

УДК 621.311.001.57

<https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-1-21-26>

С.О. СКРИПНИК (аспірант), Г.О. ШЕІНА (канд. техн. наук.)

Державний вищий навчальний заклад

«Донецький національний технічний університет»

[savelii.skrypnyk@gmail.com](mailto:savelii.skrypnyk@gmail.com) [ganna.sheina@donntu.edu.ua](mailto:ganna.sheina@donntu.edu.ua)

## ПОРІВНЯННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ 6(10) кВ та 20 кВ

*Анотація:* У статті розглянуто математичне моделювання ділянки електричної мережі і моделювання режимів короткого замикання для електричних розподільчих мереж напругою 6, 10, 20 кВ. На базі отриманих результатів проаналізовано рівень струмів короткого замикання для електричних мереж різних класів напруги: 6, 10, 20 кВ. Наведено дані повітряних та кабельних ліній електропередачі. Детально розглянуто розрахунок трифазного короткого замикання, так як розрахунки короткого замикання є первинним дослідженням, коли планується розробка, модернізація або розширення електроенергетичної системи.

**Ключові слова:** математичне моделювання, електрична мережа, коротке замикання, рівень струмів короткого замикання, повітряні та кабельні лінії електропередачі.

**Постановка проблеми.** Причиною більшості аварій в електроустановках є короткі замикання (КЗ), які виникають внаслідок порушення електричної міцності ізоляції струмопровідних частин. Коротке замикання – це електричне з'єднання двох точок електричного кола з різними значеннями потенціалу, не передбачене конструкцією пристрою, яке порушує його нормальну роботу. Коротке замикання може виникати в результаті порушення ізоляції струмоведучих елементів або механічного дотику неізованих елементів. Також коротким замиканням називають стан, коли опір навантаження менше внутрішнього опору джерела живлення.

Причини таких порушень різноманітні: старіння ізоляції, обриви проводів повітряних ліній електропередачі, механічні пошкодження ізоляції кабельних ліній при земельних роботах, удари блискавки в лінії електропередачі та інші. Частіше за все КЗ відбуваються через перехідний опір, наприклад через опір електричної дуги, який виникає в місці пошкодження ізоляції. Інколи виникають металічні КЗ при яких опір електричної дуги має дуже мале значення.

**Аналіз попередніх досліджень.** В трифазних електроустановках виникають трифазні та двофазні КЗ. Крім того, в трифазних мережах з наглухо заземленою нейтраллю також можуть виникати однофазні та двофазні КЗ на землю. При трифазному КЗ всі фази мережі знаходяться в однакових умовах тому його називають симетричним. При інших видах КЗ у кожній фазі мережі протікають різні струми, у зв'язку з чим векторні діаграми струмів та напруги скривлюються. Такі замикання називають несиметричними. Короткі замикання, як правило, супроводжуються збільшенням струму у пошкоджених фазах до величини, яка в декілька разів перевищує номінальне значення.

Протікання струму КЗ є короткочасним, тому призводить до короткочасного збільшення втрат електричної енергії в провідниках та контактах, що супроводжується їх сильним нагріванням. Перегрів струмопровідних частин може призвести до швидкого старіння та руйнування ізоляції, зварювання та вигорання контактів електричних апаратів, втрати механічної міцності шин та провідників. Провідники та комутаційні пристрої повинні витримувати нагрів струмами короткого замикання, тобто бути термічно стійкими. Протікання струму КЗ також супроводжується значними електродинамічними зусиллями між провідниками. Струмопровідні частини, комутаційні апарати та електричні машини повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони витримували без пошкодження зусилля, які виникають при КЗ. Тобто вони повинні бути електродинамічно стійкими. Короткі замикання супроводжуються пониженням рівня напруги в електричній мережі, особливо біля місця пошкодження.

Наслідками КЗ є [1]:

1. Теплові або термічні впливи струму КЗ на елементи електричної системи (розм'якшення, виплавлення металу, випалювання ізоляції, руйнування контактів).
2. Динамічні дії, що виникають між струмоведучими провідниками.
3. Різке зниження напруги в місці КЗ.
4. При тривалому зниженні напруги на 30-40% від номінального (на час більше 1 с) двигуни починають зупинятися.
5. Перерви в електропостачанні.
6. Порушення стійкості окремих елементів і режиму електроенергетичної системи в цілому.
7. Вигорання елементів електроустановок.

**Метою даної статті** дослідження величини струмів короткого замикання в залежності від типу конструктивного виконання ліній електропередачі і номінальної напруги: 6(10) кВ і 20 кВ.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Дослідження коротких замикань в енергосистемі є основним кроком у плануванні сучасних електричних мереж. Дослідження проводяться з використанням комп'ютерного програмного забезпечення, спочатку шляхом моделювання системи, а потім імітуючи помилки. Несправність зазвичай призводить до підвищення струму, що протікає в елементах мережі, і якщо не забезпечується надійний захист, може стати причиною пошкодження в силовому пристрої й подальшому розвитку аварії. Таким чином, розрахунки короткого замикання є первинним дослідженням, коли планується розробка, модернізація або розширення енергосистеми.

Найменшу ймовірність має трифазне КЗ. У багатьох випадках трифазне КЗ пов'язано з найбільш важкими наслідками, оскільки воно викликає найбільші значення небалансів потужності на валах генераторів. Вивчення перехідних процесів починається з режиму трифазного замикання в силу його відносної простоти в порівнянні з іншими видами несиметрії.

У більшості випадків при аналізі і розрахунку перехідного режиму електричної системи передбачається складання розрахункової схеми заміщення, в якій параметри її елементів визначаються в іменованих або відносних одиницях. Електрична схема заміщення використовується для подальшого дослідження перехідних процесів в електроенергетичній системі.

Визначення електричних і електромагнітних величин у відносних одиницях широко застосовується в теорії електричних машин. Це обумовлено тим, що істотно спрощує теоретичні викладки і надає результатам узагальнений вид в практичних розрахунках струмів і залишкових напруг при КЗ. Під відносним значенням будь-якої величини розуміють її відношення до іншої однойменної величини, прийнятої за базову. Отже, перед тим як представити будь-які величини в відносних одиницях, треба вибрати базисні одиниці [2, 3].

Базисних електричних одиниць чотири: потужність  $S_\delta$ , напруга  $U_\delta$ , струм  $I_\delta$ , опір  $z_\delta$ . Однак тільки дві (будь-які) з цих чотирьох є незалежними, тобто можуть бути прийняті довільним чином. З практичної точки зору найбільш доцільно в якості незалежних базисних одиниць прийняти  $S_\delta$  та  $U_\delta$ . Інші величини знаходяться на їх основі. Базисний струм:

$$I_\delta = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} \cdot U_\delta} \quad (1)$$

Для детального аналізу коротких замикань проведемо моделювання енергетичної системи в пакеті прикладних програм MATLAB, а саме Simulink.

Розглянемо ділянку розподільчої мережі енергетичної системи 20 кВ, 10 кВ, 6 кВ з двома незалежними джерелами живлення потужністю 63 МВт та лініями електропостачання з зосередженими параметрами (рис. 1).

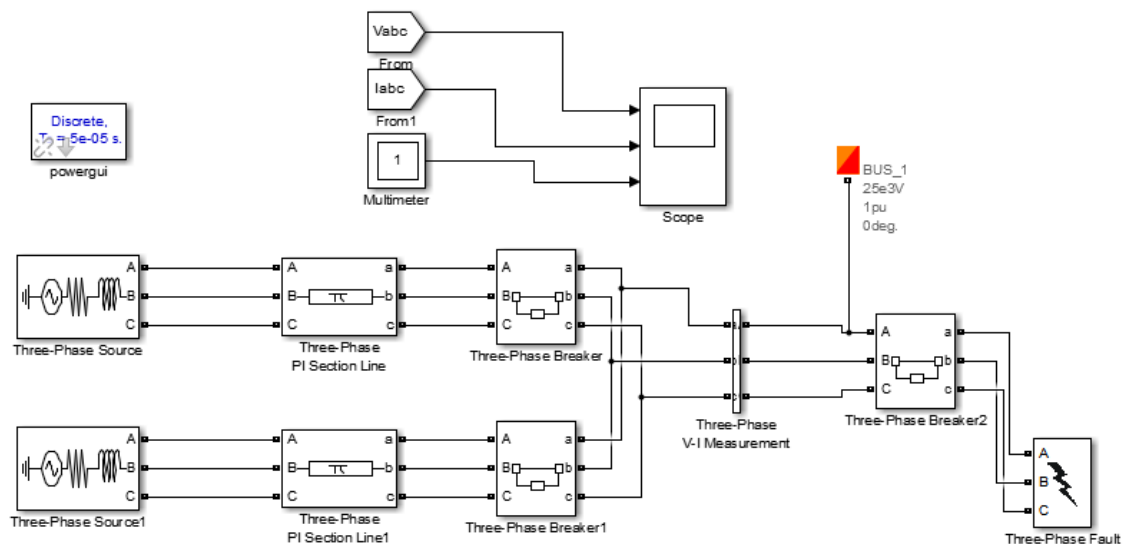


Рисунок 1 – Схема моделі енергетичної розподільчої системи з джерелом живлення

Максимальна потужність джерела живлення складає 63 МВА. Порівняємо значення струму короткого замикання в повітряних та кабельних лініях електропередачі з врахуванням мінімального та максимального перерізу цих дротів [4, 5, 6]. Параметри ліній електропередачі приведені у табл. 1.

Базисні струми:

$$I_{\delta 20\text{кВ}} = \frac{S_\delta}{\sqrt{3} \cdot U_\delta} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 2184 \text{ A}$$

$$I_{\delta 10кВ} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 4368 \text{ A}$$

$$I_{\delta 6кВ} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{63 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 7280 \text{ A}$$

Таблиця 1 – Параметри ліній електропостачання 6-20 кВ

Тип лінії	Напруга кВ	Переріз мм	Питомий активний опір Ом/км	Питомий індуктивний опір Ом/км	Питома реактивна ємність мкСм/км
ПЛ	20	35	0,89	0,445	2,56
ПЛ	20	185	0,167	0,384	2,92
КЛ	20	35	0,89	0,129	69
КЛ	20	185	0,167	0,101	127,5
ПЛ	10 (6)	35	0,89	0,391	2,92
ПЛ	10 (6)	185	0,167	0,339	3,4
КЛ	10	35	0,89	0,095	107
КЛ	10	185	0,167	0,077	200
КЛ	6	35	0,89	0,087	127,8
КЛ	6	185	0,167	0,073	325

Визначення активного й індуктивного опору ліній електропередачі (в.о.) (табл. 2):

$$R_l = R_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \quad (2)$$

$$X_l = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} \quad (3)$$

Таблиця 2 – Параметри ліній електропостачання в електричних мережах 6-20 кВ

Тип лінії	Напруга кВ	Переріз мм	Активний опір лінії $R_l$ в.о.	Індуктивний опір лінії $X_l$ в.о.
ПЛ	20	35	1,401	0,701
ПЛ	20	185	0,263	0,605
КЛ	20	35	1,401	0,203
КЛ	20	185	0,263	0,159
ПЛ	10	35	5,607	2,463
ПЛ	10	185	1,052	2,136
КЛ	10	35	5,607	0,599
КЛ	10	185	1,052	0,485
ПЛ	6	35	15,575	6,842
ПЛ	6	185	2,922	5,932
КЛ	6	35	15,575	1,522
КЛ	6	185	2,922	1,277

Аналітичний вираз для визначення струму короткого замикання, а саме трифазного короткого замикання:

$$I_{кз} = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{R_l^2 + X_l^2}} I_{\delta} \quad (4)$$

Розраховані струми трифазного КЗ для різних параметрів зведено до табл. 3 та наведено осцилограми залежності величини струму відповідно до параметрів лінії електропередачі та класів напруги рис. 2-4.

Таблиця 3 – Струм КЗ при різних конструктивних виконаннях ЛЕП

Тип лінії	Напруга кВ	Переріз мм	Струм короткого замикання $I_{кз}$ А
ПЛ	20	35	1619
ПЛ	20	185	2883
КЛ	20	35	1732
КЛ	20	185	4795
ПЛ	10	35	1305
ПЛ	10	185	2450
КЛ	10	35	1379
КЛ	10	185	3960
ПЛ	6	35	1101
ПЛ	6	185	2066
КЛ	6	35	1164
КЛ	6	185	3360

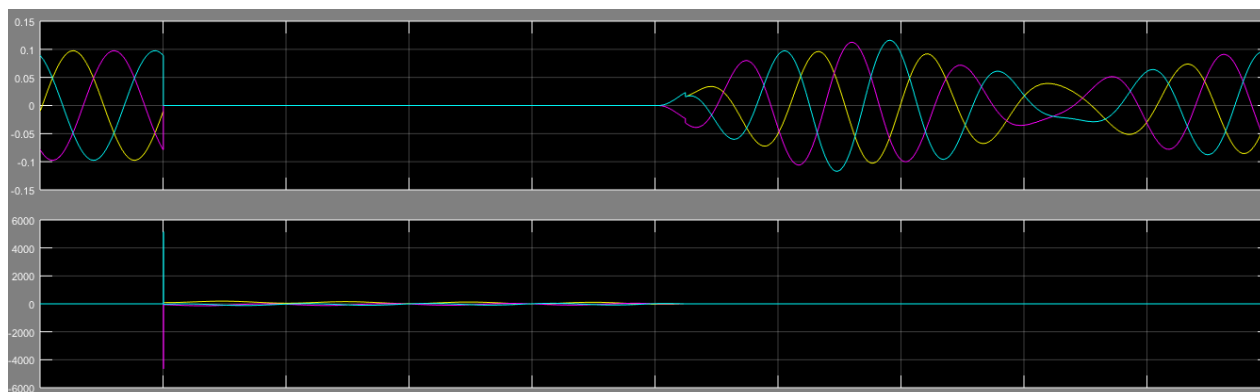


Рисунок 2 – Осцилограма перехідного процесу напруги та струму КЗ в кабельній лінії 20 кВ.

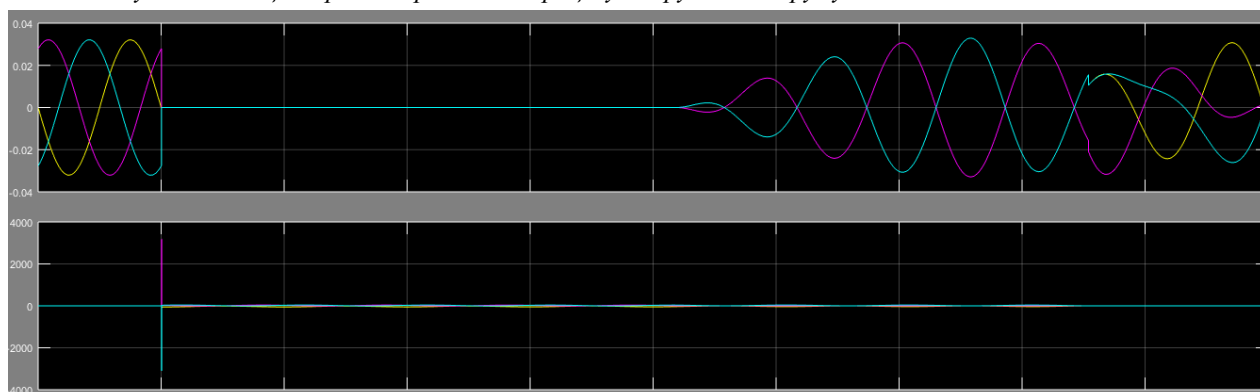


Рисунок 3 – Осцилограма перехідного процесу напруги та струму КЗ в кабельній лінії 10 кВ.

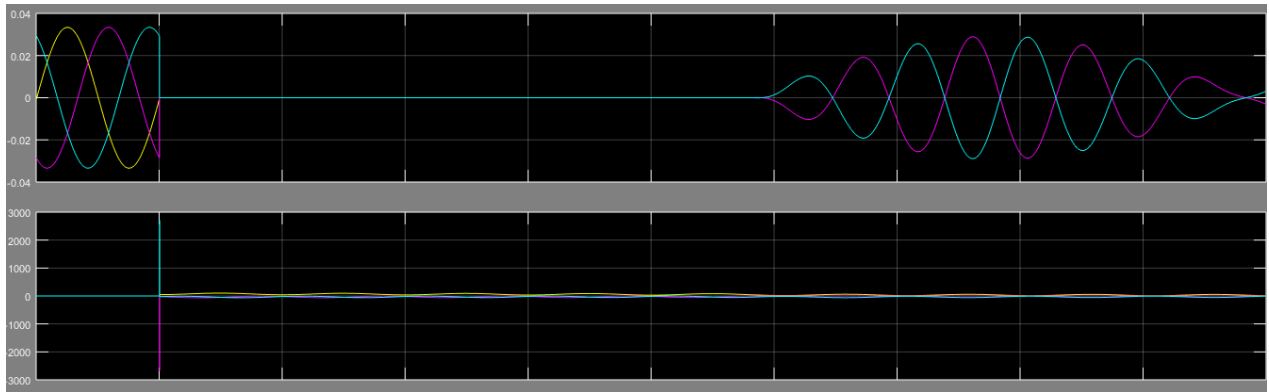


Рисунок 4 – Осцилограма перехідного процесу напруги та струму КЗ в кабельній лінії 6 кВ.

**Висновки.** При збільшенні напруги в електричній системі підвищується загальна навантажувальна здатність мережі, що в свою чергу надає можливість постачання якісної електричної енергії на більшу відстань. В процесі порівняння типу ліній електропередачі треба зазначити, що переваги має кабельна лінія електропередачі. За результатами розрахунку струмів короткого замикання можна зробити висновок, що в мережах з більшим перерізом лінії та більшою напругою струми КЗ мають більшу величину. Таким чином, при переході електричних мереж на вищий клас напруги 20 кВ струми КЗ збільшено на 43 % в порівнянні з електричною мережею напругою 6 кВ. Такий аналіз показує, що важливість надійного електроживлення в системі електропостачання для вищих класів напруги повинна бути на високому рівні та мати обладнання для запобігання аварійних ситуацій. В подальшому планується розробити систематизований розрахунок струмів КЗ для більшого ряду ліній електропередачі в системі розподілу електричної енергії.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електропостачання. URL: <http://www.kgau.ru/distance/2013/et2/007/gl4.htm>
2. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/6379214/page:7/>
3. Лекції.Ком. URL: <https://lektsii.com/1-177061.html>.
4. Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах: учебное пособие/ В.И. Готман; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 240 с.
5. Расчет токов короткого замыкания на ЭВМ: учеб.- метод. пособие / В.Г. Слюсаренко, Ю.И. Рясков, Н.М. Шайтор. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 44 с.
6. Михайло Андреев, Олексій Суворов, Алмаз Сулайманов "Універсальна математична модель трифазної лінії електричної передачі ", Томськ, Росія, 2016.

#### REFERENCES

1. Electricity supply. URL: <http://www.kgau.ru/distance/2013/et2/007/gl4.htm>
2. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/6379214/page:7/>.
3. Lectures.Com. URL: <https://lektsii.com/1-177061.html>.
4. Short circuits and asymmetric modes in electric power systems: a training manual / V.I. Gotman; Tomsk Polytechnic University. - Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011. - 240 p.
5. Calculation of short circuit currents on a computer: textbook.- method. allowance / V.G. Slyusarenko, Yu.I. Ryaskov, N.M. Shaytor. - Sevastopol: SevSU, 2018. - 44 p.
6. Mikhail Andreev, Aleksey Suvorov, Almaz Sulaymanov "Universal Mathematical Model of Three-phase Electrical Transmission Lines", Tomsk, Russia, 2016.

Надійшла до редколегії 06.02.2020

Рецензент: д.т.н. Нікіфоров А.П

S. SKRYPNYK, A. SHEINA  
State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

**Short circuits currents comparison of 6 (10) kV and 20 kV.** Most failures in electrical installations are caused by short circuits (short circuits), which occur as a result of a failure in the electrical strength of the insulation of the conductive parts. A short circuit is an electrical connection of two points of an electric circuit with different values of potential, which is not provided by the design of the device, which interferes with its normal operation. Short circuits may result from a failure of the insulation of the current-carrying elements or the mechanical contact of the non-insulated elements. Also called a short circuit is a condition where the load resistance is less than the internal resistance of the power source.

The reasons for such violations are various: aging of insulation, breakages of wires of overhead transmission lines, mechanical damages of isolation of cable lines at ground works, lightning strikes in the transmission line and others. Most often, short-circuits occur through transient resistance, such as through the resistance of an electric arc that occurs at the point of damage to the insulation. Sometimes there are metallic short circuits in which the resistance of the electric arc is very small.

The study of short circuits in the power grid is a major step in the design of modern electrical networks. The research is conducted using computer software, first by modeling the system and then simulating errors. A malfunction usually leads to an increase in the current flowing in the lines, and failure to provide reliable protection can result in damage to the power unit. Thus, short-circuit calculations are the primary consideration when designing, upgrading, or expanding a power system.

The three-phase short circuit is the least likely. However, in many cases, the three-phase short circuit is associated with the most severe consequences, as it causes the highest power imbalances on the shafts of the generators. The study of transients begins with the mode of three-phase closure due to its relative simplicity in comparison with other types of asymmetry.

In most cases, the analysis and calculation of the transient regime of the electrical system involves the preparation of a calculated scheme of substitution, in which the parameters of its elements are determined in named or relative units. The electrical substitution circuitry is used to further study the transients in the power system.

The definition of electrical and electromagnetic quantities in relative units is widely used in the theory of electric machines. This is because it significantly simplifies the theoretical calculations and gives the results a generalized view in the practical calculations of currents and residual voltages at the short circuit. By the relative value of any value is understood as its relation to another value of the same name, taken as the base. So, before presenting any quantities in relative units, we need to choose the basic units.

In the electrical system with increased voltages, the overall load capacity of the network increases, which in turn makes it possible to supply high-quality electrical energy over a greater distance. In the process of comparing the type of transmission lines, it should be noted that the advantages of the cable transmission line. According to the results of the calculation of short-circuit currents, it can be concluded that in networks with a larger line cross-section and a higher voltage, the short-circuit currents are larger. Thus, during the transition of the electric networks to the higher voltage class of 20 kV, the currents of the KZ increased by 43% compared to the 6 kV electric network. This analysis shows that the importance of reliable power supply in the power supply system for high voltage classes must be high and have equipment to prevent emergencies. In the future, it is planned to develop a systematic calculation of short-circuit currents for a number of transmission lines and to conduct mathematical modeling in the system of applications for the study of transient processes at short circuits.

**Keywords:** *mathematical modeling, electrical network, short circuit, current level of short circuit, overhead and cable transmission lines.*