21.001

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Ковальчук О.А., Хоменко В.О. Розосереджені джерела електроенергії в електричних мережах // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.104-108.

Робота присвячена аналізу впливу альтернативних джерел електроенергії, розміщених в розподільних електричних мережах, на їх режими. Показано вплив розосередженого генерування в електричних мережах на втрати потужності та електроенергії в них.

Ил. 1. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 621.316.21.001

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Ковальчук А.А., Хоменко В.А. Рассредоточенные источники электроэнергии в электрических сетях // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.104-108.

Работа посвящена анализу влияния альтернативных источников электроэнергии, размещенных в распределительных электрических сетях, на их режимы. Показано влияние рассредоточенного генерирования в электрических сетях на потери мощности и электроэнергии в них.

Ил. 1. Библиогр.: 4 назв.

UDC 621.316.21.001

Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Kovalchuk O.A., Homenko V.O. Dispersed Sources of Electric Power in Electric Networks // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.104-108.

The work analyses the influence of alternative sources of electric power, installed in distributive electric networks, on their working modes. It is shown how dispersed power generation affects the power loss rate.

Ill. 1. Ref.: 4.

УДК 621.316.1

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Поліщук А.Л., Сидоренко В.Ю. Формування заходів з компенсації реактивної потужності в розподільних мережах на підставі нечіткого багатокритеріального аналізу // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.109-115.

Робота присвячена аналізу особливостей визначення місць встановлення та потужностей додаткових джерел реактивної потужності у розподільних електричних мережах за комплексним критерієм оптимальності.

Іл. 0. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621. 316.1

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Полищук А.Л., Сидоренко В.Ю. Формирование мероприятий по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях на основании нечеткого многокритериального анализа // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.109-115.

Работа посвящена анализу особенностей определения мест установки и мощностей дополнительных источников реактивной мощности в распределительных электрических сетях по комплексному критерию оптимума.

Ил. 0. Библиогр.: 5 назв.

UDC 621. 316.1

Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Polischuk A.L., Sidorenko V.J. Fuzzy Multicriteria Analysis for Development of Actions to Compensate Reactive Power in Distributive Networks // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.109-115.

The work makes use of complex optimum criterion to determine appropriate locations and evaluate the required power of additional sources of reactive power in distributive networks.

Ill. 0. Ref.: 5.

УДК 621.311

Мальований М.М. Пріоритетні напрямки розвитку електричних мереж ВАТ ЕК «Чернігівобленерго», спрямовані на покращення якості послуг з постачання електричної енергії // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.116-119.

Приведено основні пріоритетні напрямки розвитку енергетичної компанії «Чернігівобленерго» задля покращення якості послуг з постачання електричної енергії споживачам.

Іл. 0. Бібліогр.: 1 назв.

УДК 621.311

Мальований М.Н. Приоритетные направления развития электрических сетей ОАО ЭК «Черниговоблэнерго», направленные на улучшение качества услуг по снабжению электрической энергии // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.116-119.

Приведены основные приоритетные направления развития энергетической компании «Черниговоблэнерго» для улучшения качества услуг по снабжению электрической энергии потребителей.

Ил. 0. Библиогр.: 1 назв.

UDC 621.311

Mal'ovanyi M.M. Priority Directions for Improving Quality of Energy Supply in Electric Networks of VAT EK «Chernigivoblenergo» // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.116-119.

Basic priority directions of development of electric power company «Chernigivoblenergo» are presented. They are pointed at improvement of service quality and energy supply quality.

Ill. 0. Ref.: 1.

УДК 621

Назаров В.В. Головна ідея енерго-економічного плану для України // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.120-125.

Приведена головна ідея формування еконатурологічно улаштованого, соціотехнічного укладу життєдіяльності людини задля зменшення впливу на навколишнє середовище.

Іл. 0. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 621

Назаров В.В. Основная идея энерго-экономического плана для Украины // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.120-125.

Приведена основная идея формирования эконатурологического устройства, социотехнического уклада жизнедеятельности человека для уменьшения влияния на окружающую среду.

Ил. 0. Библиогр.: 4 назв.

UDC 621

Nazarov V.V. The Main Idea of Energoeconomic Plan for Ukraine // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.120-125.

The main idea of forming econatural and sociotechnical vital activity to moderate the human influence on environment is described.

Ill. 0. Ref.: 4.

УДК 621.313.32

Омельчук А.О., Мосейчук В.О., Рябчук О.І., Скидан А.В. Обґрунтування засобів компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.126-133.

Наведені зауваження автора щодо постановки та вирішення задач компенсації реактивної потужності (КРП) в електричних мережах, зокрема, з використанням синхронних двигунів (СД). Наведено критерії економічної доцільності використання СД для КРП та проаналізовано величини економічного реактивного завантаження СД.

Ил. 5. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 621.313.32

Омельчук А.А., Мосейчук В.А., Рябчук А.І., Скидан А.В. Обоснование средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях потребителей // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.126-133.

Приведены замечания автора относительно постановки и решения задачи компенсации реактивной мощности (КРМ) в электрических сетях, в частности, с применением синхронных двигателей (СД). Приведены критерии экономической целесообразности использования СД для КРМ и проанализирована величина экономической реактивной нагрузки СД.

Ил. 5. Библиогр.: 6 назв.

UDC 621.313.32

Omelchuk A.O., Mosechuk V.O., Ryabchuk O.I., Skedan A.V. A Ground of Facilities of Indemnification of Reactive Power is in the Electric Networks of Users // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.126-133.

The remarks of author are resulted in relation to raising and decision tasks of indemnification of reactive power (IRP) in electric networks, in particular, with the use of synchronous engines (SE). The criteria of financial viability of the use of SE are resulted for IRP and the sizes of economic reactive load of SE are analysed.

Ill. 5. Ref.: 6.

УДК 621.316.1

Пентегов І.В., Безручко В.М., Приступа А.Л. Вибір місць приєднання фільтра струмів нульової послідовності до розподільної мережі висотних адміністративних й офісних будинків // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.134-141.

Представлено основні підходи при розрахунку й виборі місць приєднання фільтра струмів нульової послідовності до розподільної мережі висотних адміністративних й офісних будинків з урахуванням критеріїв: фільтрації вищих гармонік струму нульової послідовності; зменшення вищих гармонік напруги нульової послідовності; зміні втрат, викликаних струмами гармонік нульової послідовності в розподільній мережі.

Ил. 5. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 621.316.1

Пентегов И.В., Безручко В.М., Приступа А.Л. Выбор мест присоединения фильтра токов нулевой последовательности к распределительной сети высотных административных и офисных зданий // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.134-141.

Представлены основные подходы при расчете и выборе мест присоединения фильтра токов нулевой последовательности к распределительной сети высотных административных и офисных зданий с учетом критериев: фильтрации высших гармоник тока нулевой последовательности; подавления высших

гармоник напряжения нулевой последовательности; изменение потерь, вызванных токами гармоник нулевой последовательности в распределительной сети.

Ил. 5. Библиогр.: 10 назв.

UDC 621.316.1

Pentegov I.V., Bezruchko V.M., Prystupa A.L. Choice of Places of Joining of the Zero Sequence Currents Filter to a Distributive Network of High-rise Administrative and Office Buildings // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.134-141.

The basic approaches are presented at calculation and a choice of places of joining of the zero sequence currents filter to a distributive network of high-rise administrative and office buildings taking into account criteria: filtrations of the higher harmonics of a zero sequence currents; suppression of the higher harmonics of pressure of zero sequence; change of losses of the harmonics of zero sequence caused by currents in a distributive network.

Ил. 5. Ref.: 10.

УДК 621.311

Перетятко В.О. Проблемы регулювання напруги // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.142-151.

Приведені загальні відомості про принципи і засоби регулювання напруги. Зроблено короткий огляд найбільш поширених пристроїв автоматики РПН. Надана інформація про досвід експлуатації РПН і деяких їх характерних несправностях.

Ил. 13. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 621.311

Перетятко В.А. Проблемы регулирования напряжения // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.142-151.

Приведены общие сведения о принципах и средствах регулирования напряжения. Дан краткий обзор наиболее распространенных устройств автоматики РПН. Приведена информация об опыте эксплуатации РПН и некоторых их характерных неисправностях.

Ил. 13. Библиогр.: 4 назв.

UDC 621.311

Peretyatko V.O. Problems of Voltage Regulation // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.142-151.

General information about principles and facilities to regulate voltage is presented. A brief review of the most widespread automation devices of RPN is given. The paper includes information about operation history of RPN and some of its characteristic malfunctions.

Ил. 13. Ref.: 4.

УДК 658. 261: 621.316

Скоробогатова В.І. Принципи оцінювання діючих електричних мереж за тривалим нагріванням // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.152-155.

Наведено результати аналізу якості відображення енергетичних станів діючих електричних мереж систем електропостачання промислових підприємств з точки зору довготривалого нагрівання елементів і втрат електроенергії за оцінками параметрів станів, що обчислені згідно існуючим нормативним принципам. Виявлені причини викривлення результатів оцінювання.

Бібліогр.: 6

УДК 658. 261: 621.316

Скоробогатова В.И. Принципы оценивания действующих электрических сетей по длительному нагреву // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.152-155.

Представлены результаты анализа качества отображения энергетических состояний действующих электрических сетей систем электроснабжения промышленных предприятий с точки зрения длительного нагрева и потерь электроэнергии по оценкам параметров состояний, которые вычислены согласно существующим нормативным принципам. Вскрыты причины искажения результатов оценивания.

Библиогр.: 6

UDK 658. 261: 621.316

Skorobogatova V.I. Principles for Estimation of the Operating Conditions of the Industrial Power Supply Specified Systems // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. №

1(47). P.152-155.

The results of the analysis of mathematical presentation of energetic conditions in operating power supply systems of enterprises according to prolong heating of the elements and energy losses through the parameters of these conditions computed according to the normative principles are presented.

Ref.: 6

УДК 621.311.11

Скоробогатова В.І., Горбань Т.В. Топологія електричної мережі як фактор енергозбереження // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.156-159.

Формування електричної мережі з врахуванням топологічного фактору дозволяє досягти енергозберігаючого ефекту під час проектування нових та реконструкції діючих електричних мереж.

Іл. 4. Бібліогр.: 3 назв.

УДК 621.311.11

Скоробогатова В.І., Горбань Т.В. Топология электрической сети как фактор энергосбережения // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.156-159.

Формирование электрической сети с учетом топологического фактора позволяет достичь энергосберегающего эффекта при проектировании новых и реконструкции действующих электрических сетей.

Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.

UDC 621.311.11

Skorobogatova V.I., Gorban T.V. Topology of an Electric Network as the Power Savings Factor // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.156-159.

Formation of an electric network taking into account the topological factor allows to reach power saving up effect at designing new and reconstruction of operating electric networks.

Ill. 4. Ref.: 3.

УДК 620.179

Шевченко С.Ю., Волохін В.В., Ганус О.І. Мережа відомчих автоматизованих метеопостів як основа підвищення ефективності боротьби з ожеледно-паморозевими утвореннями // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.160-163.

Стаття присвячена обґрунтуванню необхідності створення мережі метеопостів як засобу контролю та видалення ожеледно-паморозевих утворень на лініях електропередавання. Розроблено рекомендації щодо побудови мережі відомчих автоматизованих метеопостів, які включають в себе пропозиції по створенню основних вузлів МВАМ, програмного забезпечення та схем обробки інформації.

Іл. 1. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 620.179

Шевченко С.Ю., Волохин В.В., Ганус А.И. Сеть ведомственных автоматизированных метеопостов как основа повышения эффективности борьбы с гололедно-изморозевыми образованиями // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.160-163.

Статья посвящена обоснованию необходимости создания сети метеопостов как средства контроля и удаления гололедно-изморозевых образований на линиях электропередач. Разработаны рекомендации по построению сети ведомственных автоматизированных метеопостов, которые включают в себя предложения по созданию основных узлов СВМ, программного обеспечения и схем обработки информации.

Ил. 1. Библиогр.: 6 назв.

UDC 620.179

Shevchenko S.Y., Volokhin V.V., Ganus O.I. Network of Departmental Automated Meteostations as a Basis for Increasing Efficiency of Actions against Icing and Hoarfrost // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.160-163.

The article proves the necessity to create a network of meteostations capable of controlling and eliminating icing and hoarfrost is distributive networks. Recommendations on the departmental metopost network structure are given.

Ill. 1. Ref.: 6.

УДК 620.179

Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Розробка методу для оцінки ступеня старіння трансформаторних масел // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.164-173.

На прикладі пробивної напруги трансформаторних масел проілюстровано алгоритм статистичного аналізу результатів періодичних випробувань стану трансформаторних масел. Проаналізовано особливості дрейфу пробивної напруги в умовах тривалої експлуатації та вплив завантаження трансформаторів на інтенсивність старіння масел. Наведено метод для оцінки ступеню старіння масел, в якому граничні значення показників не є постійними, а є функціями тривалості експлуатації, завантаження трансформаторів, сорту та якості масел, що заливаються до баку трансформаторів.

Іл. 6. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 620.179

Шутенко О.В., Баклай Д.Н. Разработка метода для оценки степени старения трансформаторных масел // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.164-173.

На примере пробивного напряжения трансформаторных масел проиллюстрирован алгоритм статистического анализа результатов периодического контроля состояния трансформаторных масел. Проанализированы особенности дрейфа пробивного напряжения в условиях длительной эксплуатации и влияние загрузки трансформаторов на интенсивность старения масел. Приведен метод для оценки степени старения масел, в котором граничные значения показателей не постоянны, а являются функцией времени, загрузки трансформаторов, сорта и качества масел, заливаемых в бак трансформаторов.

Іл. 6. Библиогр.: 10 назв.

UDC 620.179

Shutenko O.V., Baklai D.N. A Method for Estimation of Deterioration Rate of the Dielectric Oil // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.164-173.

A presented example explains an algorithm of statistical analysis of the dielectric oil quality control results. The features of drift of aggressive tension in the conditions of the continuous operation and influence of loading of transformers are analysed. A method for estimation of deterioration rate of dielectric oil is described. The input parameters for the method are not constant, but they change with time and vary on load as well as type and quality of the dielectric oil.

Іл. 6. Ref.: 10.

УДК 621.313.333.1

Денисов Ю. О. Пульсаційна нестійкість системи електропривода на основі автономного інвертора з синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.174-180.

Отримана передатна функція АІН з синусоїдальною ШІМ, на підставі чого знайдені умови субгармонійної стійкості електропривода змінного струму з різними регуляторами.

Іл. 3 . Бібліогр. 5

УДК 621.313.333.1

Денисов Ю.А. Пульсационная неустойчивость системы электропривода на основе автономного инвертора с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией. // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.174-180.

Получена передаточная функция АИН с синусоидальной ШИМ, на основании чего найдены условия субгармонической устойчивости электропривода переменного тока с различными регуляторами.

Ілл. 3. Библиогр. 5

UDC 621.313.333.1

Denysov Y.O. Subharmonic Stability of AC Motor Systems with PWM DC/AC Converter // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.174-180.

The transmission function of DC/AC converter sinusoidal PWM is obtained. As a result, conditions of subharmonic stability of AC motor with different regulators are obtained.

Іл. 3. Ref. 5

УДК 621.396.2.019.4 : 621.391.254

Казимир В.В., Зайцев С.В., Горлинський Б.В. Математична модель декодування турбо кодів по модифікованому алгоритму *MAX LOG MAP* // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.181-188.

В статті вперше запропонована математична модель модифікованого алгоритму *Max Log Map*. Застосування математичної моделі при моделюванні статистичних характеристик заводо захищеності безпровідних технологій дозволяє отримати такі самі характеристики, як і при застосуванні алгоритму *Log Map*, але при цьому кількість елементарних операцій, необхідних для здійснення процедури декоду-

вання, зменшується. Крім того, в порівнянні з відомим алгоритмом *Max Log Map*, статистичні характеристики завадозахищеності кращі.

Іл. 6. Бібліогр. 11

УДК 621.396.2.019.4 : 621.391.254

Казимир В.В., Зайцев С.В., Горлинский Б.В. Математическая модель декодирования турбо кодов по модифицированному алгоритму *MAX LOG MAP* // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.181-188.

В статье впервые предложена математическая модель модифицированного алгоритма *Max Log Map*. Применение математической модели при моделировании статистических характеристик помехозащищенности беспроводных технологий позволяет получить такие же характеристики, как и при применении алгоритма *Log Map*, но при этом количество элементарных операций, необходимых для осуществления процедуры декодирования, уменьшается. Кроме того, в сравнении с известным алгоритмом *Max Log Map*, статистические характеристики помехозащищенности лучше.

Илл. 6. Библиогр. 11

UDC 621.396.2.019.4 : 621.391.254

Kazimir V.V., Zaycev S.V., Gorlinsky B.V. Mathematical model of the uncoding of a turbo of the codes by the modified algorithm *MAX LOG MAP* // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.181-188.

The paper first proposed a mathematical model of the modified algorithm *Max Log Map*. Application of mathematical models for modeling the statistical characteristics of noise immunity of wireless technology allows you to get the same features as the application of the algorithm *Log Map*, but the number of elementary operations required for the decoding procedure is reduced. In addition, in comparison with a known algorithm *Max Log Map*, the statistical characteristics of noise immunity is better.

Ill. 6. Ref. 11

УДК 004.942

Бивойно П.Г., Бивойно Т.П., Сисоева М.М. Прикладна програма для дослідження перехідних процесів в системах масового обслуговування // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. - № 1(47). С.189-195.

Представлено опис прикладної програми, у якій була реалізована методика, що дозволяє шляхом моделювання оцінювати характер перехідного процесу для середньої довжини черги та його тривалість. Програма створена на основі фреймворку *SimulationJava*, який вирішив задачі створення імітаційних моделей систем масового обслуговування, синхронізації їх роботи у єдиному часовому просторі та забезпечив автоматизацію проведення експериментів, візуалізацію ходу експерименту, регресійний та дисперсійний аналіз отриманих результатів.

Іл. 4. Бібліогр.: 3 назв.

УДК 004.942

Бивойно П.Г., Бивойно Т.П., Сысоева М.Н. Прикладная программа для исследования переходных процессов в системах массового обслуживания // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.189-195.

Представлено описание прикладной программы, в которой была реализована методика, позволяющая путём моделирования оценивать характер переходного процесса для средней длины очереди и его длительность. Программа создана на основе фреймворка *SimulationJava*, который решил задачи создания имитационных моделей систем массового обслуживания, синхронизации их работы в едином временном пространстве и обеспечил автоматизацию проведения экспериментов, визуализацию хода эксперимента, регрессионный и дисперсионный анализ полученных результатов.

Илл. 4. Библ.: 3 назв.

UDC 004.942

Bivoyno P.H., Bivoyno T.P., Sysoeva M.M. The Application for Research of Transitional Processes in the Queuing Systems // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.189-195.

Description of the application and the methodic that allows by modeling estimate the character of transitional process for a middle length of the queue and its lengts are suggested. An application is created on the basis of framework *SimulationJava*, which decided the tasks of creation models of queuing systems, synchronization of their work in the unique temporal space and provided automation of conducting experiments, visualization of experiment, regressive and dispersion analysis of the got results.

Ill. 4. Ref.:3.

УДК 621.365.9:681.5.015:681.518.3

Войтенко В.П., Хоменко М.А., Рудіч П.В. Застосування штучних нейронних мереж для ідентифікації промислових об'єктів керування // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.196-201.

Сформульовано актуальні задачі практичної реалізації автоматичних і дистанційних режимів навчання штучної нейронної мережі при роботі з реальним об'єктом керування, які мають працювати в двох режимах – із застосуванням апаратних та програмних засобів персонального комп'ютера і автономно. Запропоновано структуру замкненої цільової САК з опорною моделлю для номінального режиму оптимального керування за допомогою автономного від комп'ютера адаптивного мікропроцесорного регулятора з напівавтоматичним коригуванням параметрів моделі, яка потребує інтенсивного використання сучасних промислових інтерфейсів.

Іл. 4. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621.365.9:681.5.015:681.518.3

Войтенко В.П., Хоменко М.А., Рудич П.В. Применение искусственных нейронных сетей для идентификации промышленных объектов управления // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.196-201.

Сформулированы актуальные задачи практической реализации автоматических и дистанционных режимов обучения искусственной нейронной сети при работе с реальным объектом управления, которые должны работать в двух режимах – с использованием аппаратных и программных средств персонального компьютера и автономно. Предложена структура замкнутой целевой САУ с опорной моделью для номинального режима оптимального управления с помощью автономного от компьютера адаптивного микропроцессорного регулятора с полуавтоматической коррекцией параметров модели, которая требует интенсивного использования современных промышленных интерфейсов.

Илл. 4. Библ.: 5 назв.

UDC 621.365.9:681.5.015:681.518.3

Voytenko V.P., Homenko M.A., Rudich P.V. Application of Artificial Neural Networks for the Identification of Industrial Control Objects // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.196-201.

The meaningful problem of practical implementation of automatic and remote modes in artificial neural network learning is formulated during the work with the real control object with the application of computer hardware and software and without such. The structure of a target closed automatic control system is suggested that includes a reference model aimed at the graded optimal control mode applying adapted microprocessor regulator with semi-automatic correction of model parameters.

Ill. 4. Ref.:5.

УДК 004.056.5:004.057.42

Соломаха В.В., Верьовко О.В. Захист арифметичних обчислень у комп'ютерних системах // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.202-205.

Представлена стохастична інформаційна технологія, яка дозволяє обробляти закодовану символічну інформацію, не розкодовуючи її. Це дає змогу забезпечити захист числової інформації під час виконання арифметичних операцій.

Іл..1. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 004.056.5:004.057.42

Соломаха В.В., Верёвко А.В. Защита арифметических вычислений в компьютерных системах // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.202-205.

Представлена стохастическая информационная технология, которая разрешает обрабатывать закодированную символную информацию, не раскодирова ее. Это дает возможность обеспечить защиту числовой информации при выполнении арифметических операций.

Ил..1. Библиогр.: 4 назв.

UDC 004.056.5:004.057.42

Solomaha V.V., Veryovko O.V. Protection of Arithmetic in Computer Systems // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.202-205.

It is presented stochastic information technology, which allows processing of the encoded character information, not decode it. This makes it possible to protect digital information in the performance of arithmetic operations.

Ill. 1. Ref.: 4.

УДК 519.6

Зацерковний В. І., Кривоберець С.В., Сімакін Ю.С. Методика створення еталонних моделей просторових об'єктів ГІС за допомогою регуляризуючого функціоналу // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.206-213.

Розглянута можливість застосування геоінформаційних систем та геоінформаційних технологій для оцінки стану природного середовища. Розроблена математична модель на базі регуляризуючого функціоналу для діагностування станів навколишнього середовища.

Іл. 2. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 519.6

Зацерковный В.И., Кривоберец С.В., Симакин Ю.С. Методика создания эталонных моделей пространственных объектов ГИС с помощью регуляризующего функционала // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.206-213.

Рассмотрена возможность применения геоинформационных систем и геоинформационных технологий для оценки состояния естественной среды. Разработана математическая модель на базе регуляризующего функционала для диагностирования состояний окружающей среды.

Ил. 2. Библиогр.: 5 назв.

UDC 519.6

Zatcerkovnyi V.I., Krivoberets S.V., Simakin Y.S. Method of Creation of Standard Models of Spatial Objects of GIS by a Regularizing Functional // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.206-213.

Possibility of application of the geoinformation systems and geoinformation technologies for the estimation of the state of natural environment is considered. It is developed mathematical model on the base of regularizing functional for diagnosing of conditions of environment.

Ill. 2. Ref.: 5.

УДК 004.274

Цулун О.В., Роговенко А.І. Архітектура криптографічного акселератора з можливістю зміни криптографічного алгоритму // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.214-219.

Проведено огляд існуючих криптографічних акселераторів. Запропонована архітектура криптографічного акселератора, яка дозволяє змінювати апаратно реалізовані криптографічні алгоритми, інтегрувати акселератор в процесорні системи з різними системними магістралями та забезпечує скорочення часу виконання криптографічних операцій.

Іл.6. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 004.274

Цулун А.В., Роговенко А.И. Архитектура криптографического акселератора с возможностью изменения криптографического алгоритма // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.214-219.

Проведен обзор существующих криптографических акселераторов. Предложена архитектура криптографического акселератора, которая позволяет изменять аппаратно реализованные криптографические алгоритмы, интегрировать акселератор в процессорные системы с различными системными магистральями и обеспечивает сокращение времени на выполнение криптографических операций.

Ил.6. Библиогр.: 7 назв.

UDC 004.274

Tsulun O.V., Rogovenko A.I. Cryptographic accelerator architecture with the ability to change the cryptographic algorithm // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.214-219.

A review of the existing cryptographic accelerators have been done. Proposed architecture of a cryptographic accelerator that lets you change the hardware-based cryptographic algorithms, integrate the accelerator processor systems with various system buses and reduce the time to perform cryptographic operations.

Ill. 6. Ref.: 7.

УДК 620.197.3

Сиза О.І., Савченко О.М., Квашук Ю.В., Гаценко С.В. Інгібіторний захист обладнання харчової промисловості // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту, 2011. – № 1(47). С.220-224.

На основі комплексної оцінки корозійно-електрохімічної поведінки сталі досліджено екологічно безпечні інгібітори корозії – водні витяжки із зерен гірчиці (ВГ) і коріння хрину (ВХ) у водопровідній воді. Виявлена залежність протикорозійної активності досліджених рослинних добавок від їх концентрації. Максимальні захисні властивості спостерігаються при застосуванні інгібітора ВГ (ступінь захисту $Z = 93,79\%$).

Лл.2. Бібліогр. 10.

УДК 620.197.3

Сизая О.И., Савченко О.Н., Квашук Ю.В., Гаценко С.В. Ингибиторная защита оборудования пищевой промышленности // Вестн. Черниг. Гос. Технолог. ун-та, 2011. - №1(47). С.220-224.

На основании комплексной оценки коррозионно-электрохимического поведения сталей, исследованы экологически безопасные ингибиторы коррозии – водные вытяжки из зерен горчицы (ВГ) и корней хрена (ВХ) в водопроводной воде. Выявлена зависимость противокоррозионной активности исследованных растительных добавок от их концентрации. Максимальные защитные свойства наблюдаются при применении ингибитора ВГ (степень защиты $Z = 93,79\%$). ,

Илл. 2. Библиогр. 10.

UDC 620.197.3

Syza O.I., Savchenko O.M., Kvashuk Y.V., Gatcenko S.V. Inhibitive Protection of Equipment of the Food-processing Industry // Journal of Chernihiv State Technological University, 2011. № 1(47). P.220-224.

On the basis of a complex estimation of corrosive-electrochemical behaviour of steels are investigated ecologically safe inhibitory corrosion - water extracts from grains of mustard (ВГ) and коренья horse-radish (ВХ) in water water. The revealed dependence of anticorrosive activity of the investigated vegetative additives on their concentration. The maximal protective properties are observed at application inhibitory ВГ (a degree of protection $Z = 93,79\%$).

Ill. 2. Ref. 10.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, ЯКІ НАДАЮТЬСЯ ДО ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Статтю подають у редакцію однією із мов (українською, російською або англійською), надруковану через 1 міжрядковий інтервал на білому папері формату А4. Кожна сторінка має бути підписана усіма авторами.

Обсяг статті з анотацією, рисунками, таблицями, списком літератури – 3-7 повні сторінки (остання сторінка має бути заповнена не менш ніж на 80 %). Кількість співавторів не повинна перевищувати трьох. В збірнику можна розміщувати не більше однієї статті на кожного автора.

Для публікації статті необхідно надіслати до редакції наступні матеріали: друкований текст статті з підписами авторів в 2-х примірниках; експертний висновок, завірений печаткою; рецензія доктора наук з зазначенням наукового ступеня рецензента, вченого звання, посади, місця роботи, завірена печаткою; відомості про авторів українською, російською й англійською мовами (окремий файл і надрукована сторінка): прізвище, ім'я, по батькові, рік народження, повна назва і дата закінчення вищого навчального закладу, факультет, науковий ступінь, вчене звання, посада, місце роботи (кафедра, факультет, інститут – без скорочень), напрям наукової діяльності, службова й електронна адреси, службовий і домашній номери телефонів; анотації українською, російською, англійською мовами; дискета зі статтею, анотаціями та відомостями про авторів. Обсяг електронного файлу статті – не більший 1 МБ. Рисунки подаються окремими файлами. Допускається надсилання електронної копії статті, анотацій та відомостей про авторів електронною поштою

Стаття повинна бути структурована (поділена на розділи з заголовками) і відповідно до вимог ВАК України мати такі елементи (Бюл. ВАК України. – 2003. – №1. – С. 2): постановку проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

Структура і форматування статті Статтю набирають в текстовому редакторі Word for Windows 98/2000/XP шрифтом Times New Roman (кегель 12) у режимі автоматичної розстановки переносів (переноси у назві статті не допускаються). Розміри полів сторінок: зліва, низу, зверху, справа – 25 мм.

Форматування окремих елементів у структурі статті: 1) індекс УДК (вирівнювання по лівому полю без абзацу, кегель 12); 2) ініціали, прізвища авторів (розміщення по правому полю, кегель 12, малі літери, напівжирний), науковий ступінь (звичайний); 3) назва статті (вирівнювання по центру без абзацу, відступ зверху 6 пт, кегель 12, великі літери, напівжирний); 4) місце роботи авторів, електронні адреси (вирівнювання по центру без абзацу, відступ зверху 6 пт, кегель 10); 5) анотація мовою основного змісту статті (вирівнювання по ширині без абзацу, відступ зверху і низу 6 пт, відступ зліва і справа 0,5 см, кегель 10, курсив); 6) текст статті з заголовками (вирівнювання по ширині, абзац 0,5 см, кегель 12); 7) список літератури (вирівнювання по ширині без абзацу, кегель 12).

Назва статті повинна бути максимально стислою (до 8 слів, 2 рядка). Ключовим словом у назві статті має бути іменник у називному відмінку.

В анотації в стислій формі викладається основний зміст статті. Обсяг анотації не повинен перевищувати 14 рядків.

Виклад матеріалу статті має бути ясным, без повторів, без дублювання в тексті даних таблиць та їхніх заголовків, рисунків та підписів до них. У статті необхідно використовувати термінологію, прийняту Державним стандартом. За науковий зміст викладеного матеріалу і термінологію відповідають автори.

Відступи заголовків розділів статті (напівжирний шрифт, кегель 12) від тексту зверху – 6 пт, низу – 3 пт.

При виборі одиниць фізичних величин слід дотримуватися Міжнародної системи одиниць (СІ).

Абревіатуру розшифровують у тексті статті, починаючи з місця, де вона вперше зустрічається.

Формули Хімічні формули набирають прямим шрифтом. Формули, на які є посилання, нумерують арабськими цифрами в круглих дужках справа. Обов'язково подають розшифровку літерних позначень величин у формулах. Для набору позначень фізичних величин використовують редактор формул Microsoft Equation: 1) змінні, латинські літери – курсив, Times New Roman; 2) функції, цифри, українські літери – прямий, Times New Roman; 3) матриці, вектори – напівжирний, прямий, Times New Roman; 4) грецькі літери, символи – прямий, Symbol; 5) розміри: звичайний 11 пт, великий індекс 7 пт, малий індекс 6 пт, великий символ 14 пт, малий символ 11 пт.

Рисунки Рисунки виконують у вигляді растрових зображень у форматах TIFF, JPG, BMP (окремий файл). Не рекомендується використання закладеної графіки Microsoft Word. Елементи зображення повинні бути якісними (300–600 dpi), чорно-білими або відтінками сірого, товщина основних і допоміжних ліній має відрізнятися у 2 рази (наприклад, товщина основної лінії 2 pt, допоміжної – 1 pt). Деталі ілюстрації нумерують арабськими цифрами (кегель 12), починаючи з цифри 1, без пропусків і повторень або за годинниковою стрілкою, або по горизонталі зліва направо, або по вертикалі зверху вниз. Написи на рисунках заміняють літерами (кегель 11), а криві на графіках позначають цифрами (кегель 12), які роз'яснюються в підписах до рисунків. Усі рисунки повинні мати підписи, які вирівнюють по лівому краю. Підписи до рисунків – кегель 10 (курсив).

Таблиці Розмір тексту таблиць – кегель 12. Усі таблиці повинні мати заголовки. Нумераційний заголовок таблиць (кегель 10) вирівнюють по правому краю таблиці, тематичний заголовок таблиці (по центру, кегель 10, курсив). Усі рисунки і таблиці повинні мати посилання в тексті і бути розташовані після них.

Список літературних джерел У списку літературних джерел (до 10 найменувань), який подається в порядку посилання, обов'язково вказують авторів, повну назву книги, том (номер, випуск), місто видання, видавництво, рік видання, загальну кількість сторінок книги, початкову і кінцеву сторінки статті (відповідно до ГОСТ 7.1-84). Якщо авторів більше п'яти, вказують перших трьох. Бібліографічні записи повинні бути пронумеровані й мати посилання на джерела в тексті статті в квадратних дужках. Посилання на неопубліковані роботи не допускаються.

Примітки Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без узгодження з автором.

Адреса редакції: м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, кімн. 207, 14027, тел.: (04622)3-42-44

E-mail: cstsu@stu.cn.ua

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ВЕСТНИКА ЧЕРНИГОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Объём статей – 3-7 полных страниц с аннотацией, рисунками, таблицами, списком литературы (последняя страница должна быть заполнена не менее, чем на 3/4).

Статью набирают в текстовом редакторе Word for Windows 98/2000/XP шрифтом Times New Roman (кегель 12) в режиме автоматической расстановки переносов (переносы в названии статьи не допускаются). Размеры полей страниц: слева, снизу, сверху, справа – 25 мм, через единичный межстрочный интервал на белой бумаге формата А4.

Стиль УДК: шрифт Times New Roman (кегель 12), выравнивание по левому полю без абзаца, отступ снизу 6 пт.

Стиль НАЗВАНИЯ: шрифт Times New Roman (кегель 12), выравнивание по центру без абзаца, отступ сверху 6 пт, большие буквы, полужирный.

Стиль АВТОРОВ И ОРГАНИЗАЦИЙ: шрифт Times New Roman (кегель 12), размещение по левому полю, малые буквы, полужирный, научная степень (обычный). Место работы авторов (выравнивание по левому полю без абзаца, отступ сверху 6 пт, кегель 10) размещаются непосредственно после фамилии автора. Количество авторов не более 3-х. В сборнике можно размещать не более одной статьи на каждого автора.

Стиль текста: текст статьи с заголовками (выравнивание по ширине, абзац 0,5 см, кегель 12). Название статьи должно быть максимально сжатым (до 12 слов, 3 строки). В аннотации в сжатой форме излагается основное содержание статьи. Объём аннотации не должен превышать 14 строк. Изложение материала статьи должно быть ясным, без повторов, без дублирования в тексте данных таблиц и их заголовков, рисунков и подписей к ним. В статье необходимо использовать терминологию, принятую Государственным стандартом. За научное содержание материала статьи и терминологию ответственность несут авторы. Отступы заголовков разделов статьи (полужирный шрифт, кегель 12) от текста сверху – 6 пт, снизу – 3 пт. При выборе единиц физических величин следует придерживаться Международной системы единиц (СИ). Абревиатуру расшифровывают в тексте статьи, начиная с места, где она впервые встречается.

Стиль ссылок: название **Список литературных источников** (выравнивание по ширине без абзаца, кегель 12). В списке литературных источников (до 10 наименований), который формируется в порядке ссылки согласно требований к оформлению библиографического описания ВАК Украины. Библиографические записи должны быть пронумерованы и иметь ссылки на источники в тексте статьи в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Стиль рисунков: рисунки выполняют в виде растровых изображений в форматах TIFF, JPG, BMP (отдельный файл). Не рекомендуется использование заложённой графики Microsoft Word. Элементы изображения должны быть качественными (300–600 dpi), чёрно-белыми или с оттенками серого, толщина основных и вспомогательных линий должна отличаться в 2 раза (например, толщина основной линии 2 pt, вспомогательной – 1 pt). Детали иллюстрации нумеруют арабскими цифрами (кегель 12), начиная с цифры 1, без пропусков и повторов или по часовой стрелке, или по горизонтали слева направо, или по вертикали. Надписи на рисунках заменяют буквами (кегель 11), а кривые на графиках обозначают цифрами (кегель 12), которые разъясняются в подписях к рисункам. Все рисунки должны иметь подписи, которые выравнивают по левому краю. Подписи к рисункам – кегель 10 (курсив).

Стиль формул: химические формулы набирают прямым шрифтом. Формулы, на которые есть ссылки, нумеруют арабскими цифрами в круглых скобках справа. Обязательно подают расшифровку буквенных обозначений величин в формулах. Для набора обозначений физических величин используют редактор формул Microsoft Equation: 1) переменные, латинские буквы – курсив, Times New Roman; 2) функции, цифры, украинские буквы – курсив, Times New Roman; 3) матрицы, векторы – курсив, Times New Roman; 4) греческие буквы, символы – курсив, Symbol; 5) размеры: обычный 11 пт, большой индекс 7 пт, малый индекс 6 пт, большой символ 14 пт, малый символ 11 пт.

Стиль таблиц: Размер текста таблиц – кегель 12. Все таблицы должны иметь заголовки. Нумерационный заголовок таблиц (кегель 10) выравнивают по правому краю таблицы, тематический заголовок таблицы (по центру, кегель 10, курсив). Все рисунки и таблицы должны иметь ссылки в тексте и быть размещены после них.

Статья должна быть структурирована (поделена на разделы с заголовками) и в соответствии с требованиями ВАК Украины иметь такие элементы (Бюл. ВАК України. – 2003. – №1. – С. 2): постановку проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими заданиями; анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья; формулирование целей статьи или постановка задачи; изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы (заключение).

Примечание. Статьи, не соответствующие указанным требованиям, не рассматриваются. В статью могут быть внесены изменения редакционного характера без согласования с автором. Ответственность за содержание статьи несут авторы публикации.

К статье обязательно подаются:

Печатный текст статьи с подписями авторов в одном экземпляре; рецензия доктора наук с указанием научной степени рецензента, учёного звания, должности, места работы, заверенная печатью; сведения об авторах подаются на языке написания статьи (отдельный файл и напечатанная страница): фамилия, имя, отчество, год рождения, полное название высшего учебного заведения, научная степень, учёное звание, должность, место работы (кафедра, университет – без сокращений), направление научной деятельности, служебный адрес, служебный и мобильный номера телефонов; аннотации на украинском, русском, английском языках; диск со статьёй, аннотациями и сведениями об авторах. Кроме наличия рисунков в тексте статьи, рисунки подаются отдельными файлами. Допускается пересылка электронной копии статьи, аннотаций и сведений об авторах электронной почтой. Авторы других государств могут подавать статьи на русском и английском языках.

Материалы присылать по адресу: Україна, 14027, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, кімн. 242.

E-mail: cst@stu.cn.ua. **Телефон для справок:** (04622)3-42-44

REQUIREMENTS TO SHAPING OF ARTICLES FOR THE JOURNAL OF THE CHERNIGOV STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

Volume of articles - 5-10 full pages with the summary, illustrations, tables, the literature list (last page should be filled not less, than on 3/4).

Article compose in text editor Word for Windows 98/2000/XP font Times New Roman (type size 12) in a mode of automatic arrangement of carryings over (carryings over to article name are not supposed). The sizes of fields of pages: at the left, from below, from above, on the right - 25 mm, through an individual line spacing on a white paper of format A4.

Style of UDC: font Times New Roman (type size 12), alignment on the left field without the paragraph, a space from below 6 pt.

Style of the NAME: font Times New Roman (type size 12), alignment on the centre without the paragraph, a space from above 6 pt, the big letters, semiboldface.

Style of AUTHORS And the ORGANIZATIONS: font Times New Roman (type size 12), placing on the left field, small letters, semiboldface), scientific degree (usual). A place of work of authors (alignment on the left field without the paragraph, a space from above 6 pt, type size 10) take places directly after a surname of the author. Quantity of authors no more than 4.

Style of the text: the text of article with headings (alignment on width, paragraph 0,5sm, type size 12). Article name should be as much as possible compressed (to 12 words, 3 lines). In the summary in the compressed form the basic maintenance of article is stated. The summary volume should not exceed 14 lines. The statement of a material of article should be clear, without repetitions, without duplication in the text of the given tables and their headings, drawings and signatures to them. In article it is necessary to use the terminology accepted in State standard. For the scientific maintenance of a material of article and terminology responsibility is born by authors. Spaces of headings of sections of article (a semiboldface font, type size 12) from the text from above-6 pt, from below-3 pt. At choice units of physical sizes it is necessary to adhere to International system of units (CI). Abbreviation decipher in article text, since a place where it meets for the first time.

Style of references: the name The list of literature sources (alignment on width without the paragraph, type size 12). In the list of literature sources (to 10 names) which is formed as the reference it agree requirements to registration of bibliographic description BAK of Ukraine. Bibliographic records should be numbered and have references to sources in article text in brackets. References to the neopublished works are not supposed.

Style of illustrations: illustrations carry out in the form of raster images in formats TIFF, JPG, BMP (a separate file). Use of put in pawn drawing Microsoft Word is not recommended. Image elements should be qualitative (300-600 dpi), black-and-white or with shades grey, the thickness of the basic and auxiliary lines should differ in 2 times (for example, a thickness of the basic line 2 pt, auxiliary - 1 pt). Illustration details number in the Arabian figures (type size 12), since figure 1, without admissions and repetitions either clockwise, or across from left to right, or on a vertical. Inscriptions in illustrations replace with letters (type size 11), and curves on schedules designate in figures (type size 12) which are explained in signatures to illustrations. All illustrations should have signatures which level by a left edge. Signatures to illustrations - type size 10 (italics).

Style of formulas: chemical formulas compose a direct font. Formulas on which there are references, number in the Arabian figures in parentheses on the right. Necessarily submit decoding of letter designations of sizes in formulas. For a set of designations of physical sizes use the editor of formulas Microsoft Equation: 1) variable, Latin letters - italics, Times New Roman; 2) functions, figures, the Ukrainian letters - italics, Times New Roman; 3) matrixes, vectors - italics, Times New Roman; 4) the Greek letters, symbols - italics, Symbol; 5) the sizes: usual 11 pt, the big index 7 pt, a small index 6 pt, the big symbol 14 pt, a small symbol 11 pt.

Style of tables: the size of the text of tables - type size 12. All tables should have headings. Numerical heading of tables (type size 10) level by a table right edge, thematic heading of the table (on the centre, type size 10, italics). All illustrations and tables should have references in the text and to be placed after them.

Article should be structured (is divided into sections with headings) and according to requirements BAK of Ukraine to have such elements (Бюл. ВАК України. - 2003. - №1. - С. 2): problem statement in a general view and its communication with the important scientific or practical tasks; the analysis of last researches and publications in which there is begun the decision of the given problem and against which the author leans, allocation unresolved before parts of the general problem which article is devoted; a formulation of the purposes of article or problem statement; a statement of the basic material of research with a full substantiation of the received scientific results; conclusions (conclusion).

The note. Articles mismatching specified requirements, are not considered. Changes of editorial character can be made to article without the coordination with the author. Article maintenance responsibility is born by authors of the publication.

To article necessarily give:

The printing text of article with signatures of authors in one copy; the review of the doctor of sciences with indication of scientific degree of the reviewer, an academic status, a post, the work place, assured by the press; data on authors move in language of a writing of article (a separate file and the printed page): a surname, a name, a patronymic, year of the birth, the full name of a higher educational institution, scientific degree, an academic status, a post, a work place (chair, university - without reductions), a direction of scientific activity, the office address, office and mobile phone numbers, E-mail; summaries in the Ukrainian, Russian, English languages; a disk with article, summaries and data on authors. Except presence of illustrations in article text, illustrations give separate files. Transfer of an electronic copy of article, summaries and data on authors is supposed by e-mail. Authors of other states can submit articles in Russian and English languages.

Materials to send to the address: Ukraine, 14027, Chtrnigov, Shevchenko str., 95, build. 1, r. 242.

E-mail: cstn@stu.cn.ua. **Phone for inquiries:** +38(04622)3-42-44

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

В І С Н И К
ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

№ 1(47)

Головний редактор: В.В. Казимир
Відповідальний за випуск: О.І. Пилипенко
Комп'ютерний макет: С.В. Бойко

Підписано до друку 08.02.2011 р. Формат 60х90/8. Папір типовий. Друк офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. – 20,37. Обл. – вид. арк. – 24,51.
Тираж 300 прим. Замовлення № 193.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського державного технологічного університету 14027,
Україна м. Чернігів, вул. Шевченка, 95. Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
України суб'єктів видавничої справи ДК №840 від 04.03.2002 р.