

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.8

УДК 621.315.614

Хмельницький Є.Д., к. т. н., доцент, ORCID: 0000-0002-8605-4960,

e-mail: khmell2020@gmail.com

Шрамко Ю.Ю., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8141-260X, e-mail: tehndir@gmail.com

Роснко Ю.С., асистент, ORCID: 0000-0001-9408-2171

e-mail: efim.mail@gmail.com

Рафієв Гусейн Іслам огли, здобувач другого (магістерського) рівня,

e-mail: RafiyevHuseyn@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Khmelnyskyi Evgen, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Shramko Yuri, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Roenko Yukhym, asistent of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

Rafiyev Huseyn, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА НАДІЙНІСТЬ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖ

Дане дослідження присвячене аналізу роботи кабельної мережі промислового підприємства напругою 10 кВ. особливістю даного вузла електроживлення є потужний вентильний електропривод постійного струму для прокатного виробництва. На принциповій схемі вузла електроживлення вказана підстанція глибокого вводу ПГВ-5 та цехові підстанції ПС-4, ПС-5 і ПС-3; загальна довжина кабелів 10 кВ становить більше 20 км. Аналізуючи проблему надійності кабельних мереж необхідно значну увагу приділити динаміці струмів витоку, яка тісно пов'язана з величиною $\text{tg}\delta$ ізоляції кабелю. Дослідження показали, що величина функції діелектричних втрат залежить від величини коефіцієнта несинусоїдальності напруги.

Ключові слова: високовольтні кабелі; аномальні гармоніки; величина $\text{tg}\delta$; струми витоку; коефіцієнт несинусоїдальності напруги.

This study is devoted to the analysis of the cable network of an industrial enterprise with a voltage of 10 kV. a feature of this power supply unit is a powerful DC valve electric drive for rolling production. The schematic diagram of the power supply unit shows the deep-entry substation PGV-5 and workshop substations PS-4, PS-5, and PS-3; the total length of 10 kV cables is more than 20 km. value of the cable insulation. Analyzing the problem of the reliability of cable networks, it is necessary to pay considerable attention to the dynamics of leakage currents, which is closely related to the $\text{tg}\delta$ Studies have shown that the value of the dielectric loss function depends on the value of the voltage non-sinusoidal coefficient.

Keywords: high-voltage cables; abnormal harmonics; $\text{tg}\delta$ value; leakage currents; non-sinusoidal voltage coefficient.

Постановка проблеми

Кабельні мережі — це один із основних і важливих елементів внутрішнього електропостачання промислових підприємств. У багатьох випадках пошкодження кабельної мережі призводить до зупинки виробничого процесу окремої ділянки або навіть усього підприємства.

В якості прикладу розглянемо вузол електропостачання прокатних цехів металургійного підприємства. Так, підстанція глибокого вводу ПГВ-5 живить напругою 10 кВ три цехові підстанції, загальна довжина кабельної мережі складає понад 20 км. Характеристика вузла електроживлення наведена на рис. 1, де вказані довжина окремих ділянок, марки і переріз кабелів,

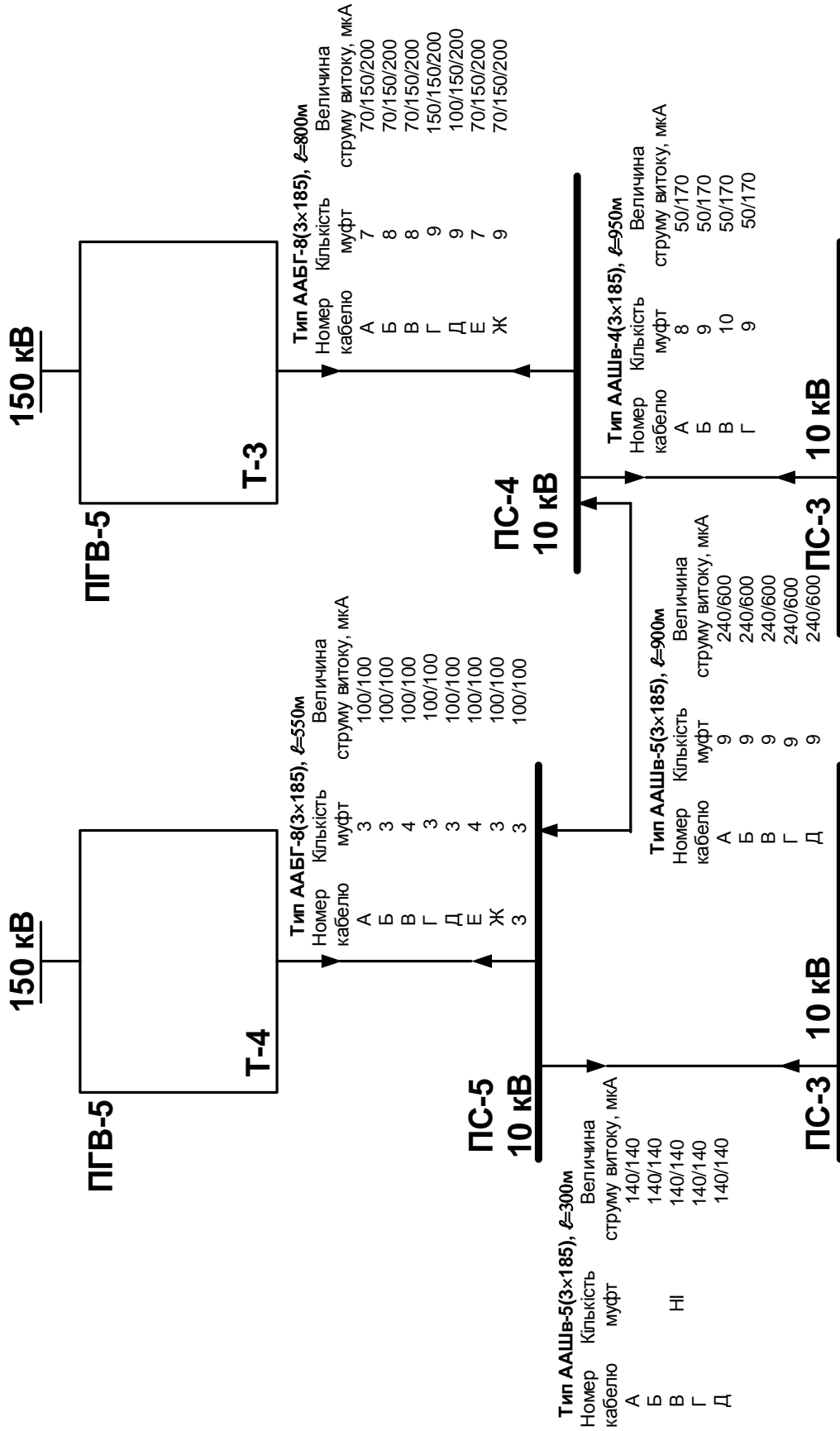


Рис.1. Схема і технічна характеристика кабельної мережі 10 кВ, що живиться від трансформаторів Т-3 і Т-4

кількість муфт та струми витоку. На період аналізу термін роботи кабелів становив майже 25 років, що типово для підприємств металургійного профілю.

Однією з причин, яка привернула увагу до проблеми надійності кабельних мереж, були два випадки пробоїв кабелів за короткий час, які привели до зупинки прокатних станів з суттєвим економічним збитком.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виходячи із аналізу наукових публікацій [1, 2], а також власних досліджень, прийшли висновку, що необхідно у першу чергу визначити рівень вищих гармонік (ВГ) мережі 10 кВ, а також величину струму однофазного замикання на землю (ОЗЗ) для цехових підстанцій ПС-4, ПС-5 та ПС-3. Основне джерело ВГ — це вентиляльний електропривод постійного струму прокатних станів. Вимірювання гармонік мікропроцесорним комплексом показало наступне: канонічні гармоніки порядку $\nu \leq 13$ у спектрі не перевищують 1,1—1,5 %, а неканонічні (парні і непарні) у різних режимах навантаження прокатних станів були у межах 1,8—2,5—3,9 % [2]. При цьому коефіцієнт несинусоїдальності знаходився у межах 5,5—8,9 %, що значно перевищує норматив у 5 %.

Вимірювання струмів однофазного замикання на землю проводилось за методикою [3], яка передбачає технічне замикання через ємність з наступним розрахунком струмів ОЗЗ для цехових підстанцій: ПС-4 — 24,2 А; ПС-5 — 17,3 А; ПС-3 — 14,8 А. Звісно, величина ємнісних струмів у мережах високої напруги в основному визначається довжиною і перерізом кабелів.

В останні роки, з метою обмеження пошкоджень від ОЗЗ, встановлюють дугогасильні реактори (ДГР). Однак, навіть при резонансному налаштуванні через точку замикання (у мережах з ізольованою нейтраллю) буде протікати струм вищих гармонік, особливо це стосується мереж із значною кількістю вентиляльних перетворювачів для електроприводів постійного струму. Струм вищих гармонік не компенсується ДГР, тому значний відсоток однофазних замикань на землю буде переходити у дво- та трифазні замикання з наступним відключенням кабельних ліній.

Формулювання мети дослідження

У процесі експлуатації кабельних мереж завжди контролюється комплекс наступних параметрів: струм однофазного замикання на землю, склад і рівень вищих гармонік та величина струмів витоку. Таким чином, необхідно з цієї послідовності визначити найбільш інформативний параметр, який обумовлює надійність роботи кабельної мережі. Вважаємо, що таким параметром буде електрична стійкість ізоляції кабелів, на яку впливають усі перелічені чинники, тому необхідно визначити ступінь цього впливу.

Виклад основного матеріалу дослідження

Кабельна мережа даного вузла електропостачання виконана трифазними кабелями марок ААШв — (3×185) та ААБГ — (3×185). Ізоляція жил кабелів складається з кабельного паперу з масляно-каніфольним просоченням. Експериментальні дослідження [4] свідчать про вплив спотворення кривої напруги на міцність і термін служби ізоляції кабелів. Основна суть полягає у тому, що така ізоляція має газові вкраплення, де під впливом височастотних електричних і магнітних полів починаються процеси іонізації з утворенням об'ємних зарядів із наступною їх нейтралізацією. Процес нейтралізації викликає появу в ізоляції часткових дефектів, що призводить до послаблення і повної втрати електричної міцності. Кількість розрядів у газових вкрапленнях залежить від форми кривої напруги, яка описується рівнянням

$$u = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \left[\sin \omega t \pm U_3 \cdot \sin(3\omega t + \Psi_3) \right], \quad (1)$$

де U_3 і U_3 і Ψ_3 — відносна величина амплітуди і початкової фази 3-ї гармоніки напруги.

Наші дослідження [3] визначили, що $tg \delta$ буде більшим у разі кривої напруги загостреної форми. Саме таку форму напруги живлення зареєстрували осцилографи (рис. 2); форма кривої змінювалась у залежності від складу ввімкнених резонансних фільтрів.

Розрахунки показали, що зростання $tg \delta$ ізоляції кабелів, навіть у разі незначного спотворення різко збільшує процес старіння ізоляції за рахунок прискорення фізико-хімічних процесів у діелектрику.

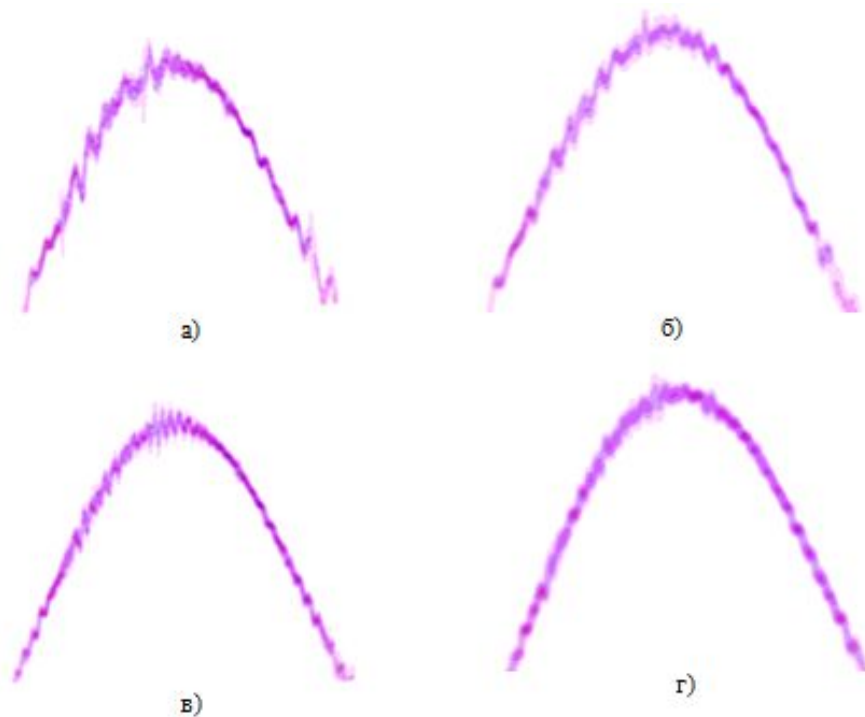


Рис. 2. Форма напруги живлення анодних трансформаторів: а) — фільтри вимкнені; б) — увімкнені Ф-5, Ф-7; в) — увімкнені Ф-5, Ф-11; г) — увімкнені Ф-5, Ф-7, Ф-11

Дослідженням процесів старіння діелектриків займався польський інженер З. Ясицький, результати роботи якого наведені у [5]. Результатом дослідів З. Ясицького стало визначення загального критерію — функції діелектричних втрат, тобто залежності $tg\delta$ від часу експлуатації:

$$\frac{tg\delta f}{tg\delta_0} = f(K_{НС}; t), \quad (2)$$

де

$$f(K_{НС}; t) = -0,031(t \cdot K_{НС})^2 + 0,1236(t \cdot K_{НС}) + 1, \quad (3)$$

тут $tg\delta_0$ і $tg\delta f$ — початкова і поточна величини коефіцієнта діелектричних втрат; $K_{НС}$ — коефіцієнт несинусоїдальності напруги (%), t — кількість років експлуатації кабелю.

В якості прикладу розрахуємо функцію діелектричних втрат, прийнявши: $t = 5; 10; 15; 20$ років та $K_{НС} = 5\%$ і 8% , що відповідає даним умовам експлуатації. При вказаних параметрах розрахунки показали наступне — функція втрат дорівнює:

$K_{НС} = 5\%$	$K_{НС} = 8\%$
$f(5\%; 5) = 6,0$	$f(8\%; 5) = 11,0$
$f(5\%; 10) = 15,0$	$f(8\%; 10) = 30,9$
$f(5\%; 15) = 27,8$	$f(8\%; 15) = 60,4$
$f(5\%; 20) = 44,4$	$f(8\%; 20) = 101,0$

Таким чином, зростання коефіцієнта несинусоїдальності суттєво впливає на процеси старіння ізоляції і як наслідок — скорочення терміну безвідмовної експлуатації кабелів.

Процес старіння ізоляції кабелів можна обґрунтувати також у результаті аналізу динаміки зміни струмів витоку кабелів. На рис. 1 для кожної кабельної лінії вказані струми витоку, які виміряні за останні 2,5 років. Найбільші струми витоку має кабельна лінія між підстанціями ПС-5 та ПС-4, найменші — між підстанціями ПС-5 та ПС-3. За вказаний період вимірювання струму витоку зросло у півтора — два рази.

Експлуатаційний персонал електротехнічної лабораторії (ЕТЛ) з інтервалом півроку — рік вимірює струми витоку, однак, як свідчить практика, аналізу динаміки зміни струмів витоку електрослужби не приділяють належної уваги, основна причина — відсутність точних нормативів на цей параметр. Однак наші дослідження [3] показали, що кількість однофазних замикань на землю тісно пов'язана з величиною струмів витоку.

Окремо слід зазначити, що проблема з надійністю кабельних мереж у вузлі ПГВ-5 принципово змінилася після вмикання фільтро-компенсуючого пристрою, налаштованого на 3—5—7—11 гармоніки. Особливістю даного проекту стало те, що потужність конденсаторних батарей (БСК) фільтрів обгрунтовувалась не тільки обмеженням рівня ВГ, а необхідністю підвищення коефіцієнта потужності вузла електроживлення. Застосування потужних БСК, особливо у фільтрі 11-ї гармоніки, дозволило скомпенсувати гармоніки 21—39-порядку, що зменшило коефіцієнт несинусоїдальності напруги до 2,5—3,0 %.

Висновки

Аналіз динаміки струмів витоку кабельної лінії і співставлення її з величиною коефіцієнта несинусоїдальності напруги та рівнем і спектром аномальних гармонік, дозволяє достовірно визначити поточний стан кабельної мережі та спрогнозувати перспективну надійність функціонування кожної кабельної лінії.

Список використаної літератури

1. Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. Визначення ефективності фільтрів вищих гармонік у мережі 10 кВ металургійного комбінату. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2017. № 1(30). С. 104–111.
2. Вищі гармоніки у розподільчій мережі 10 кВ металургійних комбінатів і питання оптимізації роботи силових резонансних фільтрів. Садовой О.В., Хмельницький Є.Д., Ключев О.В. *Кременчук*, 2009.
3. Садовой А.В., Хмельницкий Е. Д. и др. Отчет о НИР «Исследование влияния высших гармоник при работе тиристорных преобразователей на качество электроэнергии и разработка методов и технических решений для их подавления» (заключительный). Днепропетровск, ДГТУ, 2009. 78 с.
4. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2015. 540 с.
5. Jasichi Z. Wplyw dobowych wahan napiecia w sieci I wyzszych harmjnicznych na starzenie sie kondensatorow. "Enegetyka", 1986, v. 20, №3, p. 15–19.

STUDY OF INFLUENCE OF HIGHER HARMONICS ON RELIABILITY CABLE NETWORKS

Abstract

This study is devoted to the analysis of the cable network of industrial enterprises with a significant number of cable lines with a voltage of 10 kV. A feature of this electric power supply unit is a powerful direct current valve electric drive for rolling production. The schematic diagram of the cable network is shown in the figure, the total length of the cables is more than 20 km. The results of previous experimental studies made it possible to determine the magnitude and spectrum of harmonics in this node, namely: in 5 harmonics do not exceed 1.5%, but abnormal $n = 22—40$ determine the value of the non-sinusoidal voltage coefficient within the limits of 5.5—8.9%, which exceeds the 5% norm. The plans of the conducted research also included the measurement of single-phase ground fault currents, which gave the following results for workshop substations: PS-4 — 24.2 A; PS-5 — 17.3 A; PS-5 — 14.8 A. Analyzing the problem of the reliability of cable networks, it is necessary to take into account one more indicator — the value of the leakage currents. A significant number of high-voltage cables are insulated with cable paper impregnated with oil-rosin mastic. Such insulation contains gas

inclusions that, under the influence of high-frequency electric shocks, are ionized with subsequent neutralization, which leads to its local damage. Oscillograms of the supply voltage show a sharp shape of the curve as a result of the presence of higher harmonics, which causes the aging of the insulation due to the acceleration of physicochemical processes in the dielectric. Thus, the results of theoretical and experimental studies made it possible to substantiate the main factors that determine the operational reliability of cables, namely: the dynamics of leakage currents, the value of the coefficient of non-sinusoidal voltage caused by abnormal harmonics. Analysis of the specified characteristics allows you to assess the current state of the cable network and predict the reliability of work in the future.

References

- [1] Hmelnickij Ye.D. & Klyuyev O.V. (2017) *Viznachennya efektyvnosti filtriv vishih garmonik u merezhi 10 kV metalurgijnogo kombinatu [Determination of the efficiency of filters of higher harmonics in the 10 kV network of the metallurgical plant]*. Zbirk naukovih prac DDTU (tehnicni nauki) Kam'yanske, 2017. P. 104–111 [in Ukrainian].
- [2] Sadovoj O.V. & Hmelnickij Ye.D. & Klyuyev O.V. (2009) *Vishi garmoniki u rozpodilnij merezhi 10 kV metalurgijnogo kombinatu i pitannya optimizaciyi roboti silovih rezonansnih filtriv [Higher harmonics in the 10 kV distribution network of the metallurgical plant and the issue of optimizing the operation of power resonance filters]*. Naukovi praci KrNU. Kremenchuk, 2009. P. 45–53. [in Ukrainian].
- [3] Sadovoj O.V. & Hmelnickij Ye.D. et al. (2009) *Otchet o NIR "Issledovanie vliyaniya vysshih garmonik pri rabote tiristornyih preobrazovateley na kachestvo elektroenergii i razrabotka metodov i tehniceskikh resheniy dlya ih podavleniya" [Study of the influence of higher harmonics during the operation of thyristor converters on the quality of electricity and the development of methods and technical solutions for their suppression]* (zaklyuchitelnyy). Dneprodzerzhinsk, DGTU, 2009. 78 p. [in Ukrainian].
- [4] Zhezhelenko Shkrabets F.P. (2015) *Elektropostachannia [Electricity supply]: navch. posib. / F.P.Shkrabets; M-vo osvity i nau-ky Ukrainy, Nats. hirn. un-t. D.: NHU. 540 p.*
- [5] Jasichi Z. *Wplyw dobowych wahan napięcia w sieci I wyższych harmjnicznych na starzenie sie kondensatorow. "Enegetyka", 1986, v. 20, №3, p. 15-19.* [in Poland].

Надійшла до редколегії 19.10.2023