МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОСТІ НАПРУГИ**І. В. Жежеленко, Ю. А. Папайка, О. Г. Лисенко, М. В. Рогоза**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: epp@pstu.edu, paraika@ukr.net, lysenkoag@ukr.net, rogozam@nmu.org.ua

С. М. Якимець

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: ysm_seem@meta.ua

Дана публікація розглядає наукову проблему надійності систем електропостачання при зростанні частки нелінійного навантаження, що є невід'ємним чинником розвитку промислового виробництва сучасності. Показані сучасні методи визначення показників надійності окремих елементів при різних ієрархіях систем електропостачання гірничих підприємств та параметрів енергетичної системи. Результати моделювання дозволяють оцінювати діапазони зміни параметрів надійності при довірливих варіаціях вентильних перетворювачів в електричних мережах, їх потужності та схем комутації. Розроблені моделі покладено в основу комплексної методики визначення оптимального електропостачання. Методика може бути застосована для систем електропостачання міст, підприємств та електроенергетичних об'єднань.

Ключові слова: якість електричної енергії, показники надійності електрообладнання, вентильні перетворювачі, гірничі підприємства, електричні мережі, стаціонарні установки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ**И. В. Жежеленко, Ю. А. Папайка, А. Г. Лысенко, М. В. Рогоза**

Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»

просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: epp@pstu.edu, paraika@ukr.net, lysenkoag@ukr.net, rogozam@nmu.org.ua

С. Н. Якимец

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: ysm_seem@meta.ua

Даная публикация рассматривает научную проблему надежности систем электроснабжения при увеличении доли нелинейной нагрузки, что является неотъемлемым фактором развития промышленного современного производства. Показаны современные методы определения показателей надежности отдельных элементов в случаях различных иерархий систем электроснабжения горных предприятий и параметров энергетической системы. Результаты моделирования позволяют оценить диапазоны изменения параметров надежности при произвольных вариациях вентильных преобразователей в электрических сетях, их мощности и схем коммутации. Разработанные модели положены в основу комплексной методики определения оптимального электроснабжения. Методика может быть использована для систем электроснабжения городов, предприятий и электроэнергетических объединений.

Ключевые слова: качество электрической энергии, показатели надежности электрооборудования, вентильные преобразователи, горные предприятия, электрические сети, стационарные установки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Головною проблемою нормального функціонування енергосистеми України є енергетична ефективність передачі та споживання електроенергії, а також зниження кінцевого споживання електроенергії усіма об'єктами народного господарства. Наразі українські електроенергетичні мережі характеризуються надвисоким рівнем втрат електроенергії при передачі (до 20 %). Порівняно з країнами з розвинутою економікою цей показник набагато більший (для країн Західної Європи втрати складають 4–5 %, США – 6 %) [1, 2, 9, 17, 19].

Високий рівень втрат в електричних мережах України пов'язаний з низьким рівнем компенсації реактивної потужності, застарілими основними фондами об'єктів електроенергетики, недостатнім використанням засобів оптимізації режимів роботи і

регулювання напруги, не вирішеністю проблем якості електричної енергії [3–8].

Енергетична система включає в себе такі величезні кількості джерел електромагнітних перешкод: передавальні лінії електропередач, розподільні пристрої (підстанції), повітряні лінії, кабельні лінії, приймачі електроенергії, засоби автоматизації, управління і безпеки.

Електрична енергосистема та система електропостачання є сприятливим середовищем для генерації, розподілу та впливу електромагнітних перешкод на інші системні блоки (приймачі електричної енергії). Електромагнітні перешкоди мають абсолютно негативний вплив на електромережу, і вони здатні серйозно знижувати якість електроенергії [9].

Якість електроенергії – це комплекс властивостей, які визначають її вплив на приймачі електроенергії і можуть бути виражені в кількісних показниках. Ці показники якості електроенергії характеризують рівень електромагнітної емісії і можуть бути розділені на її частоту, ефективне значення напруги, форму кривої, симетрії та імпульсів напруги. На станціях та підстанціях можуть впливати ці електричні перешкоди у разі перевищення встановлених лімітів.

Низький рівень якості електричної енергії призводить до значного зниження енергетичної ефективності електричних мереж за цілою низкою показників. Проблема якості електричної енергії – це складова комплексного поняття електромагнітної сумісності системи електропостачання (СЕП). Вона визнана провідними світовими вченими та відноситься до числа найважливіших проблем сучасної електроенергетики і є частиною проблеми підвищення енергоефективності електричних мереж [5–8].

Питання електромагнітної сумісності систем електропостачання з нелінійними навантаженнями, у тому числі енергоефективні режими роботи електричних мереж досліджувалися в роботах Шидловського А.К., Жаркіна А.Ф., Саєнка Ю.Л., Железка Ю.С., Півняка Г.Г., Михальського В.М., Гриба О.Г., Борисова Б.П., Вагіна Г.Я, Маєвського О.А., Кузнецова В.Г., Кутіна В.М., Солдаткіної Л.А., Іванова В.С., Соколова В.І., Трофімова Г.Г.

Разом з тим виконаний аналіз праць показав, що більшість результатів не мають універсального характеру та не повною мірою враховують зміни в електроенергетиці. Єдиний погляд на фізичну картину, що відбувається в системі електропостачання гірничих підприємств при нових умовах функціонування, відсутній, а відомі моделі не дають змоги прогнозувати рівні електромагнітної сумісності при системних змінах характеру та потужності нелінійного навантаження.

Виходячи із сказаного, постає задача розробки математичної моделі розрахунку показників надійності електрообладнання на прикладі типової схеми гірничого підприємства при варіативній комутації потужних нелінійних електроприймачів. Це дасть можливість оптимізувати режими електричних мереж та розробити нові аналітичні залежності, які будуть враховувати взаємний вплив показників якості електроенергії на показники надійності системи електропостачання.

Дана наукова робота спрямована на поєднання двох важливих напрямків: якості електроенергії та надійності електропостачання. Ці проблеми є актуальними виходячи з необхідності забезпечення енергетично ефективних режимів роботи системи в цілому.

Метою даної роботи є дослідження показників надійності й якості систем електропостачання гірничих підприємств при зростанні частки

потужних нелінійних навантажень з урахуванням індивідуальних «профіль».

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Основним завданням для досягнення поставленої мети оптимізації режимів електричних мереж є розробка нових аналітичних залежностей, які враховують взаємний вплив показників якості електроенергії на показники надійності системи електропостачання.

Для прийняття початкових умов та рівнів припущення були досліджені всі можливі схемні комбінації систем електропостачання гірничих підприємств з потужними нелінійними навантаженнями та отримані граничні значення елементів схем заміщення. Це дозволило отримати уніфіковані показники схем заміщення та розробити адекватні моделі для оцінки зниження надійності електропостачання при погіршенні якості напруги.

Розробка алгоритму моделювання показників надійності

Першочерговим завданням для моделювання показників надійності є збір та обробка статистичних даних щодо існуючої системи електропостачання.

Основним джерелом для адекватної оцінки надійності систем електропостачання гірничих підприємств є статистичні дані про аварійні ситуації та планові відключення. Використовуючи математичні алгоритми обробки зібраних даних, ми можемо визначити показники надійності на основі спостережень.

Відповідно, весь процес збору та обробки статистичних даних можна представити наступним алгоритмом математичного моделювання показників надійності електропостачання:

- збір, систематизація та групування даних за факторами впливу;

- статистична оцінка основних показників надійності, побудова статистичної оцінки точності розподілу та статистичних оцінок;

- математичні моделі, які враховують показники викривлення синусоїдальності напруги;

- висновки щодо зменшення терміну служби електрообладнання внаслідок погіршення якості напруги.

Подібний алгоритм має уніфікований характер та може застосовуватися для оцінки надійності систем електропостачання будь-яких промислових підприємств, сільських та міських електричних мереж.

Складання уніфікованих схем заміщення

Враховуючи стратегічне значення вугільних шахт для забезпечення енергетичної незалежності України оцінимо показники надійності електрообладнання на прикладі типової схеми гірничого підприємства, приведеної на рисунку 1 [10, 11]. Трирівневі схеми розподілу електричної енергії найбільш часто застосовуються на вугільних підприємствах України.

Рисунок1 – Типова функціональна схема електропостачання вугільної шахти

Схему розбито на зони, в яких відбувається емісія електромагнітних завад (точка розподілу з енергосистемою, вузол навантаження 6–10 кВ зі стаціонарними установками, мережі 0,66 кВ підземних споживачів). Подібний підхід дозволяє отримати гнучкі залежності показників надійності при довільних кількості та потужності вентильних перетворювачів у мережі.

Для визначення рівня впливу якості напруги на показники надійності, перш за все, необхідно розрахувати показники надійності при нормальних умовах роботи системи електропостачання на рисунку 1.

Дослідження в області надійності систем електропостачання за низької якості напруги проводить наукова школа професора Жежеленко І.В [9, 17, 19]. Моделювання показників надійності електрообладнання виконано з урахуванням додаткових втрат активної потужності, що виникають при періодичній дії вищих гармонік (ВГ) виходячи з виразу:

$$\Delta P_n = \Delta P_{nom} \rho \sum_{n=2}^n \Lambda_n (K_{MTHD} U_n)^2,$$

де ΔP_{nom} – номінальні втрати при синусоїдальній

напрузі, $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$ – коефіцієнт гармонійних втрат, значення якого залежать від кількості вищих гармонік у мережі; ρ – індекс втрат, U_n – значення гармоніки напруги порядку n , n – номер гармоніки напруги, що враховується; K_{MTHD} – коефіцієнт максимуму графіку зміни ВГ.

Коефіцієнти графіків вищих гармонік для вугільних підприємств були отримані шляхом експериментальних досліджень показників електромагнітної сумісності на діючих шахтах з потужними нелінійними навантаженнями [9, 17, 19].

При моделюванні використовувались методи теоретичної електротехніки для еквівалентування схем заміщення електричних мереж при послідовно-паралельному з'єднанні елементів. Використовуючи їх, були розраховані показники надійності в трьох різних точках схеми ($T1$, $T2$, $T3$). Для розрахунку показників надійності в будь-якій точці схеми необхідно знати такі статистичні дані, як: середня частота відмов, яка показує, скільки разів певний елемент може бути знижений за рік і середній час відновлення, що показує, скільки часу це потребує ремонту або заміни [9]. Схема заміщення (рис. 2) дозволяє врахувати довільну комбінацію елементів

СЕП для визначення несинусоїдальності у вузлах навантаження.

Після розрахунків показників надійності виявлено залежності в трьох точках схеми. Утім, всі результати базуються на статистичних даних, а від реальних можуть відрізнятися. Щоб зрозуміти вплив вищих гармонік на показники надійності енергосистеми, необхідно зробити припущення, що результати розраховані для системи з чистим синусоїдальним струмом на будь-якому рівні енергосистеми [9].

Наступне припущення полягає в тому, що генерація вищих гармонік відбувається на стороні 0,66 та 6...10 кВ. Частотний спектр, який приймається у розрахунку, прийнятий стандартний в результаті експериментального моніторингу показників якості напруги вугільних шахт [17]. Основними об'єктами дослідження були трансформатори 6/0,66, 6/0,4 кВ всіх типів, кабельні лінії 6...10 кВ. Моделювання було виконано, враховуючи можливість переходу до децентралізованого електропостачання (обмеженню потужності енергосистеми) для оцінки перспективних змін індексу надійності при переході до нових принципів побудови інтелектуальних електричних мереж.

Рисунок 2 – Схема заміщення системи електропостачання

Показники надійності при несинусоїдальності напруги

Моделювання показників надійності силових трансформаторів

Відповідно до наукової проблеми, одним з основних показників енергетичної ефективності системи електропостачання є показники надійності трансформаторів, ліній електропередач, асинхронних двигунів та конденсаторних установок [15–16].

Для знаходження імпедансу всієї схеми системи електропостачання використовуємо коефіцієнт перерахунку, в основі якого покладено принцип затування електромагнітної перешкоди. Для дослідження впливу несинусоїдальності на надійність роботи силових трансформаторів. Щоб зрозуміти, як вищі гармоніки впливають на надійність енергосистеми, всі розрахунки повинні бути передбачені у трансформаторів найпоширеніших типів, таких як: ТМ-40; ТМ-63; ТМ-100; ТМ-160; ТМ-250; ТМ -400; ТМ-630; ТМ-1000; ТМ-1600; ТМ-2500. Коефіцієнт викривлення синусоїдальності на стороні 0,4 кВ та 6...10 кВ змінюється від 1 % до 12 %, що є максимально допустимим рівнем несинусоїдального коефіцієнта відповідно до стандартів.

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності в точках ТЗ можна знайти з виразу [9, 17]:

$$K_{U3} = \frac{\left(\frac{X_{*S} X_{*Tl(2)}}{X_{*S} + X_{*Tl(2)}} \right)}{X_{*Tl(1)} + \left(\frac{X_{*S} X_{*Tl(2)}}{X_{*S} + X_{*Tl(2)}} \right)} K_{U1}, \quad (1)$$

де X_{*S} – імпеданс енергосистеми, K_{U1} – коефіцієнт викривлення синусоїдальності у точці ТІ, $X_{*Tl(1)}$ – еквівалентний опір елементів, зведений до вузла ТІ.

Для знаходження значення додаткового нагріву, викликаного вищими гармоніками, нам необхідно знати такі значення [9]:

- нормальна робоча температура електрообладнання;
- номінальні втрати в обладнанні при синусоїдальній напрузі;
- додаткові втрати в елементах СЕП, викликані вищими гармоніками.

Нормальна робоча температура трансформатора становить близько 45 градусів Цельсія. Номінальні втрати в трансформаторах розраховуються за відомими залежностями [9].

Додаткові втрати в трансформаторах визначимо із застосуванням коефіцієнтів ВГ:

$$\Delta P_n = \Delta P_{nom} \rho \sum_{n=2}^N \Lambda_n U_{n*}^2, \quad (2)$$

де $U_{n*} = \frac{U_n}{U_{nom}}$ – відносне значення гармоніки напруги порядку n . Індекс втрат ρ_T для

трансформаторів розраховують з виразу:

$$\rho_T = \frac{0,6}{U_{SC}^2},$$

де U_{SC} – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Як відомо, додаткові втрати в енергосистемі можуть викликати додатковий нагрів, що має дуже негативні наслідки для обладнання. Зменшується надійність завдяки швидшому старінню ізоляції.

Відповідний дефіцит ізоляції можна розрахувати за допомогою наведеної нижче формули [9]:

$$\Delta T = 0,086 \Delta \tau + \frac{(0,086 \Delta \tau)^2}{2}, \quad (3)$$

де 0,086 – параметр Монтзингера, який ґрунтується на поправці, що кожні 8 градусів Цельсія перегріву ізоляції вище номінального значення, скорочує його робочий період в 2 рази; $\Delta \tau$ – перегрів ізоляції, викликаний вищими гармоніками.

Описана вище методологія може дати нам тільки значення дефіциту ізоляції, оскільки співвідношення між додатковими втратами ґрунтується на поправці, що всі трансформатори, електричні машини та інші елементи об'єднані в одну систему.

Тому значення додаткового нагрівання електричних машин, викликане вищими гармоніками, можна знайти з співвідношення [9]:

$$\Delta \tau = \tau_s \frac{\Delta P_n}{\Delta P_{nom}}, \quad (4)$$

де ΔP_n – втрати при несинусоїдальній напрузі, ΔP_{nom} – номінальні втрати, викликані чистим синусоїдальним струмом τ_s – нагрів електрообладнання при синусоїдальній напрузі.

Після знаходження значення перегріву ізоляції його можна просто перетворити в індекс надійності, який може показати вплив вищих гармонік на надійність системи електропостачання.

Рисунок 3 – Функція індексу надійності в залежності від температури обладнання

Значення індексу надійності можна знайти за допомогою рис. 3 [6, 16, 18]. Залежність є універсальною для масляних трансформаторів серії ТМ.

Результатом моделювання є отримання залежностей терміну служби електрообладнання від коефіцієнту викривлення синусоїдальності напруги. Електрообладнання, яке підключено до точок $T1$, $T2$, $T3$ має різні показники надійності, що дозволяє уніфікувати розрахунки залежно від місця підключення джерела електромагнітної завади.

Зниження значення терміну служби відрізняється від точки до точки. Наприклад, для трансформатора ТМ-2500 загальне зниження показника в точці $T2$

менше, ніж результати зниження показника надійності в точці $T3$ і відрізняються на 18 %, результати в точці $T1$ значно менші, ніж результати зниження індексу надійності в точці $T2$ і в цьому випадку вони відрізняються на 93,5 %. Це пояснюється затуханням рівня несинусоїдальності напруги та відсутністю резонансів на даних частотах. Результати моделювання показників надійності були отримані для трьох розрахункових точок. Характер графічних залежностей показано на рис. 4 і 5. Несинусоїдальність при цьому врахована перегрівом ізоляції електричних машин струмами ВГ.

Рисунок 4 – Залежності терміну служби силових трансформаторів від коефіцієнта викривлення синусоїдальності THD : а) точка $T1$, б) точка $T2$, в) точка $T3$

Рисунок 5 – Зниження надійності силових трансформаторів від коефіцієнта викривлення синусоїдальності THD : а) точка $T1$, б) точка $T2$

Моделювання показників надійності кабельних ліній 6 кВ

Вищі гармоніки мають значний вплив на скорочення терміну служби кабельних ліній. При високому рівні вищих гармонік або високому значенні коефіцієнта викривлення синусоїдальності кабельні лінії старіють набагато швидше, ніж при синусоїдальній напрузі [9, 13–16]. Це відбувається завдяки додатковому нагріву кабельної лінії, викликаній тими вищими гармоніками, а також збільшенням процесів іонізації в ній.

Для розрахунку додаткового нагріву ізоляції кабельної лінії, що виникає через несинусоїдальний сигнал, необхідно використовувати спеціальну теплову схему заміщення, яка показана на рис. 6 [9, 15, 17].

На рисунку позначено: T_c – температура провідників кабельних ліній; T_s – температура навколишнього середовища; P_c – втрати активної потужності в кабельних лініях; P_{IS} – втрати активної потужності в ізоляції кабеля; S_{IS} , $S_{C.L.}$, S_G – тепловий опір ізоляції кабелю, покривних шарів і ґрунту.

Рисунок 6 – Теплова схема заміщення трижильної кабельної лінії, середньої напруги, прокладка під землею

Додатковий нагрів кабельних ліній можна розрахувати за допомогою формули [1]:

$$\Delta\tau = \theta_{cr} \sum_{v=2}^n I_v^2 (0,187 + 0,532\sqrt{v}). \quad (5)$$

Перегрів кабельних ліній, викликаних втратами активної потужності:

$$\theta_{cv} = 3P_{c.loss} (S_{IS} + S_{C.L.} + S_G) = 3I_{loss}^2 R_c, \quad (6)$$

де $P_{c.loss}$ – втрати активної потужності в провідниках для номінального режиму роботи або з номінальним значенням струму I_{loss} .

Опір теплової ізоляції S_{IS} можна розрахувати [11, 15, 17]:

$$S_{IS} = \frac{\sigma_{IS}}{6\pi} G, \quad (7)$$

де σ_{IS} – питомий тепловий опір ізоляції;
 G – геометричний коефіцієнт.

Тепловий опір покривних шарів можна розрахувати [11, 15, 17]:

$$S_{C.L.} = \frac{\sigma_{C.L.}}{2\pi} \ln \frac{R_{C.L.} + \delta_{C.L.}}{R_{C.L.}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{C.L.}$ – питомий термічний опір покривного шару, $R_{C.L.}$ – зовнішній радіус покривного шару, $\delta_{C.L.}$ – товщина покривного шару.

Тепловий опір ґрунту можна знайти [1, 7, 9]:

$$S_G = \frac{\sigma_G}{2\pi} \ln \frac{4L}{D}, \quad (9)$$

де σ_G – питомий тепловий опір ґрунту, що оточує кабельну лінію; D – зовнішній діаметр кабельної лінії; L – глибина прокладання кабельної лінії.

Моделювання проведено для особливих марок кабелів КШВГ з перетином 50...120 мм², які застосовують на гірничих підприємствах.

Функціональна залежність показника надійності від перегріву при протіканні вищих гармонік показана на рис. 7 [6, 16, 18].

Рисунок 7 – Залежність показника надійності роботи кабельних ліній від перевищення температури

а)

б)

Рисунок 8 – Залежності терміну служби кабельних ліній від коефіцієнта викривлення синусоїдальності THD :
а) мережі поверхні; б) підземні електричні мережі

Враховуючи наявність несинусоїдальності в точках $T2$ та $T3$ було виконано моделювання показників надійності в електричних мережах 0,4 та 0,66 кВ. Це особливо актуально при збільшенні обсягів видобутку вугілля, при якому впроваджуються нові лави з комплексом перетворювачів енергії (конвейєрний та локомотивний транспорт, комбайни, допоміжне електрообладнання), параметрів підземних та поверхневих електричних мереж [1] та визначати граничні значення індексу надійності.

Отримані залежності на рис. 8, 9 дозволяють прогнозувати погіршення показників надійності при довільній комбінації

Несинусоїдальність напруги викликає значні зміни показників надійності кабельних ліній, як ми

можемо зробити висновок з графіки рис. 7. Збиток для надійності електропостачання у середньому складає 30...50 % [3, 7, 9].

Ситуація значно погіршується, якщо послідовно з'єднані дві або більше системи електропостачання, які можуть бути пошкоджені вищими гармоніками. Досліджуючи різні варіації електричних мереж гірничих підприємств були отримані середні значення показників надійності електрообладнання. Залежно від параметрів ці значення досягають 60 %, що є неприпустимим для нормального функціонування підприємства.

Як бачимо, найгірші результати в зниженні показників надійності належить трансформатору ТМ-2500, а найменші зміни належить трансформатору ТМ-40.

а)

б)

Рисунок 9 – Залежності показників надійності кабельних ліній від коефіцієнта викривлення синусоїдальності THD : а) мережі поверхні; б) підземні електричні мережі

Надійність системи електропостачання при децентралізованому живленні

Даний режим роботи системи електропостачання означає значне скорочення вимог до централізованого електропостачання. Зазвичай кожна система електропостачання стикається з дефіцитом електроенергії щорічно. Тому відновлювальні джерела впроваджуються бурхливими темпами.

У нашому випадку для мінімального режиму живлення система електропостачання шахти потребує в три рази менше значення потужності КЗ. Результати моделювання показників надійності елементів системи електропостачання при обмеженнях енергосистеми показали збільшення впливу якості напруги на надійність, що ще погіршує показники.

Підсумовуючи результати розрахунку, можна сказати, що трансформатори не є надзвичайно чутливими до впливу вищих гармонік. В середньому зменшення строку служби трансформатора складає 1,5–2 роки. Крім того, на проникнення вищих гармонік впливає зміна опору енергосистеми при обмеженнях електропостачання [14].

ВИСНОВКИ. 1. За допомогою математичної моделі визначення показників надійності силових трансформаторів та ліній електропередач здійснено комплексну оцінку енергоефективності функціонування систем електропостачання гірничих підприємств. Результати моделювання довели функціональну залежність часу роботи електрообладнання при несинусоїдальності напруги та розкрили особливості забезпечення рівнів електромагнітної сумісності при децентралізованому живленні підприємства.

2. Отримані залежності дозволяють оцінити зниження строку служби електрообладнання гірничих підприємств при застосуванні характерних для даного об'єкту дослідження співвідношень уніфікованих схем заміщення. Середнє значення зменшення строку служби при коефіцієнті викривлення синусоїдальності 10 % складає 2–7 років в залежності від комбінації режимних параметрів.

3. В результаті моделювання показників надійності електропостачання на основі теплових моделей, отримано граничні значення індексу надійності, які залежать від рівнів вищих гармонік від перетворювачів стаціонарних установок гірничого підприємства.

4. При моделюванні показників надійності систем електропостачання враховувались різні комбінації та ієрархія підключення перетворювачів до електричних мереж. Це дозволило отримати специфічні комбінації параметрів мережі з режимними параметрами перетворювачів, що є важливою складовою оцінки енергетичної ефективності системи електропостачання при нестационарності нелінійного навантаження та постійних змінах підземних електричних мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко І. В., Шидловський А. К., Півняк Г. Г., Саєнко Ю. Л. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2009. 319 с.
2. Жежеленко И. В. и др. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий. Москва : Энергоатомиздат, 2007. 296 с.
3. Вагин Г. Я., Лоскутов А. Б., Севастьянов А. А. Электромагнитная совместимость в электро-энергетике : учеб. пособие. Н. Новгород : НГТУ, 2004. 214 с.
4. Гриб О. Г. и др. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества. Харьков : ХНУРЕ, 2010. 300 с.
5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. 5-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2004.
6. Жежеленко И. В., Коротчевич М. А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях. Минск : Высшая школа, 2012. 197 с.
7. Борисов Б. П., Вагин Г. Я., Лоскутов А. Б., Шидловский А. К. Повышение эффективности использования электроэнергии в системах электротехнологии. Киев : Наукова Думка, 1990. 240 с.
8. Дьяков А. Ф. и др. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. Москва : Энергоатомиздат, 2003. 768 с.
9. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папайка Ю. А. Енергетична ефективність систем електропостачання. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 149 с.
10. Півняк Г. Г. та ін. Електрифікація гірничих робіт. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2005. 320 с.
11. Електрифікація гірничого виробництва : підручник для ВНЗ. За ред. Л. О. Пучкова і Г. Г. Півняка. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2010.
12. Sabin D. D., Dimitriu C., Santiago D., Baroudi G. Overview of an automatic underground distribution fault location system. *Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE, Calgary, Canada 26–30 July 2009. Calgary, 2009. P. 1–5.*
13. Hu L., Yacimini R. Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance. *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*. 1993. Vol. 140, No. 6. P. 469–475.
14. Chang G., Chen S. An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, No. 4, P. 2585–2593.
15. Жежеленко И. В., Саєнко Ю. Л., Горпинич А. В. Оценка надежности оборудования при пониженном качестве электроэнергии. *Вести в*

електроенергетики. 2006. № 6. С. 13–17.

16. Короткевич М. А. Оценка значения индекса надежности энергосистем. *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных статей*. Минск : БНТУ, 2015. Вып. 66. С. 54–59.

17. Папаїка Ю. А., Пивняк Г. Г., Жежеленко И. В., Лысенко А. Г. Интергармоніки в системах електропостачання. *Науковий вісник НГУ*. Дніпропетровськ. 2017. № 6. С. 109–114.

18. Непомнящий В. А. Надежность оборудования энергосистем. Москва : Издательство журнала «Электроэнергия. Передача и распределение». 2013. 196 с.

19. Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Лисенко О. Г. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. Дніпропетровськ. 2018. № 100. С. 25–30.

MODELING OF RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF POWER SUPPLY SYSTEMS WITH UNSINUSOIDAL VOLTAGE

I. Zhezhelenko, Yu. Papaika, O. Lysenko, M. Rogoza

National Technical University Dnipro Polytechnic

prosp. Dmytra Yavornytskogo, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: epp@pstu.edu, papaika@ukr.net, lysenkoag@ukr.net, rogozam@nmu.org.ua

S. Yakimets

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: ysm_seem@meta.ua

Purpose. Development of mathematical model of calculation of reliability indicators of electrical equipment on the example of a typical scheme of a mining enterprise with the variable switching of powerful nonlinear electric receivers. Modes optimization of electric networks. Development of new analytical dependencies that take into account the mutual influence of electricity quality indicators on the reliability indicators of the electricity supply system.

Methodology. The algorithm of modeling of reliability indicators is considered; Unified substitution schemes have been drawn up; reliability of power transformers and cable lines of 6 k V is simulated; aspects of reliability of power supply systems with decentralized power supply are considered. **Originality.** New mathematic models designed for calculating unsinusoidal voltage allow to study the impact of a wide range of higher harmonics and interharmonics (characteristic for mines) on electric equipment reliability and to predict the processes of electric machines and cables insulation aging, thus preventing system faults in electric circuits. It is established for the first time that there are certain relationships between changes in the life time of electric equipment ranging depending on configuration of mine power supply scheme, equipment composition and levels of unsinusoidal voltage. **Practical value.** The influence of unsinusoidal voltage on the reliability of electrical equipment at arbitrary hierarchies of the power supply system and converter connection nodes is substantiated. This allows to obtain specific combinations of network parameters with mode parameters of converters, which is the important component of energy efficiency assessment of the power supply system with non-stationary non-linear load and constant changes of underground electrical networks. References 19, Figures 9.

Key words: quality of electric energy, reliability indicators of electrical equipment, valve converters, mining enterprises, electrical networks, stationary devices.

REFERENCES

1. Zhezhelenko, I. V., Shydlovskiy, A. K., Pivnyak, H. H., & Saenko Yu. L. (2009). *Elektromagnitna sumistnist u sistemakh elektropostachannya: pidruchnyk [Electromagnetic compatibility in power systems: Textbook]*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyy hirnychyy universytet. [in Ukrainian]

2. Zhezhelenko, I. V., & et. al. (2007). *Izbrannie voprosi nesinusoidalnykh rezhimov v elektricheskikh setyakh predpriyatij [Selected issues of unsinusoidal modes in electrical networks of enterprises]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]

3. Vagin, G. Ya., Loskutov, A. B., & Sevastyanov, A. A. (2004). *Elektromagnitnaya sovmestimost v elektroenergetike: uchebnoe posobie [Electromagnetic Compatibility in Power: Training Manual]*. N. Novgorod: NGTU. [in Russian]

4. Grib, O. G., & et. al. (2010). *Kontrol potrebleniya elektroenergii s uchetom ee kachestva [Energy consumption control taking into account its quality]*. Kharkov: KhNURE. [in Russian]

5. Zhezhelenko, I. V. (2004). *Vishie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennikh predpriyatij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises.]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]

6. Zhezhelenko, I. V., & Korotchevich, M. A. (2012). *Elektromagnitnaya sovmestimost v elektricheskikh setyakh [Electromagnetic compatibility in electrical networks]*. Minsk: Visheysheya shkola. [in Russian]

7. Borisov, B. P., Vagin, G. Ya., Loskutov, A. B., & Shydlovskiy, A. K. (1990). *Povishenie effektivnosti ispolzovniya elektroenergii v sistemakh elektrotekhnologii [Improving the efficiency of electricity use in electrical technology systems]*. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

8. Dyakov, A. F., & et. al. (2003). *Elektromagnitnaya sovmestimost v elektroenergetike i elektrotekhnike [Electromagnetic compatibility in the electric power industry and electrical engineering]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian]

9. Pivnyak, H. H., Zhezhelenko, I. V., & Papaika, Yu. A. (2018). *Enerhetychna efektyvnist system elektropostachannya [Energy Efficiency of Power Supply Systems]*. Dnipro: NTU «Dniprovskа politekhnika». [in Ukrainian]
10. Pivnyak, H. H., Bilyy, M. M., & et al. (2005). *Elektryfikatsiya hirnychkh robot [Electrification of mining operations]*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyy hirnychyy universytet. [in Ukrainian]
11. Puchkov, L. O., & Pivnyak, H. H. (2010). *Elektryfikatsiya hirnychoho vyrobnytstva: pidruchnyk dlya VNZ. [Electrification of mining: Textbook for universities]*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyy hirnychyy universytet. [in Ukrainian]
12. Sabin, D. D., Dimitriu, C., Santiago, D., & Baroudi, G. (2009). Overview of an automatic underground distribution fault location system. *Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE*, 1–5.
13. Hu, L., & Yacamini, R. (1993). Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance. *IEEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*, 6 (140), 469–475.
14. Chang, G., & Chen, S. (2005). An analytical approach for characterizing harmonic and interharmonic currents generated by VSI-fed adjustable speed drives. *IEEE Transaction on Power Delsvery*, 4 (20), 2585–2593.
15. Zhezhelenko, I. V., Saenko, Yu. L., & Gorpinich, A. V. (2006). Otsenka nadezhnosti oborudovaniya pri ponizhenom kachestve elektroenergii. *Vesti v elektroenergetike*, 6, 13–17. [in Russian]
16. Korotkevich, M. A. (2015). Otsenka znacheniya indeksa nadezhnosti energosistem. *Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: sbornik nauchnykh statey*, 66, 54–59. [in Russian]
17. Papaika, Yu. A., Pivnyak, G. G., Zhezhelenko, I. V., & Lysenko, A. G. (2017). Intergarmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya. *Naukovyy visnyk NHU*, 6, 109–114. [in Russian]
18. Nepomnyashchiy, V. A. (2013). *Nadezhnost oborudovaniya energosistem [Reliability of power systems equipment]*. Moscow: Izdatelstvo zhurnala «Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye». [in Russian]
19. Zhezhelenko, I.V., Papaika, Yu. A., & Lysenko, O. H. (2018). Otsinka enerhetychnoyi efektyvnosti system elektropostachannya za dopomohoyu indeksu nadiynosti. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka*, 100, 25–30. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 07.04.2020.