

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЖКОТУШКОВИХ ЗАМИКАНЬ У ТРАНСФОРМАТОРАХ І ТРАНСФОРМАТОРНИХ АГРЕГАТАХ

© Лисяк Г.М., Маліновський А.А., Никонець Л.О., 2007

Запропоновано заступні схеми та метод для порівняльної оцінки рівнів струмів під час міжкатушкових замикань у трансформаторах і трансформаторних агрегатах. Наведені результати досліджень на прикладі трансформатора ТМ-6300/35.

Equivalent circuits and method for comparative analysis of current levels during short-circuits in inter induction windings of transformers and transformer units are proposed. The results of researches are presented on test example of transformers ТМ-6300/35.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Виткові (ВЗ) й міжкатушкові (МКЗ) замикання в обмотках належать до найважчих внутрішніх коротких замикань (к.з.) силових трансформаторів, під час яких виникають значні аварійні надструми, що призводить здебільшого до незворотного руйнування трансформаторів і необхідності їхньої заміни новими [1]. Для уникнення таких аварій в [2] запропоновано нові схемно-технічні вирішення у вигляді трансформаторних агрегатів з малим рівнем струмів під час ВЗ і МКЗ, у яких окремі послідовно з'єднані частини обмоток розміщені на різних, не зв'язаних між собою, магнітопроводах. В загальному випадку розрахунок струмів під час таких пошкоджень потребує складних математичних моделей та громіздких обчислень.

Задача досліджень. Розроблення математичних моделей та методу інженерної порівняльної оцінки рівня струмів під час міжкатушкових замикань в трансформаторах і трансформаторних агрегатах.

Виклад основного матеріалу. Згідно з [1] під час інженерних розрахунків ВЗ і МКЗ трифазний трансформатор можна розглядати як однофазний відносно пошкодженої фази. Там само зазначено, що рівень аварійних струмів у замкнених витках на один-два порядки перевищує номінальне значення струмів; аварійні струми в зовнішніх стосовно обмоток трансформатора мережах – на рівні номінальних значень струмів цих обмоток. Це дає змогу у першому наближенні під час розрахунків обмежитися розглядом лише первинної (живильної) обмотки та закороченої частини витків цієї самої чи однієї з інших обмоток багатообмоткового трансформатора без урахування навантаження останніх. Надалі таку закорочену частину витків будь-якої з обмоток розглядатимемо як виокремлену вторинну обмотку трансформатора.

З урахуванням наведеного узагальнену електричну схему трансформатора можна зобразити, як показано на рис. 1, а. Можливі два принципово різні варіанти розрахунку: варіант 1 – ВЗ чи МКЗ в первинній обмотці; варіант 2 – ВЗ чи МКЗ у вторинній обмотці. Для обох варіантів розрахунки можна виконувати за Г-подібною зведеною заступною схемою, показаною на рис. 1, б, а за умови нехтування активними опорами – за спрощеною зведеною заступною схемою на рис. 1, в. Якщо за базову кількість витків w_0 приймати кількість незакорочених витків (варіант 1) чи фактичну кількість витків (варіант 2) первинної обмотки, то координати режиму первинної обмотки будуть

дійсними, а вторинної обмотки – зведеними. Для схем рис. 1 й надалі прийняті такі позначення і співвідношення:

$w_{\text{НОМ}} = w_{\text{ННОМ}} \vee w_{\text{ВНОМ}}$ – номінальна кількість витків обмоток нижчої (Н) та вищої (В) напруг;

$w = w_{\text{Н}} \vee w_{\text{В}}$ – фактична кількість витків обмотки за наявності ПБЗ чи РПН;

$w_{\alpha} = w_{\alpha\text{Н}} \vee w_{\alpha\text{В}}$; $w_{\beta} = w_{\beta\text{Н}} \vee w_{\beta\text{В}}$; $w_{\gamma} = w_{\gamma\text{Н}} \vee w_{\gamma\text{В}}$; $w_{\alpha} + w_{\beta} + w_{\gamma} = w$ – кількість закорочених (w_{α}) і незакорочених (w_{β}, w_{γ}) витків обмоток;

$\alpha = \alpha_{\text{Н}} \vee \alpha_{\text{В}} = w_{\alpha}/w$; $\beta = \beta_{\text{Н}} \vee \beta_{\text{В}} = w_{\beta}/w$; $\gamma = \gamma_{\text{Н}} \vee \gamma_{\text{В}} = w_{\gamma}/w$; $\alpha + \beta + \gamma = 1$ – відносні значення кількості закорочених (α) і незакорочених (β, γ) витків обмоток;

$$w_{\delta} = \begin{cases} (\beta + \gamma) \cdot w = (1 - \alpha) \cdot w & \text{для варіанта 1;} \\ w & \text{для варіанта 2;} \end{cases}$$

$U_{\text{НОМ.}\phi} = U_{\text{ННОМ.}\phi} \vee U_{\text{ВНОМ.}\phi}$, $I_{\text{НОМ}} = I_{\text{ННОМ.}\phi} \vee I_{\text{ВНОМ.}\phi} = S_{\text{НОМ}} / (3 \cdot U_{\text{НОМ.}\phi})$ – номінальні фазні напруги і струми та потужність обмоток;

$\dot{U}_{\phi} = \dot{U}_{\text{Н}\phi} \vee \dot{U}_{\text{В}\phi}$ – фактичне значення фазної напруги, прикладеної до первинної обмотки;

$\dot{I} = \dot{I}_{\text{Н}} \vee \dot{I}_{\text{В}}$, $\dot{I}_{\alpha} = \dot{I}_{\alpha\text{Н}} \vee \dot{I}_{\alpha\text{В}}$, $\dot{I}_{\text{К}} = \dot{I}_{\text{КН}} \vee \dot{I}_{\text{КВ}}$ – дійсні значення струмів первинної обмотки, вторинної обмотки (у закороченій частині витків) та у гілці, що утворила замикання частини витків;

$\dot{I}'_{\alpha} = \dot{I}'_{\alpha\text{Н}} \vee \dot{I}'_{\alpha\text{В}}$, $\dot{I}'_{\mu} = \dot{I}'_{\mu\text{Н}} \vee \dot{I}'_{\mu\text{В}}$ – струми у закороченій частині витків та у гілці намагнічування, зведені до базової кількості витків w_{δ} ;

$\underline{Z}' = r' + jx'$, $\underline{Y}'_{\mu} = g'_{\mu} + jb'_{\mu}$ – повні опір та провідність відповідних гілок заступної схеми трансформатора, зведені до базової кількості витків w_{δ} .

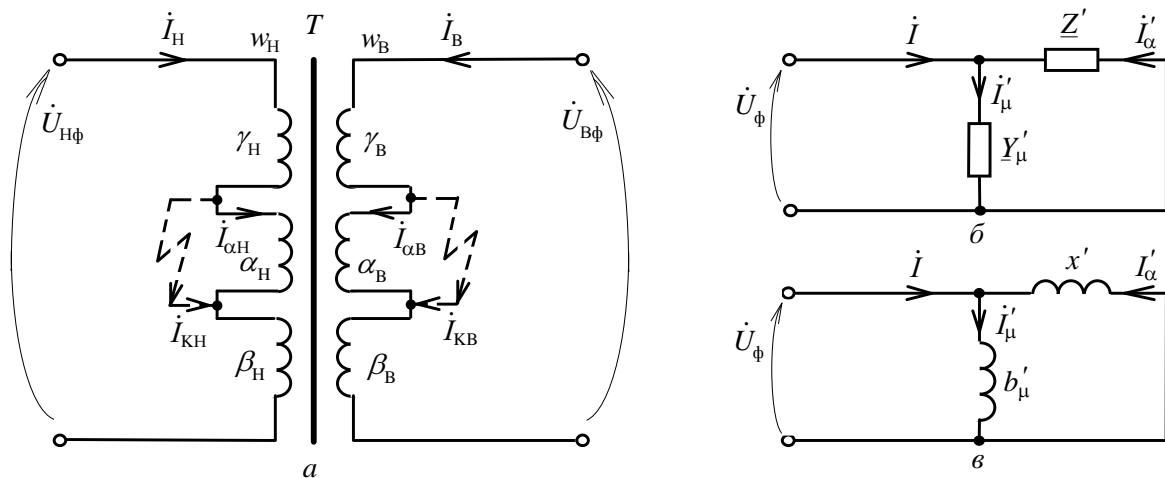


Рис. 1. Узагальнені схеми трансформатора для розрахунку струмів під час виткових і міжкатушкових замикань:
а – електрична; б – зведена заступна; в – спрощена зведена заступна

За припущення, що внутрішній опір джерела живлення первинної обмотки дорівнює нулю, значення вхідного опору $\underline{Z}'_{\text{T}}$ трансформатора і струмів обчислюємо за формулами:

$$\underline{Z}'_{\text{T}} = \underline{Z}'_{\mu} // \underline{Z}' \quad \text{для} \quad \underline{Z}'_{\mu} = 1/\underline{Y}'_{\mu}; \quad \dot{I} = \dot{U}_{\phi} / \underline{Z}'_{\text{T}}; \quad \dot{I}'_{\mu} = \underline{Y}'_{\mu} \cdot \dot{U}_{\phi}; \quad \dot{I}'_{\alpha} = -\dot{U}_{\phi} / \underline{Z}' = \dot{I}'_{\mu} - \dot{I};$$

$$\dot{I}_{\alpha} = \frac{w_{\delta}}{w_{\alpha}} \cdot \dot{I}'_{\alpha} = K_{\delta\alpha} \dot{I}'_{\alpha} \quad \text{для} \quad K_{\delta\alpha} = \frac{w_{\delta}}{w_{\alpha}}; \quad \dot{I}_{\text{К}} = \begin{cases} \dot{I} - \dot{I}'_{\alpha} & \text{для варіанта 1;} \\ -\dot{I}'_{\alpha} & \text{для варіанта 2.} \end{cases} \quad (1)$$

За умови нехтування активними опорами гілок схеми рис. 1, б, тобто для схеми рис. 1, в, вирази (1) спрощуються:

$$x'_T = x'_\mu // x' \quad \text{для } x'_\mu = 1/b'_\mu; \quad I = U_\Phi / x'_T; \quad I'_\mu = b'_\mu \cdot U_\Phi; \quad I'_\alpha = -U_\Phi / x' = I'_\mu - I; \quad (2)$$

$$I_\alpha = K_{\beta\alpha} \cdot I'_\alpha \quad \text{для } K_{\beta\alpha} = w_\beta / w_\alpha; \quad I_K = \begin{cases} I - I_\alpha & \text{для варіанта 1;} \\ -I_\alpha & \text{для варіанта 2.} \end{cases}$$

Отже, наближену оцінку рівня струмів під час ВЗ та МКЗ в обмотках трансформаторів можна здійснювати за (2), які відповідають спрощеній заступній схемі рис. 1, в. Для цього достатньо обчислити параметри b'_μ і x' , зведені до базової кількості витків w_β .

У загальному випадку значення активної g'_μ і реактивної b'_μ провідностей та активного опору r' обчислюємо за номінальними паспортними даними трансформаторів у такій послідовності:

$$g_{\mu\text{НОМ}} = \frac{\Delta P_{X\text{НОМ}}}{3 \cdot U_{\text{НОМ.Ф}}^2}; \quad b_{\mu\text{НОМ}} = \frac{I_{X\text{НОМ}} \cdot S_{\text{НОМ}}}{100 \cdot 3 \cdot U_{\text{НОМ.Ф}}^2}; \quad r_{\text{НОМ}} = \frac{\Delta P_{K\text{НОМ}} \cdot 3 \cdot U_{\text{НОМ.Ф}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2};$$

$$g'_\mu = g_{\mu\text{НОМ}} / K_\beta^2; \quad b'_\mu = b_{\mu\text{НОМ}} / K_\beta^2; \quad K_\beta = w_\beta / w_{\text{НОМ}}; \quad (3)$$

$$r' \approx \frac{r_{\text{НОМ}}}{2} \cdot \begin{cases} \omega_\beta / \omega_{\text{НОМ}} & \text{для варіанта 1;} \\ (1 + K_{\text{НОМ}} \cdot K_{\beta\alpha}) \cdot K_\beta & \text{для варіанта 2;} \end{cases}$$

$$(w, w_{\text{НОМ}}, K_{\text{НОМ}}) = \begin{cases} (w_H, w_{H\text{НОМ}}, K_{VH\text{НОМ}}), & \text{якщо первинною є обмотка Н;} \\ (w_B, w_{B\text{НОМ}}, K_{HB\text{НОМ}}), & \text{якщо первинною є обмотка В,} \end{cases}$$

де $g_{\mu\text{НОМ}}$, $b_{\mu\text{НОМ}}$, $r_{\text{НОМ}}$ – активна та індуктивна провідності та активний опір, обчислені за номінальними параметрами трансформатора; $U_{\text{НОМ.Ф}}$ – номінальна фазова напруга первинної обмотки; $\Delta P_{X\text{НОМ}}$, $I_{X\text{НОМ}}$, $\Delta P_{K\text{НОМ}}$ – втрати активної потужності й струм [%] під час досліду неробочого ходу та втрати активної потужності під час досліду короткого замикання; K_β – коефіцієнт зведення номінальних значень параметрів до базової кількості витків w_β .

Згідно з [3] індуктивність розсіювання пари циліндричних обмоток, розміщених на одному стрижні, можна у першому наближенні визначити, нехтуючи кривиною обмоток і впливом близькості феромагнітного осердя. Тоді уявно випрямлені обмотки за умови однакових за значенням і протилежних за напрямом їхніх струмів можна розглядати як двопровідну лінію з шин прямокутного перерізу. Довжина такої лінії визначається за розрахунковим діаметром D за формулою:

$$l = \pi \cdot D \quad \text{для } D = \begin{cases} D_{\text{Нсер}} \vee D_{\text{Всер}} & \text{для варіанта 1;} \\ D_{\text{Ксер}} & \text{для варіанта 2,} \end{cases} \quad (4)$$

де $D_{\text{Нсер}}$, $D_{\text{Всер}}$, $D_{\text{Ксер}}$ – середні діаметри обмоток Н і В та каналу (К) між ними.

Індуктивний опір розсіювання x' пари довільних обмоток А і С, приведений до базової кількості витків w_β , визначається з урахуванням [3] за формулою:

$$x' = \omega \cdot L = \omega \cdot w_\beta^2 L_B = \omega \cdot w_\beta^2 \cdot \pi \cdot D \cdot L_0 = \omega \cdot w_\beta^2 \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{g_{AC}^2}{g_A \cdot g_C} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot D \cdot w_\beta^2 \cdot G, \quad (5)$$

де ω – кутова частота, с^{-1} ; L , L_B , L_0 – індуктивності розсіювання пари обмоток А і С, зведені до базової кількості витків w_β , одновиткових довжиною l (4) та одновиткових на одиницю довжини відповідно; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; g_A , g_C , g_{AC} – середні геометричні відстані

(с.г.в.) фігур A і C (перерізи відповідних обмоток) самих від себе та однієї від іншої відповідно;
 $G = \ln\left(g_{AC}^2 / (g_A \cdot g_C)\right)$.

З викладеного випливає, що під час розрахунку струмів ВЗ і МКЗ найскладнішим є обчислення величини G . Нижче наведено спосіб обчислення величини G для трансформаторів з циліндричними обмотками однакової висоти на основі застосування теореми про чотири прямокутники [3], що дало змогу одержати узагальнені вирази. Ця теорема дає змогу визначити с.г.в. площ фігур A і C однієї від іншої через с.г.в. площ відповідних фігур самих від себе на підставі аналітичних співвідношень між с.г.в. площ цих фігур та певними розрахунковими величинами F , а саме:

$$F(A) = S_A^2 \cdot \ln g_A; \quad F(C) = S_C^2 \cdot \ln g_C; \quad F(A \times C) = S_A \cdot S_C \cdot \ln g_{AC}; \quad F(C \times A) = F(A \times C), \quad (6)$$

де S_A, S_C – площі фігур (перерізів обмоток) A і C відповідно.

З високим ступенем точності с.г.в. площі прямокутника зі сторонами a, h самої від себе та логарифм цієї відстані можна обчислювати за формулами [3]:

$$g = k \cdot (a + h); \quad \ln g = \ln(a + h) + \ln k, \quad (7)$$

де $k \approx 0,2236$ – коефіцієнт, значення якого можна прийняти незмінним.

Тоді вираз для обчислення величини G в (5) з урахуванням (6) і (7) набуває вигляду:

$$G = \ln \frac{g_{AC}^2}{g_A \cdot g_C} = 2 \cdot \ln g_{AC} - \ln g_A - \ln g_C = \frac{2 \cdot F(A \times C)}{S_A \cdot S_C} - \ln g_A - \ln g_C. \quad (8)$$

Треба зазначити, що за умови $k = const$ в (7) складові $\ln k$ в кінцевому виразі (8) будуть відсутні. Тому під час користування формулами (7) немає потреби враховувати складову $\ln k$. Отже, задача зводиться до одержання виразів для обчислення величини $F(A \times C)$ для конкретного розміщення двох фігур A і C .

Розміщення фігур, які відображають перерізи обмоток для варіанта 1, наведені на рис. 2, а, а для варіанта 2 – на рис. 2, б.

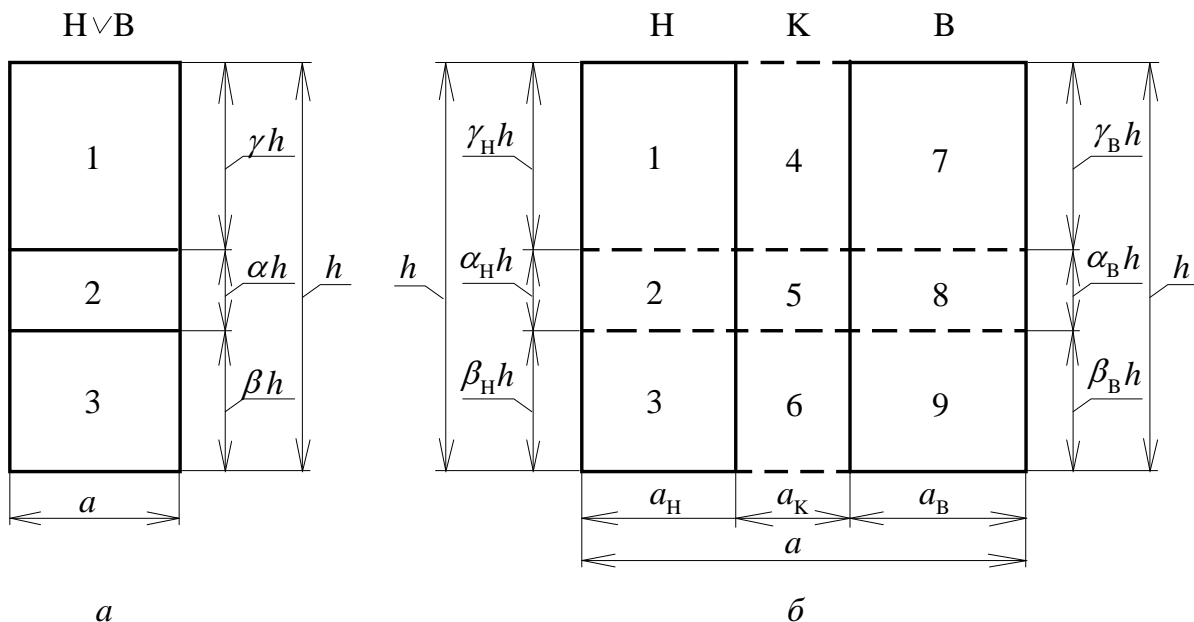


Рис. 2. Розміщення фігур, які відображають перерізи обмоток:
 а – для варіанта 1; б – для варіанта 2

Для варіанта 1 (рис. 2, а) фігура A складається з фігур 1 і 3 та відповідає незакороченій частині витків первинної обмотки ($H \vee B$), а фігура C складається лише з фігури 2 та відповідає закороченій частині витків первинної обмотки ($H \vee B$). Тоді згідно з [3] можемо записати:

$$F(A \times C) = F(1, 3 \times 2) = \frac{1}{2} \cdot [F(1, 2) + F(2, 3) - F(1) - 2 \cdot F(2) - F(3)]; \quad (9)$$

$$F(A) = F(1, 3) = F(1, 2, 3) - F(1, 2) - F(2, 3) + F(1) + F(2) + F(3); \quad F(C) = F(2).$$

Після перетворень (8) з урахуванням (7), (9) та позначень на рис. 2, а одержимо кінцевий вираз для обчислення величини G в (5) для варіанта 1:

$$G = \frac{1}{\alpha \cdot (1 - \alpha)^2} \left\{ (1 - \beta)^2 \cdot \ln[a + (1 - \beta) \cdot h] + (1 - \gamma)^2 \cdot \ln[a + (1 - \gamma) \cdot h] - \alpha \cdot [\ln(a + h) + \ln(a + \alpha \cdot h)] - \beta^2 \cdot \ln(a + \beta \cdot h) - \gamma^2 \cdot \ln(a + \gamma \cdot h) \right\}; \quad (10)$$

де

$$a = a_H \vee a_B; \quad 0 < \alpha < 1; \quad 0 \leq \beta < 1; \quad 0 \leq \gamma < 1. \quad (11)$$

Для варіанта 2 (рис. 2, б) фігура $A = A_H \vee A_B$ складається з фігур 1, 2, 3 \vee 7, 8, 9 та відповідає первинній обмотці ($H \vee B$), а фігура $C = C_B \vee C_H$ складається з фігури 8 \vee 2 та відповідає закороченій частині витків обмотки $B \vee H$ відповідно. Згідно з [3] можемо записати:

$$F(A_H \times C_B) = F(1, 2, 3 \times 8); \quad F(A_B \times C_H) = F(7, 8, 9 \times 2);$$

$$F(A \times C) = F(A_H \times C_B) \vee F(A_B \times C_H) = \frac{1}{4} \cdot [F(1, 2, 4, 5, 7, 8) + F(12, 3, 5, 6, 8, 9) + F(4, 5) + F(5, 6) + F(1, 4) + F(4, 7) + F(3, 6) + F(6, 9) - F(1, 2, 4, 5) - F(2, 3, 5, 6) - F(4, 5, 7, 8) - F(5, 6, 8, 9) - F(1, 4, 7) - F(3, 6, 9) - F(4) - F(6)]; \quad (12)$$

$$F(A) = F(A_H) \vee F(A_B) = F(1, 2, 3) \vee F(7, 8, 9); \quad F(C) = F(C_B) \vee F(C_H) = F(8) \vee F(2).$$

Після перетворень (8) з урахуванням (7), (12) та позначень на рис. 2, б одержимо кінцевий вираз для обчислення величини G в (5) та її складових для варіанта 2:

$$G = \frac{G_1 + G_2 - G_3 - G_4}{2 \cdot a_H \cdot a_B \cdot \alpha} - \ln[a_H + (1 \vee \alpha_H) \cdot h] - \ln[a_B + (\alpha_B \vee 1) \cdot h];$$

$$G_1 = (1 - \beta)^2 \cdot \left\{ a^2 \cdot \ln[a + (1 - \beta) \cdot h] + a_K^2 \cdot \ln[a_K + (1 - \beta) \cdot h] - a_{HK}^2 \cdot \ln[a_{HK} + (1 - \beta) \cdot h] - a_{BK}^2 \cdot \ln[a_{BK} + (1 - \beta) \cdot h] \right\};$$

$$G_2 = (1 - \gamma)^2 \cdot \left\{ a^2 \cdot \ln[a + (1 - \gamma) \cdot h] + a_K^2 \cdot \ln[a_K + (1 - \gamma) \cdot h] - a_{HK}^2 \cdot \ln[a_{HK} + (1 - \gamma) \cdot h] - a_{BK}^2 \cdot \ln[a_{BK} + (1 - \gamma) \cdot h] \right\}; \quad (13)$$

$$G_3 = \beta^2 \cdot \left[a^2 \cdot \ln(a + \beta \cdot h) + a_K^2 \cdot \ln(a_K + \beta \cdot h) - a_{HK}^2 \cdot \ln(a_{HK} + \beta \cdot h) - a_{BK}^2 \cdot \ln(a_{BK} + \beta \cdot h) \right];$$

$$G_4 = \gamma^2 \cdot \left[a^2 \cdot \ln(a + \gamma \cdot h) + a_K^2 \cdot \ln(a_K + \gamma \cdot h) - a_{HK}^2 \cdot \ln(a_{HK} + \gamma \cdot h) - a_{BK}^2 \cdot \ln(a_{BK} + \gamma \cdot h) \right];$$

де

$$a = a_H + a_K + a_B; \quad a_{HK} = a_H + a_K; \quad a_{BK} = a_B + a_K; \quad (14)$$

$$0 < \alpha \leq 1; \quad 0 \leq \beta < 1; \quad 0 \leq \gamma < 1.$$

Тут треба зазначити, що варіант 2 з $\alpha = 1$ та $\beta = 0$ і $\gamma = 0$ відповідає традиційному короткому замиканню на виводах вторинної обмотки трансформатора. Отже, одержані вирази (10), (11) та (13), (14) дають змогу за геометричними розмірами обмоток обчислювати величину G і за (6) індуктивний опір розсіювання x пари обмоток (первинної та частини закорочених витків – вторинної) для довільної кількості закорочених витків та для довільного їхнього розташування за

умови, що переріз цієї закороченої частини витків утворює прямокутник, якому відповідає фігура $2\sqrt{8}$ на рис. 2.

Оцінювати рівень струмів під час ВЗ і МКЗ зручно за результатами розрахунку, зведеними до відносних номінальних одиниць стосовно номінальних струмів відповідних обмоток. Тоді на основі (2) з урахуванням (3), (5), (10), (11), (13), (14) одержимо робочі формули для розрахунку та оцінки рівня струмів під час ВЗ і МКЗ за схемою рис. 2, в, у зручному для інженерних розрахунків вигляді:

$$\begin{aligned}
 U_* &= U_\phi / U_{\text{ном.}\phi} = U / U_{\text{ном}}; & K_\delta &= w_\delta / w_{\text{ном}}; & K_{\delta\alpha} &= w_\delta / w_\alpha; \\
 x'_{\mu*} &= K_\mu \cdot K_\delta^2, & \text{де } K_\mu &= 100 / I_{X\text{ном}}; \\
 x'_* &= K_x \cdot K_\delta^2 \cdot G, & \text{де } K_x &= \frac{S_{\text{ном}} \cdot w_{\text{ном}}^2 \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot D}{6 \cdot U_{\text{ном.}\phi}^2}; \\
 x'_{T*} &= x'_{\mu*} \cdot x'_* / (x'_{\mu*} + x'_*); \\
 I_* &= U_* / x'_{T*}; & I'_{\mu*} &= x'_* / (x'_{\mu*} + x'_*) \cdot I_*; & I'_{\alpha*} &= I'_{\mu*} - I_*; \\
 (I_{\alpha*}, I_{K*}) &= \begin{cases} (K_{\delta\alpha} \cdot I'_{\alpha*}, I_* - I_{\alpha*}) - \text{для варіанта 1;} \\ (K_{\text{ном}} \cdot K_{\delta\alpha} \cdot I'_{\alpha*}, -I_{\alpha*}) - \text{для варіанта 2,} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{15}$$

де

$$K_{\text{ном}} = \begin{cases} K_{\text{ВНном}}, & \text{якщо первинною є обмотка Н;} \\ K_{\text{НВном}}, & \text{якщо первинною є обмотка В.} \end{cases} \tag{16}$$

Для зменшення рівня струмів під час ВЗ і МКЗ замикань в [2] запропоновано використовувати трансформаторний агрегат з двох однакових трансформаторів T_1 і T_2 , принципова електрична схема якого з урахуванням викладеного наведена на рис. 3, а, зведена заступна схема – на рис. 3, б, а спрощена зведена заступна схема – на рис. 3, в. На рис. 3 штриховими лініями зображені ємнісні елементи, приєднання яких, як буде показано нижче, дає змогу додатково зменшити рівень струмів під час ВЗ і МКЗ у трансформаторному агрегаті.

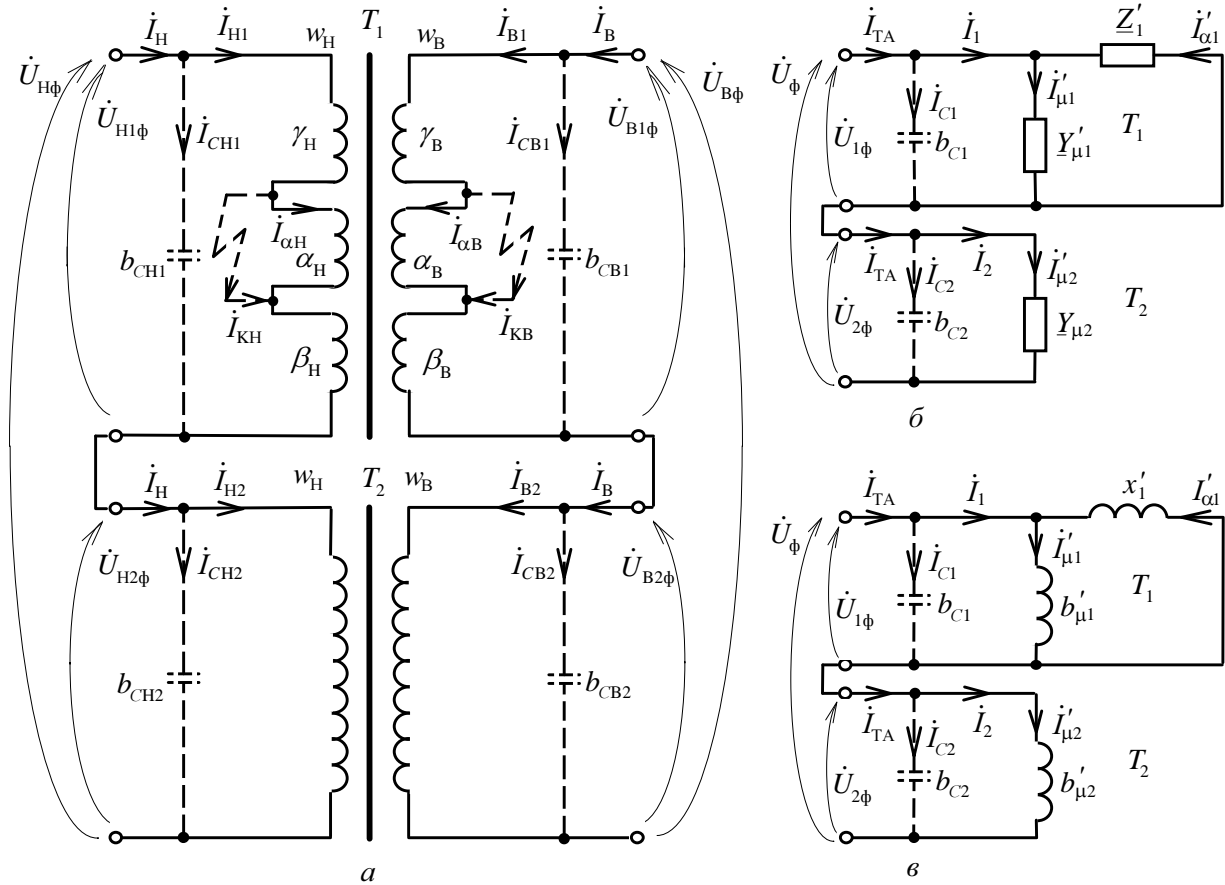


Рис. 3. Схеми трансформаторного агрегату для розрахунку струмів під час виткових і міжкатушкових замикань:
 а – електрична; б – зведена заступна; в – спрощена зведена заступна

Як видно з рис. 3, трансформаторний агрегат складається з двох однакових трансформаторів T_1 і T_2 , обмотки яких з'єднані відповідно послідовно. Розглядатимемо виникнення ВЗ чи МКЗ в одній з обмоток, наприклад, трансформатора T_1 .

За відсутності ємнісних елементів розрахунок для заступної схеми на рис. 3, б можна вести за (1), замінивши в них вхідний опір \underline{Z}'_T трансформатора на вхідний опір \underline{Z}'_{TA} трансформаторного агрегату

$$\underline{Z}'_{TA} = \underline{Z}'_T + \underline{Z}'_{\mu 2}, \quad (17)$$

а для спрощеної схеми на рис. 3, в – за формулами (16), замінивши x'_{T*} на x'_{TA*} :

$$x'_{TA*} = x'_T + x'_{\mu 2*}; \quad x'_{\mu 2*} = \left(\frac{w_{\Pi}}{w_{\Pi ном}} \right)^2 \cdot x_{\mu ном*}, \quad (18)$$

де w_{Π} , $w_{\Pi ном}$ – фактична і номінальна кількість витків первинної обмотки трансформатора T_2 .

Для схеми рис. 3, в без ємнісних елементів справедливі співвідношення:

$$I_{TA*} = I_{1*} = I_{2*} = I'_{\mu 2}; \quad I'_{\alpha*} = I'_{\mu 1*} - I_{1*} = I'_{\mu 1*} - I'_{\mu 2*}. \quad (19)$$

Отже, на відміну від трансформаторів, для яких рівень струмів під час ВЗ і МКЗ визначається величиною індуктивного опору розсіювання пари обмоток та кількістю закорочених витків, у трансформаторних агрегатах рівень струмів під час ВЗ і МКЗ визначається різницею струмів намагнічування трансформаторів T_1 і T_2 та кількістю закорочених витків.

Наведене вище дає змогу обґрунтувати можливість простої оцінки у першому наближенні зменшення рівня струмів у трансформаторних агрегатах порівняно з трансформаторами. Для трансформаторів потужністю 1000 кВ·А і більше струм неробочого ходу становить $I_{\text{ХНОМ}} \approx (2 \div 0,2)\%$, тобто $x_{\text{мНОМ}*} \approx 100/I_{\text{ХНОМ}} = 50 \div 500$. Попередні дослідження дали змогу оцінити діапазон зміни індуктивного опору розсіювання x'_* (x'_{1*} – для схеми рис. 3, в), а саме: $x'_* \approx 1,5 \div 0,4$ при $0 < \alpha < 0,3$. Тому для схеми рис. 1, в маємо $x'_{\mu 2*} \gg x'_*$, а для схеми рис. 3, в – $x'_{\mu 1*} \gg x'_{1*}$ та $x'_{\mu 2*} \gg x'_{1*}$. Тоді можемо прийняти, що для схеми рис. 1, в $x'_{T*} \approx x'_*$, а для схеми рис. 3, в $x'_{TA*} \approx x'_{\mu 2*} \approx x_{\text{мНОМ}*}$. За цих спрощень з (15) і (18) одержуємо вираз для обчислення коефіцієнта $K_{TA,T}$ зменшення рівня струмів у трансформаторних агрегатах щодо трансформаторів:

$$K_{TA,T} = \frac{I_{\alpha*(T)}}{I_{\alpha*(TA)}} = \frac{I_{K*(T)}}{I_{K*(TA)}} = \frac{x_{\text{мНОМ}*}}{x'_*} \approx \frac{50 \div 500}{1,5 \div 0,4} \approx 33 \div 1250, \quad (20)$$

тобто рівень струмів під час виткових і міжкатушкових замикань в трансформаторних агрегатах у десятки і сотні разів менший порівняно з трансформаторами.

Паралельне під'єднання до обмоток трансформаторного агрегату ємнісних елементів, як показано на рис. 3, дає змогу додатково зменшити рівень струмів. Це наочно ілюструється спрощеною схемою на рис. 3, в: за умови $b_{C2} = b'_{\mu 2}$ матимемо $U_{2\phi} = U_{\phi}$, $U_{1\phi} = 0$ й дорівнюватимуть нулю струми $I_{TA}, I_1, I_{\mu 1}, I_{\alpha 1}$ у гілках схеми трансформатора T_1 . Отже, для реального трансформатора рівень струму у замкнених витках і у гілці, яка утворила таке замикання, визначатиметься за схемою рис. 3, б лише активною складовою струму гілки намагнічування непошкодженого трансформатора T_2 , і з урахуванням співвідношення між активною й реактивною складовими цього струму буде ще у 5 і більше разів меншим, ніж обчислений за (15) з урахуванням (18).

Тестові розрахунки струмів під час МКЗ у трансформаторі та трансформаторному агрегаті велись за спрощеними схемами рис. 1, в та рис. 3, в відповідно для знижувального трансформатора типу ТМ-6300/-35-У/Δ-11 з катушковими ($n_{K,B}, n_{K,H}$) обмотками та такими номінальними параметрами [4]: $S_{\text{НОМ}} = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $U_{\text{ВНОМ}} = 35 \text{ кВ}$; $\Delta P_{\text{ХНОМ}} = 7,9 \text{ кВт}$; $I_{\text{ХНОМ}} = 0,64\%$; $I_{\text{ХНОМ},a} = 0,126\%$ (активна складова); $I_{\text{ХНОМ},p} = 0,63\%$ (реактивна складова); $\Delta P_{\text{КНОМ}} = 46,8 \text{ кВт}$; $u_{\text{КНОМ}} = 7,55\%$ (реактивна складова); $w_{\text{ВНОМ}} = 720$; $w_{\text{ННОМ}} = 360$; $n_{K,B} = 60$; $n_{K,H} = 60$; $D_{\text{Ксер}} = 49,92 \text{ см}$; $D_{\text{Всер}} = 57,89 \text{ см}$; $h = 123 \text{ см}$; $a_H = 4,86 \text{ см}$; $a_K = 2,7 \text{ см}$; $a_B = 5,27 \text{ см}$.

Основні (характерні) результати розрахунку міжкатушкових замикань як у первинній обмотці В, так і у вторинній обмотці Н ($n_{\alpha} = n_{\alpha H} \vee n_{\alpha B} = 2$) наведені у таблиці та на рис. 4. В обох варіантах, враховуючи однакову кількість катушок обмоток В і Н ($n_K = n_{K,H} \vee n_{K,B} = 60$), було прийнято:

$$\alpha = w_{\alpha} / w_{\text{НОМ}} = n_{\alpha} / n_K = 2/60 = \text{const}; \quad 0 \leq \beta \leq \beta_{\text{макс}}; \quad (21)$$

$$\beta_{\text{макс}} = (w_{\text{НОМ}} - w_{\alpha}) / w_{\text{НОМ}} = (n_K - n_{\alpha}) / n_K = (60 - 2) / 60 = 58/60.$$

Характерні значення величин трансформатора (Т) та трансформаторного агрегату (ТА) під час міжкатушкових замикань

Т			ТА		
α	$\alpha_B = 2/60$ (вар. 1)	$\alpha_H = 2/60$ (вар. 2)	α	$\alpha_{B1} = 2/60$ (вар. 1)	$\alpha_{H1} = 2/60$ (вар. 2)

β	0	30/60	0	30/60	β	0	30/60	0	30/60
$x'_{\mu*}$	148,32	148,32	158,73	158,73	$x'_{\mu 2*}$	158,73	158,73	158,73	158,73
x'_*	1,048	0,6804	0,9651	0,674	x'_{1*}	1,048	0,6804	0,9651	0,674
x'_{T*}	1,0407	0,6773	0,9593	0,6711	x'_{TA*}	159,7708	159,4075	159,69	159,40
$I'_{\mu*}$	$6,74 \cdot 10^{-3}$	$6,74 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$I'_{\mu 1*}$	$4,39 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$
I_*	0,9609	1,4764	1,0424	1,4901	I_{TA*}	0,00626	0,00627	0,00626	0,00627
$I_{\alpha*}$	-27,671	-42,6213	-31,084	-44,513	$I_{\alpha 1*}$	-0,1802	-0,1811	-0,1867	-0,1874
I_{K*}	28,632	44,097	31,084	44,513	I_{K1*}	0,1865	0,1874	0,1867	0,1874
					$K_{TA,T}$	153,5	235,3	166,5	237,3

Аналіз одержаних результатів розрахунку МКЗ в обмотках трансформатора показав таке:

а) вхідний опір переважно визначається індуктивним опором розсіювання пари обмоток – первинної (або її незакороченої частини) та вторинної з пари закорочених котушок, а його значення максимальне при закороченій парі котушок посередині обмотки, що узгоджується з [1]:

б) рівень струму в первинній обмотці відповідає номінальному значенню струму цієї обмотки і є мінімальним при закороченій парі крайніх котушок і є максимальним при закороченій парі котушок посередині обмоток, що також узгоджується з [1];

в) рівень струмів у закорочених витках і у гілці, що утворила таке замикання, є практично однаковим, у 30–45 разів перевищує номінальне значення струму пошкодженої обмотки та є мінімальним при закороченій парі крайніх котушок і максимальним при закороченій парі котушок посередині обмоток;

г) рівень струмів під час МКЗ у вторинній обмотці є дещо вищим за рівень струмів під час МКЗ у первинній обмотці трансформатора;

д) вплив опору гілки намагнічування на рівень струмів є незначним і під час інженерних розрахунків цю гілку можна не враховувати, що дає змогу спростити обчислення.

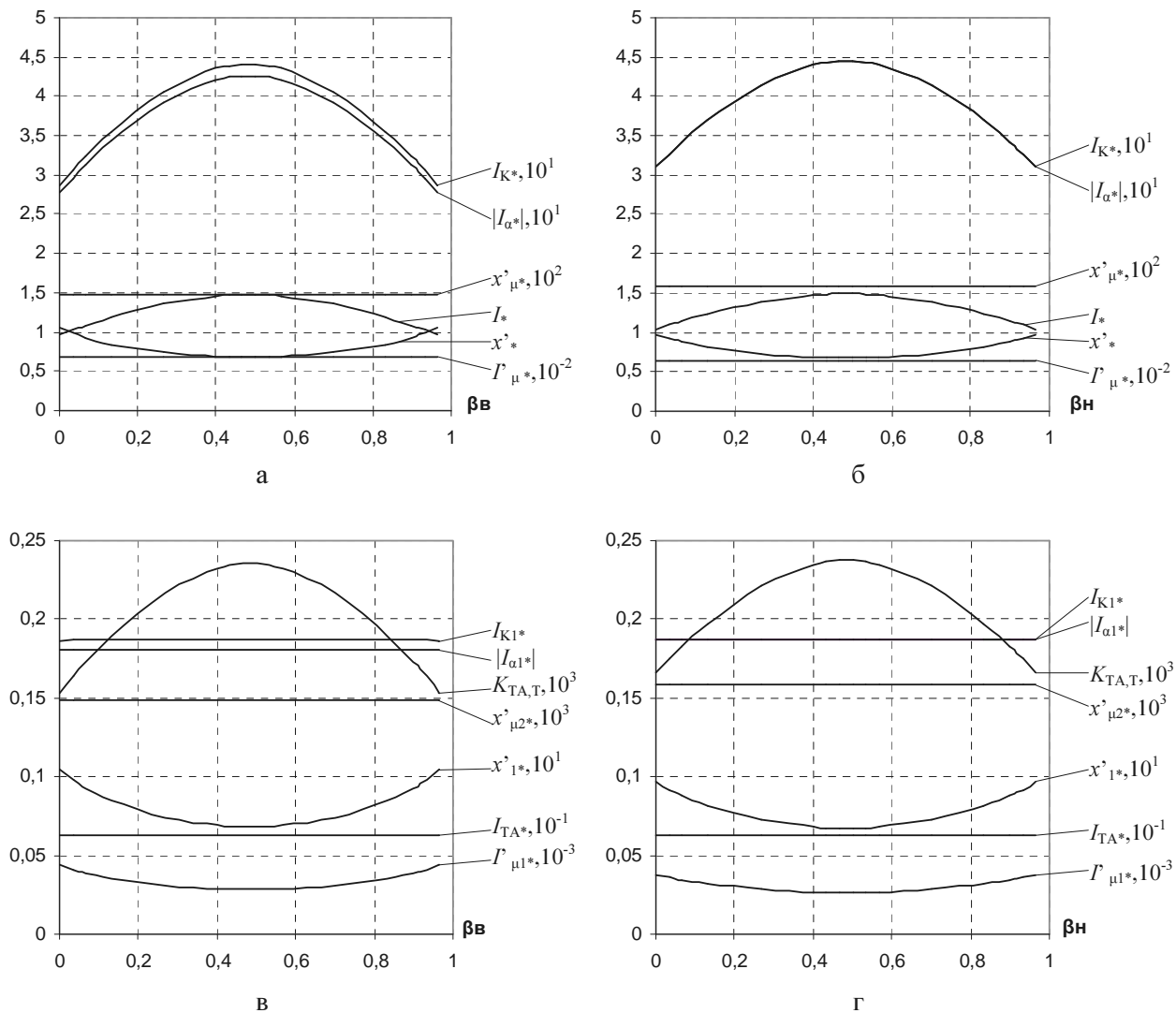


Рис. 4. Індуктивні опори та струми під час міжкатушкових замикань:
 а, б – у трансформаторі; в, г – у трансформаторному агрегаті;
 а, в – у первинній обмотці В; б, г – у вторинній обмотці Н

Умови роботи трансформаторів трансформаторного агрегату під час МКЗ істотно відрізняються від розглянутих вище для окремого трансформатора, а саме:

а) вхідний опір переважно визначається індуктивним опором гілки намагнічування непошкодженого трансформатора і тому перевищує вхідний опір окремого трансформатора більш ніж на два порядки;

б) рівень струму у первинних обмотках більш ніж на два порядки є меншим, дорівнює струму намагнічення непошкодженого трансформатора та практично не залежить від місця виникнення МКЗ;

в) рівень струмів у замкнених витках і у гілці, що утворила таке замикання, більш ніж на два порядки є меншим і не перевищує $0,19I_{\text{ном}}$ пошкодженої обмотки, тобто орієнтовно у 150–240 разів є меншим за рівень струмів під час МКЗ в окремому трансформаторі;

г) вплив опорів паралельно з'єднаних гілок намагнічування та замкнених витків пошкодженого трансформатора на рівень струмів є незначним і під час інженерних розрахунків їхній результуючий опір можна приймати таким, що дорівнює нулю, що дає змогу в першому

наближенні визначати рівень струмів у закорочених витках і у гілці, яка утворила таке замикання, за простою формулою

$$I_{\alpha*} \approx I_{K*} \approx \frac{I_{X_{НОМ}}\%}{100 \cdot \alpha}, \quad (22)$$

яка, наприклад, для $\alpha = 2/60$ дає значення

$$I_{\alpha*} \approx I_{K*} \approx \frac{0,64}{100 \cdot 2/60} = 0,192, \quad (23)$$

що порівняно з даними таблиці дає похибку до 6,5 %;

д) для трансформаторного агрегату з ємнісними елементами за умови $b_{C2} = b'_{\mu 2}$ рівень струмів $I^{(C)}$ під час ВЗ і МКЗ визначається лише активною складовою $I'_{\mu 2a}$ струму $I'_{\mu 2}$ гілки намагнічування непошкодженого трансформатора (рис. 3, б) і у першому наближенні обчислюється за простою формулою

$$I_{\alpha*}^{(C)} \approx I_{K*}^{(C)} \approx \frac{I_{X_{НОМ.а}}\%}{100 \cdot \alpha}, \quad (24)$$

яка, наприклад, для $\alpha = 2/60$ дає значення

$$I_{\alpha*}^{(C)} \approx I_{K*}^{(C)} \approx \frac{0,126}{100 \cdot 2/60} = 0,0378, \quad (25)$$

тобто спостерігається додаткове п'ятикратне зниження рівня струмів.

Висновки: 1. Запропоновані узагальнені схеми й математичні моделі трансформатора і трансформаторного агрегату характеризуються простотою реалізації та дають змогу розраховувати струми під час виткових і міжкатушкових замикань з урахуванням визначальних факторів, які впливають на адекватність результатів.

2. Одержані для трансформаторів з обмотками однакової висоти аналітичні вирази для обчислення індуктивного опору розсіювання пари обмоток – первинної (чи її незакороченої частини) та вторинної (закороченої частини витків) – дають змогу формалізувати процедуру обчислення їхніх значень і тим самим спростити алгоритмічну реалізацію під час математичних експериментів.

3. Запропонований підхід та розроблений на його основі метод дають змогу у першому наближенні здійснювати порівняльну оцінку рівня струмів як під час міжкатушкових замикань, так і під час виткових замикань в трансформаторах і трансформаторних агрегатах.

4. Виконані розрахунки показали, що рівень струмів під час ВЗ і МКЗ у трансформаторних агрегатах в сотні разів менший за рівень струмів у трансформаторах, що підвищує надійність роботи електроустановок з трансформаторними агрегатами.

5. Запропоновані прості формули наближеного розрахунку дають змогу здійснювати оцінку рівня струмів під час виткових і міжкатушкових замикань в трансформаторних агрегатах лише за їхніми паспортними даними і можуть використовуватися як перше наближення в інженерних розрахунках.

1. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
2. Пат. на изобретение 2271050 Российской Федерации. Трансформаторный агрегат / Г.Н. Лысяк, А.А. Малиновский, Л.А. Никонец. – 2006, Бюл. № 6.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
4. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов: Учеб. для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.