

plementation of environmental measures. As a control vector, was adopted the total velocity vector of capital investments aimed at the development of fixed assets production and environmental protection.

Based on analytical indicators formed a computer database for each field of the economy, as well as the database of quality indicators of use of water objects. By methods of mathematical modeling it is possible to perform an objective assessment of the carried out calculations and make the forecast obtained data, in the near future. This allows a deeper examination of the complex relationships in the economic mechanism of natural resource consumption. Feature of building such a dynamic model, unlike its classical version, is not only to increase agricultural production, but also in the implementation of mandatory environmental protection measures. Choosing as the control vector total velocity vector of capital investments aimed at the development of fixed assets production and environmental protection, can be achieved increasing the rate of growth of agricultural production at minimum environmental costs.

Keywords: water management, water resources, differential rent, the optimal structure.

Дата надходження до редакції: 28.01.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Павлюченко А.М.

УДК 621.313

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ НА ВЕЛИЧИНУ КУТА МІЖ СТРУМОМ І НАПРУГОЮ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

В. М. Лисенко, к.т.н., доцент

О. Ю. Савойський, асистент

Сумський національний аграрний університет

В статті розглядається використання математичної моделі для дослідження впливу параметрів однофазного замикання на землю в електричних мережах з ізольованою нейтраллю і несиметрії навантажень споживачів на величину зсуву фаз між струмом та напругою нульової послідовності. Для дослідження процесів, що протікають в електричних мережах при зміні опору ізоляції та величини навантаження, пропонується використовувати математичні та імітаційні моделі.

Ключові слова: електричні мережі, контроль ізоляції, однофазне замикання на землю, несиметрія навантажень.

Постановка проблеми. Для забезпечення безперебійного та якісного електропостачання та безпечної експлуатації низьковольтних ліній електропередачі насамперед необхідна інформація про стан їх ізоляції.

Правильне уявлення про стан опору ізоляції низьковольтних ліній електропередачі може бути отримане в тому випадку, якщо його значення виміряно в нормальних експлуатаційних умовах, тобто при робочій напрузі і при включених струмоприймачах.

Також необхідно відмітити про необхідність забезпечення безперервного контролю ізоляції тому, що як би не були проведені періодичні експлуатаційні вимірювання опору ізоляції та ремонт мережі, ізоляція на протязі проміжку часу між наступними експлуатаційними випробуваннями може бути в аварійному стані.

Стан ізоляції трифазних мереж з ізольованою нейтраллю прийнято оцінювати, здійснюючи безперервне вимірювання величину струму нульової провідності. Однак, така оцінка в багатьох випадках виявляється не достатньо точною в зв'язку з тим, що струми нульової послідовності з'являються не тільки при несиметричних замиканнях в мережі, але і у випадку, коли навантаження по фазам розподілене нерівномірно.

Аналіз останніх досліджень та публіка-

цій. Існуючі методи контролю ізоляції базуються на проведенні періодичних планових випробувань підвищеною напругою [1]. Ці методи в умовах забезпечення безперервного та надійного електропостачання споживачів I категорії не завжди є прийнятними, оскільки вони приводять до перерв в електропостачанні споживачів, створення на час проведення вимірювань тимчасових систем електропостачання, що мають знижені показники надійності. Крім цього, дані методи збільшують можливість додаткових руйнувань ізоляції, що приводить обладнання до виходу з ладу.

В даний час поширені наступні методи контролю ізоляції [2-8]:

1) методи, основані на вимірюванні симетричних складових мережі;

2) методи, основані на використанні накладення оперативного струму на мережу, що контролюється;

3) методи, основані на використанні вимірювань струмів контрольованої мережі.

Існуючі методи не задовольняють вимогам по забезпеченню надійності та достовірного контролю ізоляції низьковольтних фідерів з наступних причин:

- значний вплив ємності мережі на результати контролю;

- значна похибка вимірювань;
- зниження загального опору контрольованої мережі при підключенні пристроїв контролю.

Метою статті є оцінка можливості застосування запропонованої в [9] математичної моделі для дослідження впливу параметрів однофазного замикання на землю в електричних мережах з різноманітними режимами роботи нейтралі, а також несиметрії навантажень споживачів на величину зсуву фаз між струмом та напругою нульової послідовності.

Основна частина. Для обґрунтування можливості використання величинизсуву фаз між струмом та напругою нульової послідовності для контролю стану ізоляції електричної мережі з різними режимами роботи нейтралі доцільно використовувати математичну модель [9] у вигляді системи рівнянь, що складені у відповідності до методу контурних струмів для схеми заміщення для електричної мережі, що розглядається у даному випадку (рис.1), де прийняті наступні позначення: $\dot{E}_A = U$, $\dot{E}_B = U \cdot e^{-j120^\circ}$, $\dot{E}_C = U \cdot e^{-j240^\circ}$ – фазні напруги мережі; $\underline{Z}_{\pi i} = R_{\pi i} + j \cdot \omega \cdot L_{\pi i}$, $i = A, B, C$ – комплексний опір фазних проводів лінії елек-

тропередачі; $R_{\pi i}$, $L_{\pi i}$ – відповідно активний опір та індуктивність фазних проводів лінії електропередачі; $\underline{Z}_{hi} = R_{hi} + j \cdot \omega \cdot L_{hi}$, $i = A, B, C$ – комплексний опір навантаження фаз; R_{hi} , L_{hi} – відповідно активний опір та індуктивність навантаження фаз; $\underline{Z}_{1i}$, $i = A, B, C$ – комплексний опір ізоляції фаз всієї мережі без врахування контрольованого фідера; $1/\underline{Z}_{1i} = 1/R_{1i} + j \cdot \omega \cdot C_{1i}$; R_{1i} , L_{1i} , $i = A, B, C$ – відповідно опори витоку та ємність ізоляції фаз всієї мережі без врахування контрольованого фідера; $\underline{Z}_{2i}$, $i = A, B, C$ – комплексний опір ізоляції фаз контрольованого фідера; $1/\underline{Z}_{2i} = 1/R_{2i} + j \cdot \omega \cdot C_{2i}$; R_{2i} , L_{2i} , $i = A, B, C$ – відповідно опори витоку та ємність ізоляції фаз контрольованого фідера; $\underline{Z}_{Nr}$ – комплексний опір нейтралі джерела електроенергії (генератора або трансформатора); $1/\underline{Z}_{Nr} = 1/R_{Nr} + j \cdot \omega \cdot C_{Nr} - j/(\omega \cdot L_{Nr})$; R_{Nr} , L_{Nr} , C_{Nr} – відповідно активний опір, ємність та індуктивність нейтралі джерела живлення; $\underline{Z}_{Nh}$ – комплексний опір нейтралі навантаження; $1/\underline{Z}_{Nh} = 1/R_{Nh} + j \cdot \omega \cdot C_{Nh} - j/(\omega \cdot L_{Nh})$; R_{Nh} , L_{Nh} , C_{Nh} – відповідно активний опір, ємність та індуктивність нейтралі джерела живлення відповідно активний опір, ємність і індуктивність нейтралі навантаження.

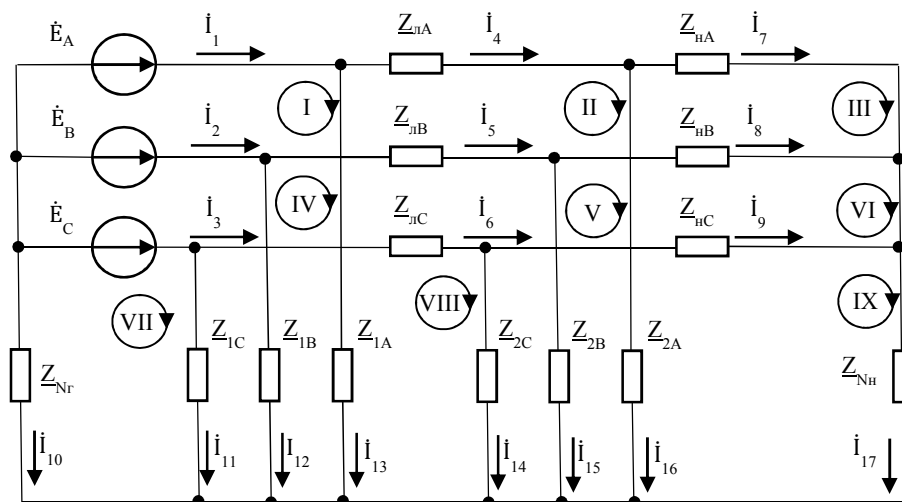


Рис. 1. – Схема заміщення трифазної електричної мережі

Процес вирішення задачі доцільно розділити на декілька етапів, кожний з яких характеризує роботу системи електропостачання в критичних режимах: режимі замикання на землю та режимі несиметрії навантаження.

Режим однофазного замикання на землю характеризується тим, що до опору ізоляції пошкодженої фази в контрольованому фідері додається активний опір R_3 , підключений паралельно опору ізоляції. Його величина може змінюватися в широких межах - від 0 Ом при металевому замиканні на землю до одиниць кілоом при запливаючому пробії або зниженні ізоляції з інших причин. Всі інші опори, а також живлячі напруги залишаються незмінними і, в більшості випадків, симетричними.

Тому рішення системи рівнянь для схеми

заміщення (рис. 1) для режиму однофазного замикання на землю будемо шукати за наступними припущеннями:

$$\underline{Z}_{Nr} = R_{Nr} \left(-j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) / \left(R_{Nr} - j \frac{1}{\omega C_{Nr}} \right) = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{1A} = \underline{Z}_{1B} = \underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_1 \frac{R_1 \left(-j \frac{1}{\omega C_1} \right)}{R_1 - j \frac{1}{\omega C_1}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{\pi A} = \underline{Z}_{\pi B} = \underline{Z}_{\pi C} = \underline{Z}_{\pi} = R_{\pi} + j\omega L_{\pi} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{2B} = \underline{Z}_{2C} = \underline{Z}_2 \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_2}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_A = \frac{R_2 R_3 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_2 R_3 + R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right) + R_3 \left(-j \frac{1}{\omega C_2} \right)} = \text{var};$$

$$\underline{Z}_{hA} = \underline{Z}_{hB} = \underline{Z}_{hC} = \underline{Z}_h = R_h + j\omega L_h = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{NH} = \frac{R_{NH}(-j\frac{1}{\omega C_{NH}})}{R_{NH} - j\frac{1}{\omega C_{NH}}} = \text{const.}$$

За такими припущеннями після відповідних перетворень вираз, що пов'язує струм I_0 і напругу U_0 нульової послідовності приймає вигляд:

$$U_0 = \frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_1}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_1} + Z_l + 3R_3 \right] I_0, \quad (1)$$

а вираз для визначення кута між струмом I_0 та напругою U_0 нульової послідовності визначається співвідношенням:

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{\text{Im} \left(\frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_1}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_1} + Z_l + 3R_3 \right] \right)}{\text{Re} \left(\frac{1}{3} \left[\frac{(Z_r + 3Z_{Nr})Z_1}{Z_r + 3Z_{Nr} + Z_1} + Z_l + 3R_3 \right] \right)} \right). \quad (2)$$

Задамо елементам еквівалентної схеми заміщення (рис.1) конкретні фізичні значення.

$$\varphi_0 = \arg[(0.418 - j0.156) \times (j17.3 + 77.4 + 21.0R_3 + j78.3R_3)]. \quad (3)$$

Графік залежності φ_0 від R_3 наведений на рис. 2.

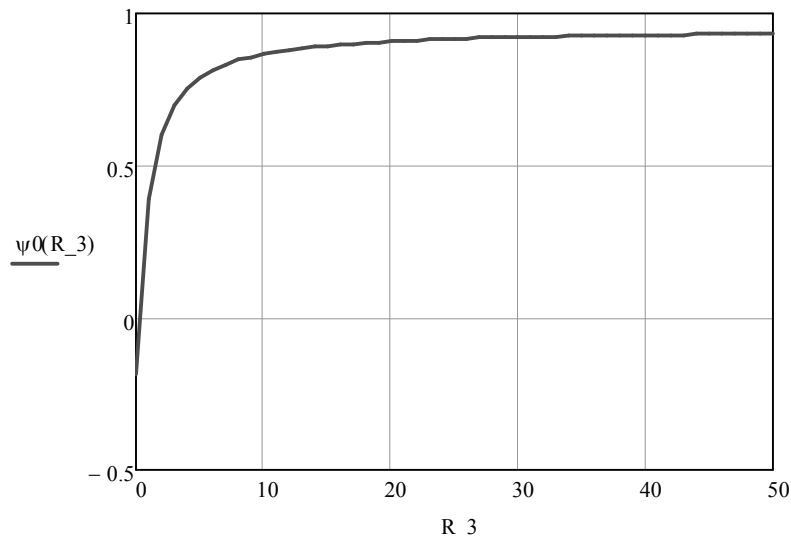


Рис. 2. –Графік залежності φ_0 від R_3

При цьому величина струму I_0 нульової послідовності вимірюється у межах від 0,039 мА при $R_3 = 5$ кОм до 1,071 мА при $R_3 = 1$ Ом, а величина напруги U_0 нульової послідовності вимірюється у межах від 7,914 В при $R_3 = 5$ кОм до 219,685 при $R_3 = 1$ Ом.

З аналізу формульних співвідношень та графіку залежності φ_0 від R_3 (рис. 2) можна зробити висновок про те, що у випадку пошкодження ізоляції та короткого замикання в одній із фаз трифазної мережі з ізольованою нейтраллю струм нульової послідовності відрізняється від напруги нульової послідовності.

Розглянемо рішення задачі для режиму несиметрії навантаження. Струми I_0 і напруги U_0 нульової послідовності виникають в електричній мережі, коли комплексний опір навантаження $\underline{Z}_H$ однієї фази відрізняється від комплексного опору навантаження інших фаз. Оскільки комплексний

Реальна система електропостачання з розгалуженою кабельною мережею, живлячим генератором (трансформатором) потужністю $S_r = 1000$ кВА та навантаженням контрольованого фідера $S_H = 100$ кВА з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,8$ характеризується наступними значеннями:

$$\begin{aligned} R_1 &= 50 \text{ кОм}; C_1 = 5 \text{ мкФ}; \\ R_{Nr} &= 50 \text{ кОм}; C_{Nr} = 0,05 \text{ мкФ}; \\ R_r &= 0,042 \text{ кОм}; L_r = 0,15 \text{ мГн}; \\ R_l &= 0,1 \text{ кОм}; L_l = 0,1 \text{ мГн}; \\ R_2 &= 500 \text{ кОм}; C_2 = 0,5 \text{ мкФ}; \\ R_H &= 2,217 \text{ кОм}; L_H = 5,293 \text{ мГн}; \\ R_{NH} &= 50 \text{ кОм}; C_{NH} = 0,05 \text{ мГн}; \\ R_3 &= 0 \dots 1000 \text{ кОм}. \end{aligned}$$

Тоді вираз (2) для φ_0 приймає вигляд:

опір навантаження, як правило, має активно-індуктивний характер, необхідно розглянути два випадки:

а) зміна активного опору однієї фази при фіксованому індуктивному опорі навантаження цієї фази і незмінному опорі навантаження решти фаз;

б) зміна індуктивного опору однієї фази при фіксованому активному опорі навантаження цієї фази і незмінному опорі навантаження решти фаз. Тому для рішення системи [9] у випадку режиму несиметрії навантаження припустимо, що:

$$\underline{Z}_{Nr} = \frac{R_{Nr}(-j\frac{1}{\omega C_{Nr}})}{R_{Nr} - j\frac{1}{\omega C_{Nr}}} = \text{const};$$

$$\underline{Z}_{1A} = \underline{Z}_{1B} = \underline{Z}_{1C} = \underline{Z}_1 = \frac{R_1(-j\frac{1}{\omega C_1})}{R_1 - j\frac{1}{\omega C_1}} = \text{const};$$

$$\begin{aligned} Z_{лA} = Z_{лB} = Z_{лC} = Z_{л} = R_{л} + j\omega Z_{л} = const; \\ Z_{2A} = Z_{2B} = Z_{2C} = Z_2 = \frac{R_2(-\frac{j}{\omega C_2})}{R_2 - \frac{j}{\omega C_2}} = const; \\ Z_{нB} = Z_{нC} = Z_{н} = R_{н} + j\omega Z_{н} = const; \\ Z_{нA} = R_{нA} + j\omega Z_{нA} = var; \end{aligned}$$

$$Z_{нH} = \frac{R_{нH}(-\frac{j}{\omega C_{нH}})}{R_{нH} - \frac{j}{\omega C_{нH}}} = const.$$

В даному випадку після відповідних перетворень вираз, що зв'язують струм I_0 і напругу U_0 в нульовій послідовності та вираз для визначення кута між ними приймають вигляд:

$$U_0 = \left[\frac{\left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нH} + 3Z_{нH} \right)}{2 \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) + \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right)} \right] I_0; \quad (4)$$

$$\varphi_0 = \arctg \left(\frac{Im \left(\frac{\left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нH} + 3Z_{нH} \right)}{2 \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) + \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right)} \right)}{Re \left(\frac{\left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нH} + 3Z_{нH} \right)}{2 \cdot \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right) + \left(\frac{(Z_r + 3Z_{нr})Z_1}{Z_r + 3Z_{нr} + Z_1} + Z_{нA} + 3Z_{нH} \right)} \right)} \right). \quad (5)$$

При несиметрії активної складової $R_{нA}$ опіру навантаження фази А, підставивши конкретні

фізичні значення системи електропостачання з розгалуженою кабельною мережею, отримаємо:

$$\varphi_0 = \arg \left[(1.159 + j0.846) \cdot \left(\frac{(j37.0 - 22.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA})}{(j71.8 - 10.8 + 21.0R_3 + j14.7R_{нA})} \right) \right]. \quad (6)$$

При цьому величина струму I_0 нульової послідовності змінюється в межах від 0,001 мА при $R_{нA} = 6$ Ом до 0,0051А при $R_{нA} = 1$ МОм, а величина напруги U_0 нульової послідовності змінюється в межах від 0,378 В при $R_{нA} = 6$ Ом до 3,144 В при $R_{нA} = 1$ МОм.

У випадку несиметрії індуктивної складової $L_{нA}$ опору навантаження фази А, підставивши конкретні фізичні значення системи електропостачання з розгалуженою кабельною мережею, отримаємо:

$$\varphi_0 = \arg \left[(1.159 + j0.846) \cdot \left(\frac{(j17.0 - 21.4 + j32.9L_{нA} - 23.1L_{нA})}{(j32.7 - 30.1 + j32.9L_{нA} - 23.1L_{нA})} \right) \right]. \quad (7)$$

Графік залежності φ_0 від $L_{нA}$ наведено на рис. 3. При цьому величина струму I_0 нульової послідовності змінюється в межах від 0,001 мА при $L_{нA} = 8$ мГн до 0,005 мА при $L_{нA} = 10000$ мГн,

а величина напруги U_0 нульової послідовності змінюється в межах від 0,623 В при $L_{нA} = 8$ мГн до 3,135 В при $L_{нA} = 10000$ мГн.

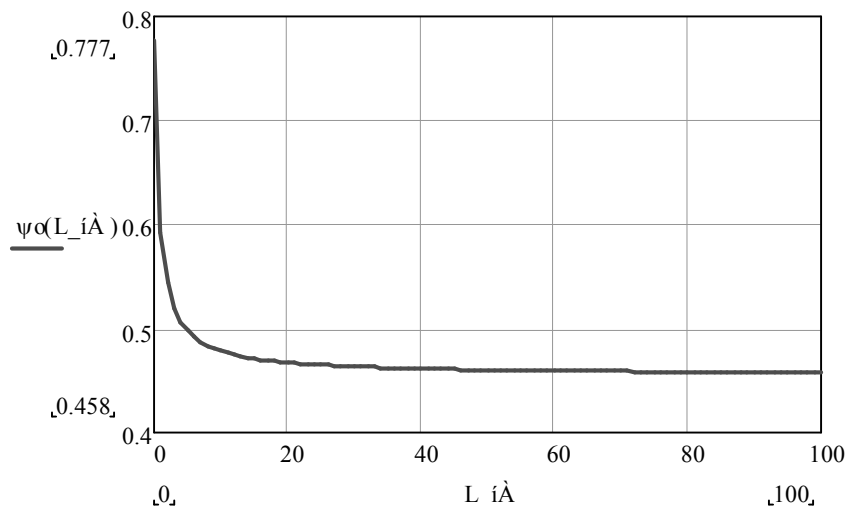


Рис. 3. –Графік залежності φ_0 від $L_{нA}$

Таким чином, на підставі аналізу співвідношень (1 - 7) і графіків (рис. 3 та рис. 2) можна зробити висновок про те, що інформація про кут між струмом I_0 і напругою U_0 нульової послідовності разом з даними про їх величини, може бути

діагностичним параметром, що дозволяє судити про стан ізоляції контрольованої ділянки електричної мережі.

Висновки. 1. Для обґрунтування можливості використання величини зсуву фаз між стру-

мом і напругою нульової послідовності при здійсненні контролю стану ізоляції електричної мережі з різними режимами роботи нейтралі доцільно використовувати математичну модель у вигляді системи рівнянь, складених відповідно до методу контурних струмів для схеми заміщення електричної мережі, що розглядається.

2. Аналіз співвідношень прийнятої математичної моделі дає можливість зробити висновок про те, що при несиметричному навантаженні в одній з фаз трифазної мережі з ізолюваною нейтраллю струм нульової послідовності випереджає

напругу нульової послідовності, а у випадку однофазного замикання на землю струм нульової послідовності відстає від напруги нульової послідовності.

3. Таким чином, виміряна величина фазового кута між напругою і струмом нульової послідовності може бути використана в якості відмінної ознаки, за допомогою якої можливо розрізнити режим несиметрії, викликаний несиметричністю навантаження, від режиму несиметрії, викликаного замиканням на землю при пошкодженнях ізоляції електричної мережі.

Список використаної літератури:

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Мінпаливенерго України від 25.07.06 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості від 13.02.2012 № 91).–К., 2012.
2. Основи електробезпеки та енергонагляду: підручник / Б.Т. Кононов, Г. І. Лагутін, А. М. Панченко, О. В. Степанюк.–Х.: ХУПС, 2011.–248 с.
3. Електробезпека: Навчально-методичний посібник для проведення лабораторних занять / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, А. О. Нечаус, О. О. Ручка.–Х.:ХУПС, 2011.–144 с.
4. Ревякин А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках / А. И. Ревякин, Б. И. Кашолкин. – М.: Энергия, 1980.–180 с.
5. Князевский Б.А. Охрана труда в электроустановках / Б.А. Князевский.–М.:Энергия, 1987.–222 с.
6. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В. Е.Манойлов.–Л.:Энергоатомиздат, 1991.–188 с.
7. Разумный О.Т. Повышение эффективности электроснабжения угольных шахт / О.Т. Разумный, Ф. П. Шкрабец.–К.: Техника, 1986.–160 с.
8. Правила безпечної експлуатації військових електроустановок, затверджені наказом МО України від 13.05.03 (зі змінами згідно наказу МО України від 12.11.10 №589).–К., 2011.
9. Лагутин Г. И. Математическая модель для исследования влияния параметров электрической сети на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности / Г. И. Лагутин, В. Н. Лысенко, В. Д. Заболотный // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил.–Х.: ХУПС, 2015.–Вип. 2(43).–С. 89-92

Лысенко В.М., Савойский А.Ю. Использование математической модели для исследования влияния критических режимов работы электрической сети на величину угла между током и напряжением нулевой последовательности

В статье рассматривается возможность использования математической модели для исследования влияния параметров однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью и несимметрии нагрузок потребителей на величину сдвига фаз между током и напряжением нулевой последовательности. Для исследования процессов, протекающих в электрических сетях при изменении сопротивления изоляции и величины нагрузки, предлагается использовать математические и имитационные модели.

Ключевые слова: электрические сети, контроль изоляции, однофазное замыкание на землю, несимметрия нагрузок.

Lysenko V., Savoytskyi A. The use of a mathematical model to study the effect of critical modes of operation of the electrical network to the angle between current and voltage zero-sequence

The article discusses the use of a mathematical model to study the influence of parameters of single-phase ground fault in electrical networks with insulated neutral and unbalance loads of consumers on the value of the phase shift between current and voltage zero-sequence. To study the processes occurring in electrical networks when changing the insulation resistance and the load, it is proposed to use mathematical and simulation models.

Analysis of correlations adopted mathematical model makes it possible to conclude that in asymmetrical loaded in one of the phases of a three-phase networks with isolated neutral ahead of current zero-sequence voltage zero sequence, in the case of single-phase ground fault zero-sequence current lags the voltage zero sequence.

Thus, the measured value of the phase angle between the voltage and current of zero sequence can

be used as a hallmark by which is possible to distinguish regime asymmetry caused by asymmetrical loading, the mode asymmetry caused by ground fault in the electrical network insulation damage.

Keywords: electrical network insulation monitoring, single-phase ground fault, unbalanced loads.

Дата надходження до редакції: 04.02.2016

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Кузема О.С.

УДК 621.311.001.57

МЕТОДОЛОГІЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОЗРАХУНКУ СКЛАДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ ТА ЇХ ОБ'ЄДНАНЬ

В. М. Лисенко, к.т.н.,

В. В. Гімпель, к.е.н.,

Сумський національний аграрний університет

У статті досліджені математичні моделі енергосистем, виявлені їх особливості та взаємозв'язки. Проаналізована теорія фізичного моделювання та управління режимами енергосистем та розглянуто її застосування для вирішення різноманітних задач. Виконана систематизація методів розрахунку установлених режимів, статичної стійкості та перехідних процесів енергосистем та їх об'єднань.

Ключові слова: енергосистема, модель, надійність, керування, моделювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У процесі створення та експлуатації енергосистем та енергооб'єднань вельми гостро виникло питання кількісної оцінки рівня надійності окремих об'єктів та енергосистем в цілому, а його вирішення на якісному рівні («надійно», «ненадійно») нерідко призводить до неекономічних результатів зважаючи на капіталоємність сучасних енергосистем.

Проблема надійності сучасних складних енергосистем як в аспекті аналізу, так і синтезу проектних та експлуатаційних схем є складною комбінаторною багатофакторною задачею стохастичного характеру надзвичайно великої розмірності, що не має аналогів вирішення в інших галузях техніки.

Научною основою в галузі надійності систем енергетики є:

- Розробка теорії вирогідності процесів моделей функціонування автоматизованих людино-машинних розподілених енергосистем з відображенням явищ фізико-технічного та соціально-економічного характеру в їх нерозривному зв'язку та єдності.

- Розробка та адаптація методів та прийомів кількісного аналізу надійності складних систем, направлених на синтез по технічним та техніко-економічним критеріям.

- Розробка математичних моделей функціонування енергосистем, адаптованих до існуючих високосервісних технологій комп'ютерних інструментів аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз фахової літератури свідчить, що дослідження, які присвячені надійності енергосистем, висвітлюють окремі положення з цього напрямку. Результати дослідження цього напрямку [1-3] свідчать про те, що не всі аспекти повною мірою висвітлюють проблему надійності сучасних

складних енергосистем як в аспекті аналізу, так і синтезу проектних та експлуатаційних схем

Постановка завдання. Метою статті є дослідження математичних моделей енергосистем, виявлення їх основних властивостей та взаємозв'язків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мірою надійності енергетичних систем є вирогідність недовідпуску електричної енергії, а також техніко-економічний показник, як збиток або недоотриманий прибуток.

Надійність системи забезпечується такими її властивостями та властивостями елементів, як працездатність, безвідмовність, керованість, ремонтпридатність, довговічність.

Задача оптимального управління режимами енергосистем у загальному випадку може бути сформульована як задача теорії оптимального управління, в якій необхідно оптимізувати цільову функцію:

$$J = \Theta[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \Phi[x(t), u(t), t] dt \quad (1)$$

Для динамічних систем цільова функція описується рівнянням:

$$\dot{x} = f[x(t), u(t), t], \quad x(t_0) = x_0, \quad (2)$$

де x – вектор змінних станів

u – вектор керування

Для вирішення задач оптимального керування застосовуються наступні основні методи: метод дискретного динамічного програмування, градієнтний метод, метод варіацій другого порядку, метод квазілінеаризації, методи математичного програмування. Для вирішення задач оптимального управління стаціонарними режимами енергосистем використовуються, в основному, три модифікації градієнтного методу: метод безумовної