

УДК 621.314.2

Г.М. Лисяк, О.Р. Пастух, В.С. Коновал  
Національний університет "Львівська політехніка"  
кафедра електричних мереж та систем

## УЗАГАЛЬНЕНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ

© Лисяк Г.М., Пастух О.Р., Коновал В.С., 2003

**Запропонована узагальнена схема заміщення двообмоткових трансформаторів з концентричними обмотками однакової висоти, яка придатна для розрахунку усталених режимів і струмів коротких замикань в електроенергетичних системах. Наведений приклад розрахунку параметрів елементів еквівалентного цієї схемі повного чотириполюсника.**

**Offered generalized substitution scheme of transformers with concentric windings of identical height, which suitable for computation of steady-state modes and currents short circuits in power systems. Directed elements parameters computation example of full of quadripole.**

### Постановка проблеми

Однією з основних задач досліджень під час проектування розвитку та управління функціонуванням електроенергетичних систем (ЕЕС) була, є та залишатиметься задача розрахунку усталених режимів. Залежно від мети досліджень, вимог щодо бажаної точності одержуваних результатів та стану й перспектив розвитку обчислювальних методів і засобів розроблялися та продовжують розроблятися спеціалізовані математичні моделі й схеми заміщення основних елементів та ЕЕС в цілому. Адекватність таких моделей визначається, передусім, обгрунтовано прийнятою множиною певних конкретних припущень, які дозволяють спрощувати загальні рівняння стану елементів ЕЕС та їх схем заміщення до зручного для комп'ютерного симулювання вигляду. Поряд з тим, в міру зростання можливостей комп'ютерного симулювання має місце тенденція до зменшення кількості припущень та розроблення все більш адекватних математичних моделей, які можуть застосовуватися для розв'язання все ширшого кола задач.

Наведене вище повною мірою стосується трансформаторів, які використовуються в ЕЕС та суттєво відрізняються між собою як за функційним призначенням і схемами з'єднання, так і за конструктивним виконанням: підвищувальні та знижувальні, силові та вимірні, одно- та багатофазні, одно- та багатострижневі, дво- та багатообмоткові тощо.

### Аналіз останніх досліджень

Розрахунок усталених режимів звичайно здійснюють шляхом розв'язування рівнянь стану, складених для схем заміщення у вигляді електричних кіл без або з ідеальними трансформаторами на основі методів балансу струмів (метод вузлових напруг) чи балансу потужностей у вузлах схеми. У [1] теоретично обгрунтовано, що структура і параметри елементів схем заміщення трансформаторів однозначно визначаються прийнятими схемами заміщення їх магнітних систем. Але одержані в [1] схеми заміщення трансформаторів безпосередньо придатні лише за умови приведення параметрів елементів і координат

режиму до одного ступеня напруги, що обмежує їх застосування, зокрема для схем з послідовним увімкненням однієї з обмоток трансформатора між двома довільними вузлами чи за необхідності враховування групи з'єднань обмоток трифазних трансформаторів, відмінної від нульової. У [2] показано, що для розрахунку усталених режимів автотрансформатори і трансформатори доцільно представляти схемами заміщення у вигляді багатополосників з трансформаторними зв'язками між вузлами. Але прийняті в [2] за основу Т-подібні схеми заміщення трансформаторів суперечать висновкам [1, 3] про помилковість використання понять індуктивностей розсіювання окремих обмоток. Окрім того, в [2] методологічно некоректним є одержання схеми заміщення трифазних тристрижневих трансформаторів для складових нульової послідовності лише зміною значення опору намагнічування того ж елемента, що й у схемі для складових прямої послідовності, оскільки шляхи замикання магнітних потоків для цих складових є різними [1, 4].

### Задача досліджень

Проведений аналіз вказує на доцільність і можливість створення узагальненої схеми заміщення двообмоткового трансформатора з концентричними обмотками однакової висоти, яка позбавлена означених вище недоліків і придатна для розрахунку усталених режимів, у тому числі й струмів коротких замикань, за довільних під'єднань обмоток трансформатора до інших елементів ЕЕС та групи з'єднань обмоток у випадку трифазного трансформатора.

### Виклад основного матеріалу

З урахуванням обґрунтованих в [1] припущень та схеми заміщення спрощеного двообмоткового трансформатора, показаної на рис. 3.9, а в [1], узагальнену схему заміщення двообмоткового трансформатора з дійсними напругами і струмами обмоток можна зобразити у вигляді, як на рис. 1.

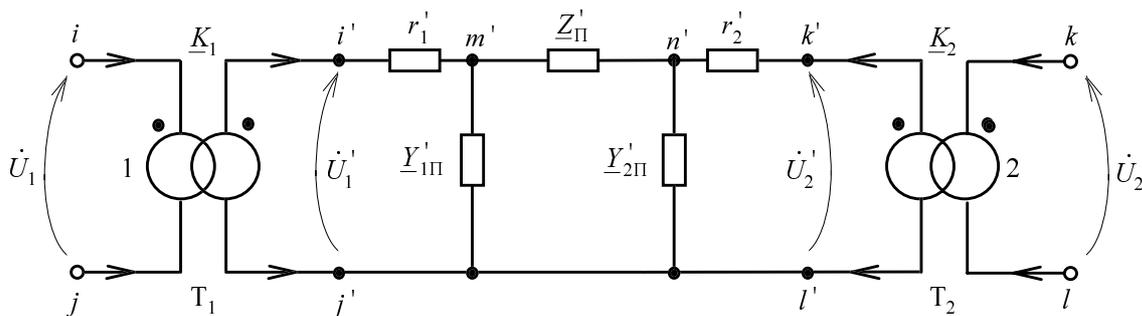
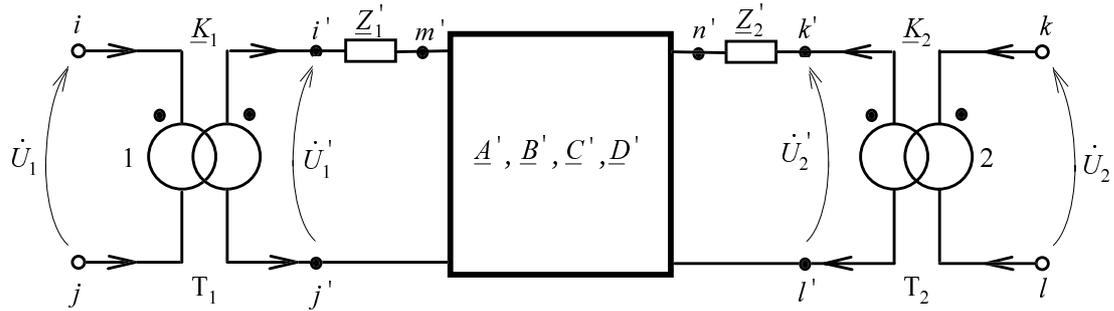


Рис. 1. Узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора з дійсними напругами і струмами обмоток

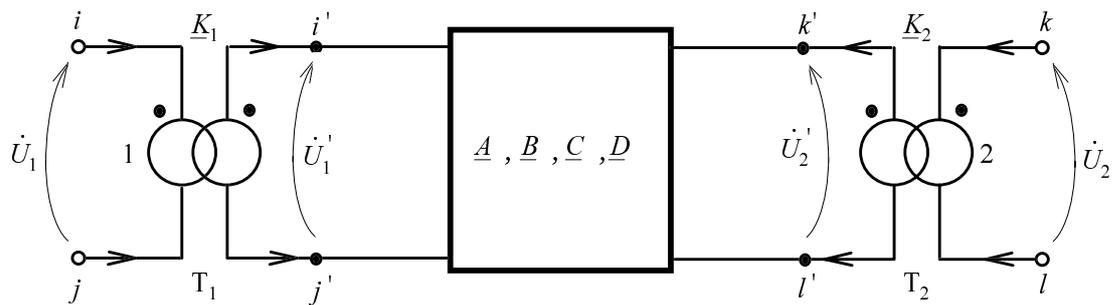
Схема на рис. 1 принципово придатна для розрахунку усталених режимів, у тому числі й струмів коротких замикань, як однофазних систем з однофазними трансформаторами, так і трифазних систем з трифазними тристрижневими трансформаторами чи трифазними групами з однофазних трансформаторів. При цьому параметри елементів цієї схеми (на рис. 1 позначені штрихом) можуть бути приведені до довільного базового значення напруги  $U_6$ . З урахуванням

цього на схемі рис. 1 прийняті такі позначення:  $i, j$  та  $k, l$  – виводи внутрішньої 1 (ближчої до стрижня) та зовнішньої 2 обмоток трансформатора відповідно (очевидно, що для однофазного двострижневого трансформатора з розміщенням обмотки 1 на одному стрижні, а обмотки 2 – на іншому поняття внутрішньої та зовнішньої обмоток тратить сенс);  $T_1, T_2$  – ідеальні трансформатори, які забезпечують приведення дійсних координат режиму обмоток 1, 2 трансформатора до базової напруги  $U_\phi$ ;  $i', j'$  та  $k', l'$  – виводи обмоток трансформаторів  $T_1$  та  $T_2$  з боку ступеня базової напруги  $U_\phi$  відповідно;  $m', n'$  – внутрішні вузли схеми заміщення трансформатора;  $\underline{K}_1 = K_1 \angle \xi_1, \underline{K}_2 = K_2 \angle \xi_2$  – в загальному випадку комплексні коефіцієнти трансформації трансформаторів  $T_1, T_2$ , де  $K_1, K_2, \xi_1, \xi_2$  – модулі та аргументи цих коефіцієнтів трансформації відповідно;  $r'_1, r'_2$  – резистанси обмоток 1, 2 відповідно;  $\underline{Z}'_{\Pi} = jx'_{\Pi}$ , де  $x'_{\Pi}$  – реактанс розсіювання пари обмоток 1, 2;  $\underline{Y}'_{1\Pi} = g'_{1\Pi} - jb'_{1\Pi}$  – комплексна провідність, яка відображає втрати активної потужності ( $g'_{1\Pi}$ ) та магнітний потік ( $b'_{1\Pi}$ ) у стрижні трансформатора, на якому розміщена обмотка 1;  – комплексна провідність, яка відображає втрати активної потужності ( $g'_{2\Pi}$ ) та магнітний потік ( $b'_{2\Pi}$ ) або в іншому стрижні, на якому розміщена обмотка 2 (для однофазних двострижневих трансформаторів), або в елементах за межами стрижня та обмоток трансформатора (для однофазних двострижневих трансформаторів без бокових ярів з розміщенням частин обмоток 1, 2 одночасно на обох стрижнях та для складових прямої і зворотної послідовностей трифазних тристрижневих трансформаторів приймають, що  $\underline{Y}'_{2\Pi} = 0$ );  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}'_1, \dot{U}'_2$  – дійсні та приведені до величини  $U_\phi$  напруги обмоток 1, 2 трансформатора відповідно. Тут і нижче наявність верхніх індексів означає: «'» – значення величин приведені до базової напруги  $U_\phi$ ; «(1)» чи «(2)» – значення величин приведені до номінальної напруги  $U_{1ном}$  обмотки 1 чи  $U_{2ном}$  обмотки 2. Відсутність верхніх індексів означає, що значення координат режиму є дійсними, а значення параметрів елементів схеми приведені до номінальних напруг відповідних обмоток, між виводами яких ці елементи увімкнені.

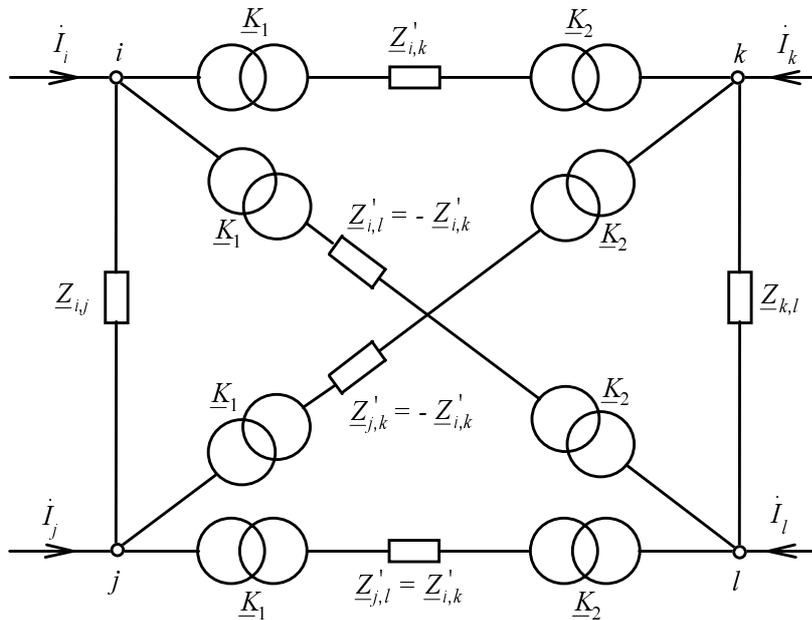
Як уже зазначалося, схема на рис. 1 принципово придатна для розрахунку усталених режимів, бо її стан може бути описаний рівняннями за методами балансу струмів чи потужностей для її вузлів  $i, \dots, l, m', n'$  з використанням відповідної матриці вузлових (власних і взаємних) провідностей. Але, по-перше, збереження внутрішніх вузлів  $m', n'$  призводить до збільшення порядку системи рівнянь стану та, по-друге, особливості структури цієї схеми ускладнюють процедуру автоматизації формування рівнянь стану системи в цілому. Саме тому схему на рис. 1 доцільно звести до еквівалентного їй повного чотиріполюсника відносно вузлів (виводів обмоток)  $i, j, k, l$  трансформатора. Таке зведення одним з можливих способів, а саме з використанням теорії прохідних чотиріполюсників (ПЧП), зображено на рис. 2 за наведеними нижче формулами.



а



б



в

Рис. 2. Зведення узагальненої схеми заміщення двообмоткового трансформатора до:

а – схеми з ПЧП відносно внутрішніх вузлів  $m'$ ,  $n'$ ;

б – схеми з ПЧП відносно виводів  $i'$ ,  $j'$ ,  $k'$ ,  $l'$  трансформаторів  $T_1$ ,  $T_2$ ;

в – схеми повного чотириполюсника відносно вузлів (виводів обмоток)

$i$ ,  $j$ ,  $k$ ,  $l$  з трансформаторними зв'язками між відповідними вузлами

Постійні ПЧП схеми на рис. 2, а обчислюють за параметрами елементів схеми на рис. 1 за відомими формулами [5]:

$$\underline{A}' = 1 + \underline{Z}'_{\text{п}} \underline{Y}'_{2\text{п}}; \underline{B}' = \underline{Z}'_{\text{п}}; \underline{C}' = \underline{Y}'_{1\text{п}} + \underline{Y}'_{2\text{п}} + \underline{Z}'_{\text{п}} \underline{Y}'_{1\text{п}} \underline{Y}'_{2\text{п}}; \underline{D}' = 1 + \underline{Z}'_{\text{п}} \underline{Y}'_{1\text{п}}. \quad (1)$$

Постійні ПЧП схеми на рис. 2, б обчислюють за значеннями постійних ПЧП (1) та опорів  $\underline{Z}'_1 = r'_1$  і  $\underline{Z}'_2 = r'_2$  схеми на рис. 2, а також за відомими формулами [5]:

$$\underline{A} = \underline{A}' + \underline{Z}'_1 \underline{C}'; \underline{B} = \underline{B}' + \underline{Z}'_1 \underline{D}' + \underline{Z}'_2 \underline{A}' + \underline{Z}'_1 \underline{Z}'_2 \underline{C}'; \underline{C} = \underline{C}'; \underline{D} = \underline{D}' + \underline{Z}'_2 \underline{C}'. \quad (2)$$

За відомих номінальних напруг  $U_{1\text{НОМ}}$ ,  $U_{2\text{НОМ}}$  обмоток 1, 2 трансформатора та базової напруги  $U_{\text{б}}$  для схем на рис. 1 та рис. 2 справедливі такі співвідношення:

$$\begin{aligned} K_1 &= U_{1\text{НОМ}}/U_{\text{б}}; K_2 = U_{2\text{НОМ}}/U_{\text{б}}; \\ \dot{U}'_1 &= \dot{U}_1/K_1; \dot{I}'_i = K_1^* \dot{I}_i; \dot{I}''_j = -\dot{I}'_j; \dot{I}_j = -\dot{I}_i; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{U}_2/K_2; \dot{I}'_k = K_2^* \dot{I}_k; \dot{I}'_l = -\dot{I}'_k; \dot{I}_l = -\dot{I}_k; \\ \dot{U}'_1 &= \dot{U}'_i - \dot{U}'_j; \dot{U}_1 = \dot{U}_i - \dot{U}_j; \dot{U}'_2 = \dot{U}'_k - \dot{U}'_l; \dot{U}_2 = \dot{U}_k - \dot{U}_l. \end{aligned} \quad (3)$$

Для прийнятих на схемах рис. 1, 2 додатних напрямів струмів і напруг  $Y$  - форма (обернена  $Z^{-1}$  форма) рівнянь стану ПЧП схеми на рис. 2, б має вигляд [5, 6]:

$$\dot{I}'_i = \underline{Y}'_{i,i} \dot{U}'_1 + \underline{Y}'_{i,k} \dot{U}'_2; \dot{I}'_k = \underline{Y}'_{k,i} \dot{U}'_1 + \underline{Y}'_{k,k} \dot{U}'_2, \quad (4)$$

де

$$\underline{Y}'_{i,i} = \underline{D}/\underline{B}; \underline{Y}'_{i,k} = \underline{Y}'_{k,i} = -1/\underline{B}; \underline{Y}'_{k,k} = \underline{A}/\underline{B}. \quad (5)$$

З урахуванням співвідношень (3) з (4) одержимо:

$$\begin{aligned} K_1^* \dot{I}_i &= \underline{Y}'_{i,i}/K_1 (\dot{U}_i - \dot{U}_j) + \underline{Y}'_{i,k}/K_2 (\dot{U}_k - \dot{U}_l); \\ K_2^* \dot{I}_k &= \underline{Y}'_{k,i}/K_1 (\dot{U}_i - \dot{U}_j) + \underline{Y}'_{k,k}/K_2 (\dot{U}_k - \dot{U}_l), \end{aligned} \quad (6)$$

або

$$\begin{aligned} \dot{I}_i &= \underline{Y}_{i,i} \dot{U}_i + \underline{Y}_{i,j} \dot{U}_j + \underline{Y}_{i,k} \dot{U}_k + \underline{Y}_{i,l} \dot{U}_l \quad \text{та} \quad \dot{I}_j = -\dot{I}_i; \\ \dot{I}_k &= \underline{Y}_{k,i} \dot{U}_i + \underline{Y}_{k,j} \dot{U}_j + \underline{Y}_{k,k} \dot{U}_k + \underline{Y}_{k,l} \dot{U}_l \quad \text{та} \quad \dot{I}_l = -\dot{I}_k, \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{i,i} &= \underline{Y}'_{i,i}/K_1^2; \underline{Y}_{i,j} = -\underline{Y}_{i,i}; \underline{Y}_{i,k} = \underline{Y}'_{i,k}/(K_1^* K_2); \underline{Y}_{i,l} = -\underline{Y}_{i,k}; \\ \underline{Y}_{k,i} &= \underline{Y}'_{k,i}/(K_1 K_2^*); \underline{Y}_{k,j} = -\underline{Y}_{k,i}; \underline{Y}_{k,k} = \underline{Y}'_{k,k}/K_2^2; \underline{Y}_{k,l} = -\underline{Y}_{k,k}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (7) у матричній формі відносно вузлів  $i, j, k, l$  з урахуванням (8) матиме вигляд:

$$\begin{array}{c} i \\ j \\ k \\ l \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & i & j & k & l \\ \hline & \underline{Y}_{i,i} & -\underline{Y}_{i,i} & \underline{Y}_{i,k} & -\underline{Y}_{i,k} \\ \hline & -\underline{Y}_{i,i} & \underline{Y}_{i,i} & -\underline{Y}_{i,k} & \underline{Y}_{i,k} \\ \hline & \underline{Y}_{k,i} & -\underline{Y}_{k,i} & \underline{Y}_{k,k} & -\underline{Y}_{k,k} \\ \hline & -\underline{Y}_{k,i} & \underline{Y}_{k,i} & -\underline{Y}_{k,k} & \underline{Y}_{k,k} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \dot{U}_i \\ \hline \dot{U}_j \\ \hline \dot{U}_k \\ \hline \dot{U}_l \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \dot{I}_i \\ \hline \dot{I}_j \\ \hline \dot{I}_k \\ \hline \dot{I}_l \\ \hline \end{array}. \quad (9)$$

Рівнянню (9) з урахуванням (8) відповідає узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора у вигляді повного чотириполюсника з трансформаторними зв'язками між відповідними вузлами, зображена на рис. 2, в.

Значення параметрів елементів схеми на рис. 2, в з урахуванням (1)–(3), (8) обчислюються за такими формулами:

$$\begin{aligned} \underline{K}_1 &= K_1 \angle \xi_1 = U_{1\text{ном}} / U_6 \angle \xi_1; \quad \underline{K}_2 = K_2 \angle \xi_2 = U_{2\text{ном}} / U_6 \angle \xi_2; \\ \underline{Z}_{i,j} &= r_{i,j} + jx_{i,j} = -1 / \underline{Y}_{i,j} = 1 / \underline{Y}_{i,i} = K_1^2 / \underline{Y}'_{i,i} = K_1^2 \underline{B} / \underline{D}; \\ \underline{Z}_{k,l} &= r_{k,l} + jx_{k,l} = -1 / \underline{Y}_{k,l} = 1 / \underline{Y}_{k,k} = K_2^2 / \underline{Y}'_{k,k} = K_2^2 \underline{B} / \underline{A}; \\ \underline{Z}'_{i,k} &= r'_{i,k} + jx'_{i,k} = -1 / \underline{Y}'_{i,k} = \underline{B}; \quad \underline{Z}'_{j,l} = r'_{j,l} + jx'_{j,l} = \underline{Z}'_{i,k}; \\ \underline{Z}'_{i,l} &= r'_{i,l} + jx'_{i,l} = -\underline{Z}'_{i,k}; \quad \underline{Z}'_{j,k} = r'_{j,k} + jx'_{j,k} = -\underline{Z}'_{i,k}. \end{aligned} \quad (10)$$

З (10) випливає, що параметри елементів  $\underline{Z}_{i,j}$ ,  $\underline{Z}_{k,l}$  приведені до напруг  $U_{1\text{ном}}$ ,  $U_{2\text{ном}}$  обмоток 1, 2 відповідно, а параметри інших елементів приведені до базової напруги  $U_6$ . Отже, одержані схема на рис. 2, в та формули (10) обчислення параметрів її елементів придатні для їх застосування під час розрахунку ustalених режимів, у тому числі й струмів коротких замикань, за довільного приєднання двообмоткового трансформатора своїми виводами  $i, j, k, l$  до інших вузлів схеми ЕЕС. При цьому існує така особливість застосування схеми на рис. 2, в у випадках з'єднання одного чи декількох (але не більше трьох) з виводів  $i, j, k, l$  з «землею» (загальною нульовою точкою) схеми ЕЕС. Прийmemo, наприклад, що вивід  $l$  обмотки 2 з'єднаний з «землею». Тоді схема на рис. 2, в зводиться до схеми на рис. 3 з провідностями елементів між вузлами (виводами)  $i, j, k$  та «землею» (вузол «0»). Тут ідеальні трансформатори, зображені на рис. 3 штриховими лініями, з коефіцієнтом трансформації  $\underline{K}_2 / \underline{K}_1$  можуть використовуватися лише для контрольного обчислення струму в «землі» з боку уземленого вузла  $l(0)$ , який повинен дорівнювати струму  $-\dot{I}_k$ .

Значення вказаних на рис. 3 провідностей елементів приведені до номінальних напруг з боку відповідних виводів обмоток 1, 2 та з урахуванням (10) обчислюються за такими формулами:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{i,l(0)} &= g_{i,l(0)} - jb_{i,l(0)} = 1 / (K_1^2 \underline{Z}'_{i,l}) = -1 / (K_1^2 \underline{B}); \\ \underline{Y}_{j,l(0)} &= g_{j,l(0)} - jb_{j,l(0)} = 1 / (K_1^2 \underline{Z}'_{j,l}) = 1 / (K_1^2 \underline{B}) = -\underline{Y}_{i,l(0)}; \\ \underline{Y}_{k,l(0)} &= g_{k,l(0)} - jb_{k,l(0)} = 1 / \underline{Z}_{k,l} = \underline{A} / (K_2^2 \underline{B}). \end{aligned} \quad (11)$$

Якщо ж з «землею» з'єднаний також вивід  $j$  обмотки 1, що відповідає традиційним схемам заміщення двообмоткових трансформаторів, то схема рис. 3 зводиться до однієї з П-подібних схем, зображених на рис. 4.

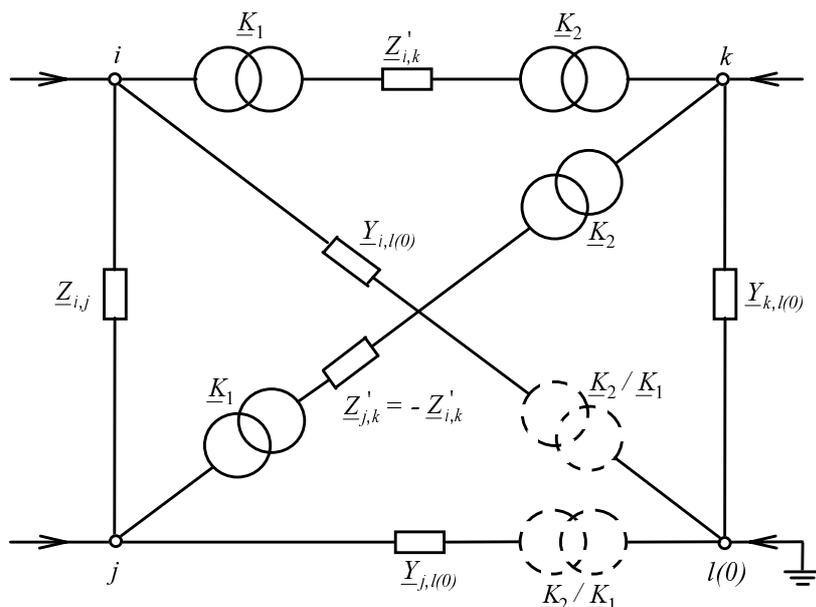


Рис. 3. Схема заміщення двообмоткового трансформатора при з'єднанні виводу  $l$  з «землею» (загальною нульовою точкою)

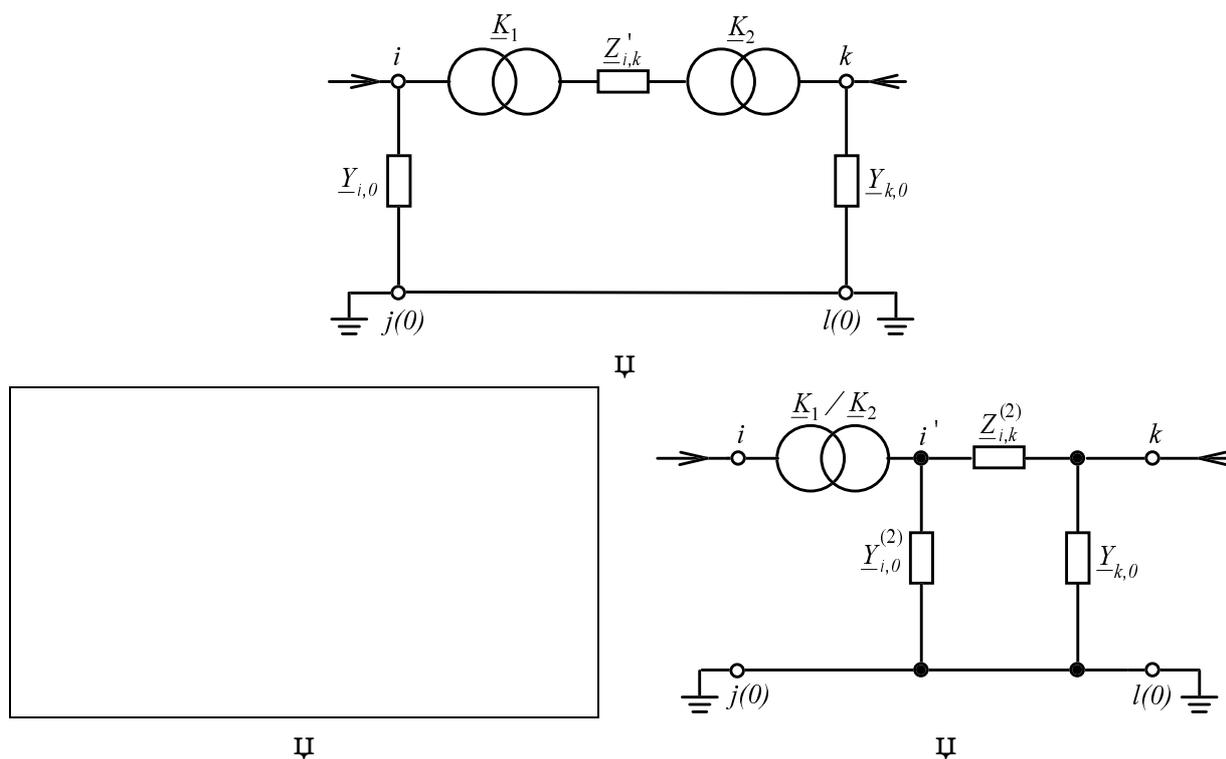


Рис. 4.  $\Pi$ -подібні схеми заміщення двообмоткового трансформатора при з'єднанні з «землею» виводів  $j$  та  $k$ :  $a$  – значення провідностей  $Y_{i,0}, Y_{k,0}$  приведені до номінальних напруг  $U_{1НОМ}, U_{2НОМ}$  обмоток 1, 2 відповідно, а опору  $Z'_{i,k}$  до базової напруги  $U_{\sigma}$ ;  $b$  – значення параметрів елементів, приведені до номінальної напруги  $U_{1НОМ}$ ;  $v$  – значення параметрів елементів, приведені до номінальної напруги  $U_{2НОМ}$

Значення параметрів елементів схем на рис. 4 з урахуванням рис. 3 та (10), (11) обчислюються за такими формулами:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{i,0} &= g_{i,0} - jb_{i,0} = 1/\underline{Z}_{i,j} + \underline{Y}_{i,l(0)} = (\underline{D}-1)/(K_1^2 \underline{B}); \\ \underline{Y}_{k,0} &= g_{k,0} - jb_{k,0} = 1/(K_2^2 \underline{Z}'_{j,k}) + \underline{Y}_{k,l(0)} = (\underline{A}-1)/(K_2^2 \underline{B}); \\ \underline{Y}_{k,0}^{(1)} &= K_2^2 / K_1^2 \underline{Y}_{k,0} = (\underline{A}-1)/(K_1^2 \underline{B}); \quad \underline{Z}_{i,k}^{(1)} = K_1^2 \underline{Z}'_{i,k} = K_1^2 \underline{B}; \\ \underline{Y}_{i,0}^{(2)} &= K_1^2 / K_2^2 \underline{Y}_{i,0} = (\underline{D}-1)/(K_2^2 \underline{B}); \quad \underline{Z}_{i,k}^{(2)} = K_2^2 \underline{Z}'_{i,k} = K_2^2 \underline{B}. \end{aligned} \quad (12)$$

Слід зазначити, що на практиці звичайно за базову напругу приймають номінальну напругу однієї з обмоток трансформатора, тобто  $U_{\bar{6}} = U_{1\text{НОМ}}$  або  $U_{\bar{6}} = U_{2\text{НОМ}}$ . Тому розрахунок параметрів елементів узагальненої схеми заміщення двообмоткового трансформатора на рис. 1, 2 та схеми на рис. 3 для випадку з'єднання виводу  $l$  обмотки 2 з «землею», що відповідає роботі трансформатора в режимі заданого струму [7], наведемо за умови  $U_{\bar{6}} = U_{2\text{НОМ}}$  на прикладі трифазного тристрижневого трансформатора з такими параметрами:  $S_{\text{НОМ}} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{2\text{НОМ}} = 6,3 \text{ кВ}$ ;  $u_{\text{к}} = 10\%$ ;  $\Delta P_{\text{к}} = 85 \text{ кВт}$ ;  $I_{\text{x}} = 0,7\%$ ;  $\Delta P_{\text{x}} = 17 \text{ кВт}$ ;  $I_{\text{x0}} = 100\%$ ;  $\Delta P_{\text{x0}} = 1000 \text{ кВт}$ ;  $K_1 = 0,183$ ;  $\xi_1 = 60^\circ$ , де  $I_{\text{x0}}$ ,  $\Delta P_{\text{x0}}$  – параметри для складових нульової послідовності (прийняті орієнтовно).

Враховуючи, що  $U_{\bar{6}} = U_{2\text{НОМ}}$ , маємо  $K_2 = 1$ ,  $\xi_2 = 0$  та:

$$\begin{aligned} Z'_T &\approx \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \frac{U_{2\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 2,480625 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}; \\ r'_T &\approx \frac{\Delta P_{\text{к}}}{1000} \cdot \frac{U_{2\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = 1,317832 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}; \\ x'_T &= \sqrt{(Z'_T)^2 - (r'_T)^2} = 2,477122 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}; \\ r'_1 = r'_2 &= 0,5r'_T = 6,589161 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}'_1 = r'_1 = 6,589161 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \\ \underline{Z}'_2 = r'_2 &= 6,589161 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}'_{\text{п}} = jx'_T = j2,477122 \cdot 10^{-1} \text{ Ом}; \\ Y'_{1\text{п}} &\approx \frac{I_{\text{x}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}^2} = 2,821869 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \\ g'_{1\text{п}} &\approx \frac{\Delta P_{\text{x}}}{1000 U_{2\text{НОМ}}^2} = 4,283194 \cdot 10^{-4} \text{ См}; \\ b'_{1\text{п}} &= \sqrt{(Y'_{1\text{п}})^2 - (g'_{1\text{п}})^2} = 2,789174 \cdot 10^{-3} \text{ См}; \\ Y'_{2\text{п}} &\approx \frac{I_{\text{x0}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}^2} = 4,031242 \cdot 10^{-1} \text{ См}; \\ g'_{2\text{п}} &\approx \frac{\Delta P_{\text{x0}}}{1000 U_{2\text{НОМ}}^2} = 2,519526 \cdot 10^{-2} \text{ См}; \quad b'_{2\text{п}} = \sqrt{(Y'_{2\text{п}})^2 - (g'_{2\text{п}})^2} = 4,0233606 \cdot 10^{-1} \text{ См}. \end{aligned}$$

Результати розрахунку значень параметрів елементів схем на рис. 2, в та 3 для  $U_{\bar{6}} = U_{2\text{ном}}$ ,  $\underline{K}_1 = 0,183 \angle 60^\circ$  та  $\underline{K}_2 = 1$  наведені у таблиці.

### Результати розрахунку

№ з/п	Параметр	Для складових прямої (зворотної) послідовності при $\underline{Y}'_{2\text{п}} = 0$	Для складових нульової послідовності при $\underline{Y}'_{2\text{п}} \neq 0$
1	$\underline{Z}_{i,j}$ , Ом	$4,419025 \cdot 10^{-4} + j8,289864 \cdot 10^{-3}$	$4,418645 \cdot 10^{-4} + j8,290448 \cdot 10^{-3}$
2	$\underline{Z}_{k,l}$ , Ом	$1,317830 \cdot 10^{-2} + j2,477123 \cdot 10^{-1}$	$1,331535 \cdot 10^{-2} + j2,252060 \cdot 10^{-1}$
3	$\underline{Z}'_{i,k}$ , Ом	$1,318289 \cdot 10^{-2} + j2,477128 \cdot 10^{-1}$	$1,384069 \cdot 10^{-2} + j2,477364 \cdot 10^{-1}$
4	$\underline{Z}'_{i,l}$ , Ом	$-1,318289 \cdot 10^{-2} - j2,477128 \cdot 10^{-1}$	$-1,384069 \cdot 10^{-2} - j2,477364 \cdot 10^{-1}$
5	$\underline{Z}'_{j,k}$ , Ом	$-1,318289 \cdot 10^{-2} - j2,477128 \cdot 10^{-1}$	
6	$\underline{Z}'_{j,l}$ , Ом	$1,318289 \cdot 10^{-2} + j2,477128 \cdot 10^{-1}$	$1,384069 \cdot 10^{-2} + j2,477364 \cdot 10^{-1}$
7	$\underline{Y}_{i,l(0)}$ , См	$-6,397103 + j120,2046$	$-6,713087 + j120,1585$
8	$\underline{Y}_{j,l(0)}$ , См	$6,397103 - j120,2046$	$6,713087 - j120,1585$
9	$\underline{Y}_{k,l(0)}$ , См	$2,141592 \cdot 10^{-1} - j4,025547$	$2,616238 \cdot 10^{-1} - j4,424911$

### Висновки

1. Запропонована узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора з обмотками однакової висоти, яка враховує основні особливості конструктивного виконання магнітних систем трансформаторів без приведення координат режиму обмоток до одного ступеня напруги.

2. Одержані з застосуванням теорії прохідних чотириполосників формули забезпечують методологічно коректне обчислення параметрів елементів зведеної до чотириполосника узагальненої схеми заміщення трифазних тристрижневих трансформаторів як для складових прямої (зворотної), так і для складових нульової послідовності.

3. Виявлені особливості та наведені схеми і формули обчислення параметрів їх елементів дозволяють враховувати характерні випадки з'єднання окремих виводів обмоток трансформатора з загальною нульовою точкою електроенергетичної системи.

4. Наведені формули та приклад розрахунку показують можливість автоматизації процесу формування математичних моделей електроенергетичних систем з розглянутими трансформаторами.

5. Створена узагальнена схема заміщення двообмоткового трансформатора з концентричними обмотками однакової висоти придатна для розрахунку ustalених режимів, у тому числі й

струмів коротких замикань, за довільних під'єднань обмоток трансформатора до інших елементів ЕЕС та груп з'єднання обмоток у випадку трифазних двообмоткових трансформаторів.

1. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М., 1974. – 192 с. 2. Беляков Ю.С. Схемы замещения автотрансформаторов с регулировочными трансформаторами // *Электричество*. – 1988. – № 5. – С. 26–33. 3. Пинцов А.М. Уравнения и схемы замещения трансформаторов с учетом тока намагничивания // *Электричество*. – 1976. – № 4. – С. 29–34. 4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М., 1979. – 152 с. 5. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учеб. пособие для вузов. – М., 1985. – 272 с. 6. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – 3-е вид., перероб. і доп. – Львів, 1989. – 464 с. 7. Лисяк Г.М., Малиновський А.А., Пастух О.Р. Методика вибору основних параметрів схеми підвищеної надійності блочних електростанцій з умови підтримання бажаного рівня напруги на шинах власних потреб під час зовнішніх трифазних коротких замикань // *Технічна електродинаміка*. – 200. – № 4. – С. 51–55.

УДК 631.3

**М.М. Лобур**

Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра систем автоматичного проектування

## **ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ САПР**

© Лобур М.М., 2003

**Описані кілька підходів до моделювання та симуляції мікроелектромеханічних структур, використовуючи сучасні САПР та мову VHDL-AMS**

**This paper present few approaches to modeling and simulation of microelectromechanical structures using CFDRC software and VHDL-AMS language**

Розвиток техніки за останні роки свідчить про виразну тенденцію появи продуктів, які є “інтелектуальними”, тобто вони мають вбудовані функції самонавчання та самокерування. Практична реалізація таких систем все частіше опирається на використання технології мікросистем. У цьому напрямку ми можемо зауважити дуже швидкий прогрес у технології виготовлення мініатюрних “інтелектуальних” компонент, реалізуючих конкретні функції, хоча вони надалі є дорогими у виготовленні. В результаті, поступово вибагливі вимоги користувачів можуть бути задоволені і розв’язання конструкторських проблем стає можливим. Тобто ринок є вже готовим для прийняття продуктів, створених на новаторських теоріях і концепціях в цій галузі.