

УЗАГАЛЬНЕНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ І АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

© Лисяк Г.М., Коновал В.С., Пастух О.Р., 2005

Запропоновано узагальнену схему заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів у вигляді трансформаторного багатополюсника, яка придатна для математичного моделювання усталених режимів за довільного з'єднання виводів окремих обмоток як між собою, так і з іншими елементами електроенергетичних систем.

The generalized circuit multiwinding transformers and autotransformers as transformer multipole, which is suitable for mathematics modeling steady states under any connection windings outputs between themselves, and with other power system elements, is offered.

Постановка проблеми. Розрахунок усталених режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) є однією з найпоширеніших і найчастіше розв'язуваних задач, результати яких використовуються під час проектування розвитку й управління функціонуванням ЕЕС. Використання для таких розрахунків комп'ютерних програмних комплексів з автоматичним формуванням рівнянь усталених режимів вимагає формалізації побудови розрахункових схем заміщення елементів ЕЕС, у тому числі трансформаторів і автотрансформаторів (надалі термін “автотрансформатор” вживатимемо, коли потрібно виділити характерні його відмінності). При цьому рівняння усталених режимів переважно формують стосовно вузлових напруг на основі методів балансу струмів або потужностей у вузлах розрахункової схеми ЕЕС, яка складається з відповідно з'єднаних між собою схем заміщення окремих її елементів [1, 2]. Надалі фізичні величини, які характеризують усталені режими ЕЕС, називатимемо координатами режиму [3].

Аналіз останніх досліджень. Основою створення розрахункових схем заміщення трансформаторів є схеми їх електричних і магнітних кіл, побудова яких завжди здійснюється за деяких допущень з урахуванням практичної можливості визначення параметрів їх елементів [4, 5]. Дуальне перетворення схем магнітних кіл дає змогу одержувати еквівалентні електричні схеми із зосередженими параметрами – схеми заміщення трансформаторів, найчастіше з приведеними до однієї базової величини значеннями параметрів елементів і відповідних координат режиму [4, 6]. Для отримання схеми заміщення багатообмоткового трансформатора у вигляді багатокутника тут заздалегідь з'єднують в один базовий (нульовий) вузол по одному з виводів (полюсів) всіх обмоток, що робить неможливим надалі довільне з'єднання обмоток як між собою, так і з зовнішньою схемою. Окрім того, за деяких особливостей конструкції магнітної системи і розміщення обмоток трансформатора схема заміщення може не мати загального базового вузла [4]. В [1] було розглянуто питання побудови схеми заміщення автотрансформатора з регульовальними трансформаторами на основі подання їх відповідними багатополюсниками з трансформаторними гілками, тобто без приведення координат режиму до однієї базової величини, що узгоджується з сучасними принципами автоматичного формування рівнянь усталеного режиму. Але прийняті за основу електричні Т-подібні схеми з'єднань автотрансформатора і регульовального трансформатора не враховують висновків і рекомендацій [4] і можуть розглядатися як конкретні окремі випадки побудови схем заміщення багатообмоткових трансформаторів. В [7] була запропонована узагальнена схема заміщення двообмоткових трансформаторів з урахуванням вищевикладеного, а в [8] були викладені особливості комп'ютерної симуляції усталених режимів для випадку роботи двообмоткового трансформатора в режимі заданого струму.

Задачі дослідження. Проведений аналіз підходів до побудови розрахункових схем заміщення, викладених в [4–8], вказує на доцільність і можливість створення узагальненої схеми заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів у вигляді трансформаторного багатополюсника, придатної для автоматичного формування рівнянь усталеного режиму щодо вузлових напруг на основі методів балансу струмів або потужностей у вузлах за довільного з'єднання виводів (полюсів) окремих обмоток (або виділених їх частин) як між собою, так і з іншими елементами ЕЕС. При цьому така схема повинна враховувати особливості конструктивного виконання і розташування, а також з'єднання обмоток трансформаторів для забезпечення бажаної адекватності результатів розрахунків.

Виклад основного матеріалу. Для подальшого викладу з врахуванням [1–8] користуватимемося такими поняттями і їх визначеннями:

- **електромагнітна схема заміщення** (ЕМСЗ) трансформатора – сукупність взаємно пов'язаних схем заміщення електричного (СЗЕК) і магнітного (СЗМК) кіл трансформатора, побудованих з урахуванням прийнятих для дослідження допущень і практичної можливості визначення параметрів елементів цих схем;

- **приведена електрична схема заміщення** (ПЕСЗ) трансформатора – еквівалентна електрична схема трансформатора з приведеними до базової кількості витків w_b значеннями параметрів елементів і відповідних координат режиму схеми, яка отримана на основі ЕМСЗ трансформатора шляхом дуального перетворення СЗМК в електричну схему заміщення його магнітного кола (ЕСЗМК). В загальному випадку ПЕСЗ трансформатора містить як електрично пов'язані прості гілки з комплексними опорами \underline{Z}' (Z' -гілки) або провідностями $\underline{Y}' = 1/\underline{Z}'$ (Y' -гілки), так і взаємні зв'язки \underline{Z}'_M (Z'_M -зв'язки) між відповідними Z' -гілками для отримання фактичних зовнішніх електромагнітних характеристик реального трансформатора (передусім так званих напруг короткого замикання). Тут і надалі штрихом позначені величини, значення яких приведені до базової кількості витків w_b ;

- **електрична схема заміщення** (ЕСЗ) трансформатора – ПЕСЗ трансформатора, доповнена ідеальними двообмотковими трансформаторами з відповідними в загальному випадку комплексними коефіцієнтами трансформації (або приведення) \underline{K} для отримання фактичних значень відповідних координат режиму;

- **трансформаторний багатополюсник** (ТБП) – еквівалентна електрична схема заміщення трансформатора, отримана перетворенням ЕСЗ трансформатора в схему багатополюсника, яка містить трансформаторні гілки (Т-гілки) між виводами (полюсами) обмоток з послідовно з'єднаних комплексних опорів \underline{Z}' (провідностей $\underline{Y}' = 1/\underline{Z}'$) й ідеальних двообмоткових трансформаторів;

- **розрахункова електрична схема заміщення** (РЕСЗ) трансформатора – еквівалентна електрична схема заміщення трансформатора, отримана в результаті спрощуючих еквівалентних перетворень ТБП для заданого з'єднання виводів (полюсів) обмоток трансформатора як між собою, так і з іншими елементами ЕЕС, і яка безпосередньо використовується для формування рівнянь усталеного режиму ЕЕС.

Відомо [4], що усталений режим n -обмоткового трансформатора характеризується n струмами і n напругами його обмоток. Це означає, що незалежно від структури ПЕСЗ трансформатора, у тому числі і за наявності в ній внутрішніх по відношенню до виводів (полюсів) обмоток вузлів, вона може бути перетворена в еквівалентний прохідний $2n$ -багатокутник. На рис. 1 показана ЕСЗ n -обмоткового трансформатора для загального випадку довільної структури його ПЕСЗ. Тут і надалі прийняті такі позначення:

L, N – нижні індекси координат режиму виводів (полюсів) обмоток трансформатора, прийнятих умовно за лінійні і нейтральні відповідно;

$i, k \in \overline{1, n}$ та $n+i, n+k \in \overline{(n+1), (n+n)}$ при $i \neq k$ – номери лінійних і нейтральних виводів (полюсів) обмоток трансформатора відповідно;

ПБП – прохідний багатополюсник або у вигляді ПЕСЗ трансформатора, або після її перетворення, у вигляді прохідного $2n$ -багатокутника, значення параметрів елементів і відповідних координат режиму якого приведені до базової кількості витків w_δ ;

$\dot{\mathbf{I}}'_L = \text{column}(\dot{I}'_i)$; $\dot{\mathbf{I}}'_N = \text{column}(\dot{I}'_{n+i})$; $\dot{\mathbf{I}}_L = \text{column}(\dot{I}_i)$; $\dot{\mathbf{I}}_N = \text{column}(\dot{I}_{n+i})$ – вектори-стовпці приведених і дійсних струмів виводів (полюсів) обмоток ЕСЗ трансформатора;

$\dot{\mathbf{U}}'_L = \text{column}(\dot{U}'_i)$; $\dot{\mathbf{U}}'_N = \text{column}(\dot{U}'_{n+i})$ – вектори-стовпці приведених напруг виводів (полюсів) ПБП щодо довільного вузла (зовнішнього або внутрішнього) ПЕСЗ трансформатора, прийнятого за базовий;

$\dot{\mathbf{U}}_L = \text{column}(\dot{U}_i)$; $\dot{\mathbf{U}}_N = \text{column}(\dot{U}_{n+i})$ – вектори-стовпці дійсних напруг виводів (полюсів) обмоток ЕСЗ трансформатора щодо базового (нульового) вузла “земля” схеми заміщення ЕЕС;

$\dot{\mathbf{U}}'_{L,N} = \text{column}(\dot{U}'_{i,n+i})$; $\dot{\mathbf{U}}_{L,N} = \text{column}(\dot{U}_{i,n+i})$ – вектори-стовпці приведених і дійсних напруг обмоток ЕСЗ трансформатора;

w_i – кількості витків i -ї обмотки трансформатора;

$\underline{K}_i = K_i \angle \xi_i$, $K_i = w_i / w_\delta$, ξ_i – комплексний коефіцієнт трансформації (приведення), його модуль і аргумент для i -ї обмотки трансформатора (тут і надалі для спрощення записів символом “ \angle ” позначатимемо функцію e^j);

$\underline{\mathbf{K}} = \text{diag}(\underline{K}_i)$ – діагональна матриця коефіцієнтів трансформації (приведення) обмоток трансформатора.

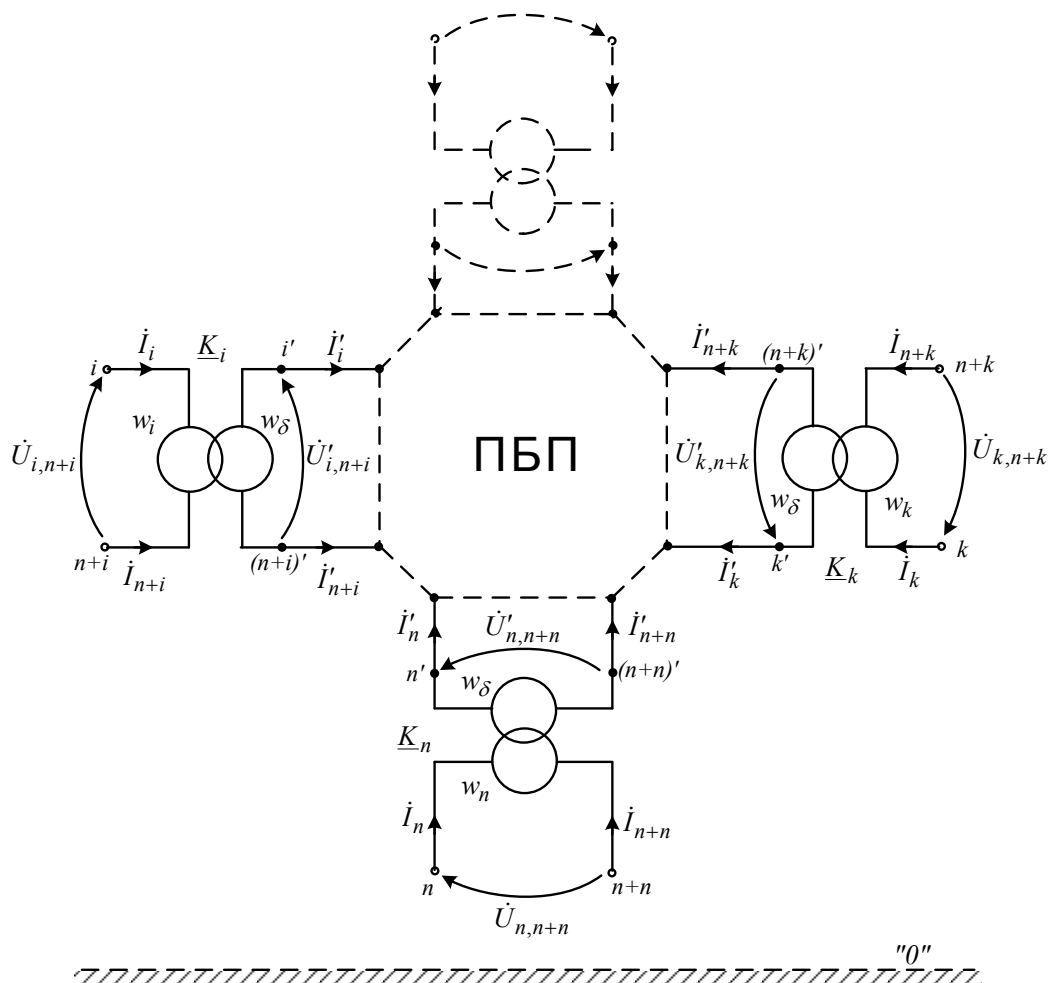


Рис. 1. Електрична схема заміщення (ЕСЗ) n -обмоткового трансформатора

Для вищевказаних координат режиму обмоток трансформатора справедливі такі очевидні співвідношення:

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{L,N} &= \dot{U}'_L - \dot{U}'_N; & \dot{U}_{L,N} &= \dot{U}_L - \dot{U}_N; & \dot{U}_{L,N} &= \underline{\mathbf{K}} \dot{U}'_{L,N}; \\ \dot{\mathbf{I}}'_N &= -\dot{\mathbf{I}}'_L; & \dot{\mathbf{I}}_N &= -\dot{\mathbf{I}}_L; & \dot{\mathbf{I}}'_L &= \underline{\mathbf{K}}^* \dot{\mathbf{I}}_L; & \dot{\mathbf{I}}'_N &= \underline{\mathbf{K}}^* \dot{\mathbf{I}}_N, \end{aligned} \quad (1)$$

де верхнім індексом “*” позначені комплексно-спряжені величини.

Кінцевою метою подальших перетворень є отримання Y-форми рівнянь усталеного режиму для узагальненої схеми заміщення n-обмоткового трансформатора як ТБП, зображеної на рис. 2. При цьому вважаємо, що на основі заданої ЕМСЗ шляхом дуального перетворення СЗМК отримана ЕСЗ трансформатора, зображена на рис. 1, в якій ПБП представлений ПЕСЗ трансформатора з внутрішньою структурою, тобто з внутрішніми по відношенню до виводів (полюсів) обмоток вузлами і контурами, і з взаємними Z'_M -зв'язками між відповідними Z' -гілками.

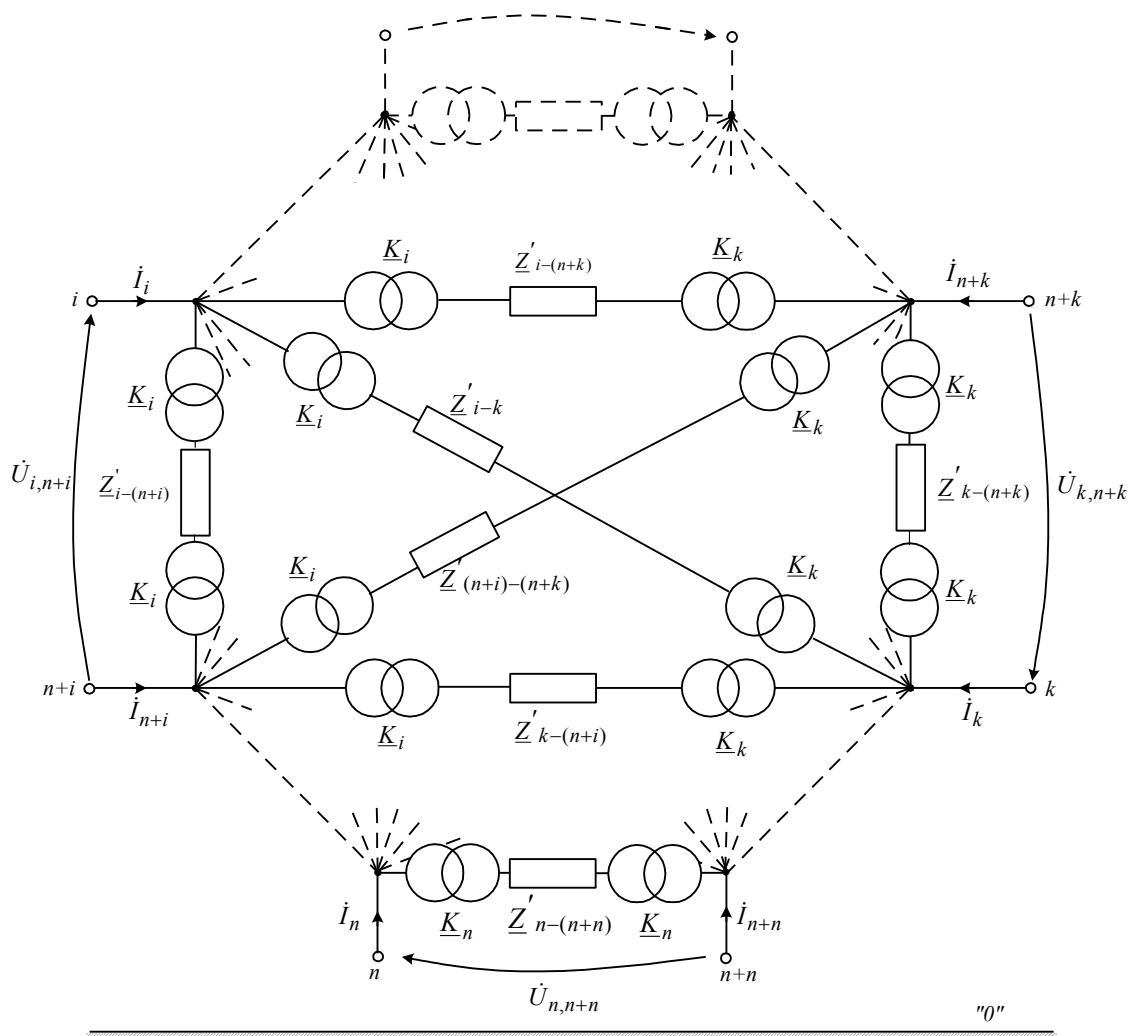


Рис. 2. Узагальнена схема заміщення n-обмоткового трансформатора у вигляді трансформаторного багатополюсника (ТБП)

З висловленого випливає, що спочатку необхідно отримати Y'-форму рівнянь стану ПБП шляхом перетворення рівнянь стану ПЕСЗ трансформатора в рівняння стану прохідного 2n-багатокутника щодо незалежних міжполюсних напруг $\dot{U}'_{L,N}$ і полюсних струмів $\dot{\mathbf{I}}'_L$. Таке перетворення можна виконати з використанням або методу незалежних (контурних) струмів, або методу незалежних (вузлових) напруг аналогічно до того, як це було наведено для багатополюсників у [3].

На нашу думку, найнаочнішим і найпростішим для реалізації такого перетворення є використання методу незалежних або контурних струмів, алгоритм якого наведено нижче. Враховуючи, що незалежні контури ПЕСЗ трансформатора складаються із зовнішніх, які замикаються через виводи (полюси) його обмоток, і внутрішніх вектор-стовпець незалежних (контурних) струмів $\dot{\mathbf{I}}'_H$ записуємо у такому вигляді:

$$\dot{\mathbf{I}}'_H = (\dot{\mathbf{I}}'_L, \dot{\mathbf{I}}'_V)_t, \quad (2)$$

де $\dot{\mathbf{I}}'_L, \dot{\mathbf{I}}'_V = \dot{\mathbf{I}}'_{vx} \vee \dot{\mathbf{I}}'_{vk}$ – вектори-стовпці незалежних (контурних) полюсних струмів для зовнішніх контурів і незалежних $\dot{\mathbf{I}}'_{vx}$ або контурних $\dot{\mathbf{I}}'_{vk}$ струмів для внутрішніх контурів відповідно.

Рівняння методу незалежних (контурних) струмів має відомий вигляд:

$$\underline{\mathbf{Z}}'_H \dot{\mathbf{I}}'_H = \dot{\mathbf{E}}'_H, \quad (3)$$

де $\dot{\mathbf{E}}'_H = (\dot{\mathbf{U}}'_{L,N}, 0)_t$ – вектор-стовпець джерел напруг незалежних зовнішніх $(\dot{\mathbf{U}}'_{L,N})$ і внутрішніх (для пасивної внутрішньої схеми дорівнюють нулю) контурів; $\underline{\mathbf{Z}}'_H = \underline{\mathbf{Z}}'_x \vee \underline{\mathbf{Z}}'_k$ – матриця комплексних опорів незалежних контурів або контурних комплексних опорів відповідно.

Рівняння (3) з урахуванням (2) можна записати так:

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Z}}'_{LL} & \underline{\mathbf{Z}}'_{Lv} \\ \underline{\mathbf{Z}}'_{Lv} & \underline{\mathbf{Z}}'_{vv} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{I}}'_L \\ \dot{\mathbf{I}}'_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{U}}'_{L,N} \\ 0 \end{pmatrix}_t \quad (4)$$

де $\underline{\mathbf{Z}}'_{LL}, \underline{\mathbf{Z}}'_{vv}$ – квадратні і $\underline{\mathbf{Z}}'_{Lv}, \underline{\mathbf{Z}}'_{vL}$ – в загальному випадку прямокутні субматриці матриці $\underline{\mathbf{Z}}'_H$ відповідно до прийнятої в (2) структури вектора-стовпця $\dot{\mathbf{I}}'_H$.

Після виключення з (4) субвектора-стовпця $\dot{\mathbf{I}}'_V$, одержимо послідовно \mathbf{Z}' - та \mathbf{Y}' -форми рівнянь стану ПБП щодо його n міжполюсних напруг і n полюсних струмів:

$$\underline{\mathbf{Z}}'_L \dot{\mathbf{I}}'_L = \dot{\mathbf{U}}'_{L,N} \quad \text{та} \quad \underline{\mathbf{Y}}'_L \dot{\mathbf{U}}'_{L,N} = \dot{\mathbf{I}}'_L, \quad (5)$$

де $\underline{\mathbf{Y}}'_L = \underline{\mathbf{Z}}'^{-1}_L = \left(\underline{\mathbf{Z}}'_{LL} - \underline{\mathbf{Z}}'_{Lv} \underline{\mathbf{Z}}'^{-1}_{vv} \underline{\mathbf{Z}}'_{vL} \right)^{-1}$ – n -вимірна квадратна симетрична матриця власних і взаємних провідностей ПБП на рис. 1 у вигляді прохідного $2n$ -багатокутника.

Рівняння (5) з урахуванням співвідношень (1) зводиться до n -вимірного незалежного рівняння стану трансформатора щодо дійсних значень напруг і струмів обмоток:

$$\underline{\mathbf{Y}}'_L \underline{\mathbf{K}}^{-1} \dot{\mathbf{U}}_{L,N} = \underline{\mathbf{K}}^* \dot{\mathbf{I}}_L, \quad (6)$$

з якого одержимо \mathbf{Y} -форму рівнянь стану трансформатора як прохідного трансформаторного $2n$ -полюсника:

$$\underline{\mathbf{Y}}_L \dot{\mathbf{U}}_{L,N} = \dot{\mathbf{I}}_L, \quad (7)$$

де $\underline{\mathbf{Y}}_L = \underline{\mathbf{K}}^{*-1} \underline{\mathbf{Y}}'_L \underline{\mathbf{K}}^{-1}$ – n -вимірна квадратна, в загальному випадку несиметрична, матриця власних і взаємних провідностей трансформатора як прохідного трансформаторного $2n$ -полюсника.

Формули для обчислення елементів матриці $\underline{\mathbf{Y}}_L$ в (7) мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} Y_{Li,i} &= Y'_{Li,i} / K_i^2; \quad Y_{Li,k} = Y'_{Li,k} / (\underline{\mathbf{K}}_i^* \underline{\mathbf{K}}_k); \\ Y_{Lk,i} &= Y'_{Lk,i} / (\underline{\mathbf{K}}_k^* \underline{\mathbf{K}}_i); \quad Y_{Lk,k} = Y'_{Lk,k} / K_k^2, \end{aligned} \quad (8)$$

де $i, k \in \overline{1, n}$ при $i \neq k$ – номери лінійних виводів (полюсів) обмоток трансформатора та $\underline{Y}'_{Lk,i} = \underline{Y}'_{Li,k}$ відповідно до (5).

Тут слід зазначити, що така \mathbf{Y} -форма рівняння (7) по суті відповідає рівнянням стану трансформатора в методі незалежних напруг, якими виступають n напруг його n обмоток. Внаслідок цього за такими рівняннями не можна безпосередньо скласти схему заміщення трансформатора, придатну для використання в згаданих вище програмних комплексах з автоматичним формуванням рівнянь ustalених режимів щодо вузлових напруг.

Зі сказаного випливає, що необхідно отримати таку \mathbf{Y} -форму рівнянь трансформатора щодо напруг $\dot{\mathbf{U}}_L, \dot{\mathbf{U}}_N$ і струмів $\dot{\mathbf{I}}_L, \dot{\mathbf{I}}_N$ усіх виводів (полюсів) його обмоток, яка дала б змогу скласти еквівалентну електричну схему заміщення трансформатора, придатну для автоматичного формування рівнянь ustalених режимів за умови збереження його принципової властивості як прохідного трансформаторного $2n$ -полюсника. Це означає, що n -мірне рівняння (7) необхідно розширити до $2n$ -вимірного рівняння щодо напруг і струмів усіх виводів (полюсів) обмоток трансформатора з урахуванням співвідношень $\dot{\mathbf{U}}_{L,N} = \dot{\mathbf{U}}_L - \dot{\mathbf{U}}_N$ і $\dot{\mathbf{I}}_N = -\dot{\mathbf{I}}_L$ з (1), внаслідок чого отримаємо $2n$ -вимірне рівняння стану трансформатора у \mathbf{Y} -формі:

$$\underline{\mathbf{Y}} \cdot \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{I}} \quad (9)$$

або у субблочному вигляді

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{LL} & -\underline{\mathbf{Y}}_{LN} \\ -\underline{\mathbf{Y}}_{NL} & \underline{\mathbf{Y}}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{U}}_L \\ \dot{\mathbf{U}}_N \end{pmatrix}_t = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{I}}_L \\ \dot{\mathbf{I}}_N \end{pmatrix}_t \quad (10)$$

де $\dot{\mathbf{U}} = (\dot{\mathbf{U}}_L, \dot{\mathbf{U}}_N)_t$, $\dot{\mathbf{I}} = (\dot{\mathbf{I}}_L, \dot{\mathbf{I}}_N)_t$ – $2n$ -вимірні вектори-стовпці вузлових напруг щодо базового (нульового) вузла “земля” схеми заміщення ЕЕС і струмів виводів (полюсів) обмоток трансформатора відповідно; $\underline{\mathbf{Y}}$ – $2n$ -вимірна квадратна, в загальному випадку несиметрична, матриця вузлових провідностей трансформатора для $2n$ виводів (полюсів) його обмоток.

Очевидно, що рівняння вигляду (10) не має безпосереднього розв’язку, оскільки матриця $\underline{\mathbf{Y}}$ є особливою, а суми значень її елементів по рядках і стовпцях дорівнюють нулю, що обумовлено відсутністю гілок між виводами (полюсами) обмоток трансформатора і базовим вузлом “земля” ЕЕС. Але саме така \mathbf{Y} -форма рівнянь стану дає можливість отримати узагальнену схему заміщення n -обмоткового трансформатора як трансформаторного багатополюсника (ТБП), зображену на рис. 2.

З урахуванням вказаних особливостей \mathbf{Y} -форми рівнянь (9), (10) і формул (8) вирази для обчислення значень комплексних опорів Т-гілок схеми заміщення трансформатора як ТБП на рис. 2 матимуть вигляд:

- між лінійними та нейтральними виводами (полюсами) однойменних обмоток

$$\underline{Z}'_{i-(n+i)} = 1/\underline{Y}'_{Li,i}; \quad \underline{Z}'_{k-(n+k)} = 1/\underline{Y}'_{Lk,k}; \quad (11)$$

- між виводами (полюсами) різнойменних обмоток

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_{i-k} &= -1/\underline{Y}'_{Li,k}; \quad \underline{Z}'_{(n+i)-(n+k)} = \underline{Z}'_{i-k}; \\ \underline{Z}'_{i-(n+k)} &= 1/\underline{Y}'_{Li,k} = -\underline{Z}'_{i-k}; \quad \underline{Z}'_{k-(n+i)} = \underline{Z}'_{i-(n+k)} = -\underline{Z}'_{i-k}. \end{aligned} \quad (12)$$

Визначальною характерною особливістю схеми на рис. 2 є те, що їй одночасно притаманні властивості як звичайного $2n$ -полюсника щодо зовнішньої по відношенню до його полюсів частини ЕЕС, так і прохідного трансформаторного $2n$ -полюсника щодо дійсних напруг і струмів обмоток трансформатора. Це означає, що ТБП на рис. 2 придатний для будь-яких схем з’єднання виводів (полюсів) обмоток трансформатора як між собою (наприклад, з’єднання нейтрального виводу послідовної обмотки з лінійним виводом загальної обмотки для автотрансформатора), так і з іншими елементами ЕЕС, і при цьому забезпечує виконання умов (1).

Проілюструємо запропонований вище підхід на прикладі триобмоткового трифазного тристрижневого трансформатора. Як відомо, в такому трансформаторі обмотки кожної з фаз розташовані на відповідних їм стрижнях магнітопроводу. На рис. 3, а показана прийнята схема розташування обмоток вищої (В) і нижчої (Н1, Н2) напруг фази А на магнітопроводі трансформатора, а також виділені характерні ділянки його магнітної системи з урахуванням викладених в [1] допущень і спрощень, що уможливило б побудувати СЗМК, зображену на рис. 3, б.

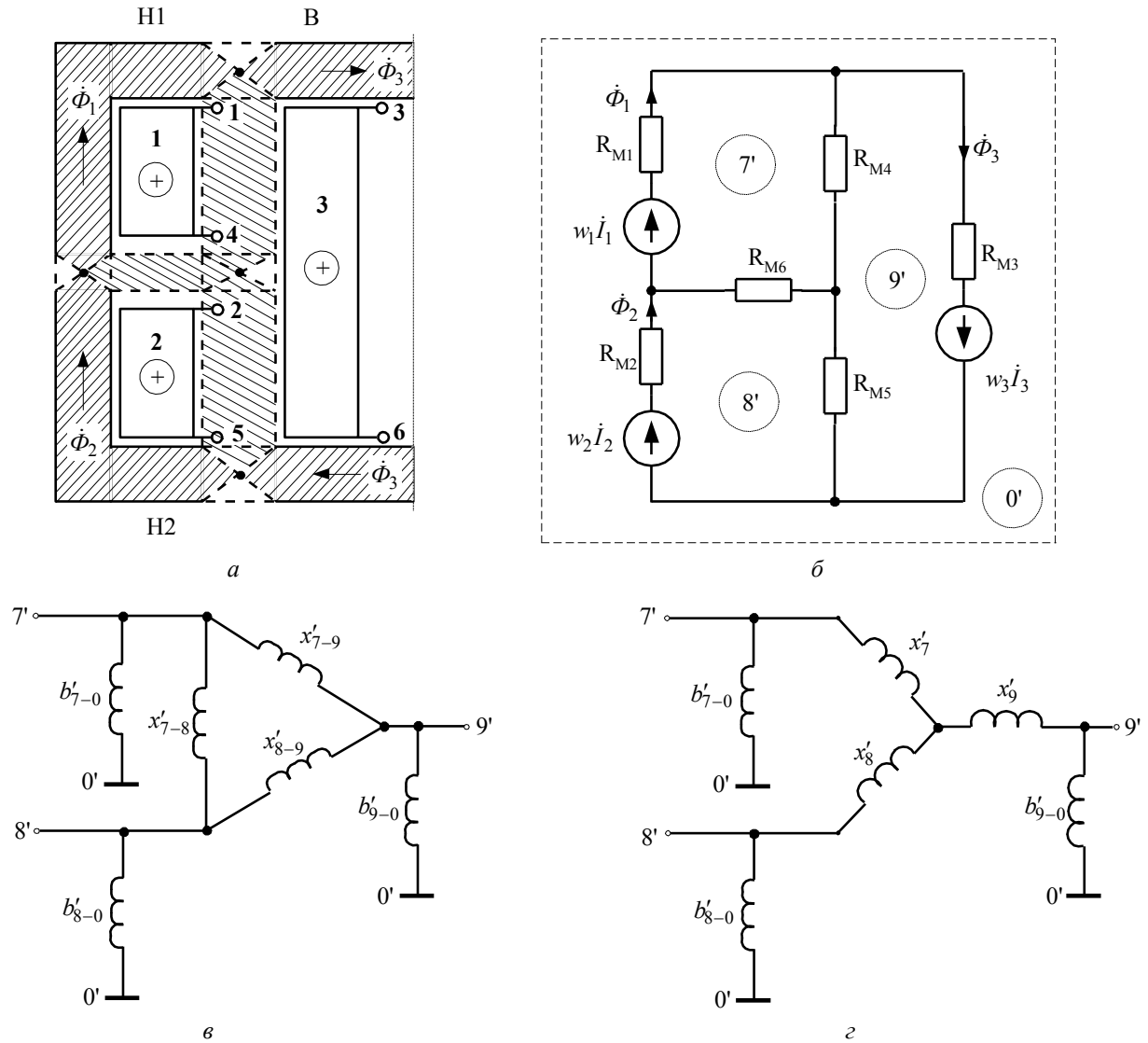


Рис. 3. Схеми триобмоткового трифазного тристрижневого трансформатора: а – схема розташування обмоток фази А на магнітопроводі; б – схема заміщення магнітного кола (СЗМК); в – електрична схема заміщення магнітного кола (ЕСЗМК); з – ЕСЗМК після перетворення трикутника міжвузлових реактансів в зірку

Варто зазначити, що така СЗМК трансформатора придатна для моделювання як симетричних, так і несиметричних режимів, оскільки уможливує враховувати шляхи замикання окремих симетричних складових магнітних потоків. Так, для складових прямої (зворотної) послідовності магнітний опір R_{M3} враховує лише ділянки яра магнітопроводу за межами обмоток, при цьому значення R_{M3} набагато менше від значень магнітних опорів R_{M1}, R_{M2} відповідних ділянок магнітопроводу в межах обмоток і тому здебільшого може бути прийняте таким, що дорівнює нулю. Для складових нульової послідовності магнітний опір R_{M3} враховує шляхи замикання магнітних потоків від яра до яра ззовні обмоток і його значення може на декілька порядків перевищувати значення магнітних опорів R_{M1}, R_{M2} , тобто в цьому випадку маємо $R_{M3} \neq 0$ [1].

Дуальне перетворення СЗМК на рис. 3, б дає ЕСЗМК трансформатора (рис. 3, в), параметри якої приведені до базової кількості витків. Доповнивши відповідно до [4] ЕСЗМК трансформатора на рис. 3, в гілками з елементами, що враховують активні опори обмоток і втрати активної потужності в магнітопроводі, а також ідеальними трансформаторами, отримаємо ЕСЗ трансформатора, показану на рис. 4, а, де штрих-пунктирною лінією виділена ПЕСЗ трансформатора, для якої маємо:

- $\underline{Z}'_1 = r'_1$, $\underline{Z}'_2 = r'_2$, $\underline{Z}'_3 = r'_3$ – активні опори обмоток нижчої (Н1, Н2) та вищої (В) напруг трансформатора;

- $\underline{Z}'_{7-0} = 1/Y'_{7-0} = 1/(g'_{7-0} - jb'_{7-0})$, $\underline{Z}'_{8-0} = 1/Y'_{8-0} = 1/(g'_{8-0} - jb'_{8-0})$, $\underline{Z}'_{9-0} = 1/Y'_{9-0} = 1/(g'_{9-0} - jb'_{9-0})$ – комплексні опори (провідності), що враховують втрати активної потужності і магнітні потоки у відповідних ділянках магнітного кола трансформатора. Тут зазначимо, що для складових прямої (зворотної) послідовності переважно приймають $\underline{Z}'_{9-0} = \infty$ ($Y'_{9-0} = 0$), тобто ця гілка відсутня;

- $\underline{Z}'_{7-8} = jx'_{7-8}$, $\underline{Z}'_{7-9} = jx'_{7-9}$, $\underline{Z}'_{8-9} = jx'_{8-9}$ – індуктивні опори, які враховують магнітні потоки в каналах між відповідними обмотками трансформатора.

Як зрозуміло з рис. 4, а ПЕСЗ трансформатора містить три незалежні вузли (7', 8', 9') і 9 гілок (або 8 – без \underline{Z}'_{9-0} – для складових прямої (зворотної) послідовності), а, значить, має шість (або відповідно 5) незалежних контурів. Вказані штриховими лініями на рис. 4, а незалежні контури вибрані з урахуванням наступного:

- три зовнішні контури (I, II, III) вибрані так, щоб їх контурні струми I'_I, I'_{II}, I'_{III} збігались зі струмами I'_1, I'_2, I'_3 полюсів ПЕСЗ відповідно;

- три внутрішні контури (IV, V, VI) вибрані так, щоб струм I'_{VI} останнього VI контуру збігався із струмом у вітці з опором \underline{Z}'_{9-0} . Це означає, що для складових прямої (зворотної) послідовності можна не враховувати цей шостий контур.

З урахуванням викладеного субкомпоненти рівняння (4) стану ПЕСЗ трансформатора на рис. 4, а в методі контурних струмів матимуть вигляд (нижче компоненти VI контуру виділені відповідними штриховими лініями):

$$\mathbf{I}'_L = (I'_1, I'_2, I'_3)_t; \quad \mathbf{I}'_V = (I'_{IV}, I'_{V}, I'_{VI})_t; \quad \mathbf{U}'_{L,N} = (U'_{1,4}, U'_{2,5}, U'_{3,6})_t;$$

$$\underline{Z}'_{LL} = \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \\ \hline & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \\ \hline & \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} & \\ \hline \end{array} ;$$

$$\underline{Z}'_{Lv} = \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline & \begin{array}{c} \text{IV} \\ \text{V} \\ \text{VI} \end{array} & \\ \hline & \begin{array}{c} \text{IV} \\ \text{V} \\ \text{VI} \end{array} & \\ \hline & \begin{array}{c} \text{IV} \\ \text{V} \\ \text{VI} \end{array} & \\ \hline \end{array} ;$$

$$\underline{Z}'_{vL} = \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{V} \\ \text{V} \\ \text{V} \\ \text{I} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{7-0} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \underline{Z}'_{8-0} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{7-0} \\ \hline \end{array} \\ \hline & & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{7-9} \\ \hline \end{array} \\ \hline & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{8-0} \\ \hline \end{array} & \\ \hline \end{array} ; \quad (13)$$

$$\underline{Z}'_{vV} = \begin{array}{c} \text{I} \\ \text{V} \\ \text{V} \\ \text{V} \\ \text{I} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{IV} & \text{V} & \text{VI} \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline \underline{Z}'_{7-8} + \underline{Z}'_{7-0} + \\ + \underline{Z}'_{8-0} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{7-8} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{8-0} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{7-8} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \underline{Z}'_{7-8} + \underline{Z}'_{7-9} + \\ + \underline{Z}'_{8-9} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{8-9} \\ \hline \end{array} \\ \hline \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{8-0} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline -\underline{Z}'_{8-9} \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline \underline{Z}'_{8-9} + \underline{Z}'_{8-0} + \\ + \underline{Z}'_{9-0} \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} .$$

Відомо, що двообмоткові трифазні тристрижневі трансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги можуть розглядатися також, як один з типів триобмоткових трансформаторів з двома однаковими обмотками нижчої напруги. Тому для подальших розрахунків був прийнятий трансформатор ТРДНС-25000/35 з такими номінальними параметрами [9]: $S_{\text{НОМ}}=25 \text{ МВ}\cdot\text{А}$; $S_{\text{ВНОМ}} = S_{\text{НОМ}}$; $S_{\text{Н1НОМ}} = S_{\text{Н2НОМ}} = 0,5S_{\text{НОМ}}$; $U_{\text{ВНОМ}} = 15,75 \text{ кВ}$; $U_{\text{Н1НОМ}} = U_{\text{Н2НОМ}} = 6,3 \text{ кВ}$; $\Delta P_x = 25 \text{ кВт}$; $\Delta P_k = 115 \text{ кВт}$; $I_x = 0,65 \%$; $u_{\text{кВ-Н}} = 10,5 \%$; $u_{\text{кН1-Н2}} = 30 \%$; схеми з'єднання обмоток В, Н1 та Н2 – Y/Y-Y. Для однозначності приймаємо, що значення величин ΔP_x і I_x були отримані з досліду неробочого ходу трансформатора при розімкненій обмотці вищої напруги (В) і підключенні до джерела живлення з'єднаних паралельно обмоток нижчої напруги (Н1/Н2).

Оскільки для прийнятих схем з'єднання обмоток складові нульової послідовності відсутні, то рівняння для VI контуру не враховуємо. Відзначимо також, що для цього прикладу можна і доцільно визначати значення індуктивних опорів схеми на рис. 3, в шляхом перетворення традиційної схеми заміщення такого трансформатора у вигляді трипроменевої зірки (рис. 3, з) з умовними індуктивними опорами окремих обмоток в еквівалентну їй схему трикутника на рис. 3, в.

Для спрощення розрахунків приймаємо, що $w_B = w_V$. Тоді за відомими формулами обчислюємо значення основних параметрів трансформатора (тут і надалі результати приведені з п'ятьма значущими цифрами):

$$\underline{K}_1 = \underline{K}_2 = K_1 = K_2 = U_{\text{Н1НОМ}}/U_{\text{ВНОМ}} = 0,4; \quad \underline{K}_3 = K_3 = 1;$$

$$Y'_T = \frac{I_x}{100} \cdot \frac{S_{\text{ВНОМ}}}{U_{\text{ВНОМ}}^2} = 6,5507 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$g'_T = \frac{\Delta P_x}{1000 \cdot U_{\text{ВНОМ}}^2} = 1,0078 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$b'_T = \sqrt{Y_T'^2 - g_T'^2} = 6,4727 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Z'_{\text{В-Н}} = \frac{u_{\text{кВ-Н}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВНОМ}}^2}{S_{\text{ВНОМ}}} = 1,0418 \text{ Ом};$$

$$Z'_{\text{Н1-Н2}} = \frac{u_{\text{кН1-Н2}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВНОМ}}^2}{S_{\text{ВНОМ}}} = 2,9767 \text{ Ом};$$

$$r'_{\text{В-Н}} = \frac{\Delta P_k}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВНОМ}}^2}{S_{\text{ВНОМ}}} = 4,5643 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$r'_B = 0,5 \cdot r'_{\text{В-Н}} = 2,2821 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$r'_{\text{Н1}} = r'_{\text{Н2}} = 2 \cdot r'_B = 4,5643 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$r'_{\text{Н1-Н2}} = r'_{\text{Н1}} + r'_{\text{Н2}} = 9,1287 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

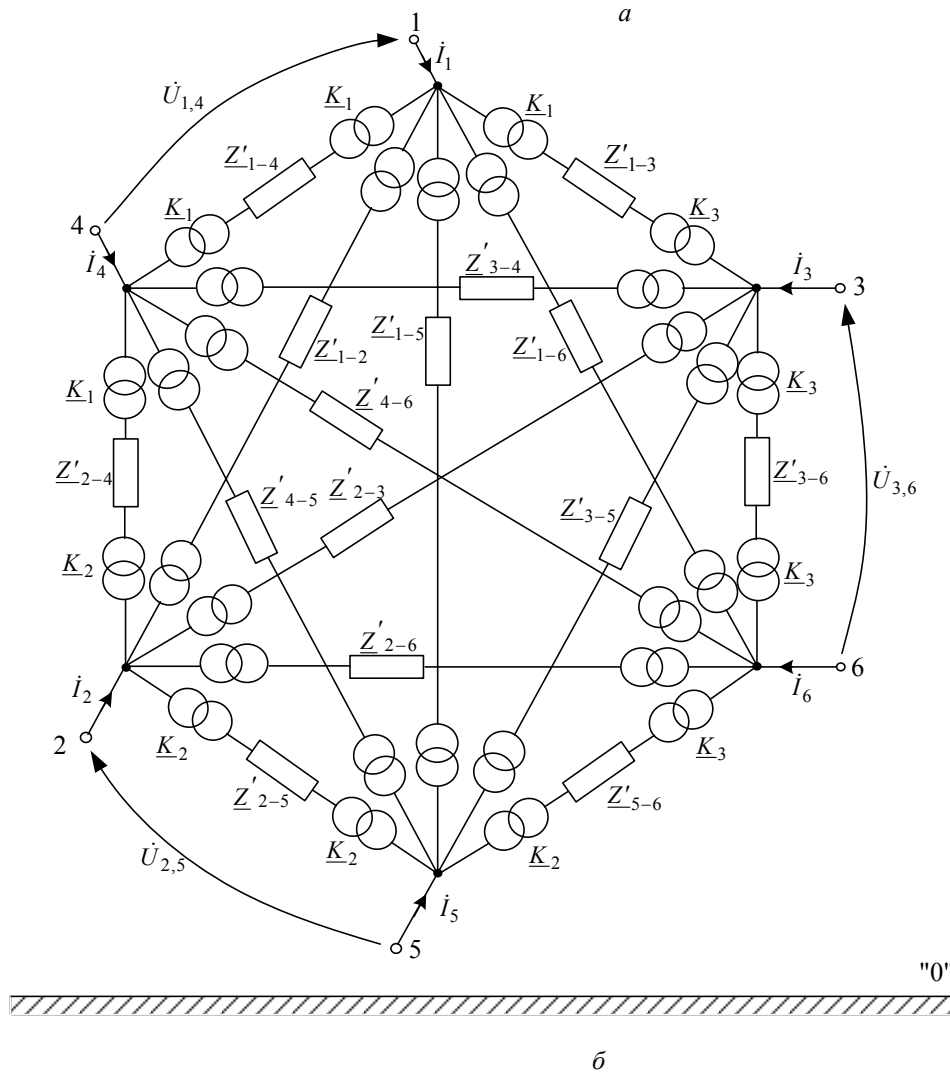
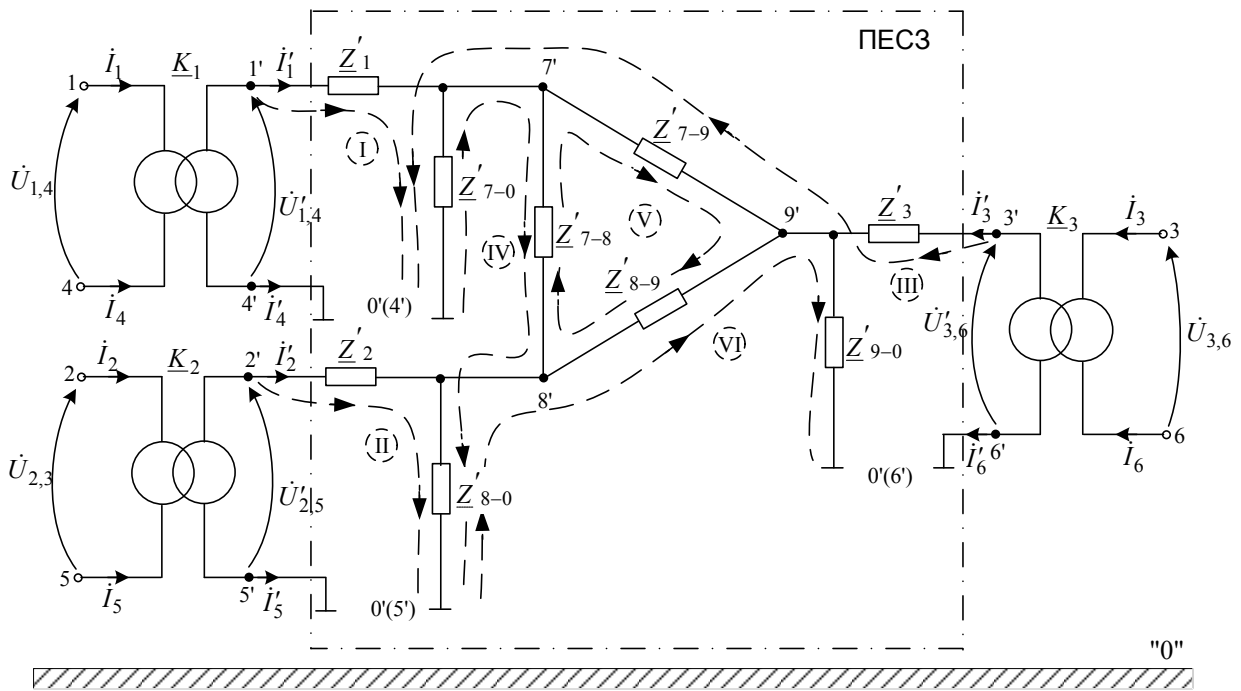


Рис. 4. Схеми заміщення триобмоткового трифазного тристрижневого трансформатора:
 а – електрична схема заміщення (ЕСЗ); б – трансформаторний багатополісник (ТБП)

$$x'_{B-H} = \sqrt{Z'^2_{B-H} - r'^2_{B-H}} = 1,0408 \text{ Ом}; \quad x'_{H1-H2} = \sqrt{Z'^2_{H1-H2} - r'^2_{H1-H2}} = 2,9753 \text{ Ом};$$

$$x'_{H1} = x'_{H2} = 0,5 \cdot x'_{H1-H2} = 1,4876 \text{ Ом}; \quad x'_B = x'_{B-H} - x'_{H1} // x'_{H2} = 2,9702 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}.$$

Для індуктивних опорів схем на рис. 3, в, з справедливі співвідношення:

$$x'_7 = x'_{H1}; \quad x'_8 = x'_{H2}; \quad x'_9 = x'_B; \quad x'_{7-8} = x'_7 + x'_8 + x'_7 x'_8 / x'_9 = 10,426 \text{ Ом};$$

$$x'_{7-9} = x'_7 + x'_9 + x'_7 x'_9 / x'_8 = 2,0817 \text{ Ом}; \quad x'_{8-9} = x'_8 + x'_9 + x'_8 x'_9 / x'_7 = 2,0817 \text{ Ом}.$$

З урахуванням викладеного для схеми на рис. 4, а маємо:

$$Y'_{7-0} = g'_{7-0} - jb'_{7-0} = (g'_T - jb'_T) / 2 = 5,0390 \cdot 10^{-5} - j3,2363 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Y'_{8-0} = g'_{8-0} - jb'_{8-0} = (g'_T - jb'_T) / 2 = 5,0390 \cdot 10^{-5} - j3,2363 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Y'_{9-0} = 0 \text{ - для складових прямої (зворотної) послідовності};$$

$$Z'_1 = r'_1 = r'_{H1} = 4,5643 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$Z'_2 = r'_2 = r'_{H2} = 4,5643 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$Z'_3 = r'_3 = r'_B = 2,2821 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$Z'_{7-8} = jx'_{7-8} = j10,426 \text{ Ом};$$

$$Z'_{7-9} = jx'_{7-9} = j2,0817 \text{ Ом};$$

$$Z'_{8-9} = jx'_{8-9} = j2,0817 \text{ Ом}.$$

Послідовне обчислення за формулами (13), (5), (7), (11), (12) дає змогу визначити параметри елементів еквівалентної електричної схеми заміщення цього трансформатора як ТБП, схема якого показана на рис. 4, б:

$$Z'_{1-4} = Z'_{2-5} = 0,062894 + j1,7343 \text{ Ом}; \quad Z'_{3-6} = 0,045643 + j1,0408 \text{ Ом};$$

$$Z'_{1-2} = Z'_{4-5} = -0,022481 + j10,410 \text{ Ом};$$

$$Z'_{1-3} = Z'_{2-3} = Z'_{4-6} = Z'_{5-6} = 0,091317 + j2,0817 \text{ Ом};$$

$$Z'_{1-5} = Z'_{2-4} = 0,022481 - j10,410 \text{ Ом};$$

$$Z'_{1-6} = Z'_{2-6} = Z'_{3-4} = Z'_{3-5} = -0,091317 - j2,0817 \text{ Ом}.$$

Отже, отримана еквівалентна схема заміщення трансформатора як ТБП, показана на рис. 4, б, при розрахованих вище значеннях параметрів її елементів придатна для будь-яких з'єднань виводів (полосів) обмоток як між собою, так і з іншими елементами (вузлами) ЕЕС. При цьому у багатьох конкретних випадках після відповідних еквівалентних перетворень схема ТБП істотно спрощується і зводиться до конкретних РЕСЗ трансформатора.

Приклад 1. Традиційне з'єднання обмоток цього трансформатора із зовнішніми мережами ЕЕС за відсутності електричних зв'язків як між обмотками, так і між згаданими мережами. Для отримання РЕСЗ трансформатора достатньо з'єднати нейтральні виводи 4, 5, 6 обмоток Н1, Н2, В між собою і з базовим вузлом "0", тобто достатньо прийняти, що $\dot{U}_4 = \dot{U}_5 = \dot{U}_6 = 0$. У результаті нескладних перетворень схема рис. 4, б зводиться до простої РЕСЗ трансформатора, показаної на рис. 5, а, або після перетворення трикутника опорів в трипроменеву зірку – до схеми на рис. 5, б.

Значення параметрів елементів цих схем обчислюються за формулами (тут і надалі верхній індекс "(3)" вказує на сторону приведення цих значень):

$$Y^{(3)}_{1-0} = Y'_{1-4} + Y'_{1-5} + Y'_{1-6} = 5,7429 \cdot 10^{-5} - j3,2222 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Y^{(3)}_{2-0} = Y'_{2-4} + Y'_{2-5} + Y'_{2-6} = 5,7429 \cdot 10^{-5} - j3,2222 \cdot 10^{-4} \text{ См};$$

$$Y^{(3)}_{3-0} = Y'_{3-4} + Y'_{3-5} + Y'_{3-6} = -1,4068 \cdot 10^{-5} - j2,8268 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

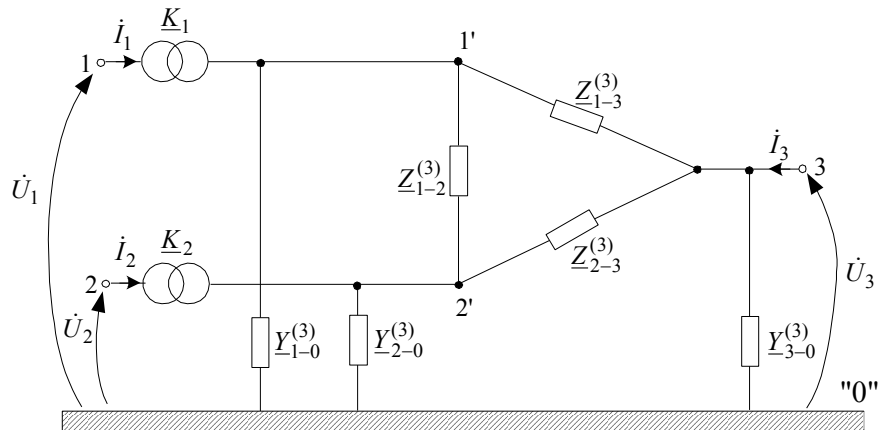
$$Z^{(3)}_{1-2} = Z'_{1-2} = -0,022481 + j10,410 \text{ Ом}; \quad Z^{(3)}_{1-3} = Z^{(3)}_{2-3} = Z'_{1-3} = 0,091317 + j2,0817 \text{ Ом};$$

$$Z^{(3)}_{1-N} = Z^{(3)}_{1-2} \cdot Z^{(3)}_{1-3} / (Z^{(3)}_{1-2} + Z^{(3)}_{1-3} + Z^{(3)}_{2-3}) = 0,045671 + j1,4876 \text{ Ом};$$

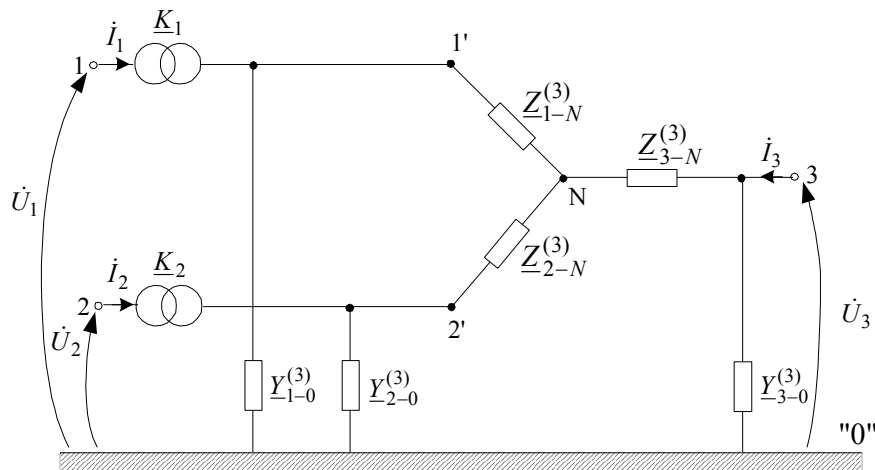
$$\underline{Z}_{2-N}^{(3)} = \underline{Z}_{1-2}^{(3)} \cdot \underline{Z}_{2-3}^{(3)} / (\underline{Z}_{1-2}^{(3)} + \underline{Z}_{1-3}^{(3)} + \underline{Z}_{2-3}^{(3)}) = 0,045671 + j1,4876 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{3-N}^{(3)} = \underline{Z}_{1-3}^{(3)} \cdot \underline{Z}_{2-3}^{(3)} / (\underline{Z}_{1-2}^{(3)} + \underline{Z}_{1-3}^{(3)} + \underline{Z}_{2-3}^{(3)}) = 0,022823 + j0,29702 \text{ Ом}.$$

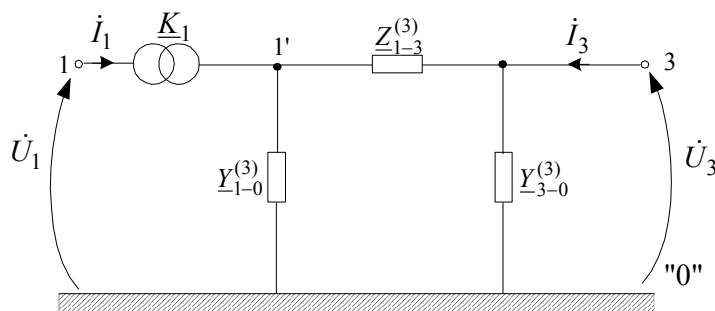
Приклад 2. З'єднання обмоток Н1, Н2 цього трансформатора за схемою автотрансформатора. Для отримання РЕСЗ автотрансформатора достатньо з'єднати між собою виводи 4 і 2 обмоток Н1 і Н2, які утворюють загальний вивід, що позначається надалі номером "2", а також з'єднати нейтральні виводи 5 і 6 обмоток Н2 і В між собою і з базовим вузлом "0", тобто достатньо прийняти, що $\dot{U}_4 = \dot{U}_2$ і $\dot{U}_5 = \dot{U}_6 = 0$.



а



б



в

Рис. 5. Розрахункові електричні схеми заміщення трансформаторів:
 а – двообмоткового з розщепленою обмоткою нижчої напруги або автотрансформатора, виконаного шляхом відповідного з'єднання обмоток нижчої напруги; б – схема рис. 5, а після перетворення трикутника опорів в трипроменеву зірку; в – двообмоткового трансформатора, виконаного шляхом відповідного з'єднання обмоток нижчої напруги

При цьому обмотка Н1 стає послідовною, а обмотка Н2 – загальною обмоткою автотрансформатора. У цьому випадку номінальна напруга обмотки Н2 залишається попередньою, а між виводами 1 обмотки Н1 і 5 обмотки Н2 повинна бути прийнятою в два рази більшою, тобто $U_{2\text{ном}}=U_{\text{Н2ном}}$ і $U_{1\text{ном}}=2U_{\text{Н1ном}}$. Зазначимо також, що цей приклад носить чисто теоретичний і методологічний характер, оскільки для прийнятого нами трансформатора ТРДНС-25000/35 така схема з'єднань обмоток Н1 і Н2 на практиці не використовується.

У результаті нескладних перетворень схема рис. 4, б зводиться до таких самих простих РЕСЗ автотрансформатора, як і в попередньому прикладі (рис. 5, а, б), проте значення параметрів елементів цих схем обчислюються вже за іншими формулами, а саме:

$$\begin{aligned} \underline{Y}'_{1-0} &= \underline{Y}'_{1-5} + \underline{Y}'_{1-6} = -0,020824 + j0,57550 \text{ См}; \\ \underline{Y}'_{2-0} &= \underline{Y}'_{2-5} + \underline{Y}'_{2-6} + \underline{Y}'_{4-5} + \underline{Y}'_{4-6} = 0,020674 - j0,67187 \text{ См}; \\ \underline{Y}'_{3-0} &= \underline{Y}'_{3-5} + \underline{Y}'_{3-6} = 0,021017 - j0,47945 \text{ См}; \\ \underline{Z}'_{1-2} &= \underline{Z}'_{1-2} // \underline{Z}'_{1-4} = 0,045754 + j1,4869 \text{ Ом}; & \underline{Z}'_{1-3} &= \underline{Z}'_{1-3} = 0,091317 + j2,0817 \text{ Ом}; \\ \underline{Z}'_{2-3} &= \underline{Z}'_{2-3} // \underline{Z}'_{3-4} = \infty \text{ Ом}; & \underline{Z}'_{1-N} &= 0 \text{ Ом}; \\ \underline{Z}'_{2-N} &= 0,045754 + j1,4869 \text{ Ом}; & \underline{Z}'_{3-N} &= 0,091317 + j2,0817 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Приклад 3. Послідовно з'єднують обмотки Н1 і Н2, внаслідок чого цей трансформатор стає звичайним двообмотковим трансформатором. Зразу ж зазначимо, що цей приклад, як і попередній, з тих самих причин носить чисто теоретичний і методологічний характер для підтвердження вищевикладеного. Для отримання РЕСЗ трансформатора тут, як і в попередньому прикладі, достатньо з'єднати між собою виводи 4 і 2 обмоток Н1 і Н2, а також з'єднати нейтральні виводи 5 і 6 обмоток Н2 і В між собою і з базовим вузлом “0”, тобто прийняти, що $\dot{U}_4 = \dot{U}_2$ і $\dot{U}_5 = \dot{U}_6 = 0$. Проте порівняно з попереднім прикладом необхідно також вилучити вузол, утворений виводами 4 і 2 обмоток Н1 і Н2, тобто вузол 2 (2') на схемі рис. 5, а, прийнявши, що $\dot{I}_2 = 0$. Для цього необхідно трипроменеву зірку опорів з центральним вузлом 2' на схемі рис. 5, а, значення яких були обчислені за формулами попереднього прикладу (для схеми автотрансформатора), перетворити в еквівалентний трикутник опорів щодо вузлів 1', 3, 0 та замінити отримані паралельно з'єднані гілки між відповідними вузлами еквівалентними опорами (провідностями).

У результаті отримуємо просту РЕСЗ двообмоткового трансформатора, показану на рис. 5, в, значення параметрів елементів якої обчислюються з використанням вже отриманих в попередньому прикладі для схеми на рис. 5, а (для однозначності позначень для них використовуємо додатковий нижній індекс “АТ”) за формулами:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{1,0}^{(3)} &= \underline{Z}_{1-2\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{2-0\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{1-2\text{АТ}}^{(3)} \cdot \underline{Z}_{2-0\text{АТ}}^{(3)} / \underline{Z}_{2-3\text{АТ}}^{(3)} = 0,091509 + j2,9739 \text{ Ом}; \\ \underline{Z}_{3,0}^{(3)} &= \underline{Z}_{2-0\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{2-3\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{2-0\text{АТ}}^{(3)} \cdot \underline{Z}_{2-3\text{АТ}}^{(3)} / \underline{Z}_{1-2\text{АТ}}^{(3)} = \infty \text{ Ом}; \\ \underline{Z}_{1,3}^{(3)} &= \underline{Z}_{1-2\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{2-3\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Z}_{1-2\text{АТ}}^{(3)} \cdot \underline{Z}_{2-3\text{АТ}}^{(3)} / \underline{Z}_{2-0\text{АТ}}^{(3)} = \infty \text{ Ом}; \\ \underline{Y}_{1-0}^{(3)} &= \underline{Y}_{1-0\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Y}_{1,0}^{(3)} = -0,010487 + j0,23956 \text{ См}; \\ \underline{Y}_{3-0}^{(3)} &= \underline{Y}_{3-0\text{АТ}}^{(3)} + \underline{Y}_{3,0}^{(3)} = 0,021017 - j0,47945 \text{ См}; \\ \underline{Z}_{1-3}^{(3)} &= \underline{Z}_{1-3\text{АТ}}^{(3)} // \underline{Z}_{1,3}^{(3)} = 0,091317 + j2,0817 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Нижченаведені результати розрахунку основних характерних режимів трансформаторів при підключенні обмотки В до джерела живлення з нульовим внутрішнім опором і напругою, що дорівнює номінальному значенню напруги обмотки В, тобто $\dot{U}_3 = U_3 = U_{\text{Вном}}$: табл. 1 – режими

неробочого ходу при $\dot{I}_1 = 0, \dot{I}_2 = 0$; табл. 2 – режими трифазного короткого замикання лінійних виводів 1 обмотки Н1 при $\dot{U}_1 = 0, \dot{I}_2 = 0$. В табл. 1, 2 значення характерних величин наведені також у [%] та у [в.о.] щодо номінальних значень струмів і напруг відповідних обмоток.

Таблиця 1

Режим неробочого ходу

Величина	Трансформатор		
	Приклад 1	Приклад 2	Приклад 3
\dot{I}_3, A	$9,1528 \cdot 10^{-4} - j0,0058819$	$9,1528 \cdot 10^{-4} - j0,0058819$	$9,1528 \cdot 10^{-4} - j0,0058819$
$I_3, \%$	0,64956	0,64956	0,64956
$\dot{U}_1, \text{кВ}$	$6,2957 - j5,6703 \cdot 10^{-4}$	$12,591 - j0,0011340$	$12,591 - j0,0011340$
$U_1, \text{в.о.}$	0,99932	0,99932	0,99932
$\dot{U}_2, \text{кВ}$	$6,2957 - j5,6703 \cdot 10^{-4}$	$6,2957 - j5,6703 \cdot 10^{-4}$	–
$U_2, \text{в.о.}$	0,99932	0,99932	–

Таблиця 2

Режим трифазного короткого замикання

Величина	Трансформатор		
	Приклад 1	Приклад 2	Приклад 3
$\dot{I}_3, \text{кА}$	$0,19552 - j5,0896$	$0,38236 - j8,7195$	$0,38236 - j8,7195$
$I_3, \text{в.о.}$	5,5579	9,5238	9,5238
$\dot{I}_1, \text{кА}$	$-0,48799 + j12,718$	$-0,47811 + j10,899$	$-0,47811 + j10,899$
$I_1, \text{в.о.}$	11,110	9,5237	9,5237
$\dot{U}_2, \text{кВ}$	$5,2470 + j0,039826$	0	–
$U_2, \text{в.о.}$	0,83288	0	–

Оскільки в усіх трьох прикладах конструкція магнітопроводу і розташування обмоток трансформатора однакова, а змінювалася тільки схема з'єднання виводів обмоток Н1 і Н2, то, як і потрібно було очікувати, в розглянутому режимі неробочого ходу (табл. 1) значення струму \dot{I}_3 у всіх трьох прикладах однакові і дещо менші від прийнятого номінального значення струму неробочого ходу $I_k = 0,65 \%$, який має місце при розімкненій обмотці В трансформатора. Напруги на однакових розімкнених обмотках Н1 і Н2 в прикладі 1 (\dot{U}_1 і \dot{U}_2) та Н2 в прикладі 2 (\dot{U}_2) також однакові і дещо менші від номінальних значень напруг цих обмоток. При цьому в прикладах 2, 3 напруги \dot{U}_1 однакові, але в два рази більші від напруги \dot{U}_1 у прикладі 1.

З вищевказаних причини в розглянутому режимі трифазного короткого замикання (табл. 2) струми \dot{I}_3 і \dot{I}_1 в прикладах 2, 3 відповідно однакові. В прикладі 1 струм \dot{I}_3 істотно менший порівняно зі струмом \dot{I}_3 в прикладах 2 і 3, оскільки в прикладі 1 еквівалентний магнітний опір для магнітних потоків ззовні магнітопроводу трансформатора істотно менший, ніж в прикладах 2, 3.

Наведені результати повністю відповідають вищеприйнятим параметрам і схемам з'єднання обмоток Н1 і Н2 трансформатора і підтверджують правильність запропонованого підходу побудови як узагальненої схеми заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів, так і на її основі розрахункових електричних схем заміщення для конкретних випадків схем з'єднання їх обмоток.

Висновки: 1. Запропонований підхід до побудови узагальненої схеми заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів ґрунтується на методологічно коректному врахуванні особливостей конструктивного виконання, а також розташування схем з'єднання обмоток трансформатора, що забезпечує підвищення адекватності результатів розрахунку усталених режимів.

2. Отриманій у вигляді трансформаторного багатополюсника узагальненій схемі заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів одночасно притаманні властивості як звичайного трансформатора, що дає змогу здійснювати довільне з'єднання виводів обмоток трансформатора між собою і з іншими елементами електроенергетичних систем, так і прохідного трансформаторного багатополюсника, що забезпечує виконання обов'язкових співвідношень між відповідними координатами режиму виводів обмоток трансформатора.

3. Запропонований на основі методу незалежних (або контурних) струмів алгоритм дає змогу формалізувати процедуру обчислення параметрів елементів трансформаторного багатополюсника.

4. Узагальнена схема заміщення багатообмоткових трансформаторів і автотрансформаторів у вигляді трансформаторного багатополюсника придатна для використання в програмних комплексах з автоматичним формуванням рівнянь усталених режимів щодо вузлових напруг на основі методів балансу струмів або потужностей у вузлах схеми, що розширює можливості проведення досліджень.

5. Для конкретних випадків з'єднання виводів обмоток трансформаторів як між собою, так і з іншими елементами електроенергетичних систем спрощувальні еквівалентні перетворення трансформаторного багатополюсника уможливають одержувати розрахункові електричні схеми заміщення з меншою кількістю вузлів і віток, внаслідок чого знижується порядок розв'язуваної системи рівнянь усталеного режиму.

1. Беляков Ю.С. Схеми заміщення автотрансформаторов с регулировочными трансформаторами // *Электричество*. – 1988. – № 5. – С. 26–33. 2. Скрипник О.І. ДАКАР – обчислювальний комплекс аналізу режимів і процесів електроенергетичних систем // *Технічна електродинаміка*. – 1998. – Спец. вип. – С. 56–61. 3. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – 3-тє вид., перероб. і доп. – Львів: Вища шк., 1989. – 464 с. 4. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схеми заміщення многообмоточных трансформаторов. – М.: Энергия, 1974. – 192 с. 5. Пинцов А.М. Уравнения и схемы заміщення трансформаторов с учетом тока намагничивания // *Электричество*. – 1976. – № 4. – С. 29–34. 6. Cherry E.C. The duality between in terlinked electric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuits // *The Proceedings of the Physical Society*. – 1949. – Vol. 62, № 350B. – P. 2. 7. Лисяк Г.М., Пастух О.Р., Коновал В.С. Узагальнена схема заміщення двообмоткових трансформаторів для розрахунку усталених режимів // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2003. – № 479. – С. 112–121. 8. Лисяк Г.М., Пастух О.Р., Скрипник О.І., Коновал В.С. Комп'ютерне симулювання усталених режимів енергоблока електростанції з додатковим робочим трансформатором власних потреб // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2003. – № 487. – С. 81–88. 9. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. *Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов*. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.