

О. І. ГАНУС, К. О. СТАРКОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ РОБОТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

Розглянуто нелінійну динамічну математичну модель трансформатора напруги та досліджено перенапруги, що виникають на елементах схеми заміщення трансформатора напруги при перехідних процесах. Визначено вплив ємності вторинних ланцюгів трансформатора напруги на кратність перенапруг у первинних ланцюгах та тривалість перехідних процесів. Використано переваги апроксимування нелінійності трансформаторів напруги гіперболічним синусом. Отримано математичні вирази, що визначають характер зміни вимушеної та вільної складових перехідного процесу в електричній мережі з трансформатором напруги. Показано, що при збільшенні ємності електричної мережі тривалість загасання перехідного процесу збільшується, а частота вимушених коливань і рівень перенапруг зменшуються. Доведено, що навіть невеликі, порівняно з первинною номінальною синусоїдальною напругою, аперіодичні складові перехідного процесу напруги можуть призвести до значних перенапруг при відключеннях трансформаторів напруги. Обґрунтовано, що на кратність перенапруг, що виникає на первинній обмотці трансформаторів напруги, впливає як опір вторинної обмотки, так і момент комутації. Показано, що замкнута вторинна обмотка погіршує процес відключення нелінійної індуктивності трансформаторів напруги. Визначено величини, до рівня яких при цьому зростають перенапруги. За результатами розрахунків визначено, що при розімкненій вторинній обмотці трансформаторів напруги тривалість перехідного процесу значно зростає. Виявлено, що зниження частоти вимушених коливань, яке відбувається при цьому, супроводжується збільшенням струмів в первинній обмотці трансформатора напруги, що є небезпечним з точки зору термічної стійкості ізоляції обмотки. Показано, що замикання вторинної обмотки трансформаторів напруги призводить до значного скорочення часу загасання перехідного процесу. Висловлено припущення щодо можливості використання даного алгоритму для забезпечення швидкого зриву (придушення) ферорезонансних процесів. Досліджено ефективність такого заходу зриву ферорезонансних процесів як короткочасне шунтування вторинної обмотки трансформаторів напруги. Визначено співвідношення параметрів електричних мереж (ємність секцій шин, нелінійність характеристик трансформаторів напруги, момент відключення тощо), при яких може наступати ферорезонансний процес і врахування яких може дозволити, з точки зору попередження ферорезонансних процесів, визначити підстанції (електричні мережі), які вимагають більш детальних досліджень. Результати аналітичних досліджень апробовано у електричних мережах АТ «Харківобленерго» та використано у системі розподілу електричної енергії для підбору конкретних трансформаторів напруги для певних конфігурацій електричних мереж.

Ключові слова: трансформатор напруги, нелінійність, перехідний процес, індукція, перенапруги, шунтування, навантаження, схема заміщення, початкові умови, магнітні характеристики, ферорезонанс, гіперболічний синус, гістерезис.

А. И. ГАНУС, К. А. СТАРКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрена нелинейная динамическая математическая модель трансформатора напряжения и исследованы перенапряжения, возникающие на элементах схемы замещения трансформатора напряжения при переходных процессах. Определено влияние емкости вторичных цепей трансформатора напряжения на кратность перенапряжений в первичных цепях и продолжительность переходных процессов. Используются преимущества аппроксимирования нелинейности трансформаторов напряжения гиперболическим синусом. Получены математические выражения, определяющие характер изменения вынужденной и свободной составляющих переходного процесса в электрической сети с трансформатором напряжения. Показано, что при увеличении емкости электрической сети продолжительность затухания переходного процесса увеличивается, а частота вынужденных колебаний и уровень перенапряжений уменьшаются. Доказано, что даже небольшие, по сравнению с первичным номинальным синусоидальным напряжением, аперіодические составляющие переходного процесса напряжения могут привести к значительным перенапряжениям при отключениях трансформаторов напряжения. Обосновано, что на кратность перенапряжений, возникающих на первичной обмотке трансформаторов напряжения, влияет как сопротивление вторичной обмотки, так и момент коммутации. Показано, что замкнутая вторичная обмотка ухудшает процесс отключения нелинейной индуктивности трансформаторов напряжения. Определены величины, до уровня которых при этом растут перенапряжения. По результатам расчетов определено, что при разомкнутой вторичной обмотке трансформаторов напряжения продолжительность переходного процесса значительно возрастает. Выведено, что снижение частоты вынужденных колебаний, которое происходит при этом, сопровождается увеличением токов в первичной обмотке трансформатора напряжения, что является опасным с точки зрения термической устойчивости изоляции обмотки. Показано, что замыкание вторичной обмотки трансформаторов напряжения приводит к значительному сокращению времени затухания переходного процесса. Высказано предположение о возможности использования данного алгоритма для обеспечения быстрого срыва (подавление) ферорезонансных процессов. Исследована эффективность такой меры срыва ферорезонансных процессов как кратковременное шунтирование вторичной обмотки трансформатора напряжения. Определено соотношение параметров электрических сетей (емкость секций шин, нелинейность характеристик трансформаторов напряжения, момент отключения и т.п.), при которых может наступать ферорезонансный процесс и учет которых может позволить, с точки зрения предупреждения ферорезонансных процессов, определить подстанции (электрические сети), которые требуют более детальных исследований. Результаты аналитических исследований апробированы в электрических сетях АО «Харьковоблэнерго» и использованы в системе распределения электрической энергии для подбора конкретных трансформаторов напряжения для определенных конфигураций электрических сетей.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, нелинейность, переходный процесс, индукция, перенапряжения, шунтирование, нагрузка, схема замещения, начальные условия, магнитные характеристики, ферорезонанс, гиперболический синус, гистерезис.

O. HANUS, K. STARKOV

STUDY OF THE NATURE OF OVERVOLTAGES IN THE ELECTRICAL NETWORK ARISING FROM VOLTAGE TRANSFORMERS

A non-linear dynamic mathematical model of voltage transformer has been considered and overvoltages arising on the elements of voltage transformer equivalent circuit during transient processes have been investigated. The influence of voltage transformer secondary circuit capacitance on overvoltage

© O. I. Ganus, K. O. Starikov, 2021

multiplicity in the primary circuits and the duration of transients has been determined. The advantages of approximation of nonlinearity of voltage transformers by hyperbolic sine are used. Mathematical expressions determining the nature of changes in the forced and free components of the transient process in an electrical network with a voltage transformer have been obtained. It is shown that with the increase of the electric network capacitance the duration of the transition process damping increases and the frequency of the forced oscillations and the level of overvoltage decrease. It is proved that even small, in comparison with the primary nominal sinusoidal voltage, aperiodic components of the voltage transient process can lead to significant overvoltages during voltage transformer outages. It has been substantiated that both the secondary resistance and the switching torque influence the overvoltage multiplicity arising in the primary winding of voltage transformers. It is shown that the closed secondary winding worsens the disconnection process of non-linear inductance of voltage transformers. The values to which overvoltages increase in this case are determined. According to the results of calculations it is determined that with open secondary winding of voltage transformers the duration of transient process significantly increases. It has been found that the decrease of frequency of forced oscillations, which occurs in this case, is accompanied by an increase of currents in the primary winding of the voltage transformer, which is dangerous in terms of thermal stability of the winding insulation. It is shown, that closing the secondary winding of voltage transformers leads to significant reduction of transient damping time. It is suggested that this algorithm can be used to provide a rapid breakdown (suppression) of ferroresonant processes. The effectiveness of such a measure of stopping of ferroresonance processes as short-term shunting of secondary winding of voltage transformers has been investigated. The correlation of parameters of electric networks (capacity of busbar sections, nonlinearity of characteristics of voltage transformers, disconnection torque, etc.) at which ferroresonance process may occur and consideration of which may allow, in terms of prevention of ferroresonance processes, to identify substations (electric networks) that require more detailed research has been determined. The results of analytical studies were tested in the electric networks of JSC "Kharkivoblenergo" and used in the electricity distribution system for the selection of specific voltage transformers for certain configurations of electrical networks.

Keywords: voltage transformer, nonlinearity, transient, induction, overvoltage, shunt, loads, equivalent circuit, initial conditions, magnetic characteristics, ferroresonance, hyperbolic sine, hysteresis

Постановка проблеми. Передача та розподіл електричної енергії споживачам України здійснюється електричними мережами (ЕМ) різних номінальних напруг. Однією з найбільш істотних особливостей їх експлуатації є пошкоджуваність окремих елементів ЕМ (зокрема вимірювальних трансформаторів напруги [1]). За результатами проведених у АТ «Харківобленерго» досліджень були визначені вимоги щодо підвищення надійності трансформаторів напруги (ТН) при появі землі в ЕМ з ізолюваною нейтраллю, впроваджені заходи з усунення умов виникнення у них ферорезонансних процесів (ФРП). Але, проблема залишилась. Для вирішення проблеми усунення впливу ферорезонансних процесів на надійність роботи вимірювальних ТН необхідна адекватна математична модель спільної роботи ТН з ЕМ. Недостатня достовірність існуючих математичних моделей пояснюється тим, що аналітичні дослідження, покладені в основу їх розробки через спрощення, які зазвичай приймають під час моделювання нелінійних кіл за допомогою традиційних методів лінеаризації, призводять до неможливості врахування у результатах аналізу впливу цілого ряду небезпечних факторів та параметрів режимів, що наявні під час експлуатації ТН [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У відомих роботах з дослідження причини пошкоджень ТН при виникненні ФРП [3] та визначені рекомендації щодо підвищення їх надійності [4] та усунення факторів, які викликають ФРП [5]. На їх підставі розроблені заходи з підвищення надійності ТН та попередження ФРП. Найбільш ефективними серед них є:

- короткочасне підключення до вторинних обмоток ТН низькоомних опорів на час протікання ФРП [6];
- використання антирезонансних ТН, підключених на лінійну напругу, з додатковим однофазним трансформатором, підключеним між двома обмотками ТН і землею, для контролю ізоляції ЕМ [7];
- використання ТН, підключених на лінійну напругу з ємнісним дільником між двома обмотками ТН і землею [8];

- використання ТН, підключених на лінійну напругу з резистивним дільником між двома обмотками ТН і землею [9];

- заземлення нейтралі ТН через активний опір [10].

Але, вжиті заходи не призвели до припинення пошкоджень ТН. Для вирішення проблеми потрібне більш детальне дослідження математичних моделей ЕМ з ТН, приймати до уваги ті їх елементи, які у попередніх дослідженнях припускалось не враховувати. З цією метою у [11] було виконано аналіз математичної моделі ЕМ з ТН, яка враховує особливості динамічних процесів, пов'язаних з наявністю у системі нелінійних елементів. Логічним продовженням отриманих у [11] результатів стали дослідження нелінійної динамічної математичної моделі ТН при перехідних процесах за умови її живлення від джерел постійної та перемінної напруги при поступовому ускладненні даної системи [12]. За результатами аналізу були виявлені фактори, що впливають на рівень перенапруг, тривалість та інші параметри перехідних процесів.

Мета роботи. Мета статті полягає в дослідженні нелінійної динамічної математичної моделі для аналізу перехідних процесів в електромагнітних ТН, запропонованої в [11] та [12], з подальшим ускладненням даної системи шляхом врахування факторів, пов'язаних з наявністю у системі нелінійних елементів, з метою розробки рекомендацій по підвищенню надійності роботи ТН та попередженню ФРП на підставі виконаних досліджень.

Основні матеріали досліджень. Для аналізу процесів, що відбуваються в ЕМ з ТН, необхідна розробка математичної моделі вільної і вимушеної складових струмів перехідних процесів та напруг на елементах системи в усьому можливому діапазоні їх зміни.

Для визначення параметрів вимушеної складової струму перехідного процесу розглянемо електричну схему, представлену на рис. 1, яка містить ТН, паралельно одній з фаз первинної обмотки якого включений конденсатор, який є еквівалентом ємності ЕМ.

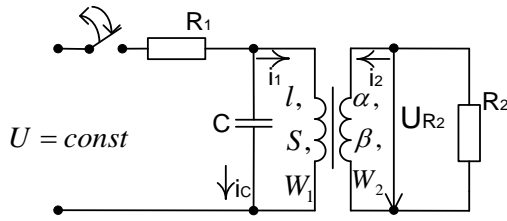


Рисунок 1 – Схема для дослідження перехідних процесів при відключенні/підключенні ТН від/до джерела постійної напруги

З урахуванням математичних моделей протікання перехідних процесів у ЕМ з ТН, отриманих у [12], диференціальне рівняння до відключення ТН від джерела постійної напруги U матиме вигляд (за умови, що опір вторинної обмотки входить до складу опору навантаження):

$$\frac{d^2 B}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right] \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot C} \cdot shB = \frac{U \cdot \beta}{R_1 \cdot C \cdot S \cdot W_1} \quad (1)$$

Диференціальне рівняння, що описує процеси в схемі після відключення ТН від джерела постійної напруги, має вигляд:

$$\frac{d^2 B}{dt^2} + \frac{W_2^2}{W_1^2} \cdot \frac{1}{C \cdot R_2} \cdot \frac{dB}{dt} + \frac{\alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot C} \cdot shB = 0 \quad (2)$$

У лінійному режимі роботи ТН, згідно з [11], маємо:

$$\begin{aligned} i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2 &= \alpha \cdot l \cdot sh\beta \cdot B_d = \\ &= \alpha \cdot l \cdot sh\beta \cong \alpha \cdot l \cdot \beta \cdot B_d; \\ B &= i_0 \cdot \frac{W_1}{\alpha \cdot l}; \\ L_3 &= \frac{S \cdot W_1^2}{\alpha \cdot l \cdot \beta'} \end{aligned} \quad (3)$$

де i_0 – струм намагнічування.

З урахуванням (3) рівняння (1) та (2) набувають вигляду:

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right] \cdot \frac{di_0}{dt} + \frac{i_0}{L_3 \cdot C} = \frac{U}{L_3 \cdot C \cdot R_1}; \quad (4)$$

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{W_2^2}{W_1^2} \cdot \frac{1}{C \cdot R_2} \cdot \frac{di_0}{dt} + \frac{i_0}{L_3 \cdot C} = 0. \quad (5)$$

Початкові умови для рівняння (5) впливають з рішення рівняння (4). Зокрема, для сталого після підключення режиму на підставі (4) можна записати:

$$i_0(0) = \frac{U}{R_1};$$

$$i_0'(0) = 0. \quad (6)$$

З урахуванням викладеного рішення (6) отримає вигляд:

$$i_0 = \frac{[-i_0(0) \cdot K_2 + i_0'(0)] \cdot e^{K_1 t}}{K_2 - K_1} + \frac{[i_0(0) \cdot K_1 + i_0'(0)] \cdot e^{K_2 t}}{K_2 - K_1}, \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} K_{1,2} &= -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \\ K_1 - K_2 &= 2 \cdot \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}; \\ K_1 \cdot K_2 &= \frac{1}{L_3 \cdot C}; \\ \omega' &= \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}; \\ \delta &= \frac{1}{2 \cdot C \cdot R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2}; \\ \omega_0^2 &= \frac{1}{L_3 \cdot C}. \end{aligned} \quad (8)$$

Миттєві значення напруги на високій (u_c) та низькій (u_{R_2}) стороні ТН, згідно з (7), будуть:

$$\begin{aligned} u_c &= S \cdot W_1 \cdot \frac{dB_d}{dt} = \\ &= \frac{i_0(0)}{2 \cdot C \cdot \omega'} \cdot (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}); \\ u_{R_2} &= S \cdot W_2 \cdot \frac{dB_d}{dt} = \\ &= \frac{i_0(0)}{2 \cdot C \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}). \end{aligned} \quad (9)$$

У разі дійсних коренів рівнянь, при малих значеннях R_2 , напруги u_c та u_{R_2} досягають максимального значення через час t_{max} і далі загасають. При великих значеннях R_2 корені рівняння будуть комплексно-спряженими і процес матиме затухаючий коливальний характер. Вирази (9) у цьому випадку приймають вигляд:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t; \\ u_{R_2} &= \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t. \end{aligned} \quad (10)$$

Зокрема, у разі, коли $\omega_0 \gg \delta$, а опір R_2 складає сотні Ом:

$$\begin{aligned} u_{c1} &= i_0(0) \cdot \sqrt{\frac{L_3}{C}} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega_0 t; \\ u_{R_2} &= i_0(0) \cdot \sqrt{\frac{L_3}{C}} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot \sin \omega_0 t. \end{aligned} \quad (11)$$

Напруги u_c та u_{R_2} досягають максимального значення через час t_{max} після відключення:

$$t_{max} = \frac{1}{\omega'} \cdot \arctg \frac{\omega'}{\delta} \quad (12)$$

Максимальні значення напруг $u_{c\ max}$ та $u_{R_2\ max}$ можна визначити після підстановки (12) в (10) та (11). В якості параметру, що досліджується, приймемо ступінь перенапруг $k = \frac{u_1}{u_{ном}}$, що виникають на первинній обмотці ТН в залежності від величини ємності C . Величину k визначимо як відношення миттєвого значення напруги u_1 , яка виникає на затискачах первинної обмотки ТН під час розмикання ключа до рівня напруги джерела живлення $u_{ном}$.

Визначимо вплив опору вторинної обмотки трансформатора R_2 на величину напруги його первинної обмотки u_c . З цією метою, розглянемо два (граничних) випадки, а саме:

- вторинна обмотка розімкнута, що відповідає $R_2 = \infty$ (в розрахунках приймалося $R_2 = 10^{12}$ Ом);
- вторинна обмотка замкнута ($R_2 = 0$ Ом).

Величину опору R_1 приймаємо рівною 10^{12} Ом.

Розрахунок виконуємо за виразами (10) та (11) з урахуванням (12).

За результатами розрахунків отримані криві, наведені на рис. 2.

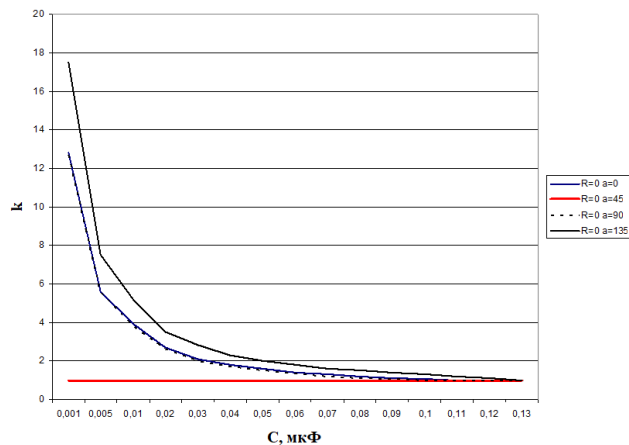


Рисунок 2 – Залежність кратності перенапруги k від величини ємності C

Як видно з отриманих кривих, вторинна обмотка практично не впливає на величину перенапруги, що виникає на первинній обмотці. Крім цього, при збільшенні ємності кратність перенапруг істотно знижується і при ємності близької до 1 мкФ перенапруг не виникає.

На рис.3 наведено криві $k(t)$ для різних значень ємності C . З наведених кривих видно, що при малих ємностях кратність перенапруг значна, але перехідний процес протікає на високих частотах і загасає досить швидко.

І, навпаки, при збільшенні ємності тривалість загасання перехідного процесу збільшується, а частота і перенапруги зменшуються.

Дані дослідження дають загальне уявлення про характер перенапруг. Для їх більш точного моделювання потрібний облік процесів, що відбуваються у дузі, яка виникає при розмиканні контактів. Дані дослідження дозволять оцінити, в першу чергу, вплив вторинної обмотки ТН і її навантаження на величину перенапруг і характер зміни аперіодичної складової перехідного процесу.

Як висновок можна зазначити, що максимальні значення перенапруг u_c , u_{R_2} при відключенні ТН зменшуються при збільшенні ємності C . Крім того, навіть невеликі, в порівнянні з первинним номінальним синусоїдальною напругою, аперіодичні складові перехідного процесу напруги можуть призвести до значних перенапруг при відключеннях ТН.

Для дослідження процесів відключення ТН від джерела синусоїдальної напруги використовувалася схема, наведена на рис. 4.

У разі синусоїдальної напруги живлення диференціальне рівняння (1) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 B}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right] \cdot \frac{dB}{dt} + \\ + \frac{\alpha \cdot l \cdot \beta}{S \cdot W_1^2 \cdot C} \cdot shB = \\ = \frac{U \cdot \beta}{R_1 \cdot W_1 \cdot C \cdot S} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u). \end{aligned} \quad (13)$$

при початкових умовах:

$$\begin{aligned} shB(0) &= \frac{U}{R_1} \cdot \frac{W_1}{\alpha \cdot l}; \\ B'(0) &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Рівняння (2) не зазнає змін. При цьому початкові умови для рівняння (2) визначаються з урахуванням моменту відключення виходячи з асимптотичного рішення рівняння (1).

У разі роботи ТН в лінійному режимі рівняння (1) та (2) з урахуванням (3) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right] \cdot \frac{di_0}{dt} + \\ + \frac{i_0}{L_3 \cdot C} = \frac{U}{L_3 \cdot C \cdot R_1} \times \sin(\omega \cdot t + \psi_u); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{d^2 i_0}{dt^2} + \frac{1}{C + R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \cdot \frac{di_0}{dt} + \frac{i_0}{L_3 \cdot C} = 0. \quad (16)$$

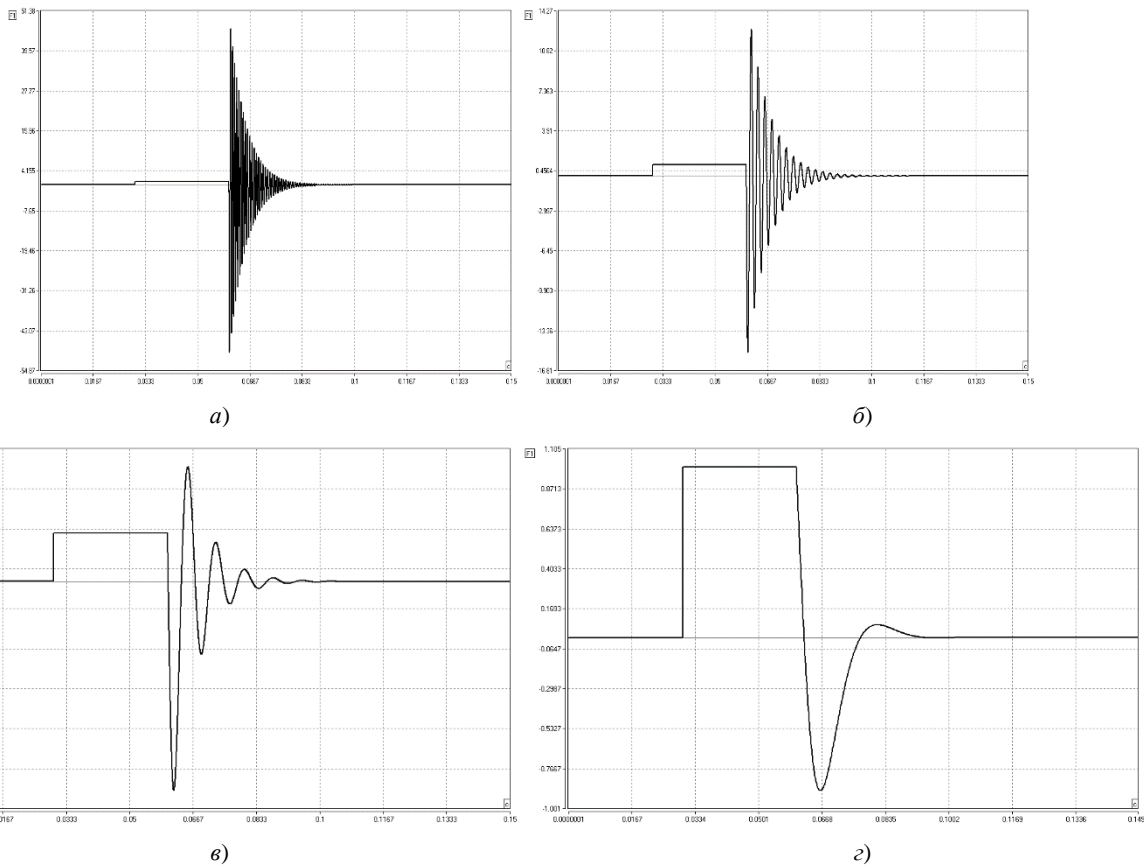


Рисунок 3 – Осцилограми зміни кратності перенапруги $k(t)$, що виникає на первинній обмотці ТН при її відключенні від джерела живлення на постійній напрузі
 а) $C = 0,001$ мкФ; б) $C = 0,01$ мкФ; в) $C = 0,1$ мкФ; г) $C = 1$ мкФ

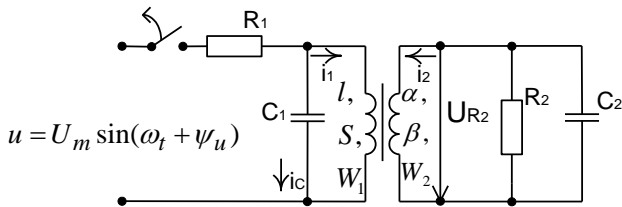


Рисунок 4 – Схема для дослідження перехідних процесів при відключенні/підключенні ТН від/до джерела синусоїдальної напруги

Початкові умови для рівняння (15) впливають з рішення рівняння (16). Зокрема, для сталого після підключення режиму, з рівняння (15), залежно від моменту відключення, можна визначити:

$$\begin{aligned} i_0(0) &= I_m \cdot \sin\psi_i; \\ i'_0(0) &= I_m \cdot \cos\psi_i; \end{aligned} \quad (17)$$

де

$$I_m = U_m / [R_1 \cdot L_3 \cdot C \cdot \omega \times \sqrt{\frac{1}{C^2} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]^2 + \left[\frac{1}{L_3 \cdot C \cdot \omega} - \omega \right]^2}]$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{\frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{W_2^2}{W_1^2} \right]}{\frac{1}{L_3 \cdot C \cdot \omega} - \omega}$$

Для миттєвих значень напруг u_c та u_{R_2} після відключення, згідно з (3), (7)–(10), (16), можна записати:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{i_0(0)}{2 \cdot C \cdot \omega'} \cdot (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) - \\ &- \frac{i'_0(0) \cdot L_3}{2 \cdot \omega'} \cdot (K_1 \cdot e^{K_1 t} - K_2 \cdot e^{K_2 t}); \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} u_{R_2} &= \frac{i_0(0)}{2 \cdot C \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot (e^{K_1 t} - e^{K_2 t}) - \\ &- \frac{i'_0(0) \cdot L_3}{2 \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot (K_1 \cdot e^{K_1 t} - K_2 \cdot e^{K_2 t}). \end{aligned} \quad (19)$$

Якщо корені K_1 і K_2 в рівняннях (18) та (19) дійсні та різні, то напруги u_c та u_{R_2} досягають максимального значення через час t_{max} після відключення:

$$t_{max} = \frac{\ln \frac{K_2^2 \cdot (K_1 \cdot \sin\psi_i - \omega \cdot \cos\psi_i)}{K_1^2 \cdot (K_1 \cdot \sin\psi_i - \omega \cdot \cos\psi_i)}}{K_1 - K_2}. \quad (20)$$

Як показали розрахунки, найбільш важким є випадок відключення ТН в момент проходження струму намагнічування через максимум, тобто, коли $i_0(0) = I_m, i'_0(0) = 0$.

У випадку, коли корені K_1 і K_2 в рівняннях (18) та (19) комплексно-спряжені, рівняння (18) та (19) можуть бути записані у вигляді:

$$u_c = \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t - i'_0(0) \cdot L_3 \times e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(\cos \omega' t - \frac{\delta}{\omega'} \cdot \sin \omega' t \right); \quad (21)$$

$$u_{R_2} = \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t - i'_0(0) \times L_3 \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \left(\cos \omega' t - \frac{\delta}{\omega'} \cdot \sin \omega' t \right). \quad (22)$$

Якщо в момент відключення $\psi_s = 90^\circ$ то:

$$\begin{aligned} i_0(0) &= I_m; \\ i'_0(0) &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Рівняння (21) та (22) у цьому випадку набувають вигляду:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t; \\ u_{R_2} &= \frac{i_0(0)}{C \cdot \omega'} \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \omega' t. \end{aligned} \quad (24)$$

Результати розрахунку кратності перенапруг k на первинній обмотці ТН за виразами (10) та (11) з урахуванням (12) при відключеному опорі вторинної обмотки для різних ємностей C наведені на рис. 5 і також проілюстровані осцилограмами, наведеними на рис. 6.

Як видно з результатів досліджень, кратність перенапруг зменшується зі збільшенням ємності. Але на кратність перенапруги, що виникає на первинній обмотці ТН, впливає як опір вторинної обмотки, так і момент розмикання ключа. Причому результати експериментів показали, що замкнута вторинна обмотка погіршує процес відключення нелінійної індуктивності ТН, оскільки перенапруги при цьому зростають.

Однак, при розімкнутій вторинній обмотці (що характерно для нормальної роботи ТН), тривалість перехідного процесу значно зростає (рис. 6). При зниженні частоти коливань збільшуються струми в

первинній обмотці, що небезпечно з точки зору термічної стійкості ізоляції обмотки.

Як показали розрахунки, при виникненні ФРП, частота коливань нижче (приблизно дорівнює половині основної частоти ЕМ) і струми в первинних обмотках ТН значно перевищують номінальні, що при стійкому процесі призводить до вигорання первинної обмотки. Тому, в розімкнутій обмотці (рис. 6) при ємності 0,1 мкФ первісна частота коливань приблизно буде дорівнювати 25 Гц, що характерно для субгармонічних ФРП.

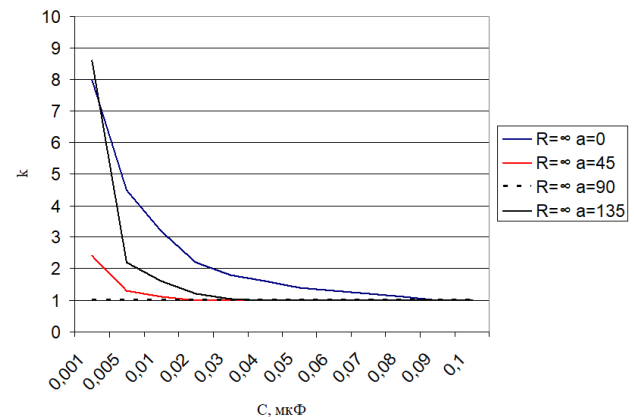


Рисунок 5 – Залежність кратності перенапруги k від величини ємності C після відключення ТН від джерела змінної напруги

З іншого боку, замикання обмотки призводить до значного скорочення часу загасання перехідного процесу (рис. 6 для закороченої обмотки). Ця особливість, незважаючи на можливість незначного збільшення кратності напруги, може бути використана для примусового зриву (придушення) ФРП. На цьому принципі функціонує захист ТН від ФРП, який при виникненні субгармонічних коливань короткочасно шунтує на опір 5 Ом вторинну обмотку ТН, з'єднану в розімкнутий трикутник, що негайно зриває ФРП [6].

Але на величину перенапруг значно впливає момент відключення ТН від джерела живлення. При цьому, у деяких випадках, перенапруги взагалі можуть не виникати (тобто $k = 1$).

Проведені в АТ «Харківобленерго» дослідження дозволили оцінити співвідношення параметрів ЕМ (ємності секцій шин і обладнання, нелінійності характеристик ТН, моменті відключення і т.п.) при можливому виникненні ФРП і, тим самим, визначити підстанції (ЕМ), які вимагають більш детальних досліджень.

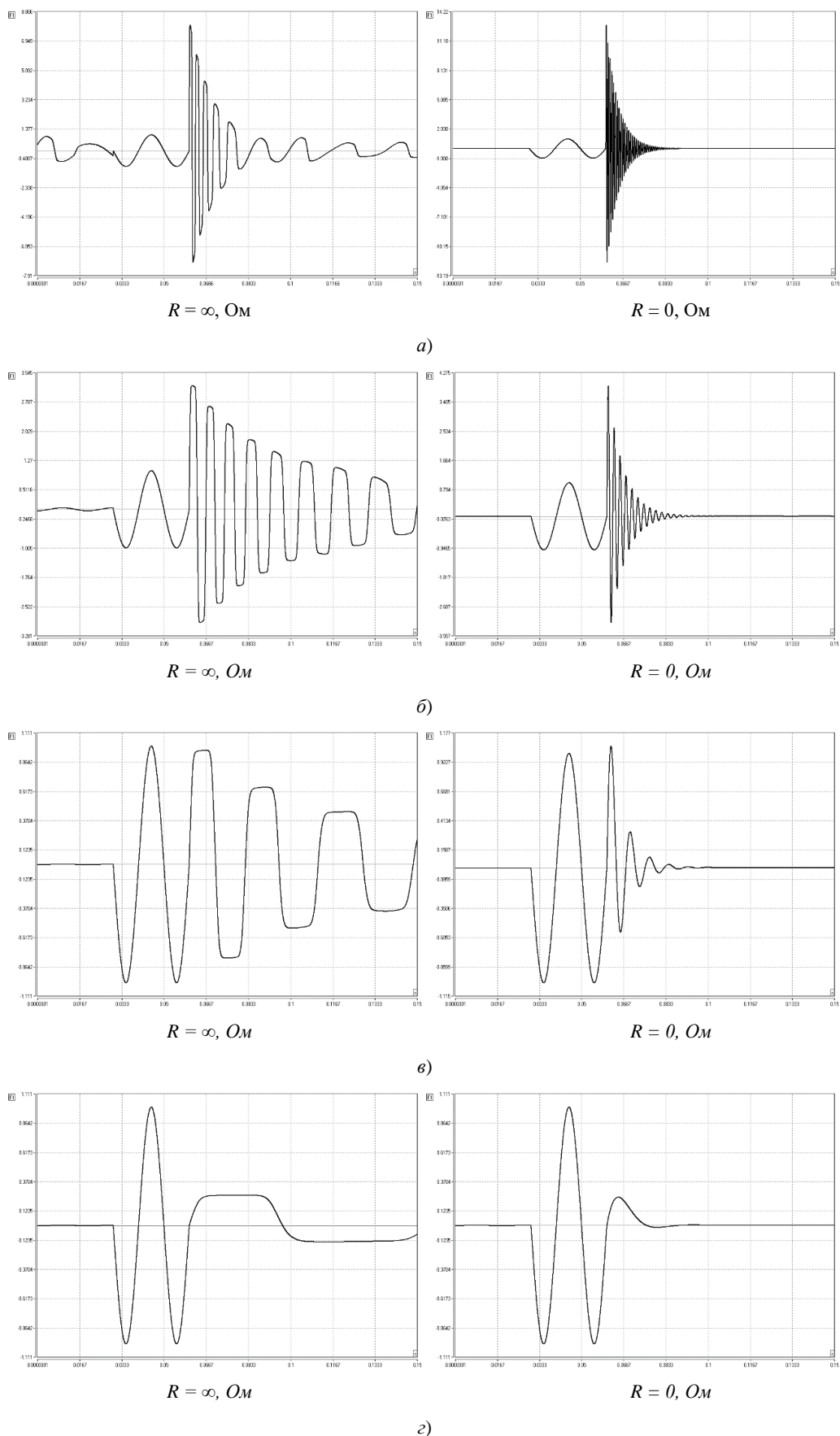


Рисунок 7 – Осцилограми зміни кратності перенапруги $k(t)$, що виникає на первинній обмотці ТН при її відключенні від джерела змінної напруги при:
 а) $C = 0,001$ мкФ; б) $C = 0,01$ мкФ; в) $C = 0,1$ мкФ; г) $C = 1$ мкФ

Висновки. Отримано математичні вирази, що визначають характер змін вимушеної та вільної складових перехідного процесу в електричних мережах з ТН. Показано, що при збільшенні ємності ЕМ тривалість загасання перехідного процесу збільшується, а частота і кратність перенапруг зменшуються.

Продемонстровано, що навіть невеликі, порівняно з первинною номінальною синусоїдальною напругою, аперіодичні складові перехідного процесу напруги можуть призвести до значних перенапруг на обмотках ТН при його відключенні. Обґрунтовано, що на кратність перенапруг, що виникають на первинній обмотці ТН, впливає як опір вторинної обмотки, так і момент комутації. Також обґрунтовано, що замкнута вторинна обмотка погіршує процес відключення нелінійної індуктивності ТН. Визначено величини, до рівня яких при цьому зростають перенапруги.

Показано, що при розімкнутій вторинній обмотці тривалість перехідного процесу значно зростає. Виявлено, що зниження частоти коливань перехідного процесу у ЕМ з ТН супроводжується збільшенням струму у первинній обмотці ТН. Зазначене є небезпечним з точки зору термічної стійкості ізоляції обмотки ТН.

Продемонстровано, що замикання вторинної обмотки ТН призводить до значного скорочення часу загасання перехідного процесу. Обґрунтовано те, що незважаючи на можливість незначного збільшення кратності напруги, даний процес можна використовувати для забезпечення примусового зриву (придушення) ФРП.

Розглянута ефективність існуючих заходів по зриву ФРП (короткочасне шунтування вторинної обмотки ТН). Визначено співвідношення параметрів ЕМ (ємність секцій шин і обладнання, нелінійність характеристик ТН, момент відключення тощо), при яких може наступати ФРП і врахування яких повинно дозволити, з точки зору попередження ФРП, визначити підстанції (ЕМ), які вимагають більш детальних досліджень.

Список літератури

1. Ганус А. И., Старков К. А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2003. № 1. С.75–81.
2. Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Мединський Р. В. Вплив апроксимації вебер-амперної характеристики на результати розрахунку струму в нелінійній індуктивності. *Технічна електродинаміка*. 2000. № 6. С. 64–69.
3. Ганус А. И., Говоров Ф. П., Старков К. А. Надёжность трансформаторов напряжения 6-10 кВ и эффективность мероприятий по её обеспечению. *Техническая электродинамика, тематический выпуск: "Силовая электроника и энергоэффективность"* ч. 3. 2004. С. 45–48.
4. Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Горбатський А. А. Моделирование та розробка пристроїв захисту трансформаторів напруги 6..35 кВ. *Вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2000. № 403. С. 51–55.
5. Hanus O., Hovorov P., Starkov K. *Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen*. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 336 p.

6. Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Сторчун О. Л., Варецкий Ю. О. Романишин В. В., Бахор З. М. Пат. 17170А, Україна. *Пристрій захисту трансформатора напруги від пошкоджень при ферорезонансних процесах у мережах з ізованою нейтраллю*. 1997.
7. Виштибеев А. В., Кадомская К. П., Хныков В. А. Повышение надёжности электрических сетей установкой трансформаторов напряжения типа НАМИ. *Электрические станции*. 2002. № 3. С. 47–51.
8. Журахівський А. В., Кенс Ю. А., Романишин В. В. Пат. 19575А, Україна, Не резонуючий трансформатор напруги. 1997.
9. Назаров В. В. О трансформаторах напряжения и устройствах контроля изоляции в сетях 6-35 кВ. *Энергетика и Электрификация*. 2000. № 4. С. 27–29.
10. Нугер Б. К. Выбор величины резистора в нейтрали трансформатора напряжения. *Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств. Збірник праць IV-ї міжнародної наукової конференції*. Маріуполь, ПДТУ, 2000. С. 211–212.
11. Тугай Ю. Л., Ганус О. Л., Старков К. О. Комутаційні перенапруги у трансформаторах напруги. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 73–75. doi: 10.15407/techned2016.05.073
12. Ганус О. Л., Старков К. О., Черкашина В. В. Складові перенапруг на елементах схеми заміщення трансформатора напруги. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Енергетика, надійність та енергоефективність*. 2019. № 29 (1354). С. 41–46.

References (transliterated)

1. Ganus O., Starkov K. Povrezhdaemost' transformatorov napryazheniya v oblastnykh elektricheskikh setyakh AK «Khar'kovoblenergo» i meropriyatiya po ee snizheniyu [Damageability of voltage transformers in regional electricity networks of JSC «Khar'kovoblenergo» and measures to reduce it]. *Lighting Engineering & Power Engineering*. 2003, no. 1, pp. 75–81.
2. Zhurakhivsky A. V., Kens Yu. A., Medynskyy R. V. Vplyv aproksymatsiyi veber-ampernoyi kharakterystyky na rezul'taty rozrakhunku strumu v nelineyniy indyuktyvnosti [Effect of the approximation of the Weber-ampere characteristic on the current calculation results for non-linear inductance]. *Technical Electrodynamics*. 2000, no. 6, pp. 64–69.
3. Ganus O., Hovorov P., Starkov K. Nadezhnost' transformatorov napryazheniya 6-10 kV i effektivnost' meropriyatiy po ee obespecheniyu [Reliability of 6-10 kV transformers and effectiveness of measures to ensure it]. *Technical Electrodynamics, thematic issue: "Power Electronics and Energy Efficiency" Part 3*. 2004, pp. 45–48.
4. Zhurakhivsky A. V., Kens Yu. A., Gorbatsky A. A. Modelyuvannya ta rozrobka prystroyiv zakhystu transformatoriv napruhy 6...35 kV [Modelling and development of protection devices for 6...35 kV transformers]. *Journal of Lviv Polytechnic National University*. 2000, no. 403, pp. 51–55.
5. Ganus O., Hovorov P., Starkov K. *Überspannung in elektrischen Netzen mit Spannungswandlern. Effizienz von Geräteschutzmaßnahmen* [Overvoltage in electrical networks with voltage transformers. Efficiency of equipment protection measures]. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 336 p.
6. Zhurakhivsky A. V., Kens Yu. A., Storchun O. L., Varetskyi Yu. O., Romanyshyn V. V., Bakhor Z. M. *Prystriy zakhystu transformatoru napruhy vid poshkodzen' pry ferorezonansnykh protsesakh u merezhakh z izol'ovanoyu neytrallyu* [Device for voltage transformer protection against supercurrent damages at ferorezonance processes in circuits with insulated neutral]. Patent UA, no. 17170A, 1997.
7. Vishtibeev A. V., Kadomskaya K. P., Khnykov V. A. Povyshenie nadezhnosti elektricheskikh setey ustanovkoy transformatorov napryazheniya tipa NAMI [Improving the reliability of electrical networks by installing NAMI-type voltage transformers.]. *Electrical Stations*. 2002, no. 3, pp. 47–51.
8. Zhurakhivsky A. V., Kens Yu. A., Romanyshyn V. V. Nerezonuyuchy transformator napruhy [Nonresonating voltage transformer]. Patent UA, no. 19575A, 1997.
9. Nazarov V. V. O transformatorakh napryazheniya i ustroystvakh kontrolya izolyatsii v setyakh 6-35 kV [About voltage transformers and insulation monitoring devices in 6-35 kV networks]. *Energy and Electrification*. 2002, no. 3, pp. 47–51.

10. Nuger B. K. Vybory velichiny rezistora v neytrali transformatora napryazheniya [Selection of resistor value in the neutral of the voltage transformer]. *Efficiency and quality of power supply to industrial enterprises. Proceedings of the IV International Scientific Conference*. Mariupol, PSTU, 2000. pp. 211–212.
11. Tugay Yu. I., Ganus O. I., Starkov K. O. Komutatsiyni perenapruhy u transformatorakh napruhy [The switching in voltage transformer]. *Technical Electrodynamics*. 2016, no 5, pp. 73–75. doi: 10.15407/techned2016.05.073
12. Ganus A. I., Starkov K. A., Cherkashyna V. V. Skladovi perenapruh na elementakh skhemy zamishchennya transformatora napruhy [Overvoltage components on voltage transformer displacement schemes elements]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*. 2019, no. 29 (1354), pp. 41–46.

Надійшла (received) 23.03.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ганус Олексій Іванович (Ганус Алексей Иванович, Hanus Oleksii) – кандидат технічних наук, технічний директор АТ «Харківобленерго»; Харків, Україна; e-mail: hanus.oleksii@obl.kh.energy.gov.ua.

Старков Костянтин Олександрович (Старков Константин Александрович, Starkov Kostiantyn) – кандидат технічних наук, заступник начальника управління виробничо-технічної політики та нагляду за експлуатацією обладнання АТ «Харківобленерго»; Харків, Україна; e-mail: ptu1@obl.kh.energy.gov.ua.