

УДК 621.395.664

[0000-0002-0688-1430] **А. О. Панов**, аспірант,

e-mail: panovanton1994@gmail.com

[0000-0002-8600-4234] **С. О. Тимчук**, д-р техн. наук, професорДержавний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, Україна

МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 0,4-10 кВ

Споживання енергії є обов'язковою умовою існування людства. Наявність доступної для споживання енергії завжди була необхідною для задоволення потреб людини, збільшення тривалості та поліпшення умов її життя. Тема якості електроенергії є головною в Україні. Найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити подавання номінальної напруги до всіх споживачів практично не можливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження електричного струму по електричній мережі пов'язане із втратами напруги. Ці втрати не залишаються незмінними, оскільки навантаження мережі постійно змінюється протягом доби, сезону, року. Внаслідок зміни навантаження змінюється і втрата напруги в мережі і, як наслідок, змінюється напруга на затискачах у споживачів. Ці зміни можуть бути швидкими і короточасними (наприклад під час пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження протягом доби або року і при плавному регулюванні напруги).

В роботі наведено результати дослідження застосування чітких алгоритмів керування для завдання нормалізації якості напруги та коефіцієнтів несиметрії в електромережі. На основі моделювання запропоновано нову ефективну модель алгоритму регулювання якості електричної енергії в розподільній мережі. У дослідному зразку використовується нове технічне рішення стосовно регулювання показників якості електроенергії.

Розроблено модель регулювання якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки і побудови блок-схеми алгоритму. Розроблена структурна схема випробувальної системи «Релсіс РЗЛ-05.РПН».

Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні пристрою для приводу з регулюванням під навантаженням (РПН), підключеного до трансформатора.

Ключові слова: енергетика, відхилення напруги, несиметрія напруги, нечітка логіка, автоматизація, регулювання під навантаженням.

Вступ. Однією з важливих вимог до електропостачання є забезпечення якості електроенергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим нормам. Відхилення напруги та інших показників якості від встановлених норм суттєво впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, що призводить до електромагнітної та технологічної складової економічної шкоди. Також однією з актуальних проблем трифазних електричних мереж напруги 0,4 кВ є несиметрія напруги. Несиметрія напруги виявляється у нерівності між собою моделей векторів фазних напруг і кутів зсуву з-поміж них.

ДСТУ EN 50160:2014 [1] номінується відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі і

гранично допустимі значення відхилення напруги, що встановилися, дорівнюють відповідно $\pm 5\%$ і $\pm 10\%$ від номінального значення напруги і в точках загального приєднання споживачів електричної енергії повинні бути встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму і максимуму навантажень в енергосистемі з огляду на необхідність виконання норм стандарту на виводах приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів.

Найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити подавання номінальної напруги до всіх споживачів практично не можливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження електричного струму по електричній мережі пов'язане із втратами напруги.

Ці втрати не залишаються незмінними, оскільки навантаження мережі постійно змінюється протягом доби, сезону, року і т. д. [2].

Внаслідок зміни навантаження змінюється і втрата напруги в мережі і, як наслідок, змінюється напруга на затискачах у споживачів [3]. Ці зміни можуть бути швидкими і короточасними (наприклад під час пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження протягом доби або року і при плавному регулюванні напруги) [4].

Несиметрія напруги є одним із показників, за яким оцінюють якість електричної енергії у трифазних електричних мережах напруги 0,4-10 кВ відповідно до ДСТУ EN 50160:2014. За цими нормами коефіцієнт несиметрії напруги призводить до різкого зниження ефективності трифазних асинхронних двигунів, при тому що більшість промислових підприємств працюють тільки на асинхронних двигунах. Тому несиметрію напруг слід ретельно вивчати та контролювати.

Несиметрія напруги в електричних мережах підприємств обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень і трифазних, споживачів, які тривало працюють у несиметричному режимі. Також трифазна система напруги може бути несиметрична під час живлення електромережі від тягової підстанції змінного струму.

При несиметрії напруги в трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін електрообладнання та знижуються економічні показники його роботи. Також при несиметрії напруги в електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, що обертаються не лише з синхронною швидкістю у напрямку обертання ротора, але й з подвійною синхронною швидкістю в протилежному. В результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти [5].

В асинхронних двигунах при коефіцієнтах зворотної послідовності напруги K_{2U} 0,05-0,06 зниження обертового моменту є досить малим, тому ним можна знехтувати. Проте вплив несиметрії на втрати в електродвигуні й, отже, нагрів і скорочення терміну служби ізоляції двигуна проявляються значно сильніше.

При роботі асинхронного двигуна з номінальним обертовим моментом і коефіцієнтом зворотної послідовності напруги, що дорівнює 4 %, термін служби ізоляції його скорочується приблизно в два рази тільки за рахунок додаткового нагріву. Якщо напруга на одній із фаз значно перевищуватиме номінальне значення, скорочення терміну служби ізоляції буде ще більшим.

Взаємний вплив показників якості електроенергії проявляється різною мірою. Несинусоїдальність напруги практично не впливає на інші показники. Винятком є випадок роботи регуляторів напруги, не захищених від проникнення вищих гармонік; у цьому випадку збільшуються похибки регулювання та як наслідок зростають відхилення напруги порівняно з установочними або оптимальними значеннями. З практики відомо, що не слід обмежувати реактивну потужність турбогенераторів блок-станцій, а також синхронних електродвигунів і спеціальних швидкодіючих синхронних компенсаторів навіть при дуже великому рівні гармонік. В останні роки конденсатори в мережах з нелінійними навантаженнями використовують в схемах силових резонансних фільтрів або в поєднанні із захисним реактором і вони виявляються цілком сумісними з іншими нелінійними навантаженнями [6].

Економічні збитки в електричних мережах суттєво залежать від якості електроенергії. І одними з головних факторів, які погіршують якість електричної енергії в електроприймачах в електричних мережах 0,4-10 кВ, є усталене відхилення напруги і несиметрія напруги за зворотною і нульовою послідовністю. Наявність відхилення напруги і несиметрії навантажень знижує пропускну властивість елементів електричної мережі, спотворення режимів напруги, які погано впливають на режими роботи споживачів електричної енергії і також впливає на технічно-економічні показники. Як показали дослідження авторів [6], коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю становить 5-12 % при нормальному і гранично допустимому значенні 2 % і 4 % відповідно. В [7] доведено, що 1 % напруги нульової послідовності відповідає 0,9 % додаткового відхилення напруги. Для визначення економічної доцільності будь-яких заходів з поліпшення якості електричної енергії необхідно знати, крім типових сталих витрат (зарплатні обслуговуючого і ремонтного персоналу, амортизаційних відрахувань,

витрат на поточний ремонт тощо), величину збитків, які зумовлені роботою електроприймачів зі зниженою якістю електричної енергії.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка моделі, яка виконує регулювання якості електричної енергії, а саме таких показників електроенергії, як усталене відхилення напруги та коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю.

Для побудови моделі регулювання якості електричної енергії необхідно виконати такі задачі: розробити блок-схему алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги; розробити блок-схему алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною і нульовою послідовністю в електричних мережах.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу і розробки методу регулювання якості електричної енергії за рахунок алгоритму керування на основі нечіткої логіки, представленого у статті [8], оцінку гармонічних складових напруги краще проводити модернізованим методом кореляційних функцій.

Як база для нового алгоритму був використаний розділ математики, який є узагальненням класичної логіки і теорії множин [9], що базується на понятті нечітких множин, введених як об'єкт з функцією належності елемента до множин, які застосовують будь-які значення в інтервалі $[0;1]$. Це забезпечує високу точність оцінки гармонічних складових напруги.

Для розробки нечіткого алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги вхідними параметрами системи нечіткого виведення були взяті нечіткі змінні, тобто відповідальні за фазу напругу, і сам пристрій приводу з регулюванням під навантаженням (РПН): "Фаза А", "Фаза В", "Фаза С" і "Положення пристрою РПН". Також вихідними параметрами системи були взяті нечіткі змінні, такі як: "Переключення пристрою РПН", "Відключення частини навантаження" і "Включення додаткового навантаження".

Для нечітких змінних були написані такі терм-множини:

$$T_u = \{ "U_{A low}", "U_{A mid}", "U_{A high}" \};$$

$$T_u = \{ "U_{B low}", "U_{B mid}", "U_{B high}" \};$$

$$T_u = \{ "U_{C low}", "U_{C mid}", "U_{C high}" \}.$$

Функції належності термів множин T_u обрані відповідно до норм стандарту і виглядають таким чином:

$$\mu_{\delta U_{yL}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{0,95U_{ном} - U}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (1)$$

$$\mu_{\delta U_{yM}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{U - 0,9U_{ном}}{0,05U_{ном}}, \frac{1,1U_{ном} - U}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (2)$$

$$\mu_{\delta U_{yH}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{U - 1,05U_{ном}}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (3)$$

Це функція належності показників усталеного відхилення, які описують низький, середній та високий ступені відхилення від потреб норм та стандартів.

Як терм-множини для нечіткої змінної "Положення пристрою РПН" були написані:

$$T_p = \{ "РПН_{min}", "РПН_{max}" \}.$$

Для написання терм-множин для нечіткої вихідної змінної для таких показників, як "Перемикання пристрою РПН", "Відключення часткового навантаження" та "Включення додаткового навантаження" вони виглядають таким чином:

$$T_n = \{ "РПН-", "РПН+" \};$$

$$T_o = \{ "ВІДКЛ.навантаження" \};$$

$$T_v = \{ "ВКЛ.навантаження" \}.$$

Після задання правил нечіткого виведення в інструментарії "Fuzzy Logic Toolbox" в пакеті програми MATLAB отримаємо результат для вихідної змінної показника "Перемикання пристрою РПН" при конкретних значеннях вхідних змінних, що зображено у вигляді графічного інтерфейсу на рисунку 1.

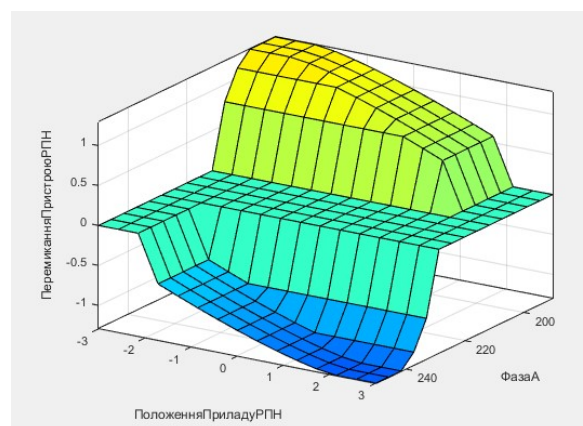


Рисунок 1. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Перемикання пристрою РПН"

Так само будується графічний інтерфейс після отримання результатів для вихідної змінної показника "Відключення часткового навантаження" при інших значеннях

вихідної змінної однієї з трьох фаз, який зображено на рисунку 2.

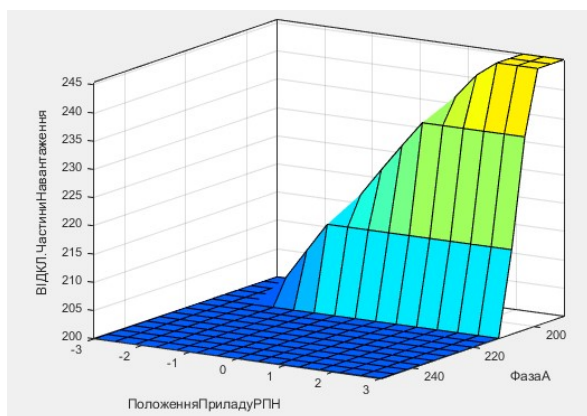


Рисунок 2. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Відключення часткового навантаження"

Аналогічно будується графічний інтерфейс для вихідної змінної показника "Включення додаткового навантаження" (рисунок 3).

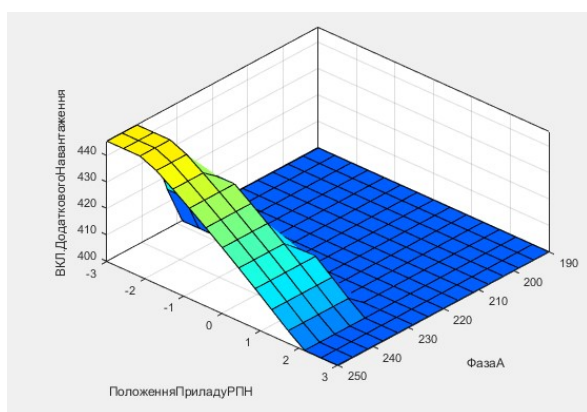


Рисунок 3. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Включення додаткового навантаження"

Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення показує, що при зміні напруги на одній із трьох фаз буде перемикається пристрій РПН на потрібне положення. При зміні напруги на двох фазах буде вмикається додаткове навантаження або вимикається частина навантаження.

Коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності "K_{2U}" і "K_{0U}" представляються у нечіткій формі, як це запропоновано у [10, 11], а вихідним параметром є нечітка змінна "Включення пристрою комутації", як це наведено у [12, 13].

Як терм-множини для нечіткої змінної "Коефіцієнт несиметрії напруги при зворотній послідовності" використовуються множини $Tk = \{ "K_{2Un}", "K_{2Uh}" \}$.

Так само як терм-множина для нечіткої змінної "Коефіцієнт несиметрії напруги при нульовій послідовності" використовується множина $Tk = \{ "K_{0Un}", "K_{0Uh}" \}$.

Функції належності терм-множин Tk обрані відповідно до норм стандартів і мають такий вигляд:

$$\mu K_{2Un} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\}; \quad (4)$$

$$\mu K_{2Uh} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}; \quad (5)$$

$$\mu K_{0Un} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\}; \quad (6)$$

$$\mu K_{0Uh} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}. \quad (7)$$

При цьому кожен із термів перших двох змінних оцінюється за шкалою коефіцієнта несиметрії від 0 % до 5 %.

Для нечіткої вихідної змінної "Перемикавання комутації" використовується множина $To = \{ "ПК" \}$.

Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення (рисунок 4) показує, що при зміні коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності буде здійснюватись комутація. Асиметрія по зворотній, так само і по нульовій послідовності вирішується однаково, тобто за допомогою трансформаторної підстанції, яка укомплектована пристроєм РПН, що має змогу зміни комутації споживача до фаз, тобто перемикавання комутації споживачів між фазами.

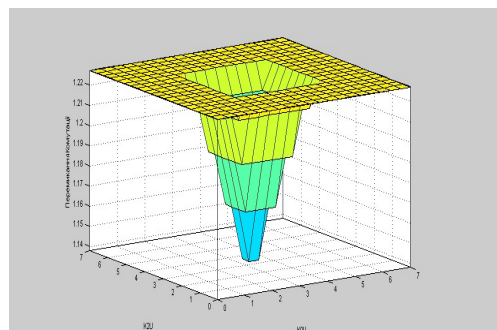


Рисунок 4. Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення для "Перемикавання комутації"

Після чого розробка блок-схеми алгоритму програмного регулювання усталеного відхилення напруги здійснюється на основі нечіткої логіки. Для побудови запишемо правило логічного виведення для нормалізації усталеного відхилення напруги в одній із фаз, які допоможуть більш детально описати блок-схему.

if (UAlow or UBlow or UClow) and not РПНmax $\rightarrow$ РПН+.

if (UAlow or UBlow or UClow) and РПНmax $\rightarrow$ ВІДКЛ.ЧастиниНавантаження.

У розроблених блок-схемах алгоритму регулювання передбачений контроль спрацювання всіх механізмів у ході нормалізації напруги, а при порушенні послідовності роботи, заданої алгоритмом, або при неспрацюванні якого-небудь механізму передбачене відпрацювання алгоритму аварійних ситуацій, який передбачає зупинку робочих приводів і механізмів та включення сигналізації аварійного режиму роботи.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на одній із трьох фаз зображено на рисунку 5 [14].

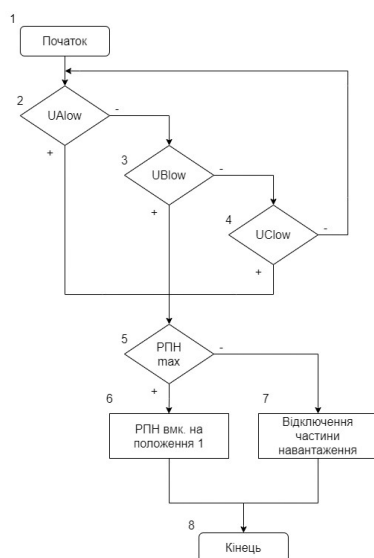


Рисунок 5. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на одній із трьох фаз, здійснена на основі нечіткої логіки

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, що здійснює вмикання

приводу РПН на положення 1. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 є активним, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, після чого вмикається РПН на положення 1. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і блок 5 не є активним, то керування переходить до блока 6, який вмикає РПН на положення 1.

Якщо блок 2 активний і блок 5 також є активним, то керування переходить до блока 7, який здійснює відключення частини навантаження. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, який відключає частину навантаження. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, що відключає частину навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на одній із трьох фаз, побудований на основі нечіткої логіки і правил логічного виведення, зображено на рисунку 6.

if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and not РПНmin $\rightarrow$ РПН-.

if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and РПНmin $\rightarrow$ ВКЛ.Навантаження.

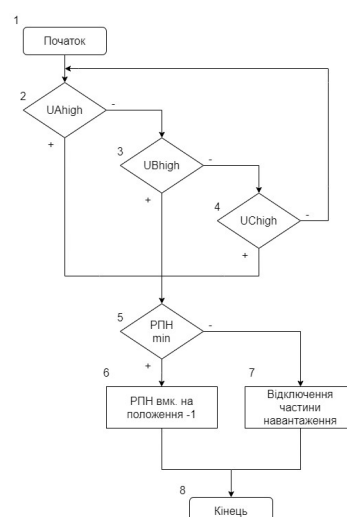


Рисунок 6. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на одній із трьох фаз, здійснена на основі нечіткої логіки

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, що здійснює вмикання

приводу РПН на положення -1. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 є активним, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, після чого вмикається РПН на положення -1. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і блок 5 не є активним, то керування переходить до блока 6, який вмикає РПН на положення -1.

Якщо блок 2 активний і блок 5 також є активним, то керування переходить до блока 7, який здійснює вмикання навантаження. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, який вмикає навантаження. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, що вмикає навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на усіх трьох фазах, що побудований на основі нечіткої логіки, де представлено правила логічного виведення, зображено на рисунку 7.

if (UAlow or UBlow or UClow) and РПНmax → Відкл.ЧастиниНавантаження.

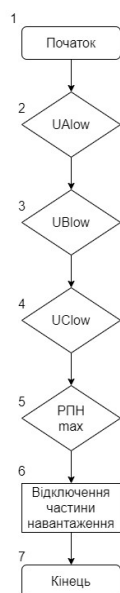


Рисунок 7. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на усіх трьох фазах, здійснена на основі нечіткої логіки

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, активний блок 3, активний блок 4 і активний

блок 5, тоді керування переходить до блока 6, який здійснює відключення частини навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на усіх трьох фазах, що побудований на основі нечіткої логіки, де представлено правила логічного виведення, зображено на рисунку 8.

if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and РПНmin → Вкл.Навантаження.

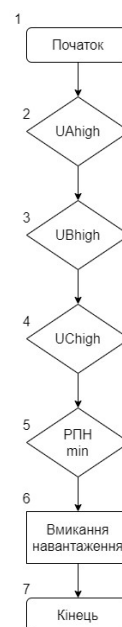


Рисунок 8. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на усіх трьох фазах, здійснена на основі нечіткої логіки

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, активний блок 3, активний блок 4 і активний блок 5, тоді керування переходить до блока 6, який здійснює вмикання навантаження.

Наступна розробка блок-схеми алгоритму програмного регулювання буде пов'язана з регулюванням коефіцієнта несиметрії напруги зворотної і нульової послідовності, що здійснено на основі нечіткої логіки. Для побудови запишемо правило логічного виведення для нормалізації коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії, що допоможе більш детально описати блок-схему

if (K2Un or K0Un) then "ПК".

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії зображено на рисунку 9.

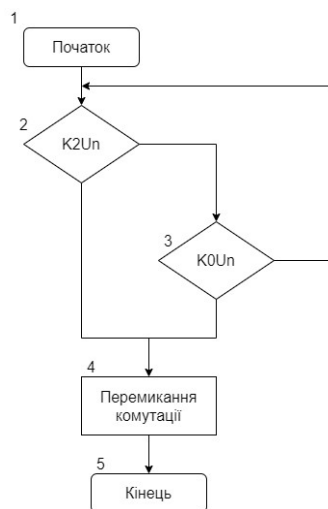


Рисунок 9. Блок-схема алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації. Якщо блок 2 є не активним, і при цьому блок 3 є активним, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації.

Для побудови блок-схеми запишемо правило логічного виведення для нормалізації коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії

if (K2Uh or K0Uh) then "ПК".

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії зображено на рисунку 10.

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії буде описуватися так само, як і при нормальному відсотку несиметрії, тобто, якщо активний блок 2, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації. Якщо блок 2 є не активним, і при цьому блок 3 є активним, тоді

керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації.

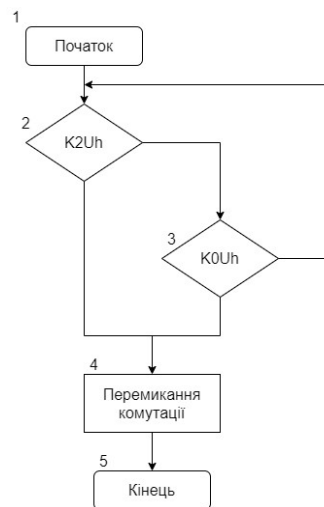


Рисунок 10. Блок-схема алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії

Результати досліджень. Дослідження відбувається за допомогою пристрою РЗЛ-05.РПН фірми "Релсіс" [15], який призначений для виконання функції управління електроприводом РПН двох- або трьохобмотувального силового трансформатора під навантаженням при автоматичному, дистанційному і місцевому регулюванні напруги трансформатора шляхом зміни коефіцієнтів трансформації, контролю рівня напруги і підтримки його в заданих уставках межах шляхом формування команди управління виконавчим пристроєм (приводом РПН) і контролю його роботи; реалізації логіки необхідних блокувань і функцій захисту. Пристрій РЗЛ-05.РПН забезпечує індикацію поточного положення РПН (номери ступеня). Уставка "Уставки" → "РПН" → "Ступінь РПН" задає поточний ступінь положення приводу від 1 до 100. Уставка необхідна для синхронізації положення внутрішнього програмного лічильника поточного ступеня з реальним положенням приводу. Поточний рівень РПН також можна задати за допомогою кнопок "Додати" та "Зменшити" на передню пам'ять (ПП). Для цього необхідно параметр "Управління з ПП" встановити у положення "Початкова позиція" та за допомогою кнопок додавати або зменшувати значення поточного ступеня, контролюючи пункт меню "Поточний ступінь РПН". Цей режим керує лише лічильником поточного ступеня. Після закінчення налаштування параметра

"Керування з РПН" слід повернутися в попередню позицію. Уставка "Уставки" → "РПН" → "Початковий ступінь РПН" задає початковий дозволений ступінь регулювання від 0 до 99. Якщо поточний ступінь РПН буде меншим, ніж "Початковий ступінь РПН -1", то видаватиметься сигналізація на реле К12 "Лічильник менше", на реле К7 "Сигналізація" та на СДІ12 "Збіг лічильника". Функція потрібна для видачі сигналізації при досягненні поточного рівня РПН деякого значення при зменшенні. Значення повернення для початкового ступеня задається уставкою "Початковий ступінь РПН", воно має бути більшим за значення уставки "Початковий ступінь РПН-1" на одиницю. Уставка "Уставки" → "РПН" → "Кінцевий ступінь РПН +1" задає кінцевий дозволений ступінь регулювання від 1 до 100. Якщо поточний ступінь РПН буде більшим, ніж "Кінцевий ступінь РПН +1", то видаватиметься сигналізація на реле К11 "Лічильник більше", на реле К7 "Сигналізація" та на СДІ12 "Збіг лічильника". Функція потрібна для видачі сигналізації при досягненні поточного рівня РПН деякого значення при додаванні. Значення повернення для кінцевого ступеня задається уставкою "Кінцевий ступінь РПН", воно має бути меншим за значення уставки "Кінцевий ступінь РПН +1" на одиницю. Уставки ступенів РПН задаються за допомогою програми "Монітор-2", автоматизованої системи керування, а також за допомогою команд на передній панелі. При регулюванні напруги (автоматичному, ручному) поточний ступінь РПН розраховується пристроєм на основі введеної уставки поточного положення, що відповідає реальному положенню приводу та відпрацьованих команд перемикавання. Поточний стан РПН передається до автоматизованої системи керування через інтерфейс RS-485.

На електронно-обчислювальній машині задаються необхідні режими роботи, після чого розраховуються і виробляються цифрові вибори струмів і напруги. Ці вибори передаються в "Релсіс РЗЛ-05.РПН". Цифро-аналогові перетворювачі масштабують цифрові вибірки, що надійшли, і формують аналогові сигнали напруги. Одним із модулів програмного забезпечення "РЗЛ-05.РПН" є кореляція рівня регульованої напруги по струму навантаження. У цьому випадку програма дає можливість запрограмувати сигнал програми каналу за формулою. У пристрої "РЗЛ-05.РПН" реалізована струмова компен-

сація з можливістю вибору трьох формул ("Уставка" → "Регулювання каналу n" → "Формула n"). Якщо при аналізі струмів і напруги граничні умови не порушені, тоді повертається вираз:

$$U_{np} \uparrow < U_{тек} < U_{np} \downarrow; \quad (8)$$

де

$$U_{np} \uparrow = U_{взгн} + U_{к1}; \quad (9)$$

$$U_{np} \downarrow = U_{нзгн} + U_{к1}, \quad (10)$$

де U_{np} – розрахункові значення напруги підтримки; $U_{тек}$ – поточне значення напруги в регульованій секції; $U_{к1}$ – розрахункове значення напруги компенсації; $U_{нзгн}$ – установка нижньої межі при регулюванні напруги вгору (додати); $U_{взгн}$ – установка нижньої межі при регулюванні напруги вниз (зменшити).

Після вибору необхідних каналів та їх налаштування панель графічного відображення набуде вигляду, зображеного на рисунку 11. При відкритті на панелі відображається уся довжина ліченої осцилограми і всі вибрані канали.

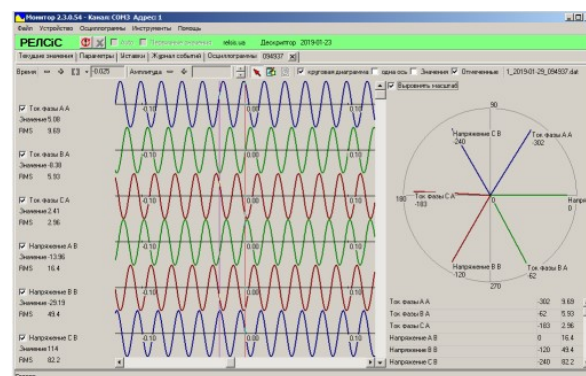


Рисунок 11. Кругова діаграма

Обговорення результатів. Як видно на рисунку 11, при зміні навантаження на одній із фаз перемикатиметься на потрібні положення пристрій РПН, а при зміні напруги двох фаз буде включатися додаткове навантаження або відключатися частина навантаження. Цей аналіз дозволяє встановити більш точне регулювання напруги на одній або на всіх фазах мережі. Після варіювання вхідних змінних визначається адекватність цієї розробленої нечіткої моделі. Ця модель ефективна тим, що команда, що управляє, може бути видана не за фактом порушення норм відхилення напруги, як це реалізовано в існуючих системах, а заздалегідь, оскільки функції належності термів перетинаються (рисунк 1).

Представлена модель дозволяє з легкістю отримувати дані для обробки, після обробки, за допомогою цих даних автоматизовано вибирати потрібний метод регулювання та керування усталеним відхиленням напруги. Ця система також підходить для регулювання інших показників якості електричної енергії в розподільних мережах 0,4-10 кВ. Тобто можна розглянути такий показник якості електроенергії, як коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю в електричних мережах, де буде застосовуватися перемикання комутації для коефіцієнтів несиметрії.

Висновки. Проаналізовано існуючі методи регулювання якості електричної енергії. Виявлено недоліки та проблеми питання, пов'язаного з підвищенням якості електроенергії.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки.

Практична цінність роботи полягає в такому:

- побудована модель за допомогою методу нечіткої логіки дозволяє прискорити узгодження трансформатора з РПН зі схемою керування та встановити більш точне регулювання напруги, що підвищить ефективність роботи трансформатора та самої системи;

- результати роботи можуть бути використані при проектуванні підстанції для впровадження в енергосистему.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схем керування трансформаторів з РПН та створення моделей на ПЛІС для реалізації більш детальних цілочисельних обчислень.

Список використаних джерел

- [1] ДСТУ EN 50160:2014, "Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності". Взамін ДСТУ EN 20160:2010; Введ. 20.05.2014. Київ: Мінекономіки України, 2014.
- [2] П. Плешков, М. Полтовець, та І. Савеленко, *Оцінка економічних збитків при несиметрії напруги за нульовою послідовністю в сільських електричних мережах*. Кіровоград: КДТУ, 2002, с. 69-72.
- [3] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, *Power Quality Problems and New Solutions*. [Online]. Available: <http://www.icrepq.com/pdfs/PL4.ALMEDIA.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [4] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, та О. В. Сапrika, "Аналіз відхилення напруги в електричних мережах внутрішнього освітлення" [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.kdu.edu.ua/stat/Tezi/Daidzhest/2011/02_01_.pdf. Дата звернення: Берез. 30, 2023.
- [5] Б. Галашин, "Вплив несиметрії напруги на роботу електрообладнання", на *VII Всеукр. студ. наук.-практ. конф. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання*, Тернопіль, 2017, с. 204.
- [6] П. Плешков, М. Полтовець, та І. Савеленко, *Оцінка економічних збитків при несиметрії напруги за нульовою послідовністю в сільських електричних мережах*. Кіровоград: КДТУ, 2002, с. 69-72.
- [7] В. Г. Ягуп, та К. В. Ягуп, *Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання*: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019.
- [8] А. А. Панов, и С. А. Тимчук, "Нечеткий алгоритм регулювання установившегося отклонения напряжения в электрической сети 0,4 кВ". Таллин: United Journal, № 26, с. 31-37, 2019.
- [9] А. А. Панов, и С. А. Тимчук, "Нечеткий алгоритм регулювання коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности", на *The 4th Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Osaka, Japan: CPN Publishing Group, 2019, pp. 670-679.
- [10] J. Feng, D. Zhao, G. Wu, Z. Liu, and J. Zhang, "Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems". [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/6287639/8274985/8031328-aam.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [11] Y. Zhou, P. Mancarella, and J. Mutale, "Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2267-2276, Feb. 2016.
- [12] А. О. Панов, "Регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги нульової та зворотної

- послідовності в електричних мережах 0,4 кВ", на VII міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020, Київ: КПІ, 2020, с. 16-17.
- [13] S. Tymchuk, S. Shendryk, V. Shendryk, A. Panov, A. Kazlauskaitė, and T. Levytska, "Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid", in *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*, A. Lopata, R. Butkienė, D. Gudonienė, and V. Sukackė, Eds, vol. 1283, Springer, Cham, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6.
- [14] А. О. Панов, "Розробка алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги в розподільних мережах 0,4-10 кВ", на Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків: ХНАДУ, 2021, с. 170-174.
- [15] "Пристрій релейного захисту автоматики для регулювання під навантаженням трансформаторів РЗЛ-05.РПН". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05rpn>. Дата звернення: Берез. 21, 2023.
- References**
- [1] DSTU EN 50160:2014, "Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks". Instead of DSTU EN 20160:2010; Introduced 05/20/2014. Kyiv: Minekonomrozyvtku Ukrainy, 2014 [in Ukrainian].
- [2] P. Pleshkov, M. Poltovets, and I. Savelenko, *Estimation of economic losses during zero-sequence voltage measurement in rural electric networks*. Kirovohrad: KDTU, 2002, pp. 69-72 [in Ukrainian].
- [3] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, *Power Quality Problems and New Solutions*. [Online]. Available: <http://www.icrepq.com/pdfs/PL4.ALMEDIA.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [4] O. G. Hryb, O. M. Dovgalyuk, and O. V. Sapryka, "Analysis of voltage deviation in electrical networks of internal lighting". [Online]. Available: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Daidzhest/2011/02_01_.pdf. Accessed on: March 30, 2023 [in Ukrainian].
- [5] B. Galashin, "The influence of voltage asymmetry on the operation of electrical equipment", in *VII All-Ukr. Student Sci. and Pract. Conf. Natural and Humanitarian Sciences. Current issues*, Ternopil, 2017, p. 204 [in Ukrainian].
- [6] P. Pleshkov, M. Poltovets, and I. Savelenko, *Estimation of economic losses during zero-sequence voltage transmission in rural electric networks*. Kirovohrad: KDTU, 2002, pp. 69-72 [in Ukrainian].
- [7] V. G. Yagup, and K. V. Yagup, *Modeling and optimization of modes of energy supply and electricity consumption systems: manual*. Kharkiv: HNUMH named after O. M. Beketov, 2019 [in Ukrainian].
- [8] A. A. Panov, and S. A. Tymchuk, "Fuzzy algorithm for regulation of steady-state voltage deviation in the 0.4 kV electrical network". Tallinn: United Journal, no. 26, pp. 31-37, 2019 [in Russian].
- [9] A. A. Panov, and S. A. Tymchuk, "Fuzzy algorithm for regulation of reverse and zero-sequence voltage asymmetry coefficients, in *4th Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Osaka, Japan: CPN Publishing Group, 2019, pp. 670-679 [in Russian].
- [10] J. Feng, D. Zhao, G. Wu, Z. Liu, and J. Zhang, "Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems". [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/6287639/8274985/8031328-aam.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [11] Y. Zhou, P. Mancarella, and J. Mutale, "Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2267-2276, Feb. 2016.
- [12] A. O. Panov, "Regulation of zero- and reverse-sequence voltage asymmetry coefficients in 0.4 kV electrical networks", in *VII Int. Sci. and Pract. Conf. of young scientists, graduate students and students Automation and computer-integrated technologies – 2020*, Kyiv: KPI, 2020, pp. 16-17 [in Ukrainian].
- [13] S. Tymchuk, S. Shendryk, V. Shendryk, A. Panov, A. Kazlauskaitė, and T. Levytska,

- "Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid", in *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*, A. Lopata, R. Butkienė, D. Gudonienė, and V. Sukackė, Eds, vol. 1283, Springer, Cham, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6.
- [14] A. O. Panov, "Development of an algorithm for regulating the steady deviation of voltage in 0.4-10 kV distribution networks ", in *All-Ukr. Sci. and Pract. Conf. of Higher Education Graduates and Young Scientists*, Kharkiv: KhNADU, 2021, pp. 170-174 [in Ukrainian].
- [15] "Automatic relay protection device for regulation under load of RZL-05.RPN transformers". [Online]. Available: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05rpn>. Accessed on: March 21, 2023 [in Ukrainian].

A. A. Panov, *Postgraduate*,
e-mail: panovanton1994@gmail.com
S. A. Tymchuk, *Dr. Tech. Sc., Professor*
State Biotechnological University
Alchevskykh St., 44, Kharkiv, 61002, Ukraine

MODEL FOR REGULATING ELECTRICITY QUALITY INDICATORS IN 0.4-10 kV DISTRIBUTION NETWORKS

Energy consumption is a prerequisite for the existence of mankind. The availability of energy available for consumption has always been necessary to meet human needs, increase the duration and improve the conditions of his/her life. The topic of electricity quality is the main one in Ukraine. Consumers of electrical energy work most efficiently at nominal voltage. However, it is practically impossible to provide nominal voltage to all consumers. Each conductor has a certain resistance, so the passage of electric current through the electrical network is associated with voltage losses. These losses do not remain constant, as the network load constantly changes throughout the day, season, and year. As a result of the load change, the voltage loss in the network also changes, and as a result, the voltage at the consumers' terminals changes. These changes can be quick and short-term (for example, when starting an induction motor with a short-circuited rotor) or slow and long-lasting (with a gradual change in load during a day or a year and with smooth voltage regulation). The paper presents the results of a study of the application of clear control algorithms for the task of normalizing voltage quality and asymmetry coefficients in electrical networks. On the basis of modeling, a new effective model of the algorithm for regulating the quality of electric energy in the distribution network is proposed. The prototype uses a new technical solution for regulating electricity quality indicators.

A model of regulation of the quality of electrical energy has been developed based on the method of fuzzy logic and the construction of a block diagram of the algorithm. A structural diagram of the "Relsis RZL-05.RPN" test system has been developed. The results of the research can be used in the design of a device for an on-load tap-changer connected to a transformer.

Keywords: energy, voltage deviation, voltage asymmetry, fuzzy logic, automation, regulation under load.