

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08

ШЛЯХИ ОБМЕЖЕННЯ РІВНІВ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

I. В. ПАНТЄЛЄЄВА¹, А. В. ГЛУШКО^{2*}

кафедра фізики, електротехніки і електроенергетики, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, УКРАЇНА
кафедра зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
*e-mail: Alyona.Glushko@khpri.edu.ua

АНОТАЦІЯ На сьогоднішній день перед Україною та світом постають важливі питання стосовно вирішення проблем енергетичної галузі, в тому числі електроенергетики. У мережах різної напруги енергосистем рівень струмів к.з. безперервно зростає, при цьому вимоги до електричних апаратів, струмоведучих частин, силових трансформаторів і конструкцій розподільчих пристроїв стають більш жорсткими. Виникає проблема оптимальної координації у динаміці параметрів електрообладнання та вимог енергосистеми або координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. Зростання струмів к.з. в електричних мережах усіх класів напруги робить актуальною розробку нових ефективних методів і пристроїв, призначених для їх зниження. У статті розглянуті питання порівняння струму однофазних і трифазних к.з. усередненої регіональної енергосистеми, наведені інтегральні параметри електричних мереж такої системи. Детально проаналізовані обмеження струмів однофазних к.з. в проблемних вузлах, де встановлені автотрансформатори. Проведені дослідження дозволили рекомендувати вдосконалені методики розрахунків електричних апаратів та струмоведучих частин на електродинамічну і термічну стійкість при к.з., в тому числі і при однофазних. Приведені рекомендації до створення математичної моделі розрахунку нелінійної системи при наявності гнучких провідників, тому що, більшість пошкоджень (у вигляді к.з.) на високовольтних повітряних лініях електропередачі та у розподільчих пристроях супроводжується електричною дугою із параметрами, які змінюються у часі. Крім того, значні струми к.з. викликають механічні зміщення гнучких проводів у просторі, що призводить до зміни міжфазних відстаней та індуктивних опорів повітряних ліній прямої і зворотної послідовностей. Всі ці перелічені фактори надають взаємний вплив під час к.з. Крім того, при експлуатації електроустановок важливим фактором є комутаційний ресурс вимикачів, який впливає на надійність роботи установки та її техніко-економічні показники. Критерієм виводу вимикача з експлуатації може бути залишковий ресурс вимикача на рівні одного відключення повного струму відмикання вимикача. Проведений аналіз показав, що необхідно враховувати при розрахунках струмів к.з. додаткову термічну дію різних джерел енергії і енергосистеми в цілому, синхронних генераторів і компенсаторів, синхронних і асинхронних двигунів.

Ключові слова: коротке замикання; електрична мережа; енергосистема; високовольтний вимикач; повітряна лінія електропередачі; струмообмеження; надійність

WAYS TO LIMIT THE LEVELS OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN ELECTRICAL GRIDS

I. PANTIIEIEVA, A. GLUSHKO

Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, UEPA, Kharkiv, UKRAINE
Department of Welding, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Today, Ukraine and the world face important issues related to solving the problems of the energy sector, including electricity. In networks of different voltages of power systems the level of short-circuit currents is constantly growing, while the requirements for electrical devices, live parts, power transformers and switchgear designs are becoming more stringent. There is a problem of optimal coordination in the dynamics of electrical equipment parameters and power system requirements or coordination of electrical equipment parameters with existing short-circuits current levels. The growth of short-circuit currents in electrical networks of all voltage classes makes it important to develop new effective methods and devices designed to reduce them. The article considers the issues of comparing the current of single-phase and three-phase short-circuit, average regional power system, the integrated parameters of electrical networks of such a system. Limitations of currents of single-phase short-circuits are analyzed in detail in problem nodes where autotransformers are installed. The conducted researches allowed to recommend the improved methods of calculations of electric devices and current-carrying parts on electrodynamic and thermal stability at short-circuit, including at single-phase. Recommendations for creating a mathematical model for calculating a nonlinear system in the presence of flexible conductors are given, because most of the damage (in the form of short-circuit) on high-voltage overhead power lines and switchgear is accompanied by an electric arc with parameters that change over time. In addition, significant short-circuit currents cause mechanical displacements of flexible wires in space, which leads to changes in the phase distances and inductive resistances of overhead lines of forward and reverse sequences. All these listed factors have a mutual influence during s.c. In addition, when operating electrical installations, an important factor is the switching life of switches, which affects the reliability of the installation and its technical and economic performance. The criterion for decommissioning the circuit breaker may be the residual life of the circuit breaker at the level of one tripping of the full tripping current of the circuit breaker. The analysis showed that it is necessary

to take into account when calculating the short-circuit currents additional thermal action of various energy sources and the power system as a whole, synchronous generators and compensators, synchronous and asynchronous motors.

Keywords: short circuit; electric network; power system; high - voltage switch; overhead power line; current limitation; reliability

Вступ

Значна увага у сучасному світі та зокрема в Україні приділяється питанням розвитку енергетики. Важливими є питання стосовно енергетичного комплексу та перспектив його розвитку, енергозбереження, надійності, часу напрацювання та економічної ефективності [1–6].

Зміна соціально-економічних умов в країні викликає необхідність аналізу нових навантажувальних комплексів, визначення відносного складу споживачів та розробки методів їхнього обліку при розрахунку струмів коротких замикань (к.з.) у сучасних умовах. Актуальність цих методів значно підвищується для особливих умов коротких замикань, не облік яких може привести до значних похибок при визначенні цих струмів. А це в свою чергу, призводить до не спрацювання пристроїв релейного захисту та до відмов у роботі електрообладнання.

Питання координації струмів к.з. повинно вирішуватися з урахуванням параметрів електрообладнання, розробок їх нових видів, а також вимог до надійності та економічності режимів роботи енергосистем. Зростання струмів к.з. в електричних мережах усіх класів напруги робить актуальною розробку нових ефективних методів і пристроїв, призначених для їх зниження. Особливо це стосується мереж напругою 110 кВ і вище, коли необхідно заземлювати нейтралі блокових трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку, що призводить до створення умов, коли струм однофазного к.з. більше струму трифазного. Ця обставина вимагає перевіряти комутаційну здатність високовольтних вимикачів по струму однофазного к.з., що робить важкими умови їх роботи, тому що однофазні к.з. виникають значно частіше (в 40 і більше раз), ніж трифазні.

При виникненні короткого замикання (к.з.) в електричній системі опір ланцюга зменшується, що веде до різкого збільшення струмів в окремих гілках системи порівняно зі струмами нормального режиму. У свою чергу це викликає зниження напруги, особливо поблизу місця к.з. У залежності від місця виникнення та тривалості пошкодження наслідки к.з. можуть мати місцевий характер, або можуть впливати на всю енергосистему. У сучасних умовах роботи необхідно враховувати велику кількість різних факторів і явищ, які впливають на зростання рівнів струмів к.з., вміти їх вірно розраховувати і обирати відповідні пристрої для обмеження цих струмів [7–9].

Проблема координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. не нова. Вона пов'язана зі зростаннями одиничних потужностей агрегатів, електростанцій, підстанцій, енергосистем та мережі середньої і високої напруги [8]. Цю проблему можна вирішити тільки на основі

системного підходу з урахуванням динаміки зміни струмів к.з. і параметрів електрообладнання.

На даному етапі розвитку великих електроенергетичних систем задача обмеження струмів к.з. залишається невирішеною [10,11], хоча і застосовуються різні струмообмежувальні пристрої. Особлива увага приділяється методам обмеження струмів к.з. на землю.

Мета роботи

Дослідити ефективність обмеження струмів к.з. на землю у високовольтних мережах та проаналізувати засоби обмеження цих струмів.

Виклад основного матеріалу

Тенденція видачі потужностей електростанцій у мережі 110 кВ і, коли необхідно заземлювати нейтралі блокових трансформаторів, а також використання автотрансформаторів, що працюють із заземленими нейтраліми, приводять до того, що у мережах енергосистем іноді створюються умови, коли струм однофазного к.з. більше струму трифазного. Ця обставина вимагає перевіряти комутаційну здатність вимикачів по струму однофазного к.з., що робить важкими умови їх роботи, тому що однофазні к.з. виникають значно частіше (в 40 і більше раз), ніж трифазні.

Для мереж із заземленням, коли не враховуються активні опори елементів, та при умові, що $x_2 = x_1$, справедливо співвідношення:

$$\frac{I_k^{(1)}}{I_k^{(3)}} = \frac{3}{2+a}; a = \frac{x_0}{x_1}, \quad (1)$$

де x_1 , x_2 , x_0 – еквівалентний опір схеми відповідно прямої, зворотної і нульової послідовностей відносно точки к.з. Якщо $a < 1$, то $I_k^{(1)} > I_k^{(3)}$ і при $a \rightarrow 0$ відповідно $I_k^{(1)} \rightarrow 1,5 I_k^{(3)}$. При формуванні електричної мережі бажано, щоб $I_k^{(1)} / I_k^{(3)} \leq 1$ ($a \geq 1$).

Параметр a залежить від режиму заземлення нейтралі і пов'язаний з коефіцієнтом заземлення.

$$K_s = \frac{U_{\phi.з.}}{U_{м.ном.}} = \sqrt{a^2 + a + 1} / (a + 2), \quad (2)$$

де $U_{м.ном.}$ – номінальна напруга мережі; $U_{\phi.з.}$ – напруга на непошкодженій фазі при однофазному к.з.

По умовам роботи ізоляції електроустановок мережі 110 кВ і вище повинні бути ефективно-заземленими, тобто в них напруга на непошкоджених фазах при к.з. на землю в будь-якій точці не повинна перевищувати 80% лінійної (1,4 фазної) номінальної.

Існуючі трансформатори напругою 110 кВ і вище та автотрансформатори 220 кВ і вище, як правило, мають ізоляцію нейтралі класу 35 кВ при одно хвильній випробувальній напрузі 85 кВ. При цьому режим часткового розземлення нейтралей допустимий тільки для трансформаторів 110 кВ.

Для обмеження струмів однофазних к.з. у проблемних вузлах у нейтралі автотрансформаторів (АТ) 500/110 і 500/220 кВ регіональної енергосистеми були встановлені 12 струмообмежувальних реакторів з індуктивними опорами X_p [12,13]. Розрахунки показали, що дійсно, для кожної окремо взятої гілки АТ ефект струмообмеження при цьому досягав приблизно 40, 30, 15% при напрузі 110, 220, 500 кВ відповідно.

Але, насправді, частка обмеження у сумарному струмі к.з. (з врахуванням реальних параметрів зовнішньої мережі) по якому і виконується вибір і перевірка електрообладнання, є не дуже великою. Як видно з результатів аналізу роботи регіональної системи, необхідне обмеження струмів $I_k^{(1)}$ склало 5÷15, 0÷7 та 0% по вузлам мережі напругою відповідно 110, 220 та 500 кВ. Відносно невисока ефективність такого струмообмежувального заходу у розвинутій мережі викликала сумнівів у практичній доцільності введення у нейтралі автотрансформаторів, розміщених поблизу вузлів мережі, опорів та примусила ввести на шинах 110÷220 кВ стаціонарне розділення мережі.

Таким чином, методи обмеження струмів однофазних к.з., що використовуються, є локальними заходами і не дуже впливають на структуру і параметри мереж так, як це відбувається при їх стаціонарному розділенні.

Максимальний струм к.з. пов'язаний з інтегральними параметрами електричних мереж, приведений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Інтегральні параметри електричних мереж регіональної енергосистеми

Напруга мережі, кВ	σ_M км/км ²	$S_{пм}$, км ²	$I_{ср}$, км
110	0,2177	111,1	12,2
220	0,1029	839,3	28,3
500	0,017	7833,3	61,5

На рис. 1 побудовані залежності $I_{k \max}$ у системі з примусово замкнутими точками стаціонарного розділення мереж від їх інтегральних параметрів.

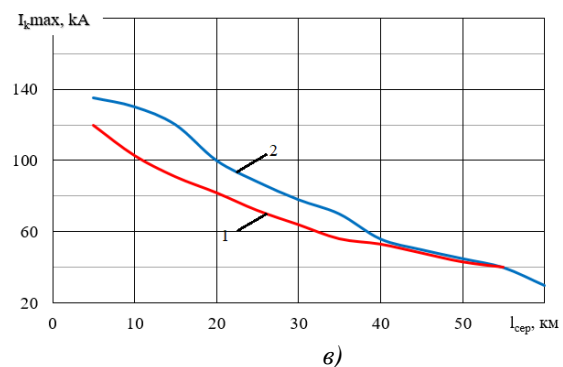
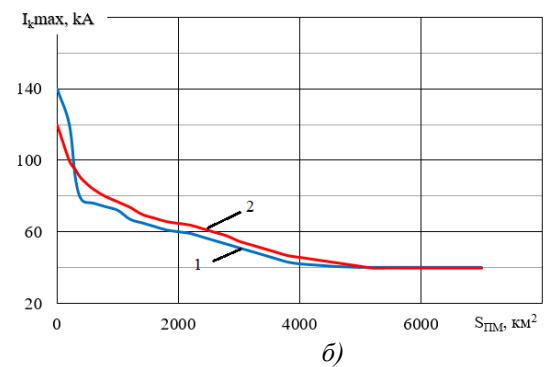
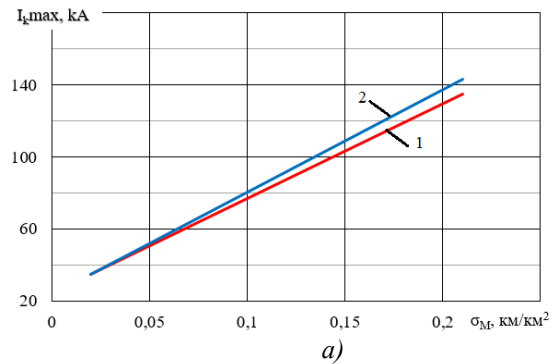


Рис.1 – Залежність максимального струму к.з. в електричній мережі: а) від щільності мережі, б) від площі електропостачання (на одну підстанцію), в) від середньої довжини лінії; 1 – $I_k^{(1)}$; 2- $I_k^{(3)}$

Проведені дослідження дозволили розробити вдосконалені методики розрахунків провідників та електричних апаратів на електродинамічну та термічну стійкість при к.з. [13,14].

Обговорення результатів

Зміна соціально-економічних умов в країні викликає необхідність аналізу нових навантажувальних структур, визначення відносного складу споживачів, та розробки методів їх обліку при розрахунку струмів к.з. в сучасних умовах. Актуальність цих методів значно підвищується для особливих умов к.з., не облік яких призводить до

значних похибок при визначенні струмів к.з. До особливих умов слід віднести:

- визначення струмів к.з. у вузлах з комплексними навантаженнями і автономних системах електропостачання;
- збільшення активного опору провідників внаслідок нагріву струмів к.з.
- виникнення відкритої електричної дуги на повітряних лініях (ПВЛ) електропередачі, яка може бути стійкою (або, яка сама гасне) у електроустановках з кабельними лініями 6÷10 кВ, а також у електроустановках змінного та постійного струму напругою 1 кВ;
- зміщення проводів при к.з. на ПЛ;
- к.з. в електроустановках постійного струму, які живляться від різних джерел (акумуляторних батарей, перетворювачів, генераторів).

Проведений аналіз аварійності в електроустановках напругою до і вище 1 кВ показав, що однією з основних причин не спрацювання пристроїв релейного захисту та відмов у роботі електрообладнання є не врахування сукупного впливу на струм к.з. факторів, що виникають при особливих умовах к.з. Для цього необхідно виявити та обґрунтувати склад основних факторів, необхідних для комплексного обліку нелінійності короткозамкнених ланцюгів при розрахунках струмів к.з. [11,15].

Більшість пошкоджень у вигляді к.з. на ПЛ та у розподільних пристроях (РП) супроводжується електричною дугою із параметрами, які змінюються у часі. Значні струми к.з. викликають зміщення гнучких проводів у просторі, що призводить до зміни міжфазних відстаней та індуктивних опорів ПЛ прямої і зворотної послідовностей. Перелічені явища надають взаємний вплив під час к.з., тому виникла необхідність розробки комплексної математичної моделі розрахунку нелінійності у системах з гнучкими провідниками.

Математична модель повинна мати систему диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які описують зміни параметрів режиму к.з. у нелінійній системі під впливом наступних факторів і процесу розвитку відкритої електричної дуги в місці к.з.; руху проводів розщепленої фази; збільшення активного опору провідників при нагріванні їх струмом к.з.; зміни індуктивного опору прямої, зворотної і нульової послідовностей ПЛ; збільшення довжини проводів ПЛ внаслідок їх нагрівання (температурне подовження). Крім того, необхідно визначити характер зміни параметрів відкритої електричної дуги, наприклад, погонного індуктивного опору прямої (зворотної) і нульової послідовностей, активного і хвильового опорів при к.з. на ПЛ з різною конструкцією.

Облік сумісного впливу основних факторів нелінійності при к.з. дозволяє більш ретельно аналізувати причини і наслідки к.з., уточнювати розрахункові умови к.з., вибирати вимикачі і параметри релейного захисту, а також оцінювати

електродинамічну стійкість ПЛ і РП з гнучкою ошиновкою.

Надійність і пожежна безпека електроустановок напругою до 1 кВ залежать від достовірності розрахунків к.з. на стадії проектування, а також при налаштуванні захисту і виборі апаратів. Досвід розрахунків експлуатації [6,12,16,17] показали, що на струм к.з. суттєво впливає активний опір дуги. Відсутність методики обліку опору дуги при розрахунку струмів к.з., як у нашій країні, так і в країнах світу, призвело до необхідності проведення промислових випробувань у системі власних потреб 0,4 кВ низки електростанцій.

Відомо, що системи постійного струму складаються з комплексу різних джерел, які працюють паралельно: акумуляторних батарей, генераторів постійного струму, статичних перетворювачів. У зв'язку з цим виникають особливі умови, які потребують обліку взаємного впливу на струм к.з. вищезазначених факторів.

При експлуатації електроустановок важливим фактором є комутаційний ресурс вимикачів. Для відповіді на питання про допустимість спрацювання ресурсу вимикачів необхідно проаналізувати та узагальнити заводські відомості по комутаційному ресурсу для різних типів вимикачів. У якості критерію виведення вимикача у ремонт необхідно приймати залишковий ресурс вимикача на рівні одного відключення повного струму відмикання вимикача. При відсутності статистичних даних по конкретному вимикачу можна використовувати імовірні характеристики к.з. і струмів к.з. Для розробки імовірних характеристик к.з. треба провести аналіз системи інформації про к.з. в енергосистемі, визначити джерела інформації про к.з., зібрати й обробити статистичні матеріали. Необхідно розробити імовірні характеристики к.з., такі як: питома кількість к.з. для електроустановок різного типу і рівня напруги; розподіл к.з. по видам; розподіл к.з. по довжині лінії електропередачі; оцінена ймовірність спрацювання комутаційного ресурсу вимикача для приєднань різного типу (на РП).

Висновки

Методи обмеження струмів однофазних к.з., які використовуються, є локальними і не впливають на структуру і параметри мереж у той мірі, як це відбувається при їх стаціонарному розділенні. Проведений аналіз показав, що можна враховувати термічну дію різних джерел енергії; енергосистеми в цілому, синхронних генераторів і компенсаторів, синхронних і асинхронних двигунів. Розроблені теоретичні положення щодо визначення струмів к.з. та їх електродинамічної і термічної дії в особливих умовах, що в сукупності дозволяє вирішувати важливі науково-технічні задачі електроенергетичної галузі.

Список літератури

1. Концепція формування енергетичного балансу. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/99242859> (дата звернення: 01.10.2020).
2. Budanov P., Brovko K., Chemiuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 5/5(95). P. 20–28. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.
3. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Iss. 1 (84). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
4. Пантелєєва І. В., Шматько Н. М., Глушко А. В. Шляхи обмеження рівнів струмів короткого замикання в електричних мережах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2. С. 38–44. doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.05.
5. Glushko A., Pantielieieva I., Shmatko N. Prospects for the development of modern energy complexes. "Progressive directions of technological complexes development". *Collection of scientific reports of IV-th international scientific and technical conference devoted to problems of higher education and science TK-2020* (June 2–4, 2020, Lutsk). Lutsk: LNTU, 2020. P. 57–58.
6. Dmytryk V.V., Glushko A.V., Iglin S.P. Structural changes in the metal of welded joints of long-term operating steam pipelines. *The Paton Welding Journal*. 2020. №2. P. 22–25. doi: 10.37434/tpwj2020.02.04.
7. Мозгалев К. В., Неклепаев Б. Н., Шунтов А. В. Токи короткого замыкания и эффективность стационарного деления электрической сети. *Электричество*. 2014. № 10. С. 32–38.
8. Роденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. *Энергия*, 2001. С. 2–5.
9. Ковалко М. П., Денисюк С. П. *Енергозбереження – пріоритетний напрям державної політики України*. Київ, 1998. 512 с.
10. Крючков Ц. П. *Переходные процессы в электроэнергетических системах*. Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.
11. Пантелєєва І. В. Проблема координації рівнів струмів короткого замикання в енергосистемах. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. 2020. Том 31 (70). №1. С. 34–39.
12. Пантелєєва І. В. Особливості захисту від неповнофазних режимів у розподільчих мережах 6–110 кВ. *Prospects for the Development of Technical Science in EU Countries and Ukraine*. Poland. 2018. P. 125–128.
13. Попов О., Shmatko N., Budanov P., Pantielieieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 6, № 3 (102). P. 39–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.183422
14. Шматько Н. М. Рекомендації щодо оцінки складників фінансового потенціалу гнучкості машинобудівного підприємництва. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2011. № 25. С. 79–85.
15. Шматько Н. М. Підходи до формування синергетичного ефекту в економіці. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. УкрДАЗТ, 2013. № 43. С. 103–106.
16. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 01.11.2020).
17. Енергобаланс. URL: <http://energobalans.com/> (дата звернення: 01.11.2020).

References (transliterated)

1. Konceptcia formuvannya energetichnogo balansu [The concept of energy balance formation]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/99242859> (accessed: 01.10.2020).
2. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2018. 5/5(95), pp. 20–28, doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.
3. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 6, Iss. 1(84), pp. 14–20, doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
4. Pantielieieva I., Shmatko N., Glushko A. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2, pp. 38–44, doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.05.
5. Glushko A., Pantielieieva I., Shmatko N. Prospects for the development of modern energy complexes. "Progressive directions of technological complexes development". *Collection of scientific reports of IV-th international scientific and technical conference devoted to problems of higher education and science TK-2020* (June 2–4, 2020, Lutsk). Lutsk: LNTU, 2020, pp. 57–58.
6. Dmytryk V. V., Glushko A. V., Iglin S. P. Structural changes in the metal of welded joints of long-term operating steam pipelines. *The Paton Welding Journal*, 2020, no 2, pp. 22–25, doi: 10.37434/tpwj2020.02.04.
7. Mozgalev K. V., Neklepaev B. N., Shuntov A. V. Toky' korotkogo zamukany`ya y` efekty`vnost` stacy`onarnogo deleny`ya elektry`cheskoj sety` [Short-circuit currents and efficiency of stationary division of an electric network]. *Elektrychestvo [Electricity]*, 2014, no. 10, pp. 32–38.
8. Rodenberg R. Eksploatacionnie rezhy`mu elektroenergeticheskikh sy`stem i ustanovok [Operating modes of electric power systems and installations]. *Energiya [Energy]*, 2001, pp. 2–5.
9. Kovalko M. P., Deny`syuk S.P. *Energozbereshennya – priory`tetny`j napryam derzhavnoyi polityky Ukrayiny* [Energy saving is a priority of Ukraine's state policy]. Kyiv, 1998, 512 p.
10. Kryuchkov Cz. P. *Perexodnie processi v yeletroyenergetycheskyykh systemax* [Transient processes in electric power systems]. РН МYeY`, 2008, 416 p.
11. Pantyleyeyeva I. V. Problema koordy`nacyi rivniv strumiv korotkogo zamy`kannya v energosy`stemax. *Vcheni zapys`sky` Tavrijs`kogo nacional`nogo univerty`tetu im. V.I. Vernads`kogo* [Scientific notes of V.I. Vernadsky Tavriya National University], 2020, Vol. 31(70), no1, pp. 34–39.
12. Pantyleyeyeva I. V. Osoblyvosti zaxystu vid nepovnofaznyx rezhy`miv u rozpodilchyyi merezhax 6–110 Kv [Features of protection against incomplete phase modes in distribution networks 6–110 kV]. *Prospects for the Development of Technical Science in EU Countries and Ukraine*. Poland, 2018, pp. 125–128.

13. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantelieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, Vol 6, no. 3 (102), pp. 39–48, doi: 10.15587/1729-4061.2019.183422.
14. Shmatko N. M. Rekomendaciyi shhodo ocinky skladnykiv finansovogo potencialu gnuchkosti mashynobudivnogo pidpryemnyctva [Recommendations for assessing the components of the financial potential of the flexibility of machine-building entrepreneurship]. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2011, no. 25, pp. 79–85.
15. Shmatko N. M. Pidxody do formuvannya sy`nergety`chnogo efektu v ekonomici [Approaches to the formation of a synergetic effect in the economy.]. *Visnyk ekonomiky transportu i promy`slovosti. [Bulletin of Transport Economics and Industry]*. UkrDAZT, 2013, no 43, pp. 103–106.
16. Derzhavna sluzhba staty`sty`ky` Ukrayiny` [State Statistics Service of Ukraine]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (accessed: 01.11.2020).
17. Energobalans [Energy balance]. Available at: <http://energobalans.com/> (accessed: 01.11.2020).

Відомості про авторів (About authors)

Пантелєєва Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: pantelieeva.uipa@gmail.com.

Ірина Пантелєєва – Ph. D., Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, associate professor at the Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: pantelieeva.uipa@gmail.com.

Глушко Альона Валеріївна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри зварювання, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-6245-9971; e-mail: alyonaglushko@gmail.com.

Alyona Glushko – Ph. D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of Welding, Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-6245-9971; e-mail: alyonaglushko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Пантелєєва І. В., Глушко А. В. Шляхи обмеження рівнів струмів короткого замикання в електричних мережах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 54-59. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

Please cite this article as:

Pantelieeva I., Glushko A. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 54-59, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пантелєєва І.В., Глушко А.В. Пути ограничения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 54-59. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

АННОТАЦІЯ На сьогоднішній день перед Україною і миром виникають важливі питання по вирішенню проблем енергетическої отрасли, в том числі електроенергетики. В сетях различного напряжения энергосистем уровень токов к.з. непрерывно растет, при этом требования к электрическим аппаратам, токоведущих частей, силовых трансформаторов и конструкций распределительных устройств становятся более жесткими. Возникает проблема оптимальной координации в динамике параметров электрооборудования и требований энергосистемы или координации параметров электрооборудования с существующими уровнями токов к.з. Рост токов к.з. в электрических сетях всех классов напряжения делает актуальной разработку новых эффективных методов и устройств, предназначенных для их снижения. Рассмотрено сравнения тока однофазных и трехфазных к.з. усредненной региональной энергосистемы, приведенные интегральные параметры электрических сетей такой системы. Проанализированы ограничения токов однофазных к.з. в проблемных узлах, где установлены автотрансформаторы. Проведенные исследования позволили рекомендовать усовершенствованные методики расчетов электрических аппаратов и токоведущих частей на электродинамическую и термическую стойкость при к.з. (в т.ч. и при однофазных). Приведены рекомендации к созданию математической модели расчета нелинейной системы при наличии гибких проводников, потому что, большинство повреждений (в виде к.з.) на высоковольтных воздушных линиях электропередачи и в распределительных устройствах сопровождается электрической дугой с параметрами, которые изменяются во времени. Значительные токи к.з. вызывают механические смещения гибких проводов в пространстве, что приводит к изменению межфазных расстояний и индуктивных сопротивлений воздушных линий прямой и обратной последовательностей. Все эти факторы оказывают взаимное влияние при к.з. Проведенный анализ показал, что необходимо учитывать при расчетах токов к.з. дополнительную термическую действие различных источников энергии и энергосистемы в целом, синхронных генераторов и компенсаторов, синхронных и асинхронных двигателей.

Ключевые слова: короткое замыкание; электрическая сеть; энергосистема; высоковольтный выключатель; надежность

Надійшла (received) 09.11.2020