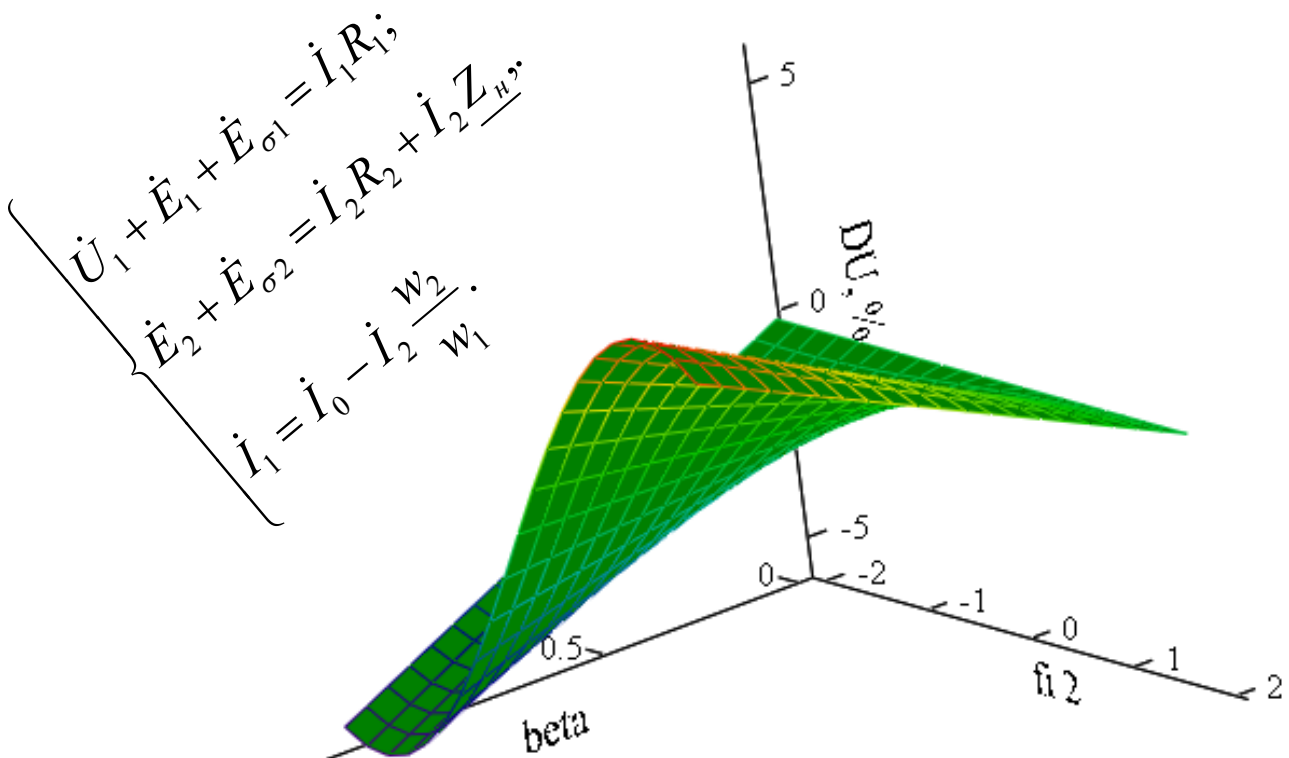


В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
Частина IV. Трансформатори**

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Частина IV. Трансформатори

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напрямів підготовки “Електромеханіка”, “Електротехніка”. Протокол №2 від 25 вересня 2008 р.

Вінниця ВНТУ 2008

УДК 621.313

Г75

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

А. І. Гладир, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М.

Г75 **Експериментальні дослідження електричних машин.**
Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. – Вінниця:
ВНТУ, 2008. – 219 с.

В навчальному посібнику викладено підходи до експериментальних досліджень трансформаторів. Для кожного виду дослідження відведено відповідне лабораторне заняття, наведено основні теоретичні відомості, задачі для самостійного розв'язування, приділено увагу використанню математичного моделювання характеристик трансформаторів, програмі лабораторних робіт і методичним вказівкам для їх виконання. Запропоновані способи досліджень дозволяють охопити основні питання для закріплення теоретичних знань з відповідного розділу дисципліни „Електричні машини”. Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за напрямками „Електромеханіка” та „Електротехніка”.

УДК 621.313

© В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький, 2008

Зміст

Перелік умовних скорочень	7
Перелік позначень	8
Вступ.....	19
1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ	20
1.1 Загальні відомості про трансформатори	20
1.1.1 Призначення і області застосування трансформаторів	20
1.1.2 Класифікація трансформаторів.....	24
1.1.3 Номінальні величини	25
1.1.4 Будова трансформаторів.....	25
1.1.4.1 Магнітопровід.....	27
1.1.4.2 Обмотка.....	30
1.1.4.3 Охолодження	32
1.1.4.4 Вводи	32
1.2 Робочий процес трансформатора.....	35
1.2.1 Принцип дії трансформатора	35
1.2.2 Ідеалізований трансформатор	40
1.2.3 Струм намагнічування і струм холостого ходу	44
1.2.3.1 Струм намагнічування.....	44
1.2.3.2 Активна складова струму холостого ходу.....	46
1.2.4 Комплексні рівняння.....	47
1.2.5 Приведення вторинної обмотки до первинної	49
1.2.6 Векторна діаграма	52
1.2.6.1 Векторна діаграма при активно-індуктивному навантаженні	53
1.2.6.2 Векторна діаграма при активно-ємнісному навантаженні	54
1.2.7 Схема заміщення трансформатора	54
1.2.8 Дослід холостого ходу	57
1.2.9 Дослід короткого замикання.....	61

1.2.10	Зміна напруги трансформатора	69
1.2.11	Зовнішні характеристики трансформатора	72
1.2.12	Втрати і ККД трансформатора.....	73
1.2.12.1	Енергетична діаграма	73
1.2.12.2	ККД трансформатора та його залежність від навантаження	77
1.2.13	Регулювання напруги трансформатора	81
1.2.13.1	Принципи регулювання.....	81
1.2.13.2	Перемикання відгалужень без збудження.....	82
1.2.13.3	Перемикання відгалужень під навантаженням.....	84
1.3	Групи з'єднань і паралельна робота трансформаторів.....	86
1.3.1	Схеми з'єднань	86
1.3.2	Групи з'єднань обмоток	88
1.3.3	Паралельна робота трансформаторів	92
1.4	Багатообмоткові трансформатори і автотрансформатори	97
1.4.1	Багатообмоткові трансформатори	97
1.4.2	Автотрансформатори	100
1.5	Спеціальні трансформатори	105
1.5.1	Вимірювальні трансформатори	105
1.5.1.1	Трансформатор напруги	106
1.5.1.2	Трансформатор струму	108
1.5.2	Трансформатори для вентильних перетворювачів	110
1.5.3	Трансформатори для електродугового зварювання	112
1.5.4	Трансформатори для автоматичних пристроїв	113
1.5.4.1	Імпульсні трансформатори.....	113
1.5.4.2	Пік-трансформатори	116
 Лабораторна робота №1Т ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....		
		118
1Т.1	Програма виконання лабораторної роботи	118
1Т.1.1	Експериментальна частина	118
1Т.1.2	Розрахункова частина.....	118
1Т.1.3	Графічна частина	119
1Т.2	Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	119
1Т.2.1	Експериментальна частина	119

1Т.2.2 Розрахункова частина.....	130
1Т.2.3 Графічна частина	131
1Т.3 Питання до захисту	131
1Т.4 Задачі для самостійного розв'язування	132
Лабораторна робота №2Т ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	134
2Т.1 Короткі теоретичні відомості	134
2Т.2 Програма виконання лабораторної роботи	137
2Т.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	137
2Т.4 Питання до захисту	141
2Т.5 Задачі для самостійного розв'язування	142
Лабораторна робота №3Т ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРИФАЗНИХ ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	144
3Т.1 Програма виконання лабораторної роботи	144
3Т.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	145
3Т.3 Питання до захисту	149
3Т.4 Задачі для самостійного розв'язування	149
Лабораторна робота №4Т ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	151
4Т.1 Короткі теоретичні відомості	151
4Т.2 Програма виконання лабораторної роботи	152
4Т.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи.....	153
4Т.4 Питання до захисту	160
4Т.5 Задачі для самостійного розв'язування	160
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА.....	162
2.1 Моделювання трансформаторів в ППП MathCAD.....	162
2.1.1 Розрахунок струму намагнічування	162
2.1.2 Моделювання зміни напруги трансформатора	168
2.1.3 Розрахунок ККД	170
2.1.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення та ударного струму короткого замикання	173

2.1.5	Моделювання паралельної роботи трансформаторів.....	176
2.2	Моделювання трансформаторів в ППП Simulink	179
2.2.1	Загальні відомості про елементну базу Simulink.....	179
2.2.1.1	Лінійний трансформатор.....	181
2.2.1.2	Нелінійний трансформатор.....	183
2.2.1.3	Трифазний лінійний трансформатор (12 виводів).....	186
2.2.1.4	Трифазний двообмотковий трансформатор.....	187
2.2.1.5	Трифазний трансформатор з первинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг.....	190
2.2.1.6	Трифазний триобмотковий трансформатор.....	193
2.2.2	Приклади програм.....	193
2.2.2.1	Моделювання холостого ходу трансформаторів.....	196
2.2.2.2	Моделювання режиму короткого замикання.....	201
2.2.2.3	Моделювання несиметричного режиму роботи трансформатора.....	207
2.2.2.4	Моделювання паралельної роботи трансформаторів....	209
	Предметний покажчик.....	214
	Література.....	216
	Глосарій.....	218

Перелік умовних скорочень

- ВН – висока напруга
- НН – низька напруга
- ЕРС – електрорушійна сила
- МРС – магніторушійна сила
- РН – регулятор напруги
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ПБЗ – перемикач без збудження
- РПН – регулювання під навантаженням
- СН – середня напруга
- ЛАТР – лабораторний автотрансформатор
- ТС – трансформатор струму
- ТН – трансформатор напруги
- ППП – пакет прикладних програм

Перелік позначень

- $\dot{\Phi}_A$ – магнітний потік фази А
- $\dot{\Phi}_B$ – магнітний потік фази В
- $\dot{\Phi}_C$ – магнітний потік фази С
- \dot{I}_0 – вектор струму холостого ходу
- \dot{E}_1 – вектор ЕРС первинної обмотки
- \dot{U}_1 – вектор напруги первинної обмотки
- \dot{E}_2 – вектор ЕРС вторинної обмотки
- \dot{F}_1 – МРС, створена первинною обмоткою трансформатора при навантаженні
- \dot{F}_2 – МРС, створена вторинною обмоткою трансформатора при навантаженні
- \dot{F}_0 – МРС, створена первинною обмоткою на холостому ході
- \dot{I}_{kc} – компенсаційний струм
- \dot{I}_1 – комплексне значення струму первинної обмотки
- \dot{I}_2 – комплексне значення струму вторинної обмотки
- \underline{Z}_n – комплексний опір навантаження
- w'_2 – кількість витків вторинної обмотки, приведеної до первинної
- E'_2 – ЕРС приведеної вторинної обмотки
- I'_2 – струм приведеної вторинної обмотки
- U'_2 – напруга приведеної вторинної обмотки
- R'_2 – приведений активний опір вторинної обмотки
- X'_2 – приведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки
- Z'_2 – приведений повний опір вторинної обмотки
- Z'_n – приведений повний опір навантаження
- X'_n – приведений реактивний опір навантаження
- R'_n – приведений активний опір навантаження

\underline{Z}_m	– комплексний повний опір кола намагнічування
\underline{Z}_1	– комплексний повний опір первинної обмотки
$\underline{Z}_{екв}$	– еквівалентний опір схеми заміщення
P'_0	– покази першого ватметра в режимі холостого ходу
P''_0	– покази другого ватметра в режимі холостого ходу
$P'_к$	– покази першого ватметра в короткого замикання
$P''_к$	– покази другого ватметра в режимі короткого замикання
P'	– покази першого ватметра в режимі навантаження
P''	– покази другого ватметра в режимі навантаження
$\dot{I}_{вр}$	– комплексний струм врівноваження
$\dot{U}_{2 I}$	– комплексна вторинна напруга першого трансформатора
$U_{2 II}$	– комплексна вторинна напруга другого трансформатора
$U_{I к.ном} \%$	– напруга короткого замикання першого трансформатора
$U_{II к.ном} \%$	– напруга короткого замикання другого трансформатора
S_I^*	– відносна потужність першого трансформатора
S_{II}^*	– відносна потужність другого трансформатора
\dot{U}'_3	– приведена напруга третьої обмотки до першої
\dot{E}'_3	– приведена ЕРС третьої обмотки до першої
\underline{Z}'_3	– приведений повний опір третьої обмотки до першої
\dot{I}'_3	– приведений струм третьої обмотки до першої
$\underline{Z}_{к12}$	– комплексний опір короткого замикання першої і другої обмоток
$\underline{Z}_{к13}$	– комплексний опір короткого замикання першої і третьої обмоток
$\underline{Z}_{к23}$	– комплексний опір короткого замикання другої і третьої обмоток
\dot{E}_{XA}	– вектор ЕРС між виводами X і A
\dot{E}_{xa}	– вектор ЕРС між виводами x і a
\dot{E}_{ax}	– вектор ЕРС між виводами a і x

- k'_{II} – коефіцієнт трансформації другого трансформатора на відпайках a, b, c
- $U_{A_1B_1}$ – лінійна напруга між фазами A_1 і B_1 першого трансформатора
- $U_{B_1C_1}$ – лінійна напруга між фазами B_1 і C_1 першого трансформатора
- $U_{C_1A_1}$ – лінійна напруга між фазами C_1 і A_1 першого трансформатора
- $U_{a_1b_1}$ – лінійна напруга між фазами a_1 і b_1 першого трансформатора
- $U_{b_1c_1}$ – лінійна напруга між фазами b_1 і c_1 першого трансформатора
- $U_{c_1a_1}$ – лінійна напруга між фазами c_1 і a_1 першого трансформатора;
- $\Delta U'_{12}$ – спад напруг в другій обмотці триобмоткового трансформатора
- $\Delta U'_{13}$ – спад напруг в третій обмотці триобмоткового трансформатора
- R'_3 – активний опір третьої обмотки, приведений до первинної триобмоткового трансформатора
- X'_3 – реактивний опір третьої обмотки, приведений до первинної триобмоткового трансформатора
- η – коефіцієнт корисної дії
- ω – кругова частота
- ν – порядок гармоніки
- Δ – густина струму в провідниках
- δ – кут між вектором магнітного потоку і струму холостого ходу
- β – коефіцієнт навантаження
- η – ККД
- τ – стала часу первинного кола
- $\eta_{0,7}$ – ККД при коефіцієнті потужності 0,95
- $\eta_{0,95}$ – ККД при коефіцієнті потужності 0,95
- φ_1 – кут між векторами напруги і струму первинної обмотки

- φ_2 – кут між векторами напруги і струму вторинної обмотки
 β_2 – коефіцієнт навантаження другої обмотки триобмоткового трансформатора
 β_3 – коефіцієнт навантаження третьої обмотки триобмоткового трансформатора
 δ_U – кутова похибка ТН
 γ_U – відносна похибка ТН
 ΔU_2 – зміна напруги
 $\Delta U_2 \%$ – зміна напруги, виражена у відсотках
 $\Delta U_{2 \text{ ном}} \%$ – номінальна зміна напруги, виражена у відсотках
 ΔE – різниця ЕРС
 γ – відносна струмова похибка ТС
 $\eta_{\text{ном}}$ – номінальний ККД
 Δp_{Σ} – сумарні втрати
 $\Delta p_{\text{вс}}$ – Втрат від вихрових струмів
 $\Delta p_{\text{г}}$ – втрати від гістерезису
 $\Delta p_{\text{ел}}$ – електричні втрати
 $\Delta p_{\text{ел. атр}}$ – електричні втрати в автотрансформаторі
 $\Delta p_{\text{ел. ном}}$ – електричні втрати при номінальному навантаженні
 $\Delta p_{\text{ел. тр}}$ – електричні втрати в трансформаторі
 $\Delta p_{\text{ел1}}$ – електричні втрати в первинній обмотці
 $\Delta p_{\text{ел2}}$ – електричні втрати у вторинній обмотці
 $\Delta p_{\text{м}}$ – магнітні втрати
 $\cos \varphi_0$ – коефіцієнт потужності холостого ходу
 $\cos \varphi_{\text{к}}$ – коефіцієнт потужності короткого замикання
 $\cos \varphi_3$ – коефіцієнт потужності третьої обмотки
 $d\Phi/dt$ – швидкість зміни магнітного потоку
 f – частота напруги живлення
 F – МРС
 I^* – відносне значення струму
 k – коефіцієнт трансформації
 k_{12} – коефіцієнт трансформації між обмотками 1 і 2
 k_{13} – коефіцієнт трансформації між обмотками 1 і 3

- k_c – коефіцієнт заповнення шихтованого стрижня сталлю
- k_I – коефіцієнт трансформації першого трансформатора
- k_{II} – коефіцієнт трансформації другого трансформатора
- k_U – коефіцієнт напруги
- $k_{виг}$ – коефіцієнт вигідності
- k_{min} – коефіцієнт типової потужності
- k_ϕ – фазний коефіцієнт трансформації
- L – абсолютне значення індуктивності
- L^* – відносне значення індуктивності
- L_m – індуктивність кола намагнічування
- m – число фаз в обмотках трансформатора
- $P_{ном}$ – потужність, яка споживається на стороні постійного струму перетворювача
- R – абсолютне значення активного опору
- R^* – відносне значення активного опору та індуктивності
- R_1 – активний опір первинної обмотки
- $R_{12к}$ – активний опір короткого замикання першої і другої обмоток триобмоткового трансформатора
- $R_{13к}$ – активний опір короткого замикання першої і третьої обмоток триобмоткового трансформатора
- R_2 – активний опір вторинної обмотки
- R_{Aa} – активний опір обмотки між виводами A і a
- R_m – активний опір кола намагнічування
- R_{ax} – активний опір обмотки між виводами a і x
- $R_{доод}$ – додатковий опір
- R_k – активний опір короткого замикання
- S_Σ – спільне навантаження трансформаторів, що працюють паралельно
- $S_{1розр}$ – розрахункова потужність первинної обмотки
- $S_{2ном2}$ – номінальна потужність другої обмотки триобмоткового трансформатора
- $S_{2ном3}$ – номінальна потужність другої третьої триобмоткового трансформатора
- $S_{2розр}$ – розрахункова потужність вторинної обмотки

- S_{np} – прохідна потужність
- $S_{V\text{ ном}}$ – навантаження одного з трансформаторів, що працює паралельно
- $S_{ел}$ – потужність, яка передається у вторинне коло внаслідок електричного зв'язку між первинним і вторинним колами
- $S_{ем}$ – потужність, яка передається у вторинне коло електромагнітним полем
- S_I – фактичне навантаження першого трансформатора
- $S_{I\text{ ном}}$ – номінальне навантаження (потужність) першого трансформатора
- S_{II} – фактичне навантаження другого трансформатора
- $S_{II\text{ ном}}$ – номінальне навантаження (потужність) другого трансформатора
- $S_{III\text{ ном}}$ – номінальне навантаження (потужність) третього трансформатора
- $S_{ном}$ – номінальна повна потужність
- $S_{пер.ст}$ – поперечний переріз стрижня магнітопроводу
- $S_{пер1}$ – поперечний переріз проводу первинної обмотки
- $S_{пер2}$ – поперечний переріз проводу вторинної обмотки
- $S_{розра}$ – розрахункова потужність
- $S_{тип}$ – типова потужність
- t – час
- t_i – тривалість імпульсів
- u_1 – миттєва напруга первинної обмотки
- U_{10} – напруга холостого ходу первинної обмотки
- U_{10A} – напруга холостого ходу фази A
- U_{10B} – напруга холостого ходу фази B
- U_{10C} – напруга холостого ходу фази C
- $U_{1л.ном}$
($U_{1ном}$) – номінальна напруга (лінійна) первинної обмотки
- $U_{1ф.ном}$ – номінальна фазна напруга первинної обмотки
- u_2 – миттєва напруга вторинної обмотки
- U_{20} – напруга холостого ходу вторинної обмотки

- $U_{2л.ном}$ – номінальна напруга (лінійна) вторинної обмотки
 $(U_{2ном})$
 $U_{2ф.ном}$ – номінальна фазна напруга вторинної обмотки
 U_{AB} – лінійна напруга між фазами A і B первинної обмотки трансформатора
 U_{ab} – лінійна напруга між фазами a і b вторинної обмотки трансформатора
 U_{BC} – лінійна напруга між фазами B і C первинної обмотки трансформатора
 U_{bc} – лінійна напруга між фазами b і c вторинної обмотки трансформатора
 U_{CA} – лінійна напруга між фазами C і A первинної обмотки трансформатора
 U_{ca} – лінійна напруга між фазами c і a вторинної обмотки трансформатора
 U_d – напруга на стороні постійного струму випрямляча
 $U_{дном}$ – номінальна напруга на стороні постійного струму випрямляча
 U_m – амплітуда напруги
 U_k – напруга короткого замикання
 $U_{k\%}$ – напруга короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{kIном\%}$ – номінальна напруга короткого замикання першого трансформатора, виражена у відсотках
 $U_{kIIном\%}$ – номінальна напруга короткого замикання другого трансформатора, виражена у відсотках
 $U_{kIIIном\%}$ – номінальна напруга короткого замикання третього трансформатора, виражена у відсотках
 $U_{k.a}$ – активна складова напруги короткого замикання
 $U_{k.a\%}$ – активна складова напруги короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{k.a.ном\%}$ – активна складова номінальної напруги короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{k.ном}$ – номінальна напруга короткого замикання

- $U_{к.ном} \%$ – номінальна напруга короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{к.р}$ – реактивна складова напруги короткого замикання
 $U_{к.р} \%$ – реактивна складова напруги короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{к.р.ном} \%$ – реактивна складова номінальної напруги короткого замикання, виражена у відсотках
 $U_{вит}$ – діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток
 U_{δ} – напруга горіння дуги
 $U_{I\text{I}ном}$ – номінальна первинна напруга першого трансформатора
 $U_{II\text{I}ном}$ – номінальна первинна напруга другого трансформатора
 $U_{к}$ – напруга короткого замикання
 $U_{к\text{ в }ном}$ – напруга короткого замикання одного з трансформаторів, що працює паралельно
 $U_{к.ф}$ – фазна напруга короткого замикання
 $U_{к12}$ – напруга короткого замикання першої і другої обмоток триобмоткового трансформатора
 $U_{к13}$ – напруга короткого замикання першої і третьої обмоток триобмоткового трансформатора
 $U_{к23}$ – напруга короткого замикання другої і третьої обмоток триобмоткового трансформатора
 $U_{кI}$ – напруга короткого замикання першого трансформатора
 $U_{кII}$ – напруга короткого замикання другого трансформатора
 $U_{кA}$ – напруга короткого замикання фази A
 $U_{кB}$ – напруга короткого замикання фази B
 $U_{кC}$ – напруга короткого замикання фази C
 w_1 – число витків первинної обмотки
 w_2 – число витків вторинної обмотки
 w_{Aa} – число витків, включених між виводами A і a
 w_{ax} – число витків, включених між виводами a і x
 w_{AX} – число витків, включених між виводами A і X
 w_{Ax} – число витків, включених між виводами A і x
 X_L – індуктивний опір (реактор)

- X_m – індуктивний опір кола намагнічування
- Z_k – повний опір короткого замикання
- Z_{kI} – опір короткого замикання першого трансформатора
- Z_{kII} – опір короткого замикання другого трансформатора
- Z_H – опір навантаження
- α – кут зсуву між векторами однойменних лінійних ЕРС обмоток ВН і НН
- β_{opt} – оптимальне значення ККД
- Φ_1 – магнітний потік, що створюється струмом первинної обмотки
- Φ_2 – магнітний потік, що створюється струмом вторинної обмотки
- $\Phi_{\sigma 1}$ – потік розсіювання первинної обмотки
- $\Phi_{\sigma 2}$ – потік розсіювання вторинної обмотки
- B_{cm} – значення магнітної індукції в стрижні
- e_1 – миттєва ЕРС первинної обмотки
- E_1 – ЕРС первинної обмотки
- e_2 – миттєва ЕРС вторинної обмотки
- E_2 – ЕРС вторинної обмотки
- $E_{\sigma 1}$ – ЕРС самоіндукції, створена магнітним потоком розсіювання первинної обмотки
- $E_{\sigma 2}$ – ЕРС самоіндукції, створена магнітним потоком розсіювання вторинної обмотки
- I_μ – діючі значення струму намагнічування
- i_μ – миттєві значення струму намагнічування
- $i_{\mu(1)}$ – перша гармоніка миттєвого струму намагнічування
- $I_{\mu(1)}$ – перша гармоніка діючого струму намагнічування
- $i_{\mu(3)}$ – третя гармоніка миттєвого струму намагнічування
- $I_{\mu(3)}$ – третя гармоніка діючого струму намагнічування
- $i_{\mu(5)}$ – п'ята гармоніка миттєвого струму намагнічування
- $I_{\mu(5)}$ – п'ята гармоніка діючого струму намагнічування
- I_0 – струм холостого ходу
- I_{0a} – активна складова струму холостого ходу
- I_{0p} – реактивна складова струму холостого ходу

- I_{0A} – струм холостого ходу фази A
 I_{0B} – струм холостого ходу фази B
 I_{0C} – струм холостого ходу фази C
 i_1 – миттєвий струм первинної обмотки
 I_1 – діюче значення струму первинної обмотки
 $I_{1к}$ – струм короткого замикання первинної обмотки
 $I_{1л.ном}$
 $(I_{1ном})$ – номінальний струм первинної обмотки
 i_2 – миттєвий струм вторинної обмотки
 I_2 – діюче значення струму вторинної обмотки
 $I_{2(1)}$ – струм горіння дуги при першому повітряному зазорі індуктивної котушки
 $I_{2(2)}$ – струм горіння дуги при другому повітряному зазорі індуктивної котушки
 I_{2b} – струм в лінії b вторинної обмотки
 I_{2c} – струм в лінії c вторинної обмотки
 I_{2a} – струм в лінії a вторинної обмотки
 $I_{2к}$ – струм короткого замикання вторинної обмотки
 $I_{2л.ном}$
 $(I_{2ном})$ – номінальний струм вторинної обмотки
 $I_{3ном}$ – номінальний струм третьої обмотки триобмоткового трансформатора
 I_d – струм на стороні постійного струму випрямляча
 $I_{дном}$ – номінальна струм на стороні постійного струму випрямляча
 I_{Aa} – струм, що протікає по обмотці з виводами A і a
 I_{ax} – результуючий струм на ділянці ax обмотки, до якого підключене навантаження
 I_{ax} – струм, що протікає по обмотці з виводами a і x
 I_I – струм першого трансформатора
 $I_{I ном}$ – номінальний струм першого трансформатора
 I_{II} – струм другого трансформатора
 $I_{II ном}$ – номінальний струм другого трансформатора
 $I_{кA}$ – струм короткого замикання фази A

- I_{kB} – струм короткого замикання фази B
- I_{kC} – струм короткого замикання фази C
- P_{cm} – переріз стрижня магнітопроводу
- P_0 – потужність холостого ходу
- P_2 – корисна потужність
- P_k – потужність короткого замикання
- P_m – магнітні втрати
- T – період
- Φ – магнітний потік
- $\Phi_{\sigma 1}$ – магнітний потік розсіювання, викликаний струмом первинної обмотки
- $\Phi_{\sigma 2}$ – магнітний потік розсіювання, викликаний струмом вторинної обмотки
- Φ^* – відносне значення магнітного потоку
- Φ_0 – магнітний потік на холостому ході
- Φ_m – амплітуда магнітного потоку
- $\Phi_{ш}$ – магнітний потік шунта
- X_1 – індуктивний опір первинної обмотки трансформатора, обумовлений потоками розсіювання даної обмотки
- X_{12k} – реактивний опір короткого замикання першої і другої обмоток триобмоткового трансформатора
- X_{13k} – реактивний опір короткого замикання першої і третьої обмоток триобмоткового трансформатора
- X_2 – індуктивний опір вторинної обмотки трансформатора, обумовлений потоками розсіювання даної обмотки
- X_k – реактивний опір короткого замикання

Вступ

Трансформатори (transformer) є одними з найекономніших електричних пристроїв, оскільки його коефіцієнт корисної дії (ККД) (efficiency factor) достатньо високий: у силових трансформаторів невеликої потужності він складає 95%, а в трансформаторів потужністю в декілька мегавольт-ампер – до 99,5%.

Трансформатор відіграє одну з головних ролей в передаванні електричної енергії на великі відстані, оскільки в цьому випадку до надходження до кінцевого споживача вона піддається багатократному перетворенню з низької напруги в високу і навпаки.

Крім цього він є незамінним елементом в різних галузях – від електроніки до електромеханіки, електрозварювання.

З метою полегшення та прискорення підготовки студентів до проведення експериментальних досліджень трансформаторів в посібнику наведено загальні теоретичні відомості з курсу „Електричні машини” розділу „Трансформатори”. В кожній роботі, разом із самостійними випробуваннями, передбачається аналіз отриманих результатів та порівняння їх з теоретичними положеннями. Для ґрунтовної підготовки до заняття рекомендується самостійно розв’язати ряд задач, що дозволить краще засвоїти суть роботи та процеси, що досліджуються. В завданнях, що вимагають побудови характеристик, доцільно використовувати технічні засоби моделювання з використанням пакетів прикладних програм (ППП) типу MATLAB, MathCAD, мову програмування Delphi, мову моделювання Labview та ін.

Розділ "Моделювання трансформатора" передбачає можливість поглиблення отриманих знань шляхом віртуального моделювання різних режимів роботи трансформаторів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРАНСФОРМАТОРИ

1.1 Загальні відомості про трансформатори

1.1.1 Призначення і області застосування трансформаторів

Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше число індуктивно пов'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї (первинної) системи змінного струму в іншу (вторинну) систему змінного струму.

В загальному випадку вторинна система змінного струму може відрізнятися від первинної деякими параметрами: значеннями напруг і струму, числом фаз, формою кривої напруги чи струму, частотою.

Застосування трансформаторів можна поділити на такі напрямки:

1) *для передачі і розподілу електричної енергії*. Передавати електроенергію на далекі відстані вигідно при великих напругах, тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, що підвищують напругу.

Електрична енергія розподіляється між промисловими підприємствами і населеними пунктами, у містах і сільській місцевості, а також усередині промислових підприємств по повітряних і кабельних лініях при напрузі 220, 110, 35, 20, 10 і 6 кВ. Отже, у всіх вузлах розподільних мереж повинні бути встановлені трансформатори, що знижують напругу. Крім того, понижувальні трансформатори варто встановлювати в пунктах споживання електроенергії, тому що більшість електричних споживачів змінного струму працює при напругах 220, 380 і 660 В. Таким чином, електрична енергія при передаванні від електричних станцій до споживачів піддається в трансформаторах багаторазовому перетворенню (3–5 разів). Для таких цілей використовуються однофазні і трифазні трансформатори, двообмоткові і триобмоткові [1]. Зовнішній вигляд такого трансформатора показано на рис. 1.1;

2) *для забезпечення потрібної схеми включення вентилів у перетворювальних пристроях і узгодження напруг на вході і виході перетворювача*.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд силового масляного трансформатора

У вентильних перетворювачах, що випрямляють змінний струм або перетворюють його з постійного в змінний (інвертори), відношення напруг на вході і виході залежить від схеми включення вентилів. Тому якщо на вхід перетворювача подається стандартна напруга, то на виході виходить нестандартна. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі, як правило, постачають трансформаторами (рис. 1.2), що забезпечують стандартну вихідну напругу при прийнятій схемі включення вентилів. Крім того, ряд схем включення вентилів вимагає обов'язкового застосування трансформатора. Трансформатори, які використовуються для цієї мети, називають *перетворювальними*. Розглянуті трансформатори виконують одно-, три- і багатофазними з регулюванням вихідної напруги в широких межах і без регулювання;

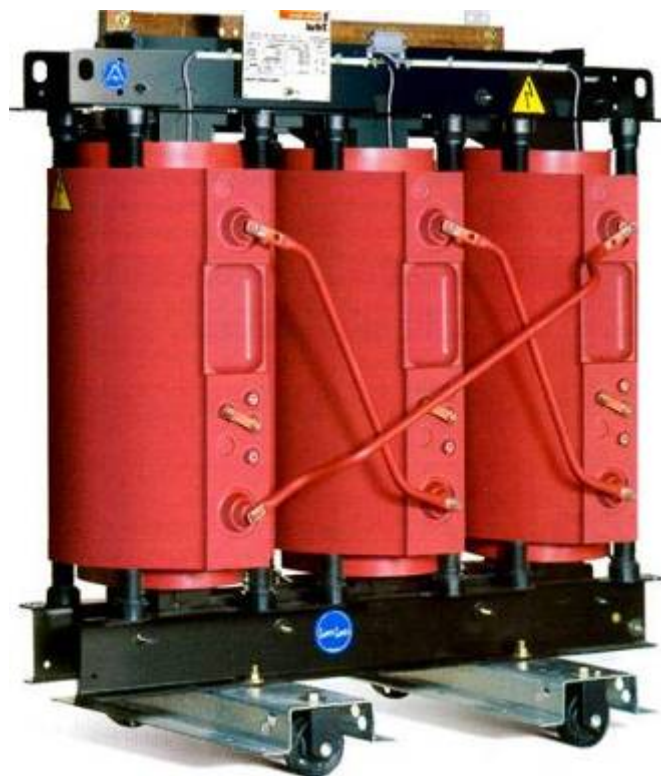


Рисунок 1.2 – Трансформатор силовий сухий для живлення комплектних тиристорних перетворювачів електроприводів

3) для різних технологічних цілей: зварювання (зварювальні (рис. 1.3) трансформатори), живлення електротермічних установок (електропічні трансформатори) і ін.;



Рисунок 1.3 – Зварювальні трансформатори

4) для живлення різних кіл радіо- і телевізійної апаратури; пристроїв зв'язку, автоматики і телемеханіки, електрообутових приладів; для розділення електричних кіл різних елементів цих пристроїв; для узгодження напруг і т.ін. Трансформатори, які використовуються в цих пристроях (рис. 1.4), зазвичай мають малу потужність, невисоку напругу. Їх виконують дво-, три- і багатообмотковими;

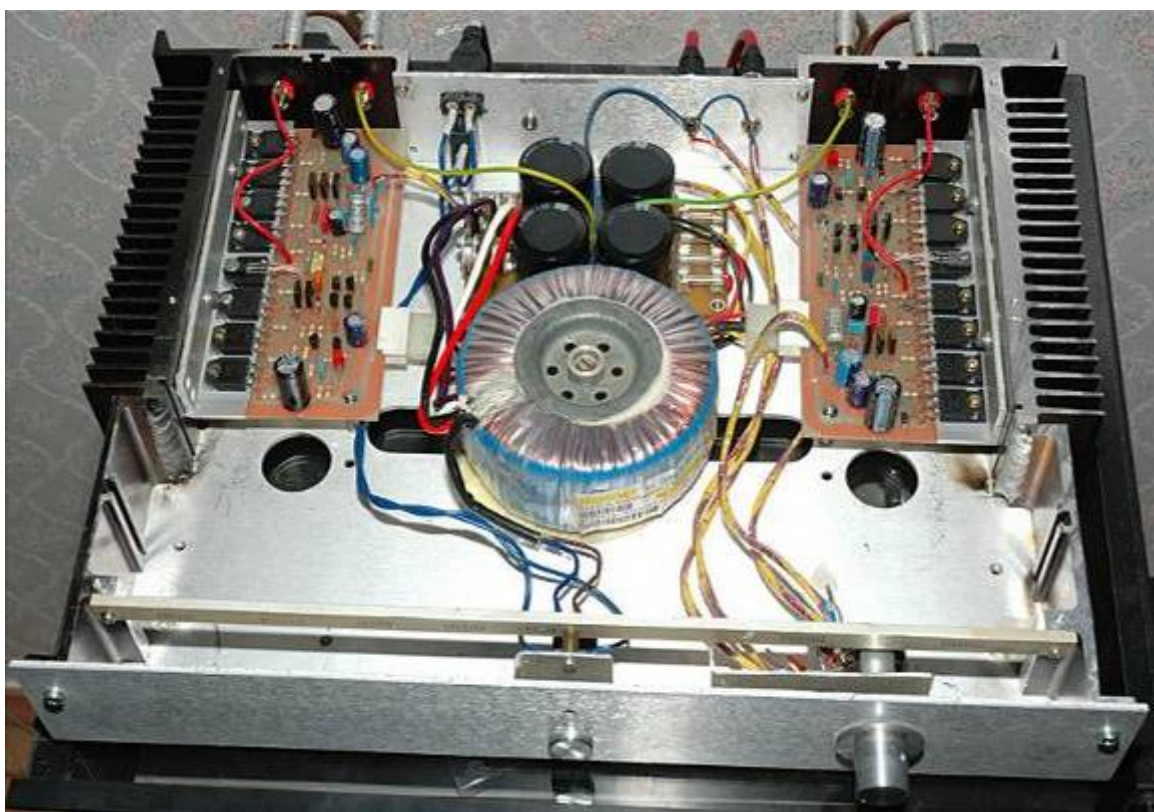
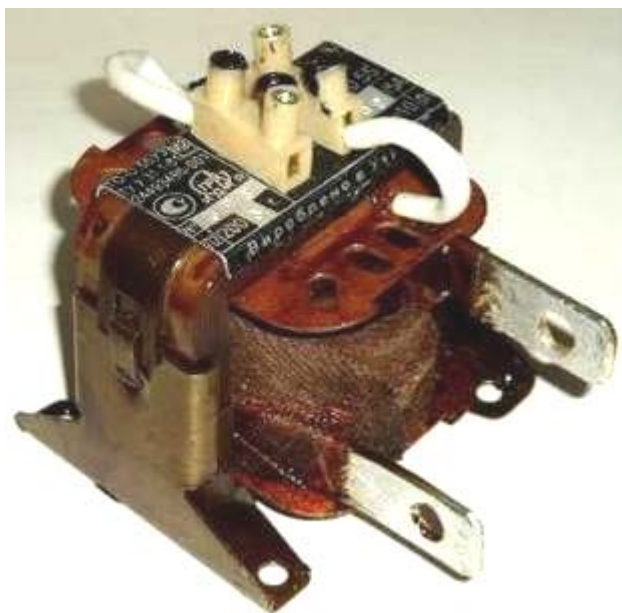


Рисунок 1.4 – Трансформатор для радіоапаратури

5) для включення електровимірювальних приладів і деяких апаратів, наприклад реле, в електричні кола високої напруги або в кола, по яких протікають великі струми, з метою розширення меж вимірювання і забезпечення електробезпечності. Трансформатори (рис. 1.5), які використовують для цієї мети, називають **вимірювальними**. Вони мають порівняно невелику потужність, обумовлену потужністю, яка споживається електровимірювальними приладами, реле й ін.

Трансформатори, перераховані в п. 1), 2), 3) і частково в п. 4), які призначені для перетворення електричної енергії в мережах енергосистем і

споживачів електричної енергії, називають *силовими*. Для режиму їхньої роботи характерна незмінна частота змінного струму і дуже малі відхилення первинної і вторинної напруг від номінальних значень [1].



а)



б)

Рисунок 1.5 – Вимірювальні трансформатори струму (а) і напруги (б)

1.1.2 Класифікація трансформаторів

Класифікують трансформатори за деякими ознаками:

1) за призначенням:

- силові загального призначення;
- силові спеціального призначення;
- імпульсні;
- для перетворення частоти і т.ін.;

2) за видом охолодження:

- з повітряним охолодженням (*сухі*);
- з масляним охолодженням (*масляні*);

3) за числом фаз, що трансформуються:

- однофазні;
- трифазні;

4) за формою магнітопроводу:

- стрижневі;
- броньові;

- бронестрижневі;
 - тороїдальні;
- 5) за числом обмоток на фазу:
- двообмоткові;
 - багатообмоткові.

1.1.3 Номінальні величини

Величини, які відповідають режиму роботи трансформатора, для якого він призначений заводом-виробником, називаються **НОМІНАЛЬНИМИ**, а такий режим роботи – **НОМІНАЛЬНИМ**. Номінальні величини (nominal values) вказуються в каталогах, паспорті і на табличці, прикріпленій до трансформатора.

Такими величинами є:

- повна потужність $S_{ном}$;
- лінійні напруги первинної $U_{1л.ном}$ і вторинної $U_{2л.ном}$ обмотки (їх часто позначають $U_{1ном}$ і $U_{2ном}$);
- лінійні струми первинної $I_{1л.ном}$ і вторинної $I_{2л.ном}$ обмотки (їх часто позначають $I_{1ном}$ і $I_{2ном}$);
- частота напруги живлення f ;
- кількість фаз m ;
- схема і група з'єднань обмоток;
- напруга короткого замикання U_k ;
- режим роботи (тривалий, короткочасний);
- спосіб охолодження;
- коефіцієнт корисної дії η ;
- повна маса.

Інколи номінальні лінійні напруги і струми трансформатора позначають без індексу «л».

1.1.4 Будова трансформаторів

Основа будь-якого трансформатора – магнітна система (магнітопровід) (magnetic circuit) з обмотками, які утворюють його **активну частину**. Інші частини трансформатора – система охолодження, контролю і захисту та ін. – виконують додаткові функції. Їх називають **неактивними (додатковими)**.

Основними елементами трансформатора (рис. 1.6) є: 1 – активна частина; 2 – бак; 3 – кришка бака; 4 – ввід високої напруги (ВН); 5 – ввід низької напруги (НН); 6 – пробивний запобіжник; 7 – нульовий ввід; 8 – запобіжна (вихлопна) труба; 9 – розширювач; 10 – перемикач; 11 – радіатор; 12 – радіатор з фільтром; 13 – кран плоский; 14 – кран для проби масла; 15 – прокладка; 16 – болт заземлення; 17 – розпірні крюки; 18 – заливна пробка; 19 – термосигналізатор; 20 – повітропідсушувач.

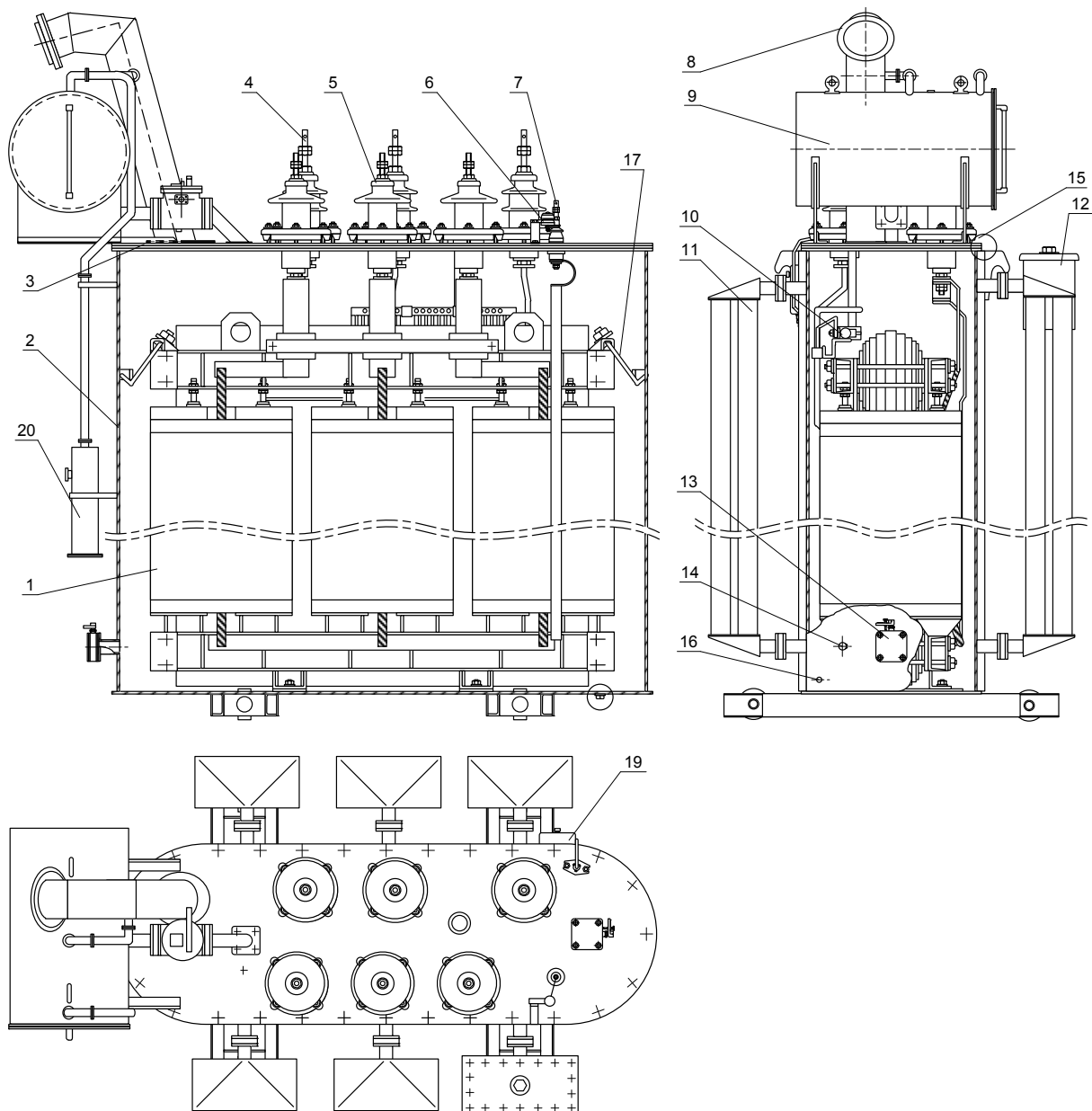


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд трифазного масляного трансформатора типу ТМ-6300/10

1.1.4.1 Магнітопровід

Магнітопровід служить для локалізації в ньому основного магнітного потоку трансформатора і зменшення опору магнітного кола, а також є основою для встановлення і кріплення обмоток, виводів, перемикачів [2, 3].

Магнітопровід має шихтовану конструкцію: він складається з тонких (товщиною 0,3 мм – 0,5 мм) пластин електротехнічної сталі, ізольованих одна від одної (наприклад, лаком). Така будова магнітопроводу обумовлена намаганням послабити вихрові струми, тобто зменшити величину втрат енергії в трансформаторі.

Через велику магнітну проникність сталь має малий магнітний опір, внаслідок чого для створення заданого магнітного потоку трансформатор споживає з мережі незначну реактивну (намагнічувальну) потужність.

Електротехнічна сталь являє собою сплав заліза з кремнієм. При легуванні заліза кремнієм покращуються магнітні та електричні властивості сталі: збільшується максимальна магнітна проникність і зменшуються втрати від вихрових струмів за рахунок збільшення її питомого електричного опору. Проте зі збільшенням вмісту кремнію сталь стає дуже крихкою, тому його вміст практично не перевищує 4,8%. Сталі, які застосовують в трансформаторах, звичайно містять 2,8% – 3,8% кремнію.

В магнітопроводі *стрижневого типу* (рис. 1.7) вертикальні стрижні 1, на яких розміщені обмотки 2, зверху і знизу замкнені ярмами 3. По кожному з стрижні, на яких розміщені обмотки відповідної фази, проходять магнітні потоки: по крайніх стрижнях – потоки $\dot{\Phi}_A$ і $\dot{\Phi}_C$, а в середньому стрижні – потік $\dot{\Phi}_B$.

Магнітопровід *броньового типу* являє собою розгалужену конструкцію зі стрижнями і ярмами, які частково перекривають обмотки (рис. 1.8).

Магнітний потік в стрижні магнітопроводу броньового типу в два рази більший, ніж в ярмах, кожне з яких має переріз, вдвічі менший перерізу стрижня.

Такий тип магнітопроводу використовується лише в радіотрансформаторах.

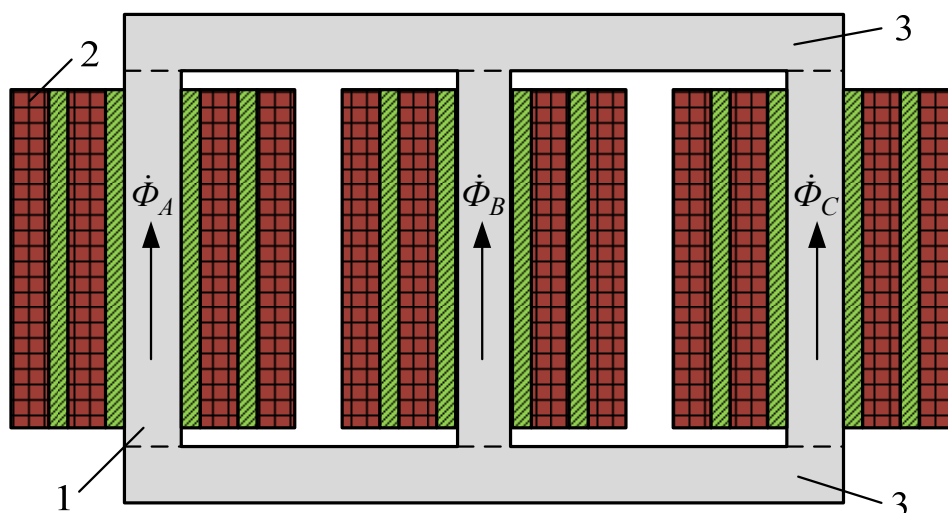


Рисунок 1.7 – Магнітопровід трифазного трансформатора стрижневого типу з обмотками

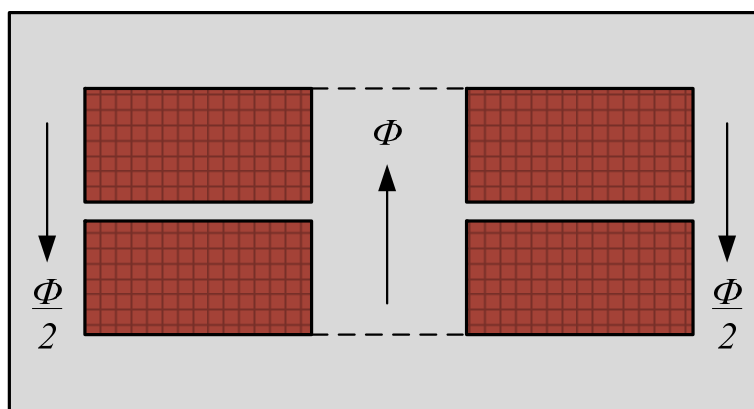


Рисунок 1.8 – Однофазний трансформатор броньового типу

Бронестрижневі конструкції (рис. 1.9) використовуються в трансформаторах великої потужності.

Відомі два способи збирання осердь – впритул або внакладку. За першим способом стрижні і ярма збираються окремо і скріплюються між собою спеціальними стяжними шпильками. Між стрижнями і ярмом ставлять ізолювальні теплостійкі прокладки для того, щоб уникнути замикання через ярма вихрових струмів, які виникають у стрижнях. За другим способом збирання магнітопроводів листи стрижнів і ярм складаються разом із перекриттям стиків. Тепер переважного значення набув другий спосіб. Відповідно до цього розрізняють *стикові* і *шихтовані магнітопроводи*.

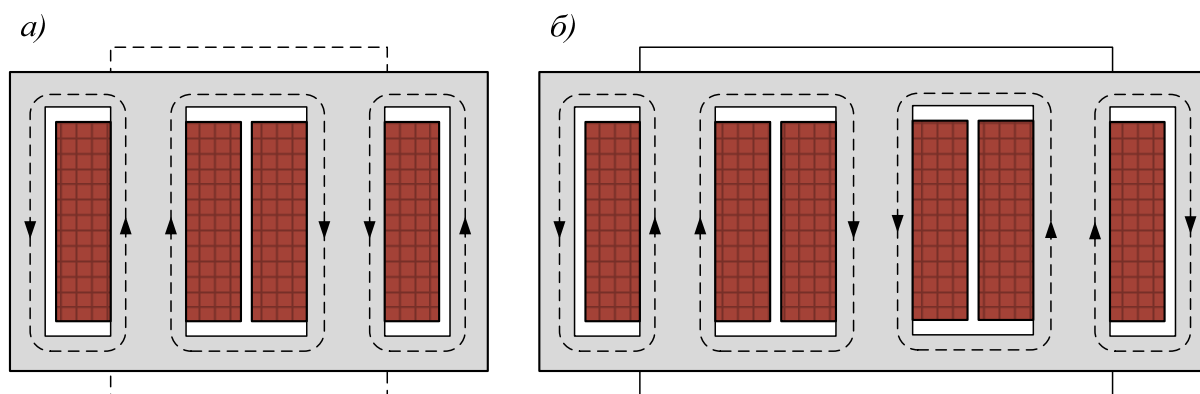


Рисунок 1.9 – Магнітопроводи бронестрижневих трансформаторів:

a) – однофазного; *б)* – трифазного

У поперечному перерізі стрижням надають форму квадрата або, значно частіше, вписаного в коло східчастого багатокутника. Квадратна форма перерізу стрижнів використовується тільки у трансформаторах дуже малої потужності, бо тоді недостатньо використовується площа кола, описаного навколо стрижня. Як правило, кількість сходинок тим більша, чим більша потужність трансформатора і, отже, чим більший діаметр описаного кола. Велика кількість сходинок ускладнює технологію виготовлення трансформатора.

У трансформаторах великої потужності між окремими пакетами сталі роблять вентиляційні канали в напрямі, паралельному площині листа або перпендикулярному до неї. Друга конструкція забезпечує краще відведення тепла, але вона трудніша щодо виконання.

Ярмо стрижневого трансформатора має в перерізі прямокутну або частіше східчасту форму. Щоб зменшити струм холостого ходу і втрати в сталі трансформатора за рахунок додаткових втрат від потоків розсіяння, переріз ярма роблять на 5–15 % більшим від перерізу стрижня.

Магнітопроводи трансформаторів малої потужності (до 1 кВ·А) частіше виготовляють з вузької електротехнічної холоднокатаної сталі шляхом навивання. Такі магнітопроводи роблять розрізними (рис. 1.10), а після насадження обмоток збирають встик і стягують спеціальними хомутами.



Рисунок 1.10 – Стрічковий розрізний трансформатор

1.1.4.2 Обмотка

Обмотка – сукупність витків, що утворюють електричне коло, в якому додаються наведені у цих витках електрорушійні сили (ЕРС) для отримання напруги трансформатора [4].

Обмотки трансформаторів середньої і великої потужності виконують з обмотувальних проводів круглого або прямокутного перерізу. Основою обмотки в більшості випадків є паперово-бакелітовий циліндр, на якому кріпляться елементи, що забезпечують механічну і електричну міцність.

За взаємним розміщенням на стрижні обмотки поділяють на:

- концентричні;
- переміжні.

Концентричні обмотки виконують у вигляді циліндрів, розміщених на стрижні концентрично: ближче до стрижня (що потребує меншу ізоляцію від стрижня) розміщують обмотку НН (low voltage winding), а ззовні – обмотку ВН (high voltage winding).

Концентричні обмотки поділяють на:

1) *циліндричні* одношарові і двошарові обмотки з проводу прямокутного перерізу (рис. 1.11, а). Їх використовують як обмотки НН на номінальний струм до 800 А;

2) *гвинтові* одно- і багатошарові обмотки виконують із декількох паралельних проводів прямокутного перерізу. При цьому витки укладають по гвинтовій лінії, що має один або кілька ходів (мал. 1.11, б). Для того щоб всі паралельні провідники однаково навантажувалися струмом, виконують *транспозицію* (перекладку) цих провідників. При транспозиції

прагнуть, щоб у межах одного витка кожний провідник займав всі положення;

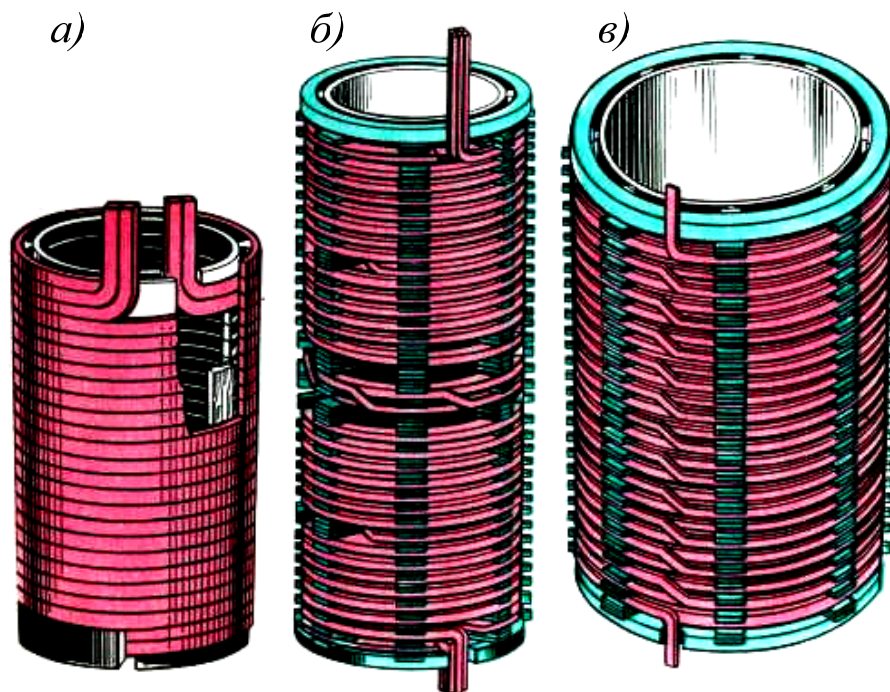


Рисунок 1.11 – Концентричні обмотки

3) *безперервні обмотки* (рис. 1.11, в) складаються з окремих дискових обмоток (секцій), намотаних по спіралі й з'єднаних між собою без пайки, тобто виконаних «неперервно». Якщо обмотка виконується декількома паралельними проводами, то в ній застосовують транспозицію проводів. Безперервні обмотки, незважаючи на деяку складність виготовлення, набули найбільшого застосування в силових трансформаторах як обмотки ВН, так і обмотки НН. Це пояснюється їх великою механічною міцністю й надійністю.

Переміжні (дискові) обмотки виконують у вигляді окремих секцій (дисків), які чергуються за висотою стрижня з таким розрахунком, щоб ближче до ярма знаходилися обмотки НН. Такі обмотки використовуються досить рідко, лише в трансформаторах спеціального призначення.

1.1.4.3 Охолодження

Конструктивне оформлення трансформатора залежить значною мірою від способу його охолодження (cooling). За цією ознакою трансформатори поділяються на:

- 1) сухі з природним або штучним повітряним охолодженням;
- 2) масляні з природним чи штучним повітряним охолодженням масляного бака (з дуттям);
- 3) масляні зі штучною циркуляцією масла і охолодженням його в окремих холодниках з природним або штучним повітряним чи водяним охолодженням.

У сухих трансформаторах з природним охолодженням тепловіддача від трансформатора відбувається в повітря, яке оточує трансформатор. Оскільки коефіцієнт тепловіддачі в повітря невеликий, сухі трансформатори з природним охолодженням зазвичай виготовляються лише малої потужності з напругами, які не перевищують 6-10 кВ.

Переважають масляні трансформатори, розміщені в баці з маслом. Нагріваючись, масло циркулює і забезпечує природне охолодження трансформатора.

1.1.4.4 Вводи

Для виведення назовні кінців від обмоток у трансформаторах, охолодження яких здійснюється маслом або негорючим рідким діелектриком, використовують прохідні порцелянові ізолятори, розташовувані на кришці або на стінці бака. Прокідний ізолятор разом зі струмоведучим стрижнем і кріпильними деталями називають **вводом**.

Вводи трансформаторів, які встановлюються всередині приміщень, мають гладку зовнішню поверхню, а вводи трансформаторів, призначених для зовнішнього устанавлення, комплектують ребрами, число яких залежить від напруги відповідної обмотки трансформатора (рис. 1.12 [5]). При наявності ребер збільшується відстань між струмоведучим стрижнем і корпусом по поверхні ізолятора і зменшується ймовірність поверхневого розряду під час дощу, при попаданні на ізолятор листків і т.ін.



Рисунок 1.12 – Ввод високовольтний

При напругах понад 110 кВ ввод часто виконують збірними – із двох порцелянових ізоляторів (рис. 1.13 [6]). Усередині таке уведення заповнюють маслом, що не повідомляється з маслом, що перебуває в баці трансформатора. Струмоведачий кабель проходить усередині металевій труби, що ізолюють кабельним папером або паперово-бакелітовими циліндрами із установленими в них металевими обкладками з фольги (для вирівнювання електричного поля).



Рисунок 1.13 – Високовольтні вводи 500 кВ блочного трансформатора

У трансформаторах, розрахованих на більші струми, навколо вводу створюється великий магнітний потік, внаслідок чого в кришці бака й кріпильному фланці виникають значні вихрові струми, що нагрівають ці деталі до високої температури. Щоб уникнути цього при великих струмах замість сталевих або чавунних фланців застосовують латунні й у кришці вирізають для них загальний отвір (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Знімний ввід на напругу 20 кВ і струм 8000 А на силовому трансформаторі

Одним із сучасних є ввід з RIP-ізоляцією, яка є продуктом подальшого розвитку конструкції й технології твердої ізоляції. Кістяк стрижнів із RIP-ізоляцією виготовляється намотуванням на трубу кабельного паперу й просочується компаундом (епоксидною смолою) під вакуумом з наступним отвердінням. На верхню частину вводу надіта порцелянова покришка, простір між якою й ізоляційним кістяком заповнено трансформаторним маслом, що є холодоагентом. Температурні зміни об'єму масла компенсуються газовою подушкою. Нижня порцелянова покришка відсутня.

При застосуванні ввідів із RIP-ізоляцією (рис. 1.15) забезпечуються низькі діелектричні втрати й низький рівень часткових розрядів. Крім того, RIP-ізоляція має високу термічну й механічну стійкість. При цьому знижуються витрати на технічне обслуговування й ремонт, а надійність передачі електроенергії підвищується.

Крім зазначених вище властивостей, вводи з RIP-ізоляцією екологічно безпечні, взаємозамінні з вводами попередніх конструкцій, а також зручні при монтажі й експлуатації (через мінімізацію масово-габаритних

характеристик). Вони відповідають ГОСТу 10693-81 і повністю відповідають вимогам Міжнародного стандарту МЭК 137 [7].



Рисунок 1.15 – Вигляд трансформатора з вводами з RIP-ізоляцією

1.2 Робочий процес трансформатора

1.2.1 Принцип дії трансформатора

Розглянемо принцип дії однофазного двообмоткового трансформатора, що складається з замкнутого магнітопроводу Σ , виконаного з феромагнітного матеріалу, на який намотані обмотки 1 та 2 (рис. 1.16).

Первинну обмотку 1 підключають до джерела змінного струму – електричної мережі з напругою u_1 . До *вторинної обмотки* 2 приєднують опір навантаження (load) Z_n .

Обмотку більш високої напруги називають *обмоткою високої напруги* (ВН), а низької напруги – *обмоткою низької напруги* (НН). Початки і кінці обмотки ВН позначають буквами A та X ; обмотки НН – буквами a і x .

Принцип дії трансформатора базується на явищі електромагнітної індукції.

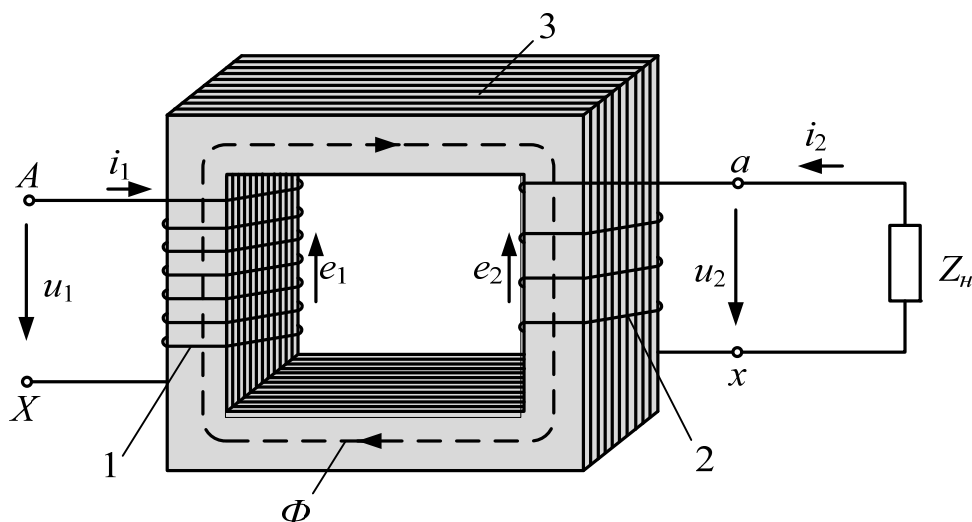


Рисунок 1.16 – Електромагнітна система однофазного трансформатора:
 1 – первинна обмотка; 2 – вторинна обмотка; 3 – магнітопровід

При підключенні трансформатора до мережі в первинній обмотці протікатиме змінний струм i_1 , що створює змінний магнітний потік Φ , який замикається по магнітопроводу. Крім основного магнітного потоку Φ індуються в кожній обмотці *потоки розсіювання* $\Phi_{\sigma 1}$ та $\Phi_{\sigma 2}$ (на рис. 1.16 не показані). Ці потоки не беруть участі в передачі електричної енергії.

Потік Φ індує в обох обмотках змінні ЕРС – e_1 і e_2 , пропорційні, згідно з законом Максвелла, числам витків w_1 і w_2 відповідної обмотки і швидкості зміни потоку $d\Phi/dt$:

– у первинній обмотці *ЕРС самоіндукції*

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1)$$

– у вторинній обмотці *ЕРС взаємоіндукції*

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.2)$$

Діючі значення ЕРС трансформатора можна подати у вигляді [8]:

$$E_j = 4,44 f w_j \Phi, \quad (1.3)$$

$$j = 1, 2.$$

При підключенні навантаження Z_n до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС e_2 в колі цієї обмотки протікатиме струм i_2 , а на виводах вторинної обмотки встановиться напруга u_2 .

Відношення миттєвих і діючих ЕРС в обмотках визначається виразом

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.4)$$

Якщо знехтувати спадами напруги в обмотках трансформатора, що зазвичай не перевищують 3–5% від номінальних значень напруг U_1 і U_2 , і вважати $E_1 \approx U_1$ й $E_2 \approx U_2$, то одержимо

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.5)$$

Відношення ЕРС E_1 первинної обмотки до ЕРС E_2 вторинної обмотки (або відношення їхніх чисел витків) називають *коефіцієнтом трансформації* (transformer factor)

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.6)$$

Для отримання вихідної напруги трансформатора U_2 , меншої за вхідну U_1 , число витків w_2 беруть меншим w_1 . В такому випадку трансформатор є *знижувальним* з $k > 1$. Для отримання $U_2 > U_1$, вибирають $w_2 > w_1$. В такому випадку трансформатор є *підвищувальним* з $k > 1$.

У трансформаторі перетворюються тільки напруги і струми. Потужність при цьому залишається майже незмінною (вона трохи зменшується через внутрішні втрати енергії в трансформаторі). Тому

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.7)$$

При збільшенні вторинної напруги трансформатора в k раз порівняно з первинною, струм i_2 у вторинній обмотці відповідно зменшується в k раз.

Трансформатор може працювати лише в колах змінного струму. Якщо первинну обмотку трансформатора підключити до джерела

постійного струму, то в його магнітопроводі утвориться магнітний потік, постійний у часі за величиною і напрямком. Тому в первинній і вторинній обмотках у сталому режимі не індукується ЕРС, а отже, не передається електрична енергія з первинного кола у вторинне. Такий режим небезпечний для трансформатора, тому що через відсутність ЕРС E_1 у первинній обмотці струм

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad (1.8)$$

досить великий [1].

Номінальну повну потужність можна визначити:

– для однофазного трансформатора як

$$S_{ном} = U_{1л.ном} I_{1л.ном}, \quad (1.9)$$

– для трифазного

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{1л.ном} I_{1л.ном}. \quad (1.10)$$



Приклад 1.1

Задано однофазний трансформатор номінальною потужністю $S_{ном} = 100$ кВ·А, номінальними напругами $U_{1л.ном} = 6$ кВ і $U_{2л.ном} = 0,4$ кВ при частоті $f = 50$ Гц; діюче значення напруги, що припадає на один виток обмоток, $U_{вит} = 5$ В; коефіцієнт заповнення шихтованого стрижня сталлю $k_c = 0,93$; густина струму в провідниках $\Delta = 4$ А/мм²; максимальне значення магнітної індукції в стрижні $B_{см} = 1,4$ Тл.

Визначити: числа витків обмоток трансформатора w_1 і w_2 ; поперечний переріз проводів первинної $s_{неп1}$ і вторинної $s_{неп2}$ обмоток; поперечний переріз стрижня магнітопроводу $s_{неп.см}$.

Розв'язок

Числа витків в обмотках:

$$w_j = \frac{U_{jл.ном}}{U_{вит}}, \quad j = 1, 2;$$

$$w_1 = \frac{6000}{5} = 1200 \text{ (витків);}$$

$$w_2 = \frac{400}{5} = 80 \text{ (витків).}$$

Номінальні значення струмів в обмотках:

$$I_{jл.ном} = \frac{S_{ном}}{U_{jл.ном}}, \quad j = 1, 2;$$

$$I_{1л.ном} = \frac{100}{6} = 16,7 \text{ (A);}$$

$$I_{2л.ном} = \frac{100}{0,4} = 250 \text{ (A).}$$

Поперечний переріз проводів обмоток:

$$s_{пер j} = \frac{I_{jл.ном}}{\Delta}, \quad j = 1, 2;$$

$$s_{пер1} = \frac{16,7}{4} = 4,2 \text{ (мм}^2\text{);}$$

$$s_{пер2} = \frac{250}{4} = 62,5 \text{ (мм}^2\text{).}$$

Припустивши, що $U_{2л.ном} = E_2$, із виразу (1.3) знаходимо значення магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{E_2}{4,44 f w_2};$$

$$\Phi = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 80} = 0,023 \text{ (Вб)}.$$

Поперечний переріз стрижня магнітопроводу:

$$S_{\text{пер.ст}} = \frac{\Phi}{k_c B_{\text{ст}}},$$

$$S_{\text{пер.ст}} = \frac{0,023}{0,93 \cdot 1,4} = 0,02 \text{ (м}^2\text{)}.$$

1.2.2 Ідеалізований трансформатор

Ідеалізований трансформатор (idealized transformer) – це трансформатор, в якому магнітний потік Φ повністю замикається по сталевому магнітопроводу і зчеплений з обома обмотками, а втрати в сталі відсутні.

Якщо на первинну обмотку трансформатора подати синусоїдну напругу $u_1 = U_m \sin \omega t$ (U_m – амплітуда, ω – кругова частота, t – час), по ній протікатиме змінний струм i_1 (рис. 1.17).

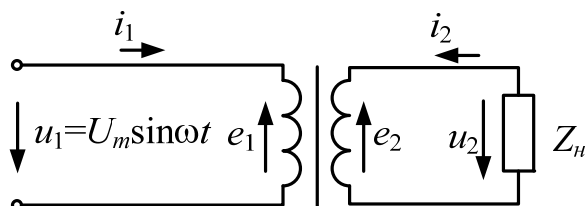


Рисунок 1.17 – Принципова схема однофазного трансформатора

У *режимі холостого ходу* коло вторинної обмотки розімкнуте ($Z_n = \infty$), а тому струм $i_2 = 0$. За таких умов для контуру первинної обмотки ідеалізованого трансформатора (при відсутності втрат в сталі магнітопроводу) буде справедливим співвідношення

$$u_1 = i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.11)$$

З врахуванням того, що ЕРС e_1 первинної обмотки визначається за формулою (1.1), вираз (1.11) можна записати як

$$u_1 + e_1 = i_1 R_1. \quad (1.12)$$

На холостому ході спад напруги в активному опорі первинної обмотки $i_1 R_1$ досить малий, а тому ним можна знехтувати. Тоді вираз (1.12) набуде вигляду

$$u_1 + e_1 = 0, \quad (1.13)$$

з якого випливає що напруга, прикладена до первинної обмотки трансформатора, практично повністю врівноважується індукованою в цій обмотці ЕРС.

Вираз (1.13) в комплексній формі запишеться як

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = 0. \quad (1.14)$$

Виходячи із припущення відсутності насичення в сталі трансформатора, а магнітний потік без розсіювання замикається по сталевому магнітопроводі, можна вважати струм первинної обмотки ідеалізованого трансформатора прямо пропорційним магнітному потокові. Тому в режимі холостого ходу на векторній діаграмі (рис. 1.18, а) вектор *струму холостого ходу* \dot{I}_0 буде збігатися за напрямком з вектором магнітного потоку $\dot{\Phi}$. А відповідно до (1.14) вектори ЕРС \dot{E}_1 і напруги \dot{U}_1 будуть в протифазі (зустрічно направлені). При цьому вектор магнітного потоку $\dot{\Phi}$ випереджає вектор ЕРС на 90° . Вектор ЕРС \dot{E}_2 збігається за фазою з вектором \dot{E}_1 , тому що ЕРС \dot{E}_2 індукується тим самим магнітним потоком, що й \dot{E}_1 .

При роботі під навантаженням для первинної обмотки ідеалізованого трансформатора можна написати рівняння

$$u_1 = w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2), \quad (1.15)$$

де Φ_1 і Φ_2 – потоки, що створюються струмами первинної і вторинної обмоток.

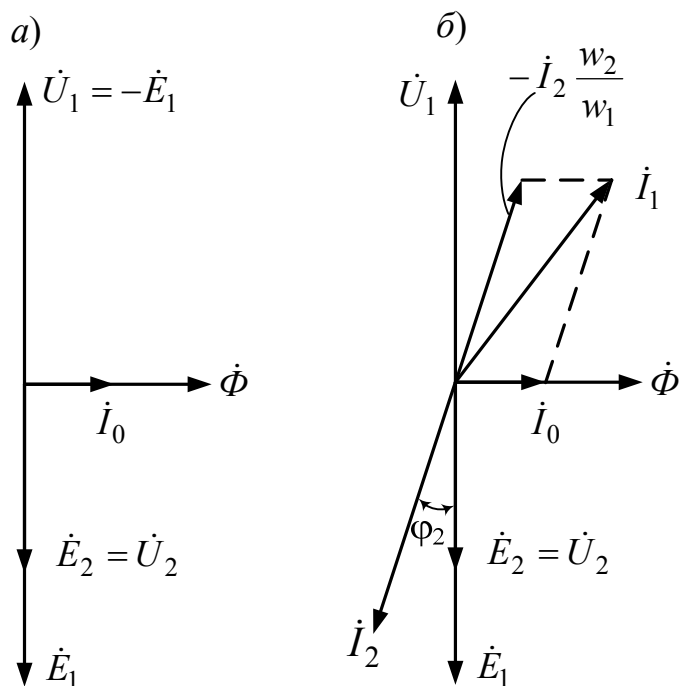


Рисунок 1.18 – Векторні діаграми ідеалізованого трансформатора:
 а) – на холостому ході; б) – під навантаженням

Позначивши

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_1 + \Phi_2), \quad (1.16)$$

отримаємо рівняння (1.13):

$$u_1 + e_1 = 0.$$

Як наслідок – результуючий магнітний потік при навантаженні дорівнює потокові при холостому ході:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0, \quad (1.17)$$

з чого можна зробити висновок: при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження магнітний потік не змінюється, що є важливою властивістю трансформатора.

З цієї властивості випливає закон рівноваги *магніторушійних сил* (МРС) у трансформаторі:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (1.18)$$

де \dot{F}_1 і \dot{F}_2 – МРС, створені первинною і вторинною обмотками трансформатора при навантаженні;

\dot{F}_0 – МРС, створена первинною обмоткою на холостому ході.

З врахуванням того, що

$$\begin{cases} \dot{F}_1 = \sqrt{2} \dot{I}_1 w_1, \\ \dot{F}_2 = \sqrt{2} \dot{I}_2 w_2, \\ \dot{F}_0 = \sqrt{2} \dot{I}_0 w_1, \end{cases} \quad (1.18)$$

отримаємо рівняння струмів:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}, \quad (1.19)$$

або, виділивши навантажувальну складову струму первинної обмотки (*компенсаційний струм*) [1],

$$\dot{I}_{e\tilde{n}} = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.20)$$

Проаналізувавши викладене вище, можна зробити висновок, що МРС, створена струмом $I_{кс}$, дорівнює за величиною і протилежна за фазою МРС вторинної обмотки, тобто компенсує МРС вторинної обмотки. Це обумовлює незмінність магнітного потоку трансформатора.

Векторна діаграма ідеалізованого трансформатора, що працює під навантаженням, показана на рис. 1.18, б) [1]. Її будують в такій послідовності. Спочатку як і для режиму холостого ходу відкладають

вектор магнітного потоку $\dot{\Phi}$ та вектор струму холостого ходу, який збігається з вектором потоку $\dot{\Phi}$, а далі – вектори ЕРС \dot{E}_1 , \dot{E}_2 , які відстають на 90° від вектора $\dot{\Phi}$, вектор напруги \dot{U}_1 , яка випереджає на 90° вектор $\dot{\Phi}$. Від вектора $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ під кутом φ_2 відкладають вектор струму вторинної обмотки \dot{I}_2 , а далі вектор компенсаційного струму $-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$. Вектор первинного струму \dot{I}_1 визначається за правилом паралелограма.

1.2.3 Струм намагнічування і струм холостого ходу

1.2.3.1 Струм намагнічування

Величина і форма струму холостого ходу визначаються магнітним потоком трансформатора і властивостями його магнітної системи. Оскільки напруга живлення трансформатора є синусоїдальною, то і магнітний потік змінюватиметься в часі також за синусоїдальним законом:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (1.21)$$

де Φ_m – амплітуда магнітного потоку.

Оскільки на холостому ході ЕРС практично дорівнює напрузі, то значення магнітного потоку визначається напругою первинної обмотки, її числом витків і частотою.

Властивості магнітної системи трансформатора описуються в основному магнітною характеристикою, що являє собою графічне зображення залежності магнітного потоку Φ від МРС трансформатора F або *струму намагнічування* (magnetization current) I_μ , пропорційного МРС. Внаслідок насичення магнітний потік трансформатора не пропорційний струму намагнічування. Тому при синусоїдальному магнітному потоці Φ струм намагнічування I_μ не є синусоїдальним.

Для графічної ідентифікації струму намагнічування можна скористатися кривою залежності магнітного потоку Φ від струму намагнічування i_μ $\Phi = f(i_\mu)$ та кривою зміни магнітного потоку Φ в часі t $\Phi = f(t)$, розміщеними в першому та другому квадранті, відповідно (рис. 1.19).

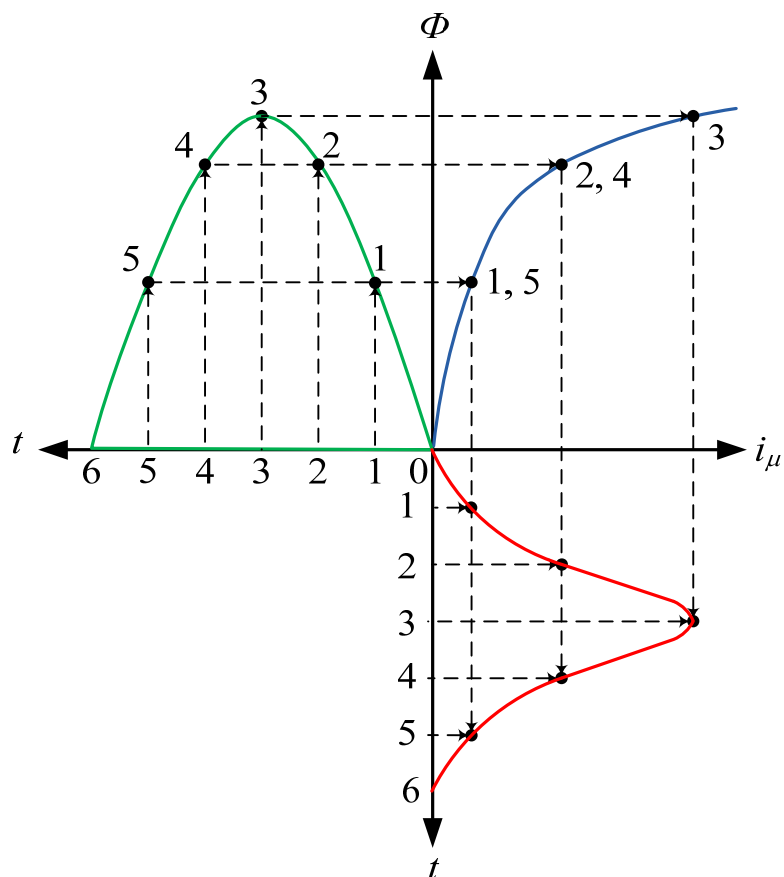


Рисунок 1.19 – Побудова графіка струму намагнічування

Для отримання графіка струму намагнічування $i_{\mu} = f(t)$ необхідно виконати такі операції. На графіці $\Phi = f(t)$ вибирають декілька точок (наприклад, 1 – 6) і відмічають їхні проєкції на кривій намагнічування $\Phi = f(i_{\mu})$ та визначають значення струму намагнічування, що відповідає вибраним значенням магнітного потоку. Далі проводять вертикальні лінії з отриманих точок до перетину з горизонтальними лініями, проведеними з точок часової осі графіка $i_{\mu} = f(t)$, розміщеного в четвертому квадранті. Результатом виконання таких дій отримують геометричне місце точок кривої струму намагнічування $i_{\mu} = f(t)$.

Отримана крива $i_{\mu} = f(t)$ несинусоїдальна, тому що залежність між струмом i_{μ} і потоком Φ нелінійна. Чим більше насичення магнітної системи, тим більше виражена несинусоїдальність струму намагнічування.

Якщо розкласти несинусоїдальну криву струму i_{μ} в гармонічний ряд (рис. 1.20), то можна побачити, що в цьому струмі будуть присутніми лише

непарні гармоніки (1, 3, 5 і т.д.). Вищі гармоніки мають частоту, в ν разів більшу за першу (основну) гармоніку (ν – порядок гармоніки). Найбільше вираженою після першої $i_{\mu(1)}$ буде третя $i_{\mu(3)}$ гармоніка, амплітуда якої складає до 50% амплітуди першої. П'ята $i_{\mu(5)}$ гармоніка має ще меншу амплітуду.

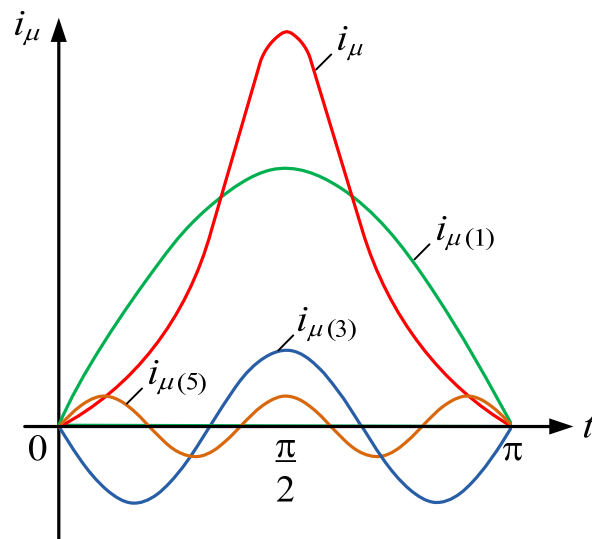


Рисунок 1.20 – Розкладання струму намагнічування в гармонічний ряд

При цьому амплітуда гармонік буде мати більше значення при більшому насиченні магнітопроводу.

Діюче значення струму намагнічування [9]:

$$I_{\mu} = \sqrt{I_{\mu(1)}^2 + I_{\mu(3)}^2 + I_{\mu(5)}^2 + \dots}, \quad (1.22)$$

де $I_{\mu(1)}$, $I_{\mu(3)}$, $I_{\mu(5)}$ – діюче значення відповідно першої, третьої і п'ятої гармоніки струму намагнічування.

1.2.3.2 Активна складова струму холостого ходу

Струм намагнічування I_{μ} є головною складовою струму холостого ходу трансформатора I_0 . Цей струм є реактивним, тобто $I_{\mu} = I_{0p}$. Однак реальний трансформатор у режимі холостого ходу споживає від джерела змінного струму деяку активну потужність, тому що при змінному магнітному потоці в сталевому магнітопроводі виникають втрати енергії від

гістерезису і вихрових струмів (*магнітні втрати* ΔP_m). Тому струм холостого ходу I_0 повинен мати ще й *активну складову*

$$I_{0a} = \frac{\Delta P_m}{U_1}. \quad (1.23)$$

Остання забезпечує надходження в первинну обмотку потужності, що компенсує магнітні втрати (електричними втратами в первинній обмотці в цьому режимі можна знехтувати через досить мале значення струму холостого ходу).

В загальному випадку струм холостого ходу визначається – в комплексній формі:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{0a}; \quad (1.24)$$

– як діюче значення:

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{0a}^2}. \quad (1.25)$$

В основному в трансформаторах звичайного виконання активна складова струму холостого ходу I_{0a} не перевищує 10% струму I_0 . Тому вона практично не впливає на значення струму холостого ходу (змінює його не більше ніж на 1%). Форма кривої струму холостого ходу визначається в основному кривою струму намагнічування [1].

1.2.4 Комплексні рівняння

Реальний трансформатор, на відміну від ідеального, крім основного магнітного потоку Φ , що замикається по сталі, і зчепленого з всіма обмотками трансформатора, має також потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 1.21), які зчеплені лише з однією з обмоток.

Потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ не беруть участь у передачі енергії, але створюють у кожній з обмоток відповідні ЕРС самоіндукції:

$$E_{\sigma j} = 4,44 f w_j \Phi_{\sigma j}, \quad j = 1, 2. \quad (1.26)$$

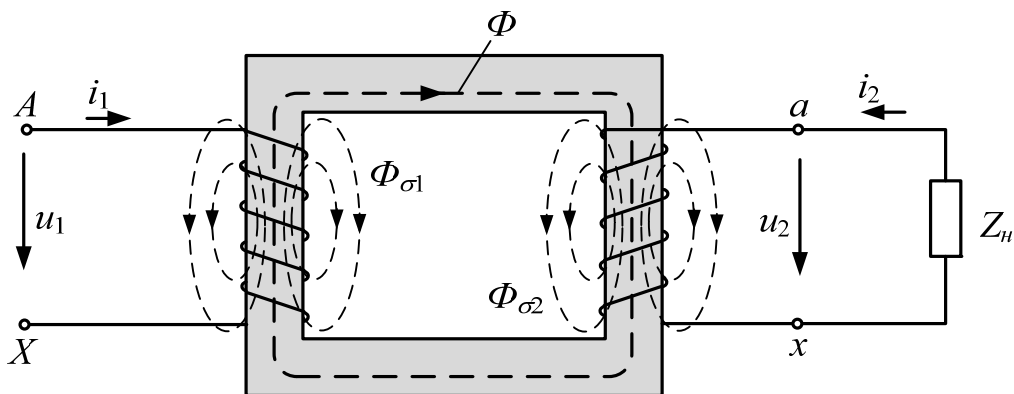


Рисунок 1.21 – Магнітні потоки в однофазному трансформаторі

З врахуванням викладеного, рівняння балансу напруг для первинної обмотки трансформатора (1.12) набуде вигляду:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 R_1. \quad (1.27)$$

За аналогією запишемо рівняння балансу напруг для вторинної обмотки трансформатора:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H, \quad (1.28)$$

де R_2 – активний опір вторинної обмотки;

\underline{Z}_H – комплексний опір навантаження.

Зібравши рівняння балансу напруг первинної (1.27) і вторинної (1.28) обмоток та рівняння струмів (1.19), отримаємо *систему комплексних рівнянь трансформатора*:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_H; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \end{cases} \quad (1.29)$$

ЕРС самоіндукції можна визначити як

$$E_{\sigma 1} = I_1 X_1, \quad (1.30)$$

$$E_{\sigma 2} = I_2 X_2, \quad (1.31)$$

де X_1, X_2 – індуктивні опори відповідних обмоток трансформатора, обумовлені потоками розсіювання.

З врахуванням

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \dot{X}_1, \quad (1.32)$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 \dot{X}_2 \quad (1.33)$$

система (1.29) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 \dot{X}_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 \dot{X}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_i, \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \end{cases} \quad (1.34)$$

Проаналізувавши рівняння (1.32) та (1.33) видно, що ЕРС самоіндукції $\dot{E}_{\sigma 1}$ і $\dot{E}_{\sigma 2}$, породжені відповідними потоками розсіювання, є негативним явищем в процесі роботи трансформатора – вони не беруть участі в передачі енергії з однієї обмотки в іншу.

Повний комплексний опір первинної і вторинної обмоток можна представити як

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 \dot{X}_1; \\ \underline{Z}_2 &= \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 \dot{X}_2. \end{aligned} \quad (1.35)$$

1.2.5 Приведення вторинної обмотки до первинної

У загальному випадку параметри первинної обмотки трансформатора відрізняються від параметрів вторинної обмотки. Ця різниця найбільше відчутна при великих коефіцієнтах трансформації, що утруднює розрахунки й побудову векторних діаграм, тому що в цьому випадку

вектори електричних величин первинної обмотки значно відрізняються по всій довжині від однойменних векторів вторинної обмотки [2].

Зазначені незручності усуваються, якщо реальний трансформатор, який має різну кількість витків у первинній w_1 і вторинній w_2 обмотках, замінити еквівалентним трансформатором, у якого обидві обмотки будуть мати однакові числа витків $w_2 = w_1$. При цьому всі величини, що характеризують вторинне коло трансформатора, – ЕРС, напругу, струм і опори – перераховують на число витків w_1 первинної обмотки.

Таким чином, замість реального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $k = w_1 / w_2$ одержують еквівалентний трансформатор з коефіцієнтом трансформації

$$k = \frac{w_1}{w'_2} = 1, \quad (1.36)$$

де w'_2 – кількість витків вторинної обмотки, приведеної до первинної ($w'_2 = w_1$).

Отриманий у такий спосіб трансформатор називають *приведеним*, як і його величини вторинної обмотки. Однак приведення вторинних параметрів трансформатора не повинно відбитися на його енергетичних показниках: всі потужності й фазові зсуви у вторинній обмотці приведенного трансформатора повинні залишитися такими, як і в реальному трансформаторі.

Тому *електромагнітна потужність вторинної обмотки* реального трансформатора $E_2 I_2$ повинна дорівнювати електромагнітній потужності вторинної обмотки приведенного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2, \quad (1.37)$$

де E'_2 , I'_2 – відповідно ЕРС і струм приведеної вторинної обмотки.

Рівною повинна бути і МРС вторинної обмотки приведенного трансформатора МРС вторинної обмотки реального трансформатора:

$$I'_2 w_1 = I_2 w_2, \quad (1.38)$$

звідки

$$I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}. \quad (1.39)$$

З формули (1.37) врахувавши (1.39) знайдемо приведену вторинну ЕРС:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = kE_2.$$

Оскільки повна потужність вторинної обмотки залишається майже незмінною:

$$U_2 I_2 = U'_2 I'_2, \quad (1.40)$$

то приведена напруга вторинної обмотки:

$$U'_2 = \frac{U_2 I_2}{I'_2} = kU_2. \quad (1.41)$$

Рівними повинні бути і втрати у вторинній обмотці цих трансформаторів:

$$I_2^2 R_2 = I'^2_2 R'_2, \quad (1.42)$$

де R'_2 – приведений активний опір вторинної обмотки:

$$R'_2 = R_2 \frac{I_2^2}{I'^2_2} = k^2 R_2. \quad (1.43)$$

Приведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки X'_2 визначають із умови рівності реактивних потужностей:

$$I_2^2 X_2 = I'^2_2 X'_2, \quad (1.44)$$

звідки

$$X'_2 = X_2 \frac{I_2^2}{I'^2_2} = k^2 X_2. \quad (1.45)$$

Тоді приведений повний опір вторинної обмотки трансформатора

$$Z'_2 = k^2 Z_2. \quad (1.46)$$

Приведений повний опір навантаження за аналогією з (1.46):

$$Z'_i = k^2 Z_i. \quad (1.47)$$

З врахуванням викладеного рівняння напруг і струмів для приведенного трансформатора мають вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (1.48)$$

Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора на всьому діапазоні навантажень від режиму холостого ходу до номінального.

1.2.6 Векторна діаграма

Векторна діаграма – графічна інтерпретація основних рівнянь (1.48) приведенного трансформатора.

Побудову діаграми (рис. 1.22) потрібно починати з вектора основного магнітного потоку $\dot{\Phi}$.

Вектор струму \dot{I}_0 випереджає за фазою вектор потоку $\dot{\Phi}$ на кут δ , а ЕРС \dot{E}_1 і \dot{E}'_2 відстають від цього вектора на кут 90° . Далі будуємо вектор \dot{I}'_2 . Для визначення кута зсуву фаз між \dot{E}'_2 і \dot{I}'_2 потрібно знати характер навантаження.

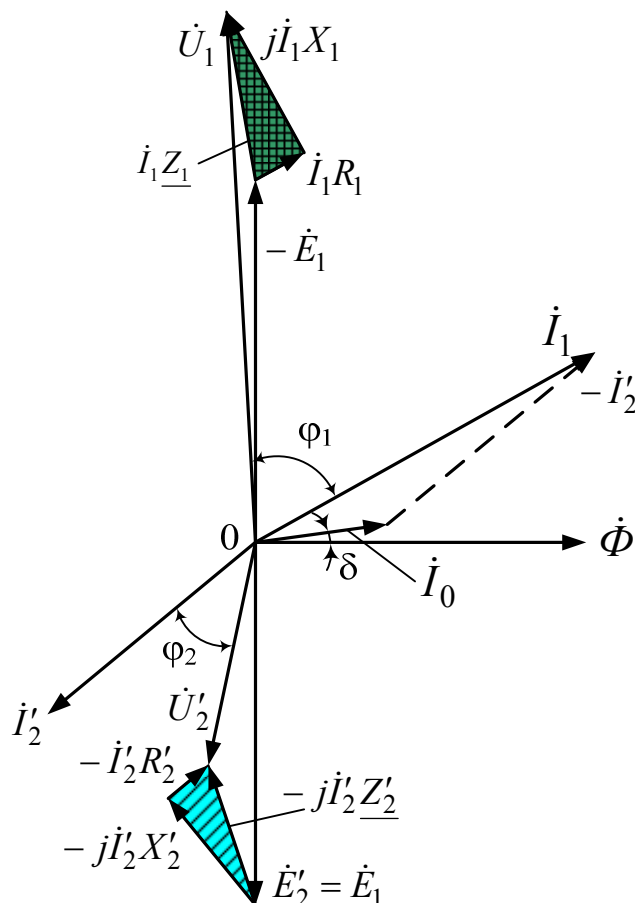


Рисунок 1.22 – Векторна діаграма трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

1.2.6.1 Векторна діаграма при активно-індуктивному навантаженні

При активно-індуктивному навантаженні вектор \dot{I}'_2 відстає за фазою від \dot{E}'_2 на кут

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'_n}{R'_2 + R'_n}, \quad (1.49)$$

де X'_n, R'_n – приведені реактивний та активний опори навантаження, відповідно.

З кінця вектора \dot{E}'_2 опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму \dot{I}'_2 і відкладаємо на ньому вектор $-j\dot{I}'_2 X'_2$. Потім проводимо пряму, паралельну \dot{I}'_2 , і на ній відкладаємо вектор $-j\dot{I}'_2 R'_2$. Побудувавши вектор

– $j\dot{I}'_2 Z'_2$, одержимо трикутник внутрішніх спадів напруги у вторинному колі.

З точки 0 проводимо вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, який випереджає за фазою струм \dot{I}'_2 на кут φ_2 .

Вектор первинного струму будуюмо як векторну суму: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2$.

Побудуємо вектор

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1, \quad (1.50)$$

для чого до вектора $-\dot{E}_1$, який випереджає за фазою вектор потоку \dot{O} на 90° , додаємо вектори внутрішніх спадів напруги первинної обмотки: вектор $\dot{I}_1 R_1$, паралельний струму \dot{I}_1 , і вектор $j\dot{I}_1 X_1$, який випереджає вектор струму \dot{I}_1 на кут 90° . З'єднавши точку 0 з кінцем вектора $\dot{I}_1 Z_1$, одержимо вектор \dot{U}_1 , який випереджає за фазою вектор струму \dot{I}_1 на кут φ_1 .

1.2.6.2 Векторна діаграма при активно-ємнісному навантаженні

У випадку активно-ємнісного навантаження векторна діаграма трансформатора має вигляд, показаний на рис. 1.23. Порядок побудови діаграми залишається таким самим, але вигляд її трохи змінюється.

Струм \dot{I}'_2 у цьому випадку випереджає за фазою ЕРС \dot{E}'_2 на кут

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X'_2 - X'_H}{R'_2 + R'_H}. \quad (1.51)$$

1.2.7 Схема заміщення трансформатора

В трансформаторах зв'язок між первинною й вторинною обмотками магнітна. При розрахунку режимів роботи й характеристик зручно магнітний зв'язок замінити електричним [9]. У цьому випадку дослідження роботи спрощується й зводиться до розрахунків порівняно простого електричного кола.

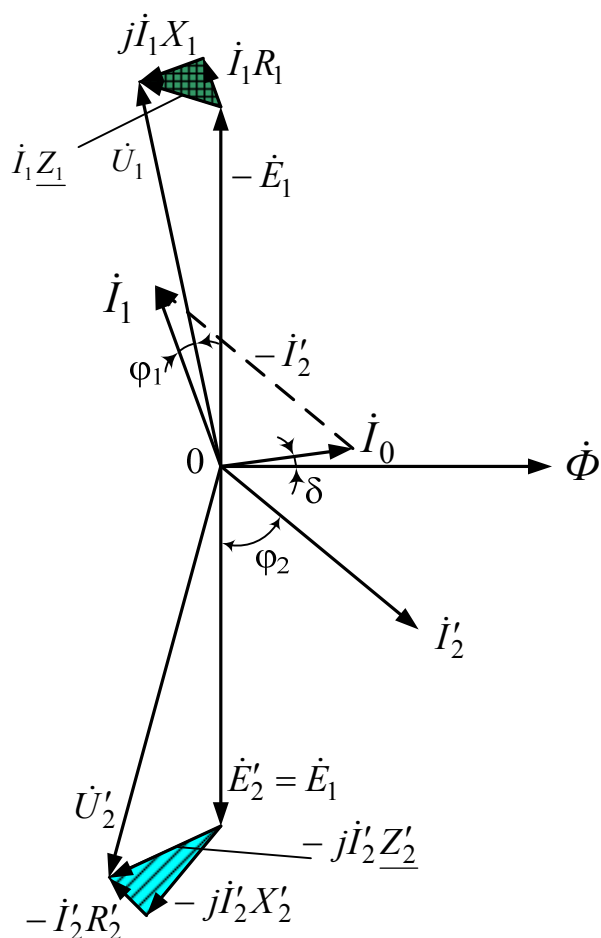


Рисунок 1.23 – Векторна діаграма трансформатора при активно-ємнісному навантаженні

Електрична схема, у якій магнітний зв'язок між обмотками трансформатора замінений електричним, називається **схемою заміщення** (replacement scheme).

Структура цієї схеми вибирається таким чином, щоб їй відповідали рівняння (1.48), які описують робочий процес у трансформаторі.

Систему (1.48) можна звести до одного рівняння, якщо врахувати, що $E_1 = kE_2$, і взяти

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 \underline{Z}_m = \dot{I}_0 (R_m + jX_m), \quad (1.52)$$

де \underline{Z}_m – повний опір кола намагнічування;

R_m , X_m – активний та індуктивний опори кола намагнічування, відповідно.

Опори R_m і X_m потрібно вибрати так, щоб у режимі холостого ходу, коли ЕРС E_1 практично дорівнює номінальній напрузі U_1 , струм

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}_1}{R_m + jX_m} = \frac{\dot{E}_1}{\underline{Z}_m} \quad (1.53)$$

за модулем дорівнював би діючому значенню струму холостого ходу, а потужність

$$I_0 E_1 \cos \varphi_0 = I_0 R_m^2 \quad (1.54)$$

дорівнювала б потужності, що забирається трансформатором з мережі на холостому ході.

Розв'язавши систему (1.48) відносно первинного струму, отримаємо:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m (k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2)}{\underline{Z}_m + k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2}} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{екв}}, \quad (1.55)$$

де $\underline{Z}_{екв}$ – *еквівалентний опір схеми заміщення*:

$$\underline{Z}_{екв} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m (k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2)}{\underline{Z}_m + k^2 \underline{Z}'_H + k^2 \underline{Z}'_2}. \quad (1.56)$$

З еквівалентної схеми приведенного трансформатора (рис. 1.24), видно, що точки A і a , а також точки X і x мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати вказані точки, отримавши *T-подібну схему заміщення приведенного трансформатора* (рис. 1.25).

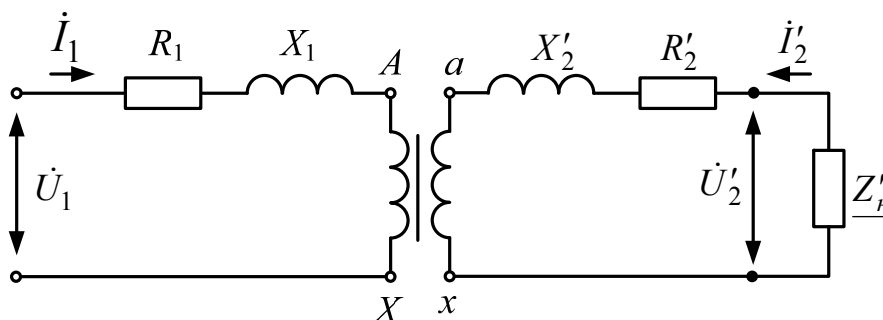


Рисунок 1.24 – Еквівалентна схема приведенного трансформатора

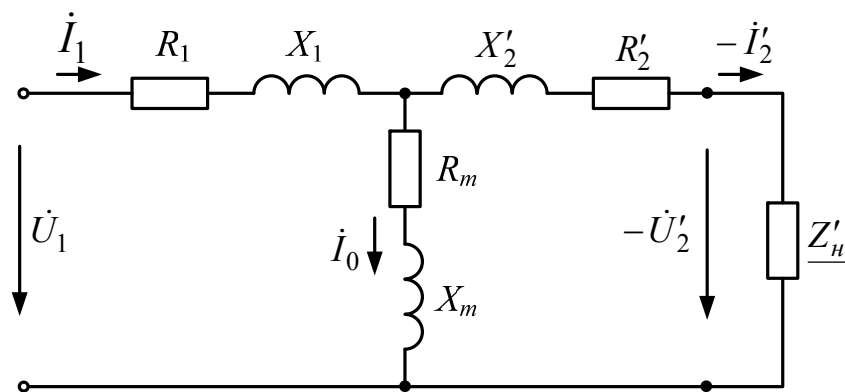


Рисунок 1.25 – Схема заміщення приведенного трансформатора

Параметри схеми заміщення для будь-якого трансформатора можна визначити за даними дослідів холостого ходу і короткого замикання.

1.2.8 Дослід холостого ходу

Холостий хід (idling) – режим роботи трансформатора при розімкнутій вторинній обмотці ($Z_H = \infty$, $I_2 = 0$).

Для такого режиму система рівнянь (1.48) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0. \end{cases} \quad (1.57)$$

Корисна потужність при роботі трансформатора на холостому ході дорівнює нулю, а вхідна (споживана) потужність холостого ходу P_0 витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі Δp_m (втрати на гістерезис та вихрові струми) і електричні втрати в міді $I_0^2 R_1$ (втрати на нагрівання проводу при протіканні по ньому струму) первинної обмотки.

Оскільки струм холостого ходу має невелике значення відносно номінального (2 – 10% від $I_{1ном}$), то електричними втратами можна знехтувати і вважати, що вся споживана потужність в режимі холостого ходу є потужністю магнітних втрат в сталі магнітопроводу.

Схема для проведення дослідів холостого ходу однофазного трансформатора показана на рис. 1.26, а), а трифазного – на рис. 1.26, б).

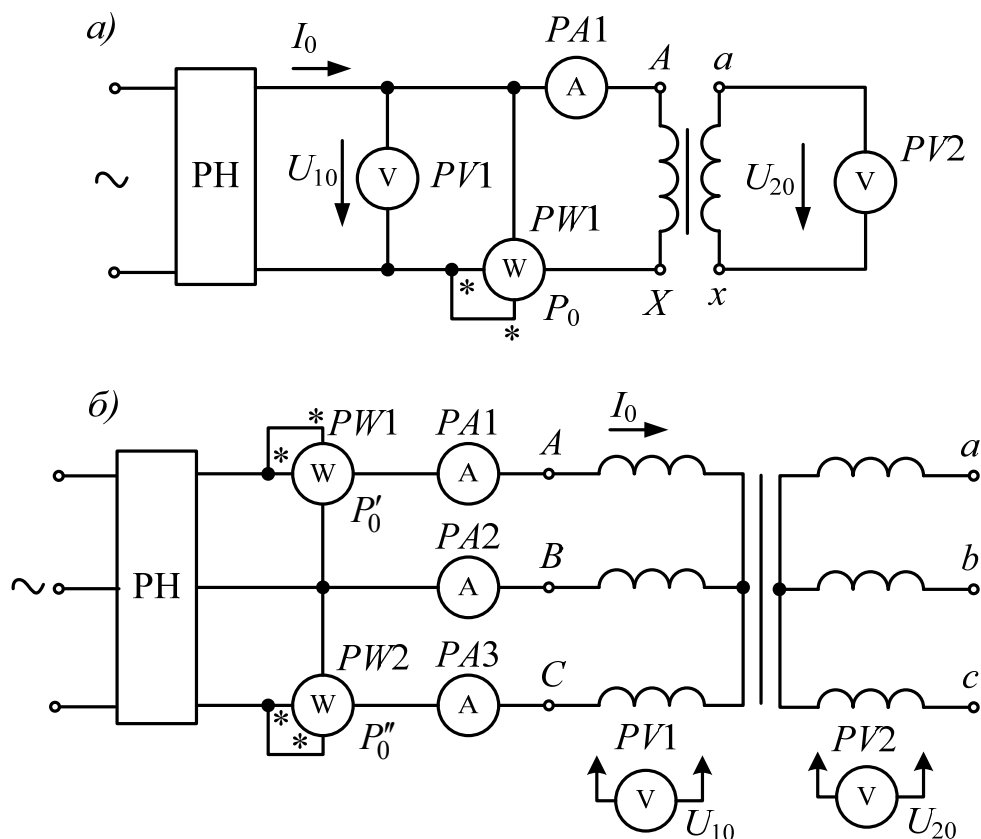


Рисунок 1.26 – Схеми дослідження холостого ходу трансформаторів однофазного (а) і трифазного (б)

До первинної обмотки трансформатора напругу подають через регулятор напруги (РН), який може змінювати напругу в діапазоні від 0 до $1,2 U_{1ном}$. Через однакові проміжки струму холостого ходу знімають покази приладів, на підставі чого будують *характеристики холостого ходу*: залежності струму холостого ходу I_0 , потужності холостого ходу P_0 , коефіцієнта потужності холостого ходу $\cos\varphi_0$ від первинної напруги U_1 (рис. 1.27).

Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу набуде вигляду, показаного на рисунку 1.28.

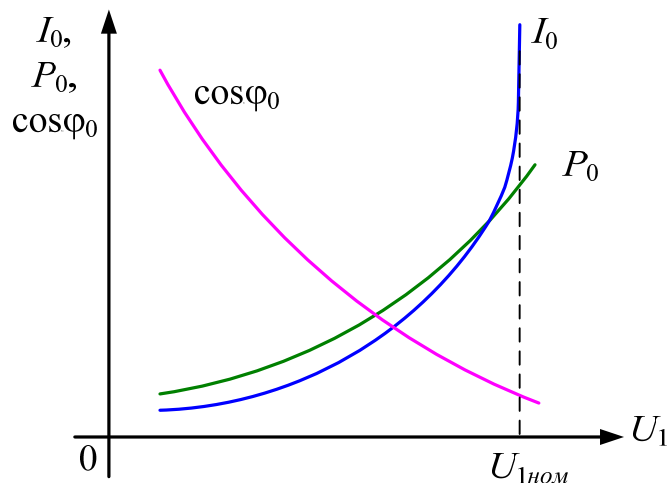


Рисунок 1.27 – Характеристики холостого ходу трансформатора

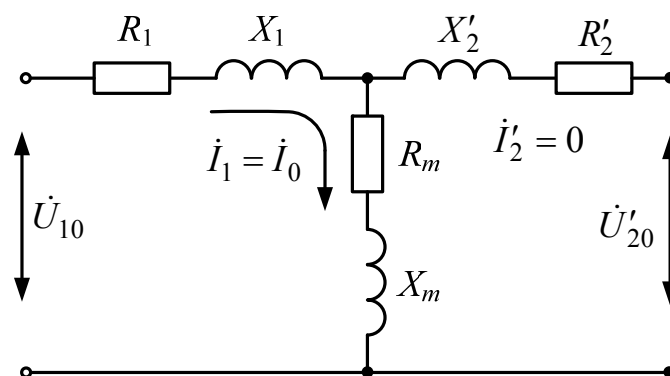


Рисунок 1.28 – Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Вимірявши струм холостого ходу I_0 і потужність P_0 , споживану трансформатором, відповідно до схеми заміщення (рис. 1.26, а) знаходимо

$$\begin{cases} Z_1 + Z_m = \frac{U_{10}}{I_0}; \\ R_1 + R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \\ X_1 + X_m = \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2}. \end{cases} \quad (1.58)$$

Для трифазного трансформатора (рис. 1.26, б) струм I_0 і напруга холостого ходу U_{10} визначаються за відповідними середніми фазними значеннями для трьох фаз:

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}; \quad (1.59)$$

$$U_{10} = \frac{U_{10A} + U_{10B} + U_{10C}}{3}, \quad (1.60)$$

де I_{0A}, I_{0B}, I_{0C} – струми у відповідних фазах трансформатора;

$U_{10A}, U_{10B}, U_{10C}$ – напруги відповідних фаз трансформатора.

Потужність холостого ходу трифазного трансформатора визначається за показами двох ватметрів:

$$P_0 = P_0' \pm P_0'', \quad (1.61)$$

де P_0', P_0'' – покази відповідно першого і другого ватметра в режимі холостого ходу.

Нехтуючи електричними втратами через невелике значення струму холостого ходу, отримаємо з другого рівняння (1.58) вираз для визначення активного магнітного опору трансформатора:

– для однофазного трансформатора

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad (1.62)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad (1.63)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в трикутник визначається за формулою (1.62).

Аналогічно вважають, що $X_1 + X_m \approx X_m$, оскільки опір X_m визначається основним потоком трансформатора Φ , а X_1 – потоком розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$, що у багато разів менший Φ . Тому з великим ступенем точності вважають, що

– для однофазного трансформатора

$$Z_m = \frac{U_{10}}{I_0}; \quad (1.64)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$Z_m = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0}; \quad (1.65)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в трикутник

$$Z_m = \frac{\sqrt{3}U_{10}}{I_0}, \quad (1.66)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (1.67)$$

Вимірявши напруги холостого ходу первинної U_{10} і вторинної U_{20} обмоток, визначають коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (1.68)$$

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10}I_0}, \quad (1.69)$$

а для трифазного трансформатора –

$$\cos \varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_0}. \quad (1.70)$$

1.2.9 Дослід короткого замикання

Коротке замикання (short circuit) *трансформатора* – це такий режим, коли вторинна обмотка замкнута накоротко ($Z_n = 0$, $U_2 = 0$), а до первинної за допомогою РН (рис. 1.29) підводять знижену напругу $U_{к.ном}$

такого значення, при якому струми короткого замикання в обмотках трансформатора стають рівними номінальним струмам в первинній ($I_{1к} = I_{1ном}$) і вторинній ($I_{2к} = I_{2ном}$) обмотках.

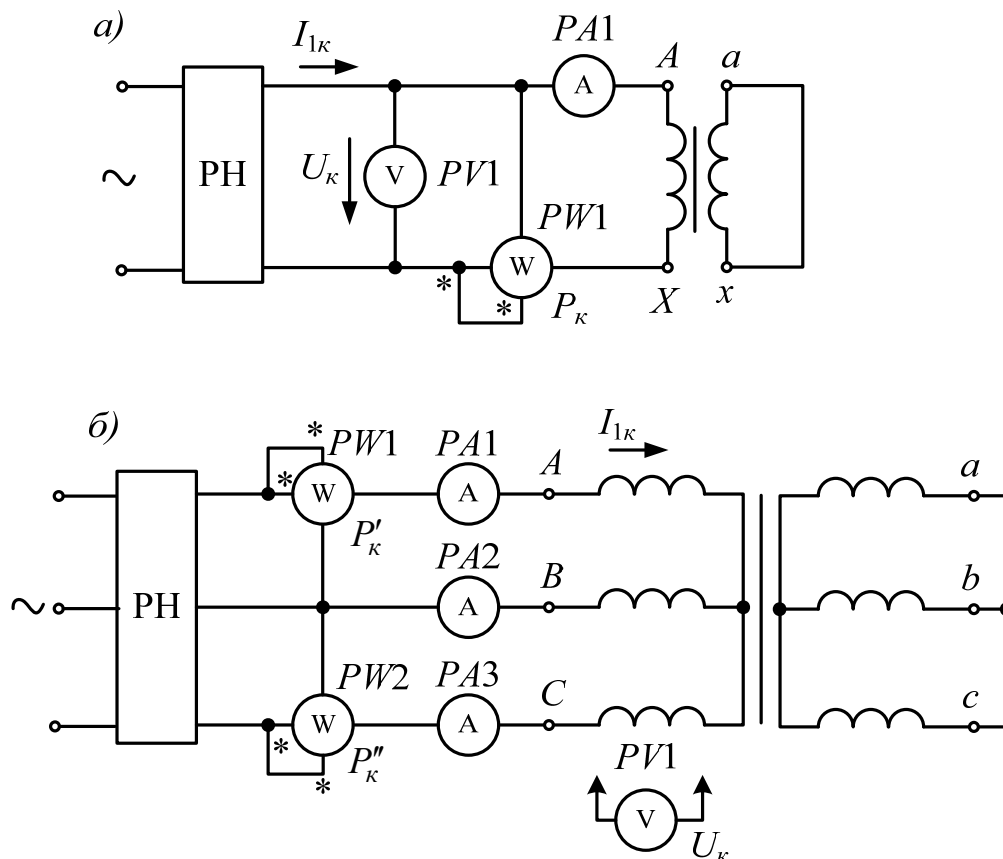


Рисунок 1.29 – Схеми дослідів короткого замикання трансформаторів однофазного (а) і трифазного (б)

У потужних силових трансформаторах напруга U_k при короткому замиканні зазвичай складає 5-15% від номінальної напруги трансформатора. У трансформаторах малої потужності напруга U_k може досягати 25-50% від $U_{ном}$.

Оскільки потік, що замикається по сталевому магнітопроводі, залежить від напруги, прикладеної до первинної обмотки трансформатора, а магнітні втрати в сталі пропорційні квадрату індукції, тобто квадрату магнітного потоку, то через мале значення U_k зневажають магнітними втратами в сталі і струмом холостого ходу. При цьому з загальної схеми заміщення

трансформатора виключають опори кола намагнічування ($R_m = 0$ і $X_m = 0$) і перетворюють її в схему, показану на рис. 1.30.

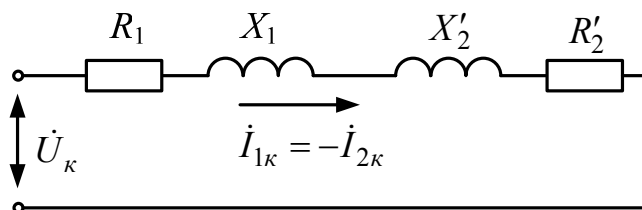


Рисунок 1.30 – Схема заміщення трансформатора в режимі короткого замикання

Для цієї схеми заміщення система рівнянь (1.48) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U}_k = \dot{I}_{1k}(R_1 + R_2') + j\dot{I}_{1k}(X_1 + X_2'); \\ \dot{I}_{1k} = -\dot{I}_{2k}'. \end{cases} \quad (1.71)$$

Перше рівняння системи (1.71) можна переписати у вигляді:

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{1k}R_k + j\dot{I}_{1k}X_k, \quad (1.72)$$

де R_k , X_k – активний та реактивний опори короткого замикання трансформатора.

Тоді повний опір короткого замикання

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}. \quad (1.73)$$

Для однофазного трансформатора дослід проводять за схемою рис. 1.29, а), а для трифазного трансформатора – за схемою рис. 1.29, б), для якої напругу короткого замикання та струм короткого замикання визначають як середні для трьох фаз:

$$U_k = \frac{U_{kA} + U_{kB} + U_{kC}}{3}; \quad (1.74)$$

$$I_{1\kappa} = \frac{I_{\kappa A} + I_{\kappa B} + I_{\kappa C}}{3}; \quad (1.75)$$

де $U_{\kappa A}$, $U_{\kappa B}$, $U_{\kappa C}$ – напруги короткого замикання відповідних фаз трансформатора;

$I_{\kappa A}$, $I_{\kappa B}$, $I_{\kappa C}$ – струми у відповідних фазах трансформатора.

Потужність короткого замикання, виміряну методом двох ватметрів для трифазного трансформатора (рис. 1.29, б), визначають як

$$P_{\kappa} = P'_{\kappa} + P''_{\kappa}, \quad (1.76)$$

де P'_{κ} , P''_{κ} – покази відповідно першого і другого ватметра в режимі короткого замикання.

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора:

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{U_{\kappa} I_{1\kappa}}, \quad (1.77)$$

а для трифазного трансформатора –

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{3} U_{\kappa} I_{1\kappa}}. \quad (1.78)$$

Параметри схеми заміщення (1.30) визначають з таких співвідношень:

– для однофазного трансформатора

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = Z_1 + Z'_2 = \frac{U_{1\kappa}}{I_{1\kappa}}; \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1\kappa}^2} = Z_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa}; \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \end{cases} \quad (1.79)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = \frac{U_{1\kappa}}{\sqrt{3}I_{1\kappa}}; \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{1\kappa}^2}; \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}, \end{cases} \quad (1.80)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в трикутник

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = \frac{\sqrt{3}U_{1\kappa}}{I_{1\kappa}}; \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1\kappa}^2}; \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \end{cases} \quad (1.81)$$

Розділити Z_{κ} на складові Z_1 і Z'_k досить важко. Здебільшого приймають схему заміщення симетричною, припускаючи

$$Z_1 + Z'_2 = \frac{1}{2} Z_{\kappa}. \quad (1.82)$$

Це припущення близьке до дійсності і не вносить відчутних похибок у розрахунки.

За даними досліду короткого замикання будують *характеристики короткого замикання*: залежності струму короткого замикання $I_{1\kappa}$, потужності короткого замикання P_{κ} і коефіцієнта потужності $\cos\varphi_{\kappa}$ від напруги короткого замикання U_{κ} (рис. 1.31).

Напруга, при якій струми в обмотках трансформатора рівні номінальним значенням, називають *напругою короткого замикання*. Її часто виражають у відсотках від номінальної напруги:

$$U_{к.ном} \% = \frac{I_{1к} Z_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100 = \frac{U_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1.83)$$

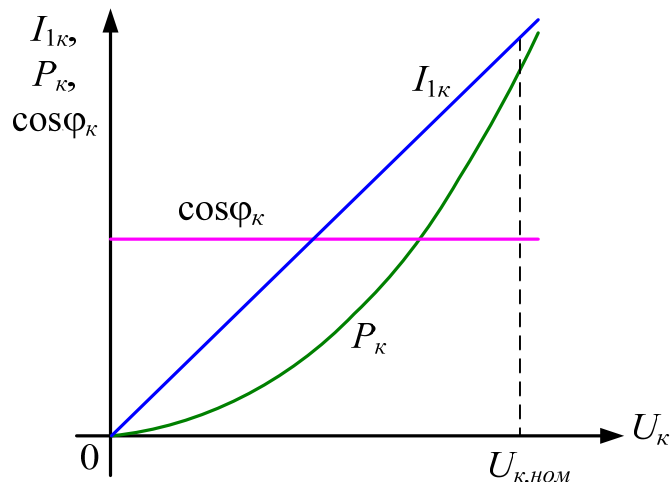


Рисунок 1.31 – Характеристики короткого замикання трансформатора

Аналогічно можна виразити відносні значення його активної і реактивної складових (y %):

$$U_{к.а.ном} \% = \frac{I_{1к} R_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100; \quad (1.84)$$

$$U_{к.р.ном} \% = \frac{I_{1к} X_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1.85)$$

При цьому

$$\begin{cases} U_{к.а.ном} \% = U_{к.ном} \% \cos \varphi_{к}; \\ U_{к.р.ном} \% = U_{к.ном} \% \sin \varphi_{к}; \\ U_{к.ном} \% = \sqrt{U_{к.а.ном}^2 \% + U_{к.р.ном}^2 \%}. \end{cases} \quad (1.86)$$

За відомим значенням $U_{к.ном} \%$ можна визначити сталий струм короткого замикання в реальних умовах експлуатації (при номінальній напрузі):

$$I_{1к} = \frac{U_{1ном}}{Z_k} = \frac{U_{1ном}}{U_{к.ном} \% / 100 I_{1к}} = 100 \frac{I_{1к}}{U_{к.ном} \%}. \quad (1.87)$$

Потрібно пам'ятати, що у формулах (1.83) – (1.87) потрібно брати струм короткого замикання $I_{1к} = I_{1ном}$, а опори короткого замикання повинні бути приведеними до робочої температури обмоток.

З розглянутого вище можна зробити висновок про те, що при досліді короткого замикання основний магнітний потік Φ складає лише декілька відсотків в порівнянні з його значенням при номінальній первинній напрузі. Тому магнітними втратами в цьому випадку можна знехтувати. За таких умов потужність короткого замикання P_k , що споживається з мережі, в режимі короткого замикання витрачається на компенсацію електричних втрат в обмотках:

$$P_k = I_{1к}^2 R_1 + I_{2к}^2 R_2'. \quad (1.88)$$



Приклад 1.2

Визначити активні й індуктивні опори трифазного трансформатора, у якого $S_{ном} = 25$ кВ·А, $U_{1ном} = 10$ кВ, $U_{2ном} = 0,4$ кВ, втрати холостого ходу $P_0 = 125$ Вт, втрати короткого замикання $P_{кз} = 690$ Вт, $U_{к.ном} \% = 4,7\%$, $I_0 = 0,032I_{1ном}$, $f = 50$ Гц, з'єднання обмоток У/У_н-0 [10].

Розв'язок

Номінальний струму первинної обмотки:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}}, \quad I_{1ном} = \frac{25}{\sqrt{3} \cdot 10} = 1,45 \text{ (А)}.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазна напруга короткого замикання:

$$U_{к.ф} = \frac{U_{к.ном\%} U_{1ном}}{\sqrt{3} \cdot 100}, \quad U_{к.ф} = \frac{4,7 \cdot 10000}{\sqrt{3} \cdot 100} = 271 \text{ (В)}.$$

Повний опір короткого замикання:

$$Z_{к} = \frac{U_{к.ф}}{I_{1ном}}, \quad Z_{к} = \frac{271}{1,45} = 187 \text{ (Ом)}.$$

Активний опір короткого замикання:

$$R_{к} = \frac{P_{к}}{3I_{1ном}^2}, \quad R_{к} = \frac{690}{3 \cdot 1,45^2} = 109 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{к} = \sqrt{Z_{к}^2 - R_{к}^2}, \quad X_{к} = \sqrt{187^2 - 109^2} = 152 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт потужності короткого замикання:

$$\cos \varphi_{к} = \frac{R_{к}}{Z_{к}}, \quad \cos \varphi_{к} = \frac{109}{187} = 0,584.$$

Активні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{к}}{2}, \quad R_1 = R'_2 = \frac{109}{2} = 54,5 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивні опори первинної і приведені вторинної обмоток:

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{к}}{2}, \quad X_1 = X'_2 = \frac{152}{2} = 76 \text{ (Ом)}.$$

Опори вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2}, \quad R_2 = \frac{54,5}{25^2} = 0,0873 \text{ (Ом)};$$

$$X_2 = \frac{X'_2}{k^2}, \quad X_2 = \frac{76}{25^2} = 0,1215 \text{ (Ом)}.$$

Струм холостого ходу:

$$I_0 = 0,032 \cdot I_{1ном}, \quad I_0 = 0,032 \cdot 1,45 = 0,0464 \text{ (А)}.$$

Опори кола намагнічування:

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad R_m = \frac{125}{3 \cdot 0,0464^2} = 19,3 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$Z_m = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}I_0}, \quad Z_m = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 0,0464} = 124,5 \cdot 10^3 \text{ (Ом)};$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2},$$

$$X_m = \sqrt{(124,5 \cdot 10^3)^2 - (19,3 \cdot 10^3)^2} = 122 \cdot 10^3 \text{ (Ом)}.$$

1.2.10 Зміна напруги трансформатора

Зміна напруги (voltage change) трансформатора – арифметична різниця між вторинною напругою трансформатора на холостому ході і при навантаженні, коли первинна напруга постійна і рівна номінальній і частота струму також постійна і рівна номінальній:

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = U'_{20} - U'_2. \quad (1.89)$$

Часто її виражають у відносних одиницях:

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100. \quad (1.90)$$

Зміна напруги є важливою експлуатаційною характеристикою трансформатора.

Визначення зміни напруги можна здійснювати або з використанням векторної діаграми, або аналітичним методом, використовуючи формулу.

Перший спосіб є незручним через те, що зміна напруги є незначною за величиною, а крім того, графічні побудови вносять додаткову похибку.

Оскільки на холостому ході відсутні спади напруг в обмотках трансформатора, то $U'_{20} = U_1$, і при номінальному значення $U_1 = U_{1ном}$. Тоді

$$\Delta U_{2\%} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1.91)$$

Інший вираз для визначення відносного спаду напруги (voltage drop) [10]:

$$\Delta U_{2\%} = \frac{100I_1}{U_{1ном}} (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2). \quad (1.92)$$

При номінальному навантаженні формула (1.92) набуде вигляду:

$$\Delta U_{2ном\%} = \frac{100I_{1ном}}{U_{1ном}} (R_k \cos \varphi_{2н} + X_k \sin \varphi_{2н}) \quad (1.93)$$

або

$$\Delta U_{2ном\%} = U_{к.а.ном\%} \cos \varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin \varphi_{2н}. \quad (1.94)$$

З (1.94) випливає, що зміна напруги трансформатора пропорційна струму навантаження $I'_2 = I_1$ і залежить від кута φ_2 . Тому, використовуючи поняття коефіцієнта навантаження (load factor)

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}} = \frac{I_1}{I_{1ном}}, \quad (1.95)$$

одержуємо [1, 9]:

$$\Delta U_{2\%} = \beta \Delta U_{2ном\%} = \beta (U_{к.а.ном\%} \cos \varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin \varphi_{2н}) \quad (1.96)$$

Точніша формула, використовувана для силових трансформаторів, має вигляд [1]:

$$\Delta U_{2\%} = \beta(U_{к.а.ном\%} \cos\varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin\varphi_{2н}) + \frac{\beta^2(U_{к.р.ном\%} \cos\varphi_{2н} - U_{к.а.ном\%} \sin\varphi_{2н})^2}{200}. \quad (1.97)$$

Однак і формула (1.96) дає результат, точність якого повністю прийнятна в більшості випадків, що зустрічаються на практиці.

Графік залежності зміни напруги від коефіцієнта навантаження $\Delta U_2 = f(\beta)$ показаний на рис. 1.32, а). Вона має майже прямолінійний характер, тобто зміна напруги прямо пропорційна струму вторинної обмотки.

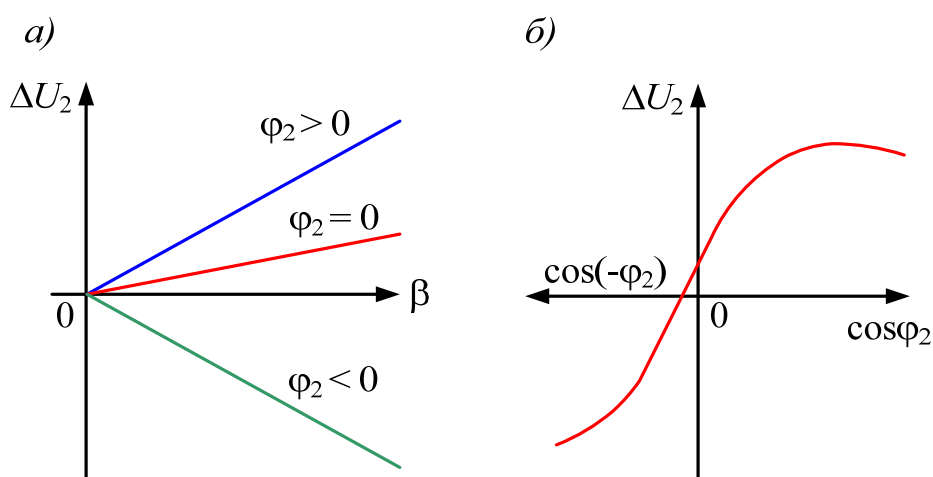


Рис. 1.32 – Графіки залежностей зміни напруги від величини навантаження (а) і від коефіцієнта потужності (б)

Графік залежності зміни напруги від коефіцієнта потужності $\Delta U_2 = f(\cos\varphi_2)$ показаний на рис. 1.32, б), з якого видно, що при активно-індуктивному навантаженні ($\varphi_2 > 0$) зміна напруги ΔU_2 має додатне значення, оскільки зі збільшенням струму навантаження I_2 вторинна напруга зменшується. При активно-ємнісному навантаженні ($\varphi_2 < 0$) зміна напруги ΔU_2 має від'ємне значення внаслідок підвищення напруги на навантаженні.

Чим більше значення напруги короткого замикання має трансформатор, тим сильніше у нього буде змінюватися вторинна напруга.

Наявність індуктивних спадів напруги, викликаних потоками розсіювання, веде до небажаної зміни напруги трансформатора під навантаженням. Щоб зменшити потоки розсіювання, первинні і вторинні обмотки виконують на тих самих стрижнях, по можливості наближаючи одну обмотку до іншої.

Мінімальна відстань між обмотками обмежується електричною міцністю ізоляційного проміжку. Внаслідок цього високовольтні трансформатори, у яких ізоляційний проміжок більший, мають відносно великі потоки розсіювання і напруги короткого замикання, порівняно з низьковольтними трансформаторами.

1.2.11 Зовнішні характеристики трансформатора

Залежність $U_2 = f(I_2)$ або $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1ном} = \text{const}$, $f = f_{ном} = \text{const}$ і $\cos\varphi_2 = \text{const}$ називають *зовнішньою характеристикою* (superficial characteristic) *трансформатора*.

Для її побудови можна використовувати формулу [1]:

$$U'_2 = U_{1ном} \frac{1 - \Delta U_{2\%}}{100} = U_{1ном} \left[1 - \frac{\beta(U_{к.а.ном\%} \cos\varphi_{2н} + U_{к.р.ном\%} \sin\varphi_{2н})}{100} - \frac{\beta^2(U_{к.р.ном\%} \cos\varphi_{2н} - U_{к.а.ном\%} \sin\varphi_{2н})^2}{200} \right]. \quad (1.98)$$

У межах зміни коефіцієнта навантаження β від 0 до 1 зовнішні характеристики практично прямолінійні (рис. 1.33).

Напруга короткого замикання U_k , її активна $U_{к.а}$ і реактивна $U_{к.р}$ складові залежать деякою мірою від номінальної потужності трансформатора. У трансформаторах середньої і великої потужності реактивна складова напруги короткого замикання значно більша, ніж активна. Тому в таких трансформаторах реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги U'_2 , ніж активна, тобто чим менший $\cos\varphi_2$, тим нижче проходить зовнішня характеристика і в більшій мірі змінюється напруга U'_2 .

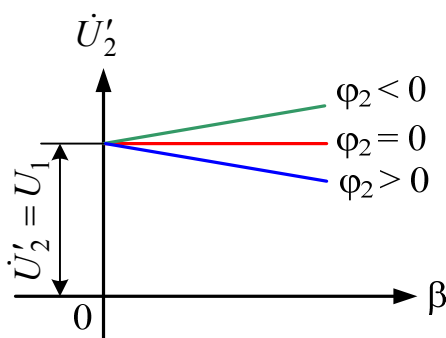


Рисунок 1.33 – Зовнішні характеристики

При активно-індуктивному навантаженні завжди напруга $U'_2 < U_1$. При активно-ємнісному навантаженні і при деяких кутах φ_2 вона може стати більшою за U_1 .

При заданому значенні β відносна зміна напруги ΔU_2 залежить від величини кута φ_2 .

При активному навантаженні величина ΔU_2 невелика; при активно-індуктивному навантаженні вона зростає і досягає максимального значення, коли $\varphi_2 = \varphi_k$; при активно-ємнісному навантаженні ця величина може стати від'ємною.

1.2.12 Втрати і ККД трансформатора

1.2.12.1 Енергетична діаграма

При роботі трансформатора мають місце втрати (wastes):

- електричні $\Delta p_{ел}$ в провідниках обмоток;
- магнітні Δp_m в сталевому осерді.

Тому сумарні втрати в трансформаторі [11-13]

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{ел} + \Delta p_m. \quad (1.99)$$

Електричні втрати $\Delta p_{ел}$ обумовлені нагріванням обмоток трансформатора при проходженні по них електричного струму:

$$\Delta p_{ел} = \Delta p_{ел1} + \Delta p_{ел2}, \quad (1.100)$$

де $\Delta p_{ел1}$ – електричні втрати в первинній обмотці;

$\Delta p_{ел2}$ – електричні втрати у вторинній обмотці,

$$\Delta p_{ел} = m(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2') \quad (1.101)$$

де m – число фаз в обмотках трансформатора.

Як видно з (1.101), електричні втрати залежать від значення струмів в обмотках трансформатора, тобто від навантаження (рис. 1.34). Тому електричні втрати є **ЗМІННИМИ**.

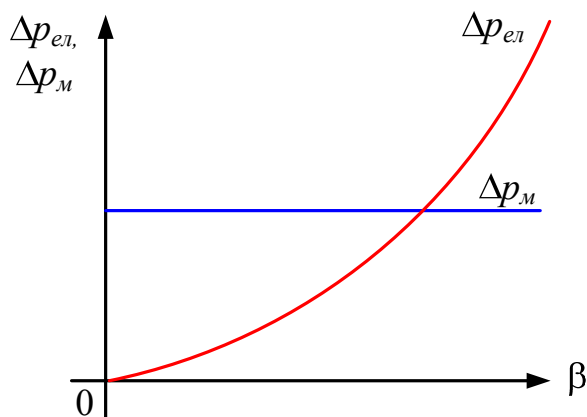


Рисунок 1.34 – Залежність втрат трансформатора від навантаження

Для визначення електричних втрат використовують формулу

$$\Delta p_{ел} = \beta^2 I_2'^2 R_k = \beta^2 \Delta p_{ел.ном} \quad (1.102)$$

де $\Delta p_{ел.ном}$ – електричні втрати при номінальному навантаженні:

$$\Delta p_{ел.ном} = I_2'^2 R_k = I_1^2 R_k \quad (1.103)$$

Значення електричних втрат $\Delta p_{ел.ном}$ можна взяти рівним потужності короткого замикання P_k , що споживається трансформатором з мережі в режимі короткого замикання відповідно до формули (1.88), в якій потрібно врахувати номінальні струми короткого замикання у відповідних обмотках. Тому

$$\Delta p_{ел} = \beta^2 P_k \quad (1.104)$$

Магнітні втрати Δp_m виникають через систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає в магнітопроводі два види магнітних втрат:

- втрати від гістерезису Δp_z , пов'язані із затратою енергії на зменшення до нуля залишкового магнетизму в феромагнітному матеріалі магнітопроводу;
- втрати від вихрових струмів $\Delta p_{вс}$, які наводяться змінним магнітним полем в пластинах магнітопроводу.

Тому

$$\Delta p_m = \Delta p_z + \Delta p_{вс}. \quad (1.105)$$

Магнітні втрати в осерді трансформатора пропорційні квадрату напруги, що підводиться до первинної обмотки трансформатора:

$$\Delta p_m \equiv U_1^2. \quad (1.106)$$

При зміні навантаження первинна напруга трансформатора практично не змінюється. Тому магнітні втрати також не залежать від навантаження і є *постійними* (рис. 1.34).

Для зменшення магнітних втрат магнітопровід трансформатора виконують із магніто-м'якого феромагнітного матеріалу (тонколистової електротехнічної сталі). При цьому магнітопровід виконують шихтованим із тонких пластин, ізольованих одна від одної тонкою плівкою лаку.

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування, тобто частоті змінного струму, а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти:

$$\begin{aligned} \Delta p_z &\equiv f; \\ \Delta p_{вс} &= f^2. \end{aligned} \quad (1.107)$$

Значення магнітних втрат Δp_m можна прийняти рівним потужності P_0 , що споживається трансформатором в режимі холостого ходу і номінальній первинній напрузі:

$$\Delta p_m = P_0. \quad (1.108)$$

Сумарні втрати в трансформаторі з врахуванням (1.99), (1.104) та (1.108) визначаються як

$$\Delta p_\Sigma = P_0 + \beta^2 P_k. \quad (1.109)$$

Процес перетворення енергії в трансформаторі характеризується енергетичною діаграмою (power diagram), поданою на рис. 1.35.

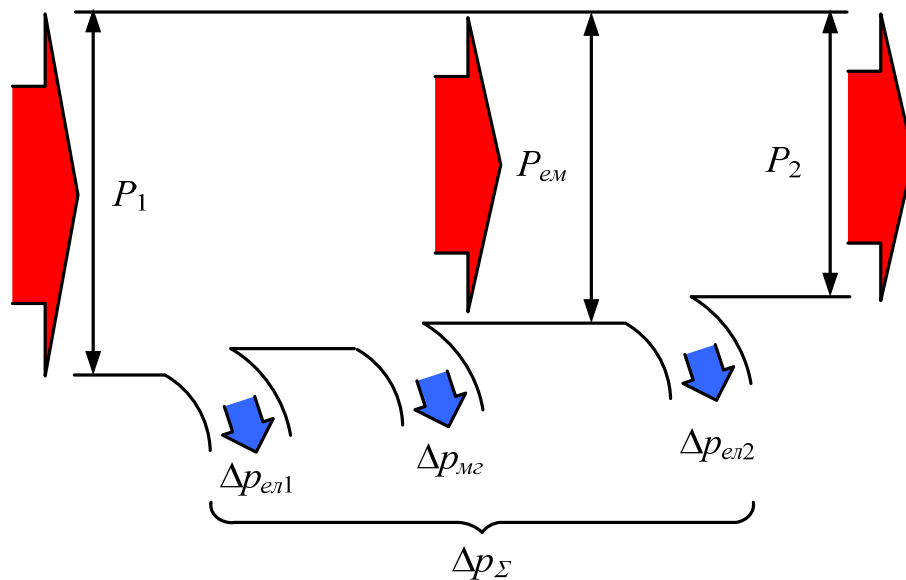


Рис. 1.35 – Енергетична діаграма трансформатора

Потужність

$$P_{em} = P_1 - \Delta p_{el1} - \Delta p_m, \quad (1.110)$$

яка надходить у вторинну обмотку трансформатора, називають **внутрішньою електромагнітною потужністю** (або просто електромагнітною потужністю).

1.2.12.2 ККД трансформатора та його залежність від навантаження
 ККД трансформатора – відношення активних потужностей – корисної P_2 , що віддається навантаженню, до споживаної P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (1.111)$$

або

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta p_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_\Sigma}{P_2 + \Delta p_\Sigma}. \quad (1.112)$$

Активна потужність на виході трансформатора:

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (1.113)$$

де

$$S_{ном} = \sqrt{3} U_{2л.ном} I_{2л.ном}. \quad (1.114)$$

З врахуванням (1.13), (1.114) та

$$P_1 = P_2 + \Delta p_\Sigma, \quad (1.115)$$

отримаємо формулу для знаходження ККД:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa} \quad (1.116)$$

або в іншому вигляді:

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_\kappa + P_0}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa}. \quad (1.117)$$

Залежність ККД від навантаження подано на рис. 1.36. При $\beta = 0$ корисна потужність і ККД дорівнюють нулю. Зі збільшенням навантаження ККД збільшується, тому що в енергетичному балансі зменшується питома значення магнітних втрат у сталі, які постійні в

трансформаторі (не залежать від навантаження). При деякому значенні β_{opt} крива ККД досягає максимуму, після чого починає зменшуватися зі збільшенням навантаження. Причиною цього є сильне збільшення електричних втрат в обмотках, що зростають пропорційно квадратові струму, тобто пропорційно β^2 , у той час як корисна потужність P_2 зростає тільки пропорційно β .

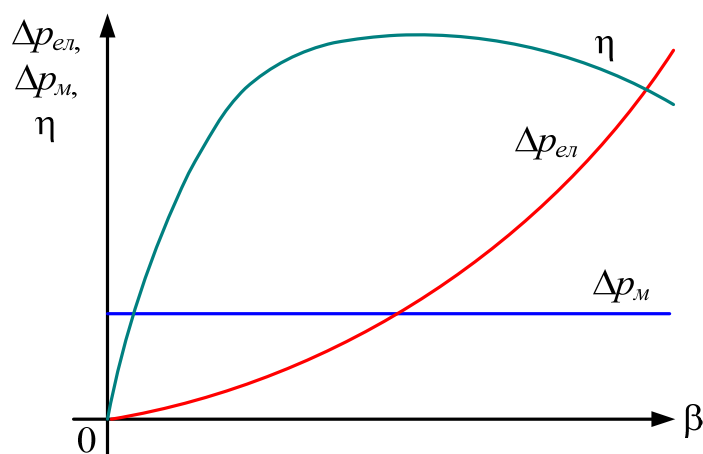


Рисунок 1.36 – Залежність ККД трансформатора від навантаження

Оптимальний коефіцієнт навантаження β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення, можна визначити, порівнявши електричні та магнітні втрати $\Delta p_{ел} = \Delta p_{м}$:

$$P_0 = \beta_{opt}^2 P_{\kappa}, \quad (1.118)$$

звідки

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\kappa}}}, \quad (1.119)$$

тобто ККД має максимум при такому навантаженні, при якому електричні втрати в обмотках дорівнюють магнітним втратам у сталі.

В силових трансформаторах ККД складає 0,97–0,995 (збільшується зі зростанням потужності). Для них $\beta_{opt} = 0,4 \div 0,5$.

За рахунок збільшених втрат в трансформаторах малої потужності їхній ККД дещо менший порівняно з трансформаторами великої потужності: 0,6–0,8 при потужності до 50 Вт; 0,9–0,92 при потужності 100–500 Вт [1].

Приклад 1.3

Трифазний трансформатор має такі паспортні дані: $f = 50$ Гц; $U_{1ном} = 10$ кВ; $U_{2ном} = 0,4$ кВ; $P_0 = 1080$ Вт; $P_{кз} = 5900$ Вт; $U_{к.ном} \% = 4,7\%$; $U_{к.ном} = 0,045U_{1ном}$; номінальний ККД $\eta_{ном} = 98,4\%$.
Схема з'єднання обмоток – У/Д.

Визначити: фазні напруги трансформатора, лінійні і фазні коефіцієнти трансформації; номінальні струми обмоток; напругу вторинної обмотки і ККД при $\cos\varphi_{ном} = 0,95$ і $0,7$.

Розв'язок

Номінальна фазна напруга первинної обмотки:

$$U_{1ф.ном} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}}, \quad U_{1ф.ном} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,78 \text{ (кВ)}.$$

Номінальна фазна напруга вторинної обмотки:

$$U_{2ф.ном} = U_{2л.ном}, \quad U_{2ф.ном} = 0,4 \text{ (кВ)}.$$

Лінійний коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}, \quad k = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Фазний коефіцієнт трансформації:

$$k_{\phi} = \frac{U_{1ф.ном}}{U_{2ф.ном}}, \quad k_{\phi} = \frac{5,78}{0,4} = 14,43.$$

Номінальні лінійні струми:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{1\text{ном}}}, \quad I_{1\text{ном}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10} = 23,1 \text{ (А)};$$

$$I_{2\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{2\text{ном}}}, \quad I_{2\text{ном}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 578 \text{ (А)}.$$

Активна і реактивна складові напруги короткого замикання:

$$U_{\text{к.а.ном}} \% = \frac{100\Delta p_{\text{кз}}}{S_{\text{ном}}}, \quad U_{\text{к.а.ном}} \% = \frac{100 \cdot 5,9}{400} = 1,475\%;$$

$$U_{\text{к.р.ном}} \% = \sqrt{U_{\text{к.ном}}^2 \% - U_{\text{к.р.ном}}^2 \%},$$

$$U_{\text{к.р.ном}} \% = \sqrt{4,5^2 - 1,475^2} = 4,29\%.$$

Для $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,95$ спад вторинної напруги:

$$\Delta U_{2\%} = \beta(U_{\text{к.а.ном}} \% \cos\varphi_{\text{ном}} + U_{\text{к.р.ном}} \% \sin\varphi_{\text{ном}})$$

$$\Delta U_{2\%} = 0,8 \cdot (1,475 \cdot \cos 0,95 + 4,29 \cdot \sin 0,95) = 2,45\%$$

або в вольтах

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta U_{2\%} U_{2\text{ном}}}{100}, \quad \Delta U_2 = \frac{2,45 \cdot 400}{100} = 9,8 \text{ (В)}.$$

Вторинна напруга при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,95$:

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U_2, \quad U_2 = 400 - 9,8 = 390,2 \text{ (В)}.$$

ККД трансформатора при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,95$:

$$\eta_{0,95} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}} + P_0 + \beta^2 P_K},$$

$$\eta_{0,95} = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,95}{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,95 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,984.$$

Для $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,7$ спад вторинної напруги:

$$\Delta U_{2\%} = 0,8 \cdot (1,475 \cdot \cos 0,7 + 4,29 \cdot \sin 0,7) = 3,25\%$$

або в вольтах

$$\Delta U_2 = \frac{3,25 \cdot 400}{100} = 13 \text{ (В)}.$$

Вторинна напруга при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,7$:

$$U_2 = 400 - 13 = 387 \text{ (В)}.$$

ККД трансформатора при $\beta = 0,8$ і $\cos\varphi_{ном} = 0,7$:

$$\eta_{0,7} = \frac{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7}{0,8 \cdot 400 \cdot \cos 0,7 + 1,08 + 0,8^2 \cdot 5,9} = 0,978.$$

1.2.13 Регулювання напруги трансформатора

1.2.13.1 Принципи регулювання

При експлуатації трансформаторів виникає потреба підтримки на відповідному рівні вторинної напруги при зміні його навантаження або при коливаннях напруги живлення самого трансформатора. Регулювання напруги (voltage regulation) в мережі зазвичай ступінчасте, реалізується шляхом зміни коефіцієнта трансформації трансформатора. Для цієї мети обмотка виконується з відгалуженнями (відпайками).

Розрізняють два основних випадки, коли необхідно здійснювати регулювання напруги:

- 1) стабілізація вторинної напруги при незначній зміні первинної напруги (викликана спадом напруги в мережі живлення первинної обмотки трансформатора);

2) регулювання вторинної напруги у широких межах при незмінній первинній напрузі (викликане особливістю технологічного процесу.

В обох випадках вторинна напруга регулюється шляхом зміни коефіцієнта трансформації, тобто співвідношення між числами витків первинної і вторинної обмоток.

Для першого випадку можна змінювати число витків як первинної, так і вторинної обмотки. Для другого випадку змінюють число витків вторинної обмотки. Зміна витків первинної обмотки призведе до зміни магнітного потоку трансформатора і, як наслідок, до його перегріву або поганого використання.

Існує два види перемикань відгалужень обмоток трансформатора:

- 1) перемикання без збудження (ПБЗ) – при відключенні трансформатора від первинної і вторинної мереж;
- 2) під навантаженням (регулювання під навантаженням – РПН).

Існують також трансформатори з плавним регулюванням напруги, в яких плавно змінюють число витків вторинної обмотки.

1.2.13.2 Перемикання відгалужень без збудження

Перемикання відгалужень без збудження застосовують у масляному і сухому силовому трансформаторах загальпромислового призначення, а також у трансформаторах, призначених для вентильних перетворювачів. Напругу регулюють на $\pm 5\%$ від номінальної напруги. Такі трансформатори мають 5 відгалужень з кратністю $2,5\%$: +5; +2,5; 0; -2,5; -5%. Відгалуження виконуються на стороні ВН (струм в даній обмотці менший, ніж струм обмотки НН, тому виводи і перемикач компактніші. Крім того, число витків обмотки ВН більше, ніж обмотки НН, унаслідок чого зміна числа витків можна здійснювати з більшою точністю).

У трансформаторах, призначених для вентильних перетворювачів, часто напругу регулюють на стороні НН; при цьому перемикальну апаратуру виконують на великі струми, що сильно ускладнює її конструкцію.

Відгалуження виконуються в зовнішньому шарі обмотки симетрично відносно середини її висоти, тому що в цьому випадку в меншій мірі порушується рівномірність розподілу магнітного поля розсіювання. Нерівномірність розподілу поля розсіювання викликає появу осьових

електромагнітних сил, які можуть призвести до руйнування обмотки при короткому замиканні.

Зміна числа витків обмотки здійснюється за допомогою контактної перемикача, розміщеного усередині бака трансформатора, який має систему нерухомих і рухомих контактів. До перших приєднують відгалуження від обмотки. Переключення перемикача з одного положення в інше здійснюється за допомогою рукоятки, розміщеної на кришці або стінці бака трансформатора.

Схеми виконання відгалужень обмоток показані на рис. 1.37.

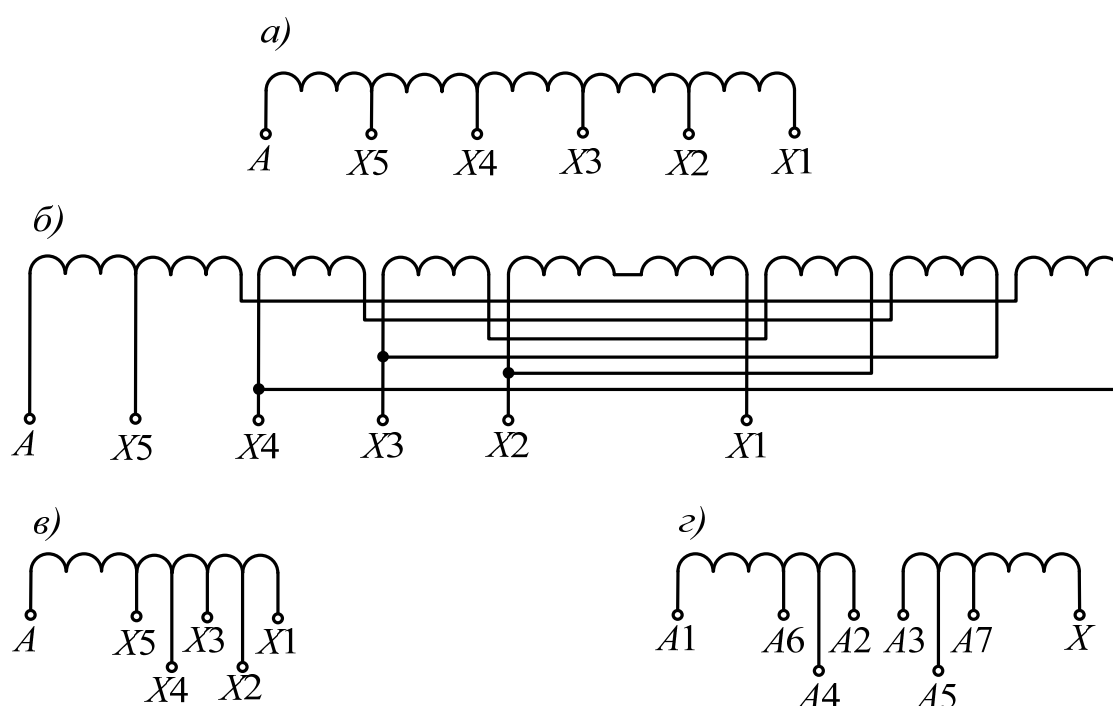


Рисунок 1.37 – Схеми виконання відгалужень обмоток

Схема рис. 1.37, а) застосовується для багатошарових циліндричних обмоток трансформаторів потужністю до 160 кВ·А. Для трансформаторів потужністю до 250 кВ·А й вище при багатошаровій циліндричній обмотці застосовується схема на рис. 1.37, б). Схема рис. 1.37, в) використовується при багатошаровій циліндричній котушковій і безперервній котушковій обмотках та номінальній напрузі до 38,5 кВ (при цьому одна половина обмотки намотується правим, а інша – лівим намотуванням, щоб ЕРС і МРС цих частин додавалися). Схема рис. 1.37, г) застосовується для тих самих обмоток, що й схема рис. 1.37, в), але при напругах до 220 кВ [9].

1.2.13.3 Перемикання відгалужень під навантаженням

Трансформатори з РПН дозволяють регулювати напругу на $\pm(9\div 16)\%$.

При використанні цього способу регулювання необхідно:

1) забезпечити перехід з одного відгалуження на інше без розриву струму, для чого в деякий момент часу повинні бути включені два сусідніх відгалуження;

2) обмежити струм короткого замикання у частині обмотки трансформатора, розташованої між цими відгалуженнями при одночасному їхньому включенні.

Для цього застосовують перемикальні пристрої з дистанційним керуванням і з струмообмежувальними реакторами і резисторами, а в трансформаторах, призначених для вентильних перетворювачів, – пристрої з вентиляним переходом [1].

Схема електрична принципова перемикального пристрою зі струмообмежувальними резисторами подана на рис. 1.38.

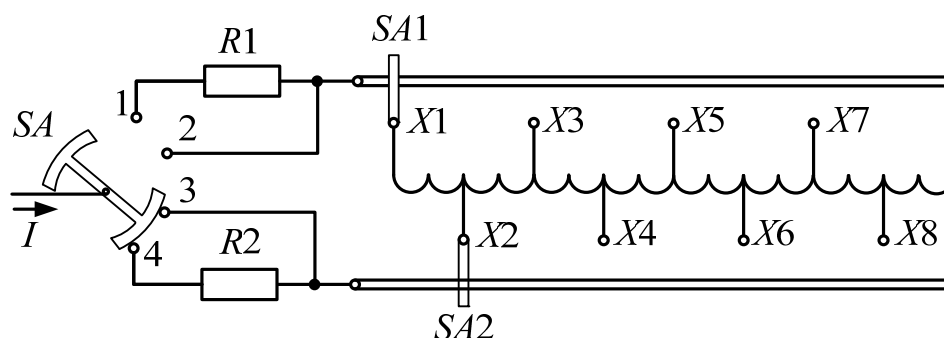


Рисунок 1.38 – Схема перемикального пристрою зі струмообмежувальними резисторами

Перемикання здійснюється швидкодіючим перемикачем SA і перемикачами $SA1$, $SA2$. Перемикач SA разом з резисторами $R1$ і $R2$ монтується в спеціальному масляному баці. Перемикачі $SA1$ і $SA2$ переводяться з одного положення в інше при відсутності струму.

Для переходу на сусіднє відгалуження, наприклад на $X1$, перемикач $SA1$ переводиться на відгалуження $X1$. Потім перемикач SA , повертаючись за годинниковою стрілкою, розриває контур 3, з'єднує між собою контакти 4 і 1, при цьому послідовно із частиною обмотки між відгалуженнями $X2$ і $X1$ включаються струмообмежувальні резистори $R1$ і $R2$. При подальшому

повороті перемикача замикаються між собою контакти 1, 2 і розривається контакт 4. У цьому положенні перемикача трансформатор буде працювати на відгалуженні $X1$. Резистор $R1$ при цьому закорочений, і струм через нього проходити не буде. Весь процес перемикання автоматизований і відбувається протягом сотих часток секунди.

Схема перемикального пристрою з струмообмежувальним реактором показана на рис. 1.39. Пристрій складається з реактора L , двох контакторів $KM1$ і $KM2$, призначених для розриву струму, що проходить по двох паралельних вітках реактора, а також двох перемикачів $SA1$ і $SA2$, що здійснюють переключення цих віток при відсутності струму.

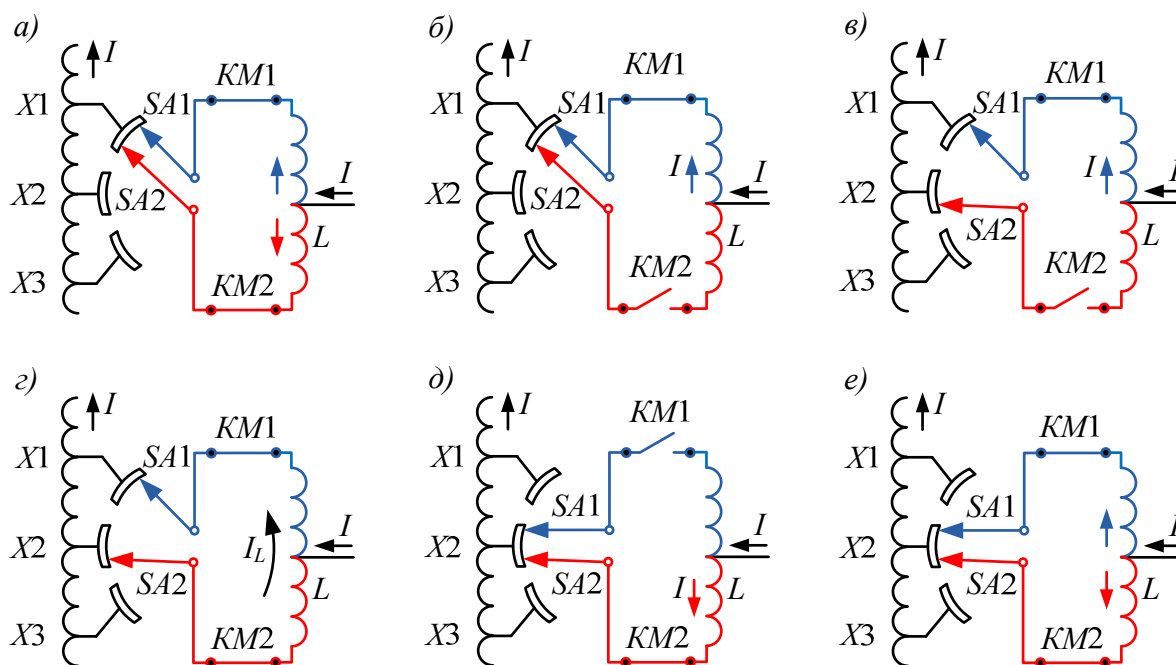


Рисунок 1.39 – Схеми перемикального пристрою зі струмообмежувальним реактором

Перемикальний пристрій працює в такий спосіб. У першому положенні, коли перемикаючий пристрій підключено до відгалуження $X1$, контакти контакторів $KM1$ і $KM2$ замкнуті (рис. 1.39, *a*) і струм проходить по паралельних вітках реактора в різних напрямках, не намагнічуючи його. Тому індуктивний опір реактора досить малий. При переході з відгалуження $X1$ на відгалуження $X2$ спочатку відключається контактор $KM2$ (рис. 1.39, *b*), але коло струму не переривається, тому що він продовжує проходити через контакт контактора $KM1$. Потім перемикач

$SA2$ без струму переводиться на відгалуження $X2$ (рис. 1.39, *в*), після чого знову включається контактор $KM1$ (рис. 1.39, *з*). У цьому положенні через обидві половини реактора проходить струм I_L одного напрямку, його індуктивний опір різко зростає і він ефективно обмежує струм I_L у замкнутому контурі, утвореному частиною обмотки трансформатора, що розташована між відгалуженнями $X1$ і $X2$. Після цього розмикається контакт контактора $KM1$, перемикач $SA1$ переводиться без струму на відгалуження $X2$ (рис. 1.39, *д*) і знову включається контактор $KM1$ (рис. 1.39, *е*).

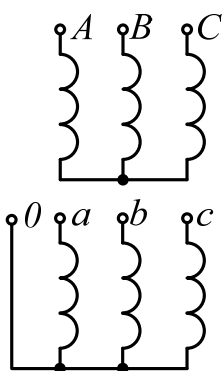
Реактор і перемикачі поміщають усередину масляного бака трансформатора, а контактори – у спеціальний бак, розташований на бічній стінці основного бака.

1.3 Групи з'єднань і паралельна робота трансформаторів

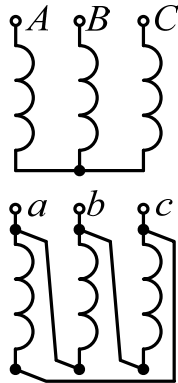
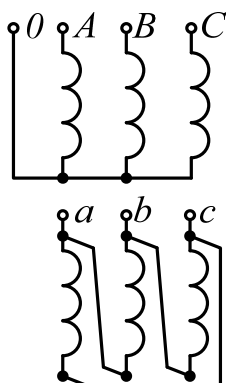
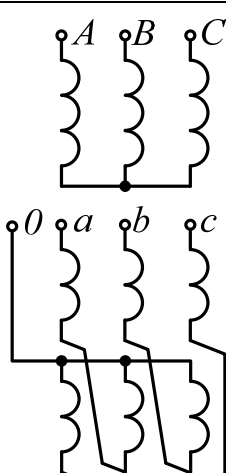
1.3.1 Схеми з'єднань

У трифазних двообмоткових трансформаторах використовують схеми з'єднань (connection scheme) обмоток, перелік яких подано в табл. 1.1.

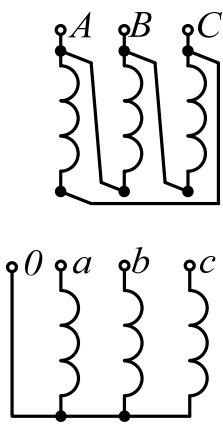
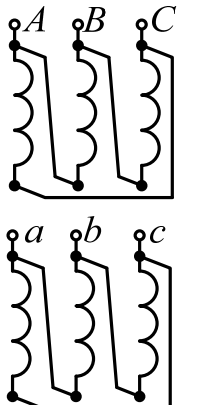
Таблиця 1.1 – Схеми з'єднань трифазних двообмоткових трансформаторів

Назва схеми	Схема	Умовне позначення	
		на кресленні	в тексті
Зірка – зірка з виведеною нульовою точкою		Y/Y	Y/Y_n

Продовження таблиці 1.1

Назва схеми	Схема	Умовне позначення	
		на кресленні	в тексті
Зірка – трикутник		Y/Δ	У/Д
Зірка з виведеною нульовою точкою – трикутник		Y/Δ	Y_H/Δ
Зірка – зигзаг з виведеною нульовою точкою		Y/Y	Y/Z_H

Продовження таблиці 1.1

Назва схеми	Схема	Умовне позначення	
		на кресленні	в тексті
Трикутник – зірка з виведеною нульовою точкою		Δ/Y	Д/У _н
Трикутник – трикутник		Δ/Δ	Д/Д

В основному обмотку ВН з'єднують за схемою «зірка», що дозволяє при заданій лінійній напрузі мати менше число витків у фазі [1].

При з'єднанні обмотки трансформатора за схемою Z_H кожна фаза складається з двох однакових котушок, що розміщені на різних стрижнях і з'єднані між собою зустрічно так, щоб вектори індукованих у них ЕРС віднімалися.

Схема Z_H неекономічна, тому що при тій самій фазній напрузі U_ϕ вона вимагає більших витрат обмотувального проводу, ніж при схемах Y і Δ . Її використовують в трансформаторах для вентиляльних перетворювачів.

1.3.2 Групи з'єднань обмоток

Група з'єднання (group of connection) *обмоток* трансформатора залежить від зсуву за фазою між лінійними напругами, виміряними на однойменних затискачах.

Розглянемо однофазний трансформатор. В нього є лише по одній обмотці ВН та НН.

Якщо обмотки трансформатора намотані в одну сторону і мають симетричне маркування виводів (рис. 1.40, а), то індуковані в них ЕРС мають однаковий напрямок. Як наслідок збігаються за фазою і напруги холостого ходу (вектори напруг \dot{U}_1 і \dot{U}_2 мають однаковий напрямок). При зміні маркування виводів однієї з обмоток (на рис. 1.40, б) – вторинної обмотки) або ж напрямку намотування однієї з обмоток (на рис. 1.40, в) – вторинної обмотки) між векторами первинної \dot{U}_1 і вторинної \dot{U}_2 напруг утворюється кут 180° .

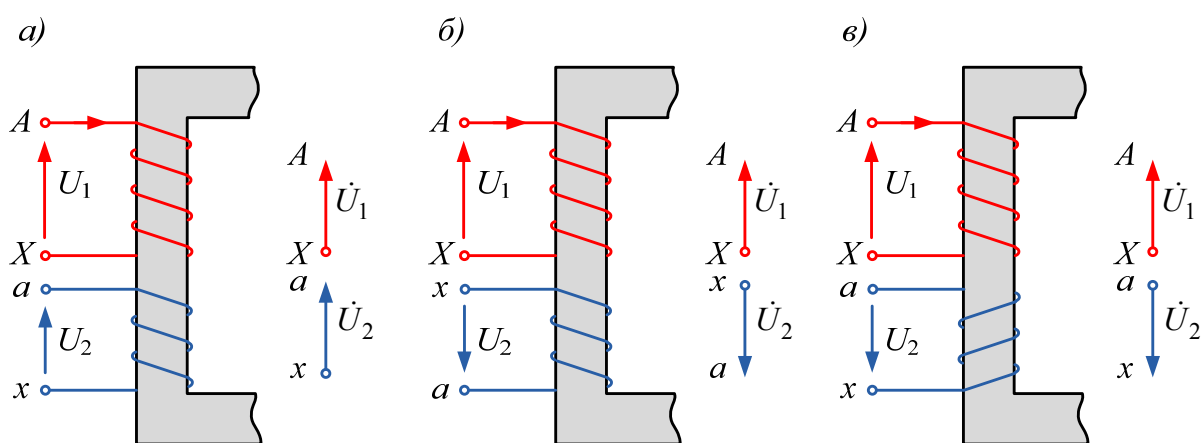


Рисунок 1.40 – Групи з'єднань однофазного трансформатора

Отже, група з'єднання обмоток трансформатора залежить від напрямку намотування обмоток і позначення виводів (маркування).

Всього є 12 груп з'єднань обмоток (від 0 до 11). *Номер групи з'єднання обмоток* визначають величиною кута, на який вектор лінійної напруги обмотки НН відстає від вектора лінійної напруги обмотки ВН. Отриманий кут потрібно розділити на 30° .

Виходячи з викладеного, однофазний трансформатор може мати лише нульову або шосту групу з'єднань обмоток (на рис. 1.40, а) кут між векторами \dot{U}_1 і \dot{U}_2 0° – перша група; на рис. 1.40, б) та в) кут між векторами \dot{U}_1 і \dot{U}_2 180°). На практиці випускають однофазні

трансформатори нульової групи, у яких напруги первинної і вторинної обмоток збігаються за фазою.

Розглянемо трифазний трансформатор. В ньому так само, як і в однофазному, залежно від схеми з'єднання обмоток і порядку з'єднання їх початків і кінців отримуються різні кути зсуву фаз між лінійними напругами, тобто різні групи з'єднань.

При з'єднанні обмоток за схемою У/У (рис. 1.41, а) за умови, що обмотки ВН і НН мають однаковий напрямок намотування і їх однойменні фази розміщені на одному і тому ж стрижні, вектори лінійних напруг \dot{U}_{AB} і \dot{U}_{ab} будуть збігатися за фазою (рис. 1.41, б) і кут між ними буде рівним 0° (рис. 1.41, в). Тому отримуємо нульову групу з'єднання, яка позначається як У/У-0.

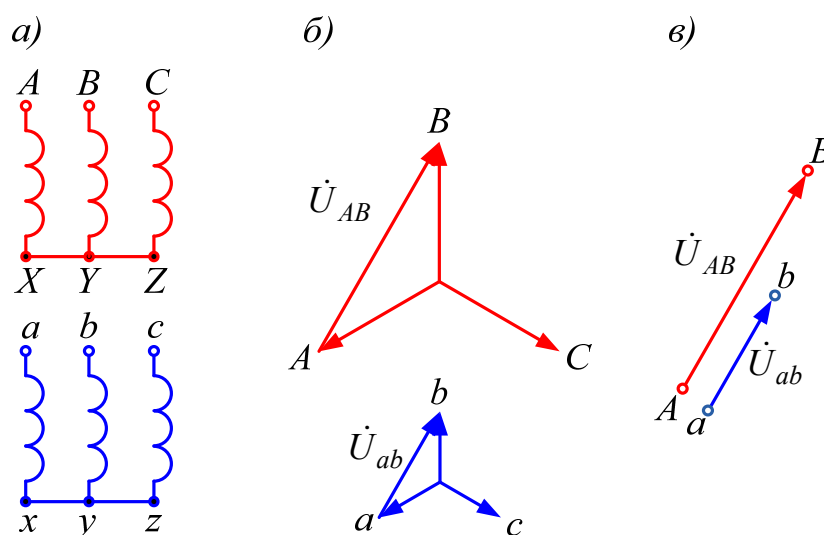


Рисунок 1.41 – Схема У/У-0

Якщо у однієї з обмоток трифазного трансформатора при з'єднанні його обмоток за схемою У/У змінити маркування початків і кінців фаз (наприклад, у обмотки НН – рис. 1.42, а), то вектори лінійних напруг \dot{U}_{AB} і \dot{U}_{ab} будуть в протифазі (рис. 1.42, б), тобто кут між ними буде рівним 180° (рис. 1.42, в). Тому отримуємо шосту групу з'єднання, яка позначається як У/У-6.

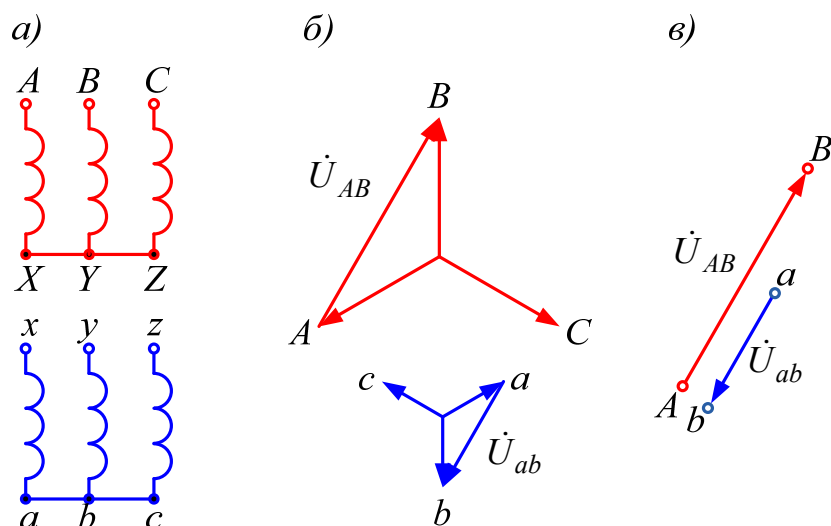


Рисунок 1.42 – Схема У/У-6

При з'єднанні обмоток за схемою Д/Д (рис. 1.43, а) кут між векторами лінійних напруг \dot{U}_{AB} і \dot{U}_{ab} (рис. 1.41, б, в) буде рівним 330° (рис. 1.41, в). Тому отримуємо одинадцяту групу з'єднання, яка позначається як Д/Д-11.

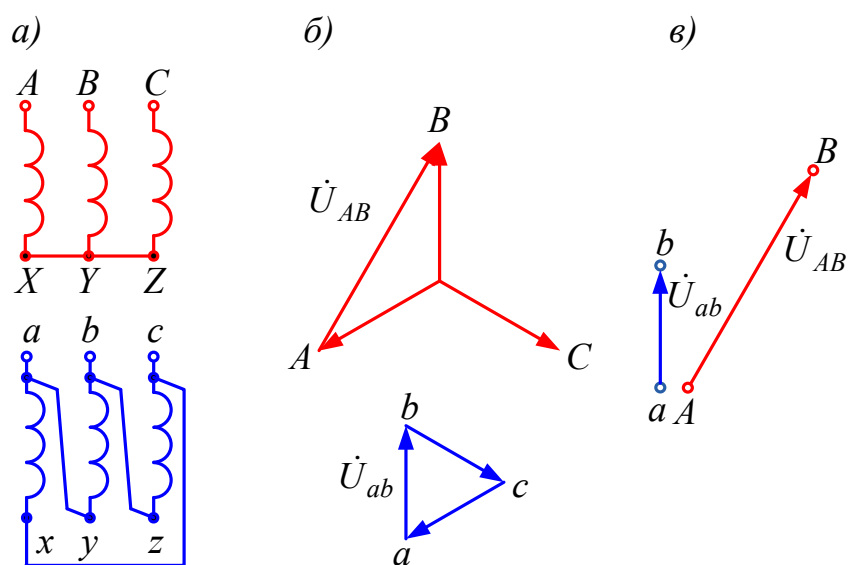


Рисунок 1.43 – Схема Д/Д-11

У трансформаторів, обмотки яких з'єднані за схемою У/У або за схемою Д/Д, отримують лише парні групи з'єднань, а у трансформаторів, у яких одна з обмоток з'єднана в зірку, а друга в трикутник – лише непарні групи з'єднань.

На практиці випускають трифазні силові трансформатори лише двох груп: нульової і одинадцятої. Це полегшує практичне вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

При з'єднанні обмотки НН за схемою Z_n , а обмотки ВН за схемою У отримують одинадцяту групу.

1.3.3 Паралельна робота трансформаторів

Паралельна робота (parallel work) трансформаторів – це робота, коли їхні вторинні обмотки підключені до спільного навантаження, а первинні обмотки заживлені від однієї мережі.

Паралельне включення трансформаторів використовується [9]:

- при коливаннях навантаження (в цьому випадку для забезпечення номінального навантаження трансформаторів та мінімальних втрат, їхню кількість, включених на паралельну роботу, визначається відповідно до підключеного навантаження);
- для забезпечення резервування (у випадках аварій або ремонтів трансформаторів);
- якщо потужність, на яку потрібно включити трансформатор, перевищує потужність, на яку виготовляється трансформатор (у випадках, коли краще використати, наприклад, два трансформатори меншої потужності, ніж один занадто великої потужності для заданого навантаження).

При паралельній роботі трансформаторів потрібно прагнути до того, щоб кожен із них був завантажений струмами, пропорційними їх номінальним потужностям.

Для цього потрібно, щоб виконувалися *умови включення трансформаторів на паралельну роботу*:

1) *при однаковій первинній напрузі вторинна напруга повинна бути також рівною, тобто трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації.*

Невиконання цієї умови призводить до появи струму врівноваження, обумовленого різницею вторинних напруг трансформатора:

$$\dot{I}_{sp} = \frac{\dot{U}_{2I} - \dot{U}_{2II}}{Z_{кI} + Z_{кII}}, \quad (1.120)$$

де \dot{U}_{2I}, U_{2II} – вторинні напруги відповідно першого і другого трансформатора;

$Z_{кI}, Z_{кII}$ – опори короткого замикання відповідно першого і другого трансформатора.

При паралельній роботі двох трансформаторів однакової потужності, один з яких має вищу вторинну напругу холостого ходу (менший коефіцієнт трансформації) буде перевантаженим порівняно з трансформатором, який має більший коефіцієнт трансформації. Оскільки перевантаження трансформаторів є недопустимим, то потрібно знижувати загальне навантаження трансформаторів.

На практиці допускається паралельна робота силових трансформаторів, що мають розходження в коефіцієнтах трансформації не більш $\pm 0,5\%$;

2) *трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднань.*

При невиконанні цієї умови вторинні лінійні напруги трансформаторів будуть зсунуті за фазою одна відносно другої і в колі трансформаторів з'явиться різниця напруг, під дією якої виникне значний струм врівноваження.

Якщо трансформатори належать навіть до найближчих груп, наприклад, одинадцятої і нульової, зсув за фазою між їх вторинними ЕРС складає 30° (рис. 1.44), і в контурі паралельно з'єднаних вторинних обмоток виникає велика різниця ЕРС:

$$\Delta E = 2E_2 \sin \frac{30}{2} \approx 0,52E_2. \quad (1.121)$$

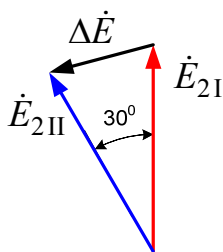


Рисунок 1.44 – Векторна діаграма вторинних напруг трансформаторів з групами з'єднань У/У-0 і У/Д-11, включених на паралельну роботу

При включенні трансформаторів із нульовою і шостою групами кут зсуву між ЕРС складає 180° , тобто $\Delta E = 2E_2$. В цьому випадку в трансформаторі виникне струм врівноваження, який в декілька разів буде перевищувати номінальний струм;

3) *трансформатори повинні мати однакові напруги короткого замикання.*

Виконання цієї умови забезпечує пропорційний розподіл навантаження між трансформаторами відповідно до їх номінальних потужностей.

Відомо, що струми в паралельних вітках розподіляються обернено пропорційно їх опорам [2]:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}}, \quad (1.122)$$

де I_I, I_{II} – відповідно струми першого і другого трансформатора.

Якщо обидві частини рівняння (1.117) помножити на $\frac{I_{IIном} U_{ном}}{I_{Iном} U_{ном}}$, ліву частину – на $\frac{U_{ном}}{U_{ном}}$ і праву частину – на $\frac{100}{100}$, отримаємо:

$$\frac{I_I}{I_{II}} \cdot \frac{I_{IIном} U_{ном}}{I_{Iном} U_{ном}} \cdot \frac{U_{ном}}{U_{ном}} = \frac{Z_{кII}}{Z_{кI}} \cdot \frac{I_{IIном} U_{ном}}{I_{Iном} U_{ном}} \cdot \frac{100}{100}. \quad (1.123)$$

Врахувавши те, що фактичне навантаження першого і другого трансформаторів

$$\begin{aligned} S_I &= I_I U_{ном}, \\ S_{II} &= I_{II} U_{ном} \end{aligned} \quad (1.124)$$

і номінальні потужності цих трансформаторів

$$\begin{aligned} S_{Iном} &= I_{Iном} U_{ном}, \\ S_{IIном} &= I_{IIном} U_{ном}, \end{aligned} \quad (1.125)$$

де $I_{I\text{ ном}}$, $I_{II\text{ ном}}$ – номінальні струми відповідно першого і другого трансформаторів, а напруга короткого замикання трансформаторів

$$U_{I\text{ к.ном}} \% = \frac{I_{I\text{ ном}} Z_{кI}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad (1.126)$$

$$U_{II\text{ к.ном}} \% = \frac{I_{II\text{ ном}} Z_{кII}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100,$$

отримаємо:

$$\frac{S_I}{S_{I\text{ ном}}} : \frac{S_{II}}{S_{II\text{ ном}}} = \frac{U_{II\text{ к.ном}} \%}{U_{I\text{ к.ном}} \%}. \quad (1.127)$$

Якщо потужність кожного з трансформаторів подати у відносних одиницях:

$$S_I^* = \frac{S_I}{S_{I\text{ ном}}}, \quad (1.128)$$

$$S_{II}^* = \frac{S_{II}}{S_{II\text{ ном}}},$$

то співвідношення (1.127) можна записати як

$$S_I^* : S_{II}^* = \frac{U_{II\text{ к.ном}} \%}{U_{I\text{ к.ном}} \%}. \quad (1.129)$$

З (1.129) випливає, що відносні потужності трансформаторів, які паралельно працюють, обернено пропорційні їх напругам короткого замикання.

Практично задовільний розподіл навантаження виходить у тих випадках, коли напруги короткого замикання паралельно працюючих трансформаторів відхиляються від їхнього середньоарифметичного значення не більше ніж на $\pm 10\%$.

Напруга короткого замикання зростає у трансформаторів, які мають велику різницю за потужністю. Тому рекомендується відношення

номінальних потужностей трансформаторів, які включені на паралельну роботу, не більше як 3:1.

Якщо при паралельній роботі напруги короткого замикання не рівні, то перевантажується трансформатор з меншим значенням напруги короткого замикання, тобто з меншим опором короткого замикання. У цьому випадку потрібно зменшити загальне навантаження всієї групи паралельно працюючих трансформаторів, тобто встановлена потужність трансформаторів буде використовуватися не повною мірою.

і *Приклад 1.4*

Три трифазних трансформатори з однаковими групами з'єднань паралельно працюють на спільне навантаження $S_{\Sigma} = 5000$ кВ·А. Трансформатори мають такі дані: $S_{I \text{ ном}} = 1000$ кВ·А, $U_{к I \text{ ном}} \% = 6,5\%$; $S_{II \text{ ном}} = 1800$ кВ·А, $U_{к II \text{ ном}} \% = 6,65\%$; $S_{III \text{ ном}} = 2200$ кВ·А, $U_{к III \text{ ном}} \% = 6,3\%$. Визначити навантаження кожного з трансформаторів.

Розв'язок

Розподіл навантаження між b трансформаторами, що паралельно працюють, визначимо як

$$S_v = \frac{S_{\Sigma} S_{v \text{ ном}}}{U_{к v \text{ ном}} \% \cdot \sum_{v=1}^b \frac{S_{v \text{ ном}}}{U_{к v \text{ ном}} \%}}, \quad v = \overline{1, b},$$

де $S_{v \text{ ном}}$ – навантаження одного з трансформаторів, що працює паралельно;

$U_{к v \text{ ном}}$ – напруга короткого замикання одного з трансформаторів, що працює паралельно.

Таким чином, навантаження кожного з трансформаторів:

$$S_1 = \frac{5000 \cdot 1000}{6,5 \cdot \left(\frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 994,2 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$S_2 = \frac{5000 \cdot 1800}{6,65 \cdot \left(\frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 1749,2 \text{ (кВ} \cdot \text{А)};$$

$$S_2 = \frac{5000 \cdot 2200}{6,3 \cdot \left(\frac{1000}{6,5} + \frac{1800}{6,65} + \frac{2200}{6,3} \right)} = 2256,6 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

Порівнявши отримане навантаження кожного з трансформаторів із його номінальним навантаженням бачимо, що третій трансформатор є перевантаженим ($S_2 > S_{2ном}$) на

$$\frac{2256,6 - 2200}{2200} \cdot 100 = 2,6\%.$$

Для усунення цього перевантаження потрібно знизити зовнішнє навантаження трансформаторів на 2,6%, тобто зменшити його до

$$S_{\Sigma(ym)} = S_{\Sigma} - S_{\Sigma} \cdot \frac{2,6}{100},$$

$$S_{\Sigma(ym)} = 5000 - 5000 \cdot \frac{2,6}{100} = 4870 \text{ (кВ} \cdot \text{А)}.$$

1.4 Багатообмоткові трансформатори і автотрансформатори

1.4.1 Багатообмоткові трансформатори

Багатообмоткові трансформатори (multi-winding transformer) на кожному із стрижнів мають не дві (одну ВН і одну НН) обмотки, а більшу їх кількість з різним числом витків. Таке виконання трансформатора дозволяє отримати декілька напруг, а як результат, – зменшити кількість встановлених трансформаторів.

Такі трансформатори невеликої потужності широко використовуються в радіотехніці і автоматиці (в більшості випадків вони однофазні).

Силові багатообмоткові трансформатори здебільшого виконують триобмотковими: одна обмотка ВН, одна обмотка НН і одна обмотка середньої напруги (СН). Такі трансформатори виконують на одну номінальну потужність для всіх трьох обмоток, хоча ще зустрічаються багатообмоткові трансформатори старого виконання, в яких обмотки мають різні номінальні потужності. За номінальну потужність трансформатора такого виконання береться потужність найпотужнішої обмотки.

Розглянемо роботу триобмоткового трансформатора (threewinding transformer), схема якого подана на рис. 1.45.

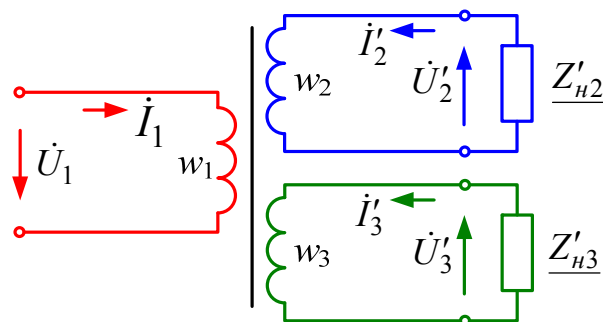


Рисунок 1.45 – Схема триобмоткового трансформатора

Такий трансформатор має два коефіцієнти трансформації:

– між обмотками з кількістю витків w_1 і w_2

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2}; \quad (1.130)$$

– між обмотками з кількістю витків w_1 і w_3

$$k_{13} = \frac{w_1}{w_3}. \quad (1.131)$$

Система рівнянь (1.48) для такого трансформатора набуде вигляду:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2; \\ \dot{U}'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 \underline{Z}'_3; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 - \dot{I}'_3, \end{cases} \quad (1.132)$$

де \dot{U}'_3 , \dot{E}'_3 , \underline{Z}'_3 , \dot{I}'_3 – відповідно приведені напруга, ЕРС, опір і струм третьої обмотки до первинної (першої).

Комплексні опори короткого замикання визначаються із трьох дослідів короткого замикання (на первинну обмотку подається напруга короткого замикання;

при першому досліді – замкнута накоротко друга обмотка, а на першу подається напруга короткого замикання; при другому досліді – замкнута накоротко третя обмотка, а на першу подається напруга короткого замикання; при третьому досліді – замкнута накоротко третя обмотка, на другу подається напруга короткого замикання):

$$\begin{cases} \underline{Z}_{\kappa 12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2; \\ \underline{Z}_{\kappa 13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3; \\ \underline{Z}_{\kappa 23} = \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3, \end{cases} \quad (1.133)$$

де $\underline{Z}_{\kappa 12}$, $\underline{Z}_{\kappa 13}$, $\underline{Z}_{\kappa 23}$ – комплексні опори короткого замикання першої і другої обмоток, першої і третьої обмоток, другої і третьої обмоток, відповідно.

Розв'язавши систему рівнянь (1.133), отримаємо:

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{\kappa 12} + \underline{Z}_{\kappa 13} - \underline{Z}_{\kappa 23}}{2}; \\ \underline{Z}'_2 = \frac{\underline{Z}_{\kappa 12} + \underline{Z}_{\kappa 23} - \underline{Z}_{\kappa 13}}{2}; \\ \underline{Z}'_3 = \frac{\underline{Z}_{\kappa 13} + \underline{Z}_{\kappa 23} - \underline{Z}_{\kappa 12}}{2}. \end{cases} \quad (1.134)$$

За таких умов схема заміщення триобмоткового трансформатора буде мати вигляд, як показано на рис. 1.46.

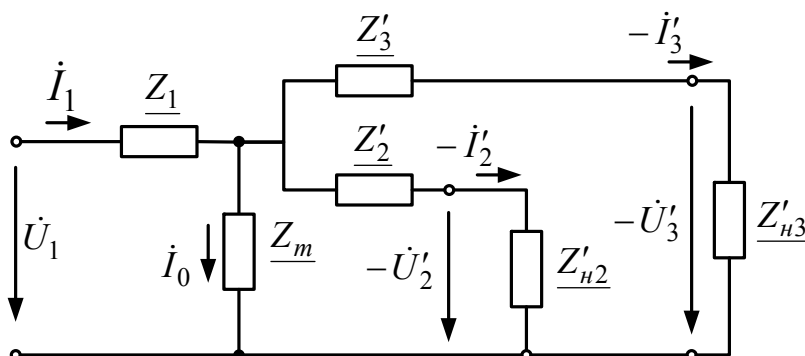


Рисунок 1.46 – Схема заміщення триобмоткового трансформатора

Як видно зі схеми заміщення (рис. 1.46) при зміні навантаження в одній із вторинних обмоток змінюються напруги на обох вторинних обмотках, тобто є взаємний вплив вторинних обмоток. Це пояснюється тим, що змінюється спад напруги на опорі Z_1 схеми заміщення, по якій проходить сумарний струм I_1 . Для того, щоб послабити цей вплив, опір первинної обмотки потрібно зменшити.

Векторна діаграма для триобмоткового трансформатора зображена на рис. 1.47.

Державним стандартом передбачені для трифазних триобмоткових трансформаторів дві схеми і групи з'єднань: У/У_н/Д-0-11 і У/Д/Д-11-11.

1.4.2 Автотрансформатори

Автотрансформатор (autotransformer) – це такий трансформатор, у якого обмотка НН електрично (гальванічно) зв'язана з обмоткою ВН, внаслідок чого потужність з первинної обмотки у вторинну передається не лише електромагнітним, а й електричним шляхом.

Схема однофазного знижувального автотрансформатора подана на рис. 1.48, з якого видно, що первинна напруга підводиться до затискачів A і X , а вторинною обмоткою служить частина первинної обмотки між затискачами a і x , причому затискачі X і x з'єднані між собою.

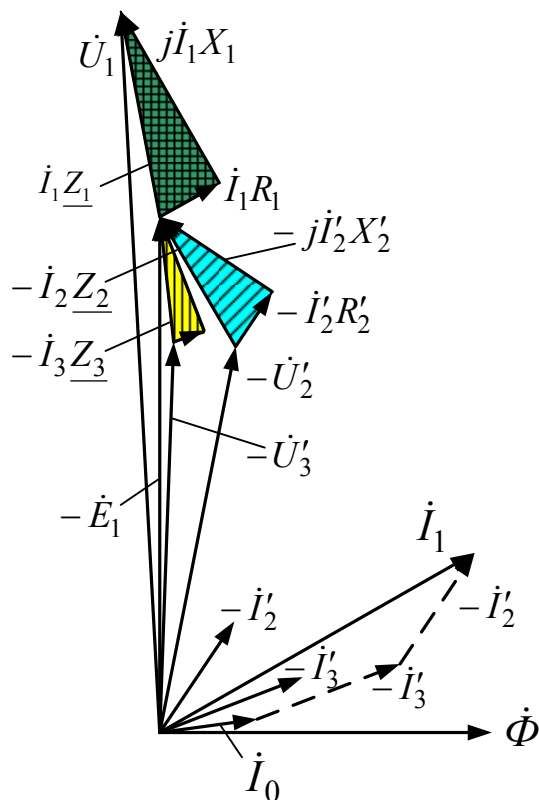


Рисунок 1.47 – Векторна діаграма триобмоткового трансформатора

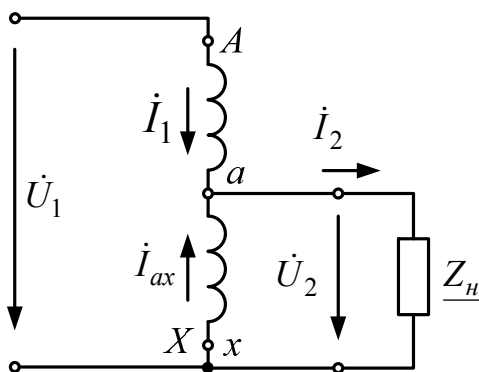


Рисунок 1.48 – Схема однофазного знижувального автотрансформатора

Вихідна напруга автотрансформатора на холостому ході на затискачах ax :

$$U_2 = U_1 \frac{w_{ax}}{w_{AX}} = U_1 \frac{1}{k}, \quad (1.135)$$

де w_{ax} – число витків, включених між виводами a і x ;

w_{AX} – число витків, включених між виводами A і X .

В автотрансформаторі розрізняють *прохідну потужність* S_{np} , що передається з первинного кола у вторинне і далі навантаженню, і *розрахункову або типову потужність* $S_{розр}$, що передається у вторинне коло електромагнітним полем.

Потужність $S_{розр}$ визначає габаритні розміри і масу автотрансформатора.

Прохідна потужність:

$$S_{np} = E_1 I_1 = E_2 I_2. \quad (1.136)$$

Розрахункова потужність:

$$S_{розр} = E_2 I_{ax}, \quad (1.137)$$

де I_{ax} – результуючий струм на ділянці ax обмотки, до якого підключене навантаження:

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_2 + \dot{I}_1 \quad (1.138)$$

або знехтувавши струмом холостого ходу і перейшовши до модулів струмів одержуємо

$$I_{ax} = I_2 - I_1. \quad (1.139)$$

З врахуванням (1.1349) формула прохідної потужності (1.136) набуде вигляду:

$$S_{np} = E_2 I_2 = E_2 (I_{ax} + I_1) = E_2 I_{ax} + E_2 I_1. \quad (1.140)$$

Перший доданок формули (1.140) – це *потужність, яка передається у вторинне коло електромагнітним полем (розрахункова потужність автотрансформатора)*:

$$S_{ем} = S_{розр} = E_2 I_{ax}, \quad (1.141)$$

а другий доданок – *потужність, яка передається у вторинне коло внаслідок електричного (гальванічного) зв'язку між первинним і вторинним колами:*

$$S_{ел} = E_2 I_1. \quad (1.142)$$

Врахувавши, що

$$I_1 = I_2' = \frac{I_2}{k}, \quad (1.143)$$

із (1.139) отримаємо:

$$I_{ax} = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (1.144)$$

Тоді розрахункова потужність автотрансформатора

$$S_{розр} = E_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (1.145)$$

Відношення

$$k_{виг} = \frac{S_{розр}}{S_{нр}} = 1 - \frac{1}{k} \quad (1.146)$$

називають *коефіцієнтом вигідності* [1].

Потужність, що передається у вторинне коло електричним шляхом,

$$S_{ел} = E_2 I_1 = E_2 I_2' = \frac{E_2 I_2}{k} = \frac{S_{нр}}{k}. \quad (1.147)$$

У двообмотковому трансформаторі $S_{ел} = 0$, а $S_{розр} = S_{нр}$.

Порівнюючи автотрансформатор з двообмотковим трансформатором, виходячи з викладеного вище, видно, що розрахункова потужність автотрансформатора менша, ніж потужність двообмоткового трансформатора при тій же прохідній потужності, яка передається з первинного кола у вторинне, що дозволяє виконати автотрансформатор з

меншою масою і меншими габаритними розмірами. Чим ближче значення коефіцієнта трансформації k до одиниці, тим менша розрахункова потужність автотрансформатора і тим вигідніше його застосовувати з погляду зменшення маси, габаритних розмірів і втрат потужності. Як показано в [1], при $k = 1,1$ розрахункова потужність автотрансформатора зменшується в 10 разів, а при $k = 10$ виходить майже такою же, як і в двообмоткового трансформатора.

При номінальному режимі в двообмотковому трансформаторі електричні втрати складають

$$\Delta p_{ел.тр} = I_{1ном}^2 R_1 + I_{2ном}^2 R_2 = I_{1ном}^2 R_k. \quad (1.148)$$

В автотрансформаторі сумарні електричні втрати на ділянках Aa й ax :

$$\Delta p_{ел.атт} = I_{Aa}^2 R_{Aa} + I_{ax}^2 R_{ax}, \quad (1.149)$$

де I_{Aa} – струм, що протікає по обмотці з виводами A і a ;

I_{ax} – струм, що протікає по обмотці з виводами a і x ;

R_{Aa} – активний опір обмотки між виводами A і a ;

R_{ax} – активний опір обмотки між виводами a і x .

В автотрансформаторі $I_{Aa} = I_1$ тому переріз проводів у первинній обмотці двообмоткового трансформатора і на ділянці Aa автотрансформатора однакові, а опір $R_{Aa} < R_1$ [1]:

$$R_{Aa} = R_1 \frac{w_{Aa}}{w_{Ax}} = R_1 \frac{w_1 - w_2}{w_1} = R_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (1.150)$$

На ділянці ax автотрансформатора проходить струм, який визначається за (1.144), тому переріз проводу на цій ділянці можна вибрати меншим, ніж у вторинній обмотці двообмоткового трансформатора. Їх відношення:

$$\frac{R_{ax}}{R_2} = \frac{I_2}{I_{ax}} = \frac{I_2}{I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)} = \frac{1}{1 - \frac{1}{k}}. \quad (1.151)$$

З врахуванням (1.144), (1.150), (1.146) формула (1.149) набуде вигляду:

$$\Delta p_{ел.амт} = I_1^2 R_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right) + \frac{I_2^2 \left(1 - \frac{1}{k}\right)^2 R_2}{1 - \frac{1}{k}} = (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2) \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (1.152)$$

Тому відношення електричних втрат в автотрансформаторі і двообмотковому трансформаторі:

$$\frac{\Delta p_{ел.амт}}{\Delta p_{ел.тр}} = 1 - \frac{1}{k}, \quad (1.153)$$

з якої випливає, що втрати потужності в автотрансформаторі менші, ніж у двообмотковому трансформаторі.

Активні й індуктивні опори автотрансформатора також менші, ніж відповідні опори двообмоткового трансформатора, тому струм короткого замикання в автотрансформатора, підключеного до мережі зі сторони обмотки ВН, більший ніж у двообмоткового трансформатора.

Істотним недоліком автотрансформаторів є те, що вторинне коло у них електрично з'єднане з первинним. Тому обмотка НН і підключені до неї споживачі повинні мати ту ж ізоляцію відносно землі, що й обмотка ВН і первинне коло. Тому для забезпечення електробезпеки не допускається застосовувати автотрансформатори для живлення кіл низької напруги від мережі високої напруги.

Автотрансформатори використовують здебільшого в лабораторіях для регулювання напруги живлення подальших кіл. Такі автотрансформатори називають ЛАТРами – лабораторними автотрансформаторами. Зовнішній вигляд ЛАТРів показано на рис. 1.49.

1.5 Спеціальні трансформатори

1.5.1 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори (measuring transformer) поділяють на трансформатори струму (ТС) і трансформатори напруги (ТН). Використовуються в колах змінного струму для розширення меж вимірювання електровимірювальних приладів, а також для підключення до кіл ВН обмоток реле, що забезпечують захист електричних установок від

аварійних режимів. При цьому електровимірювальні прилади виявляються ізольованими від кіл ВН, що забезпечує безпеку роботи обслуговуючого персоналу.

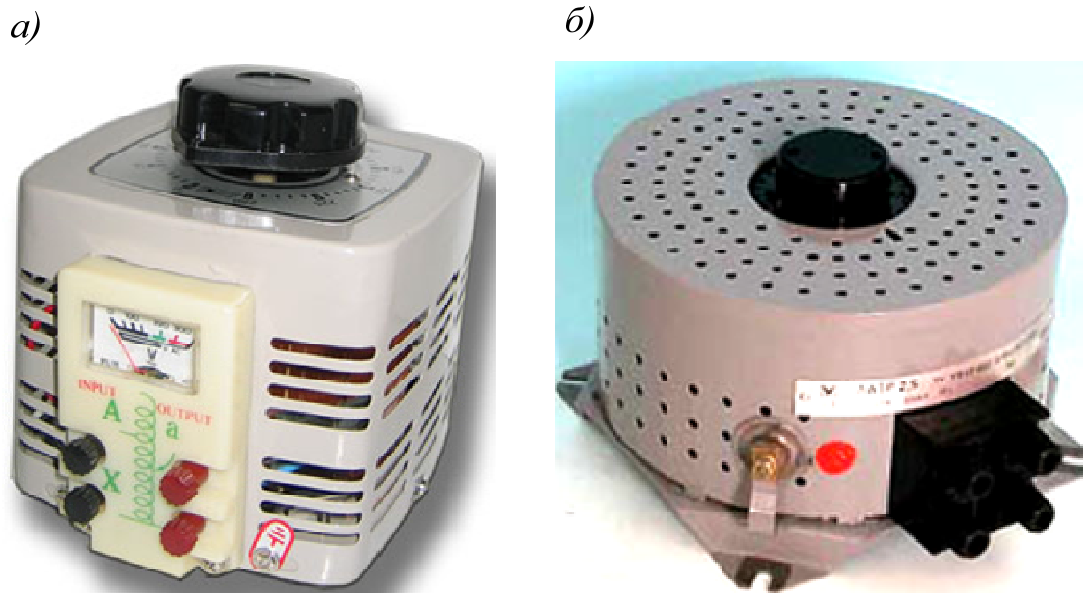


Рисунок 1.49 – ЛАТРи: а) типу TDGC2-0,5 [14]; б) ЛАТР-2,5 [15]

1.5.1.1 Трансформатор напруги

ТН (voltage transformer) (рис. 1.5, б) використовується для вимірювання напруги, частоти і для живлення паралельних котушок вимірювальних приладів (фазометрів, лічильників, ватметрів) та реле напруги.

ТН здебільшого працюють як знижувальні. Первинна обмотка $A-X$ однофазного ТН (рис. 1.50) вмикається в мережу паралельно (на повну напругу). До вторинної обмотки під'єднується вольтметр або інші паралельні обмотки приладів.

Для забезпечення безпеки роботи обслуговуючого персоналу вторинну обмотку ретельно ізолюють від первинної і заземлюють.

Вимірювальний ТН працює в режимі, близькому до холостого ходу, оскільки опори котушок, які підключаються до вторинної обмотки ТН, досить великі. Тому можна вважати, що

$$U_1 = U'_2 = U_2 k. \quad (1.154)$$

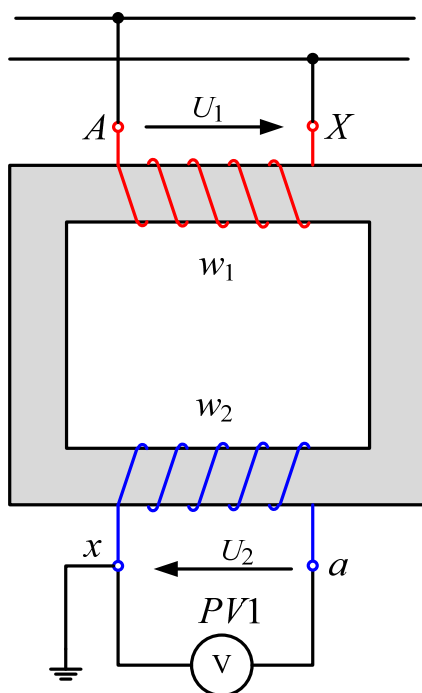


Рисунок 1.50 – Схема включення вимірювального ТН

Однак наявність струму холостого ходу I_0 в первинній обмотці та невеликого струму навантаження призводить до появи зсуву за фазою δ_U між повернутим на 180° вектором вторинної напруги \dot{U}'_2 і вектором первинної напруги \dot{U}_1 (рис. 1.51), в результаті чого довжина цих векторів також різна.

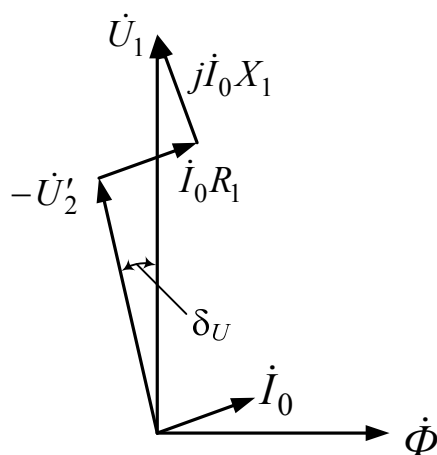


Рисунок 1.51 – Векторна діаграма вимірювального ТН

Вимірювальні ТН мають дві похибки:

1) *відносну похибку напруги*

$$\gamma_U = \frac{U_2 k - U_1}{U_1} \cdot 100\%; \quad (1.155)$$

2) *кутову похибку* δ_U .

Кутлова похибка вважається позитивною, якщо вектор \dot{U}'_2 випереджає вектор \dot{U}_1 .

Для зменшення похибок γ_U і δ_U опори обмоток трансформатора роблять по можливості малими, а магнітопровід виконують з високоякісної сталі досить великого поперечного перерізу, щоб у робочому режимі він не був насиченим, завдяки чому забезпечується значне зменшення струму холостого ходу.

Класи точності для вимірювальних ТН [1]:

- стаціонарних: 0,5; 1 і 3;
- лабораторних: 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5.

Позначення класу відповідає величині відносної похибки при номінальній напрузі. ТН зберігають клас точності при зміні первинної напруги від 80 до 120% номінальної.

1.5.1.2 Трансформатор струму

ТС (current transformer) використовують в електроустановках всіх напруг для вимірювання струмів або підключення струмових обмоток інших вимірювальних приладів чи реле струму.

Його виконують у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора (рис. 1.52) або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою служить провід, що проходить через вікно магнітопроводу.

Оскільки опори обмоток амперметрів та інших приладів, що підключаються до ТС малі, то він практично працює в режимі короткого замикання. Тому можна вважати

$$I_1 = I'_2 = I_2 k. \quad (1.156)$$

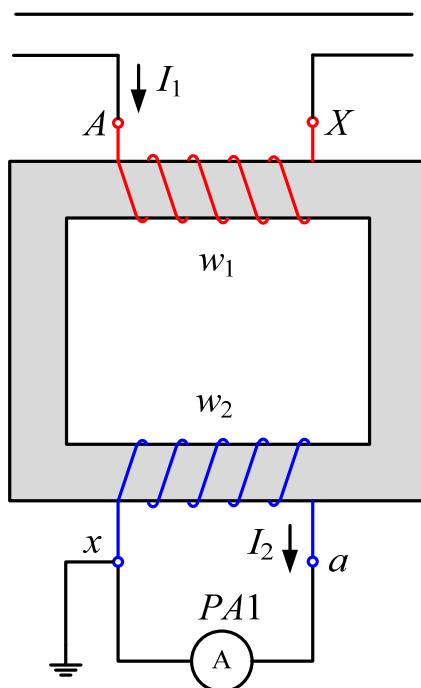


Рисунок 1.52 – Схема включення вимірювального ТС

У дійсності наявність в ТС струму холостого ходу I_0 , практично рівного струму намагнічування I_μ , призводить до нерівності векторів \dot{I}_1 і \dot{I}'_2 (рис. 1.53), що призводить до появи **абсолютної струмової похибки**

$$\gamma_I = \frac{I_2 k - I_1}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.157)$$

і кутової похибки δ_I (кут між векторами \dot{I}_1 і повернутого на 180° вектора \dot{I}'_2).

Похибка δ_I є додатною, якщо вектор $-\dot{I}'_2$ випереджає вектор \dot{I}_1 .

Класи точності для вимірювальних ТС [1]:

- стаціонарних: 0,2; 0,5; 1; 3 і 10;
- лабораторних: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2.

Наведені цифри відповідають струмовій допустимій похибці для даного класу при номінальному значенні струму.

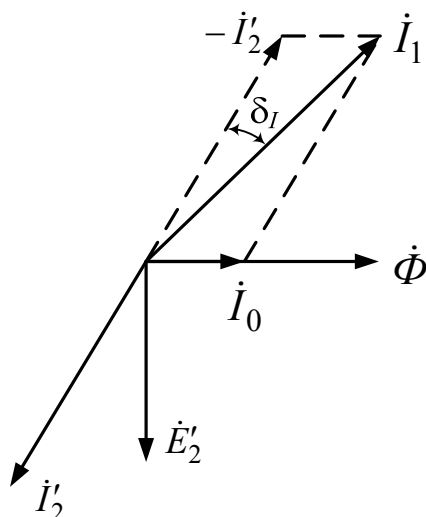


Рисунок 1.53 – Векторна діаграма вимірювального ТС

1.5.2 Трансформатори для вентильних перетворювачів

Вентильні перетворювачі підключаються до вторинної обмотки трансформатора послідовно з навантаженням.

Характерною рисою цих трансформаторів є неоднчасне навантаження окремих фаз, пов'язане з почерговим відкриванням вентилів, включених у відповідні фази. Тому струми первинної і вторинної обмоток мають несинусоїдальну форму і містять вищі гармоніки, які збільшують втрати і знижують ККД трансформатора.

Наявність в більшості випадків згладжувального дроселя значної індуктивності на стороні постійного струму призводить до того, що струми в обмотках трансформатора мають форму, близьку до прямокутної.

У загальному випадку струми I_1 і I_2 мають різні діючі значення, внаслідок чого розрахункові потужності первинної $S_{1розр}$ і вторинної $S_{2розр}$ обмоток неоднакові. Тому вводиться поняття типової потужності трансформатора вентильного перетворювача

$$S_{min} = 0,5 \cdot (S_{1розр} + S_{2розр}) \quad (1.158)$$

і коефіцієнт типової потужності

$$k_{\delta\epsilon i} = \frac{S_{\delta\epsilon i}}{P_{dii}}, \quad (1.159)$$

де $P_{\text{дном}}$ – потужність, яка споживається на стороні постійного струму перетворювача (вихідна потужність):

$$P_{\text{днн}} = U_{\text{днн}} I_{\text{днн}} \text{ ,} \quad (1.160)$$

де $U_{\text{дном}}$, $I_{\text{дном}}$ – номінальні значення напруги і струму на стороні постійного струму.

Типова потужність вентильного трансформатора S_{mun} більша його вихідної потужності $P_{\text{дном}}$ при номінальному навантаженні, тобто $k_{\text{mun}} > 1$ (тому що при будь-якій схемі випрямлення $U_2 > U_d$ і $I_2 > I_d$; U_d , I_d – відповідно напруга і струм на стороні постійного струму випрямляча).

Тому габаритні розміри і маса таких трансформаторів завжди більші, ніж у трансформаторів тієї ж номінальної потужності, які працюють при синусоїдальному струмі.

Співвідношення між випрямленою напругою і змінною напругою вторинної обмотки трансформатора залежить від схеми випрямлення вентильного пристрою:

$$U_{2\text{ном}} = k_U U_{\text{днно}} \text{ ,} \quad (1.161)$$

де k_U – коефіцієнт напруги.

Значення коефіцієнтів напруги і типової потужності для деяких схем випрямлення подані в табл. 1.2 [2].

Таблиця 1.2 – Значення k_U і k_{mun} для схем випрямлення

Схема випрямлення	k_U	k_{mun}
Однофазна однонапівперіодна	2,22	3,09
Однофазна двонапівперіодна мостова	1,11	1,23
Однофазна двонапівперіодна з мулевим виводом	1,11	1,48
Трифазна з нульовим виводом	0,855	1,345
Трифазна мостова	0,427	1,05

Порівняння різних схем випрямлення показало, що краще використання трансформатора забезпечується в мостових схемах випрямлення, в яких k_{mun} має мінімальне значення.

1.5.3 Трансформатори для електродугового зварювання

Трансформатор для електродугового зварювання (зварювальний трансформатор) (weld transformer) – це знижувальний однофазний двообмотковий сухий трансформатор, який перетворює напругу мережі 220 В або 380 В в напругу 60-75 В, необхідну для надійного запалювання і горіння електричної дуги між металевим електродом і деталями, що зварюються (рис. 1.3). При номінальному навантаженні вторинна напруга зменшується до 30 В.

Особливість роботи зварювального трансформатора – переривчастий режим роботи з різким переходом від холостого ходу до короткого замикання і в зворотному напрямку.

Оскільки для зварювального трансформатора коротке замикання є нормальним експлуатаційним режимом, то для обмеження струму короткого замикання і стійкого горіння дуги такий трансформатор повинний мати зовнішню характеристику з крутим спадом, а коло зварювального струму повинно мати значну індуктивність. Крім того, потрібно обмежувати струм короткого замикання.

Виконання цих умов можливе шляхом збільшення потоку розсіювання в трансформаторі і вмикання у вторинне коло індуктивної котушки зі сталевим осердям.

Тому первинну і вторинну обмотки трансформатора розміщують на різних стрижнях магнітопроводу. А для регулювання зварювального струму індуктивну котушку виконують з повітряним зазором в магнітному колі (із змінною індуктивністю). При зменшенні (за допомогою відповідного пристрою) повітряного зазору індуктивність котушки збільшується, а струм в колі зварювання при цьому зменшується.

Схема вмикання зварювального трансформатора подана на рис. 1.54.

Регулюючи індуктивність котушки, змінюють форму зовнішньої характеристики (рис. 1.55): при малому повітряному зазорі отримують криву 1 зі струмом горіння дуги $I_{2(1)}$, а при збільшенні зазору – криву 2 зі струмом горіння дуги $I_{2(2)}$ при заданій напрузі горіння дуги U_d .

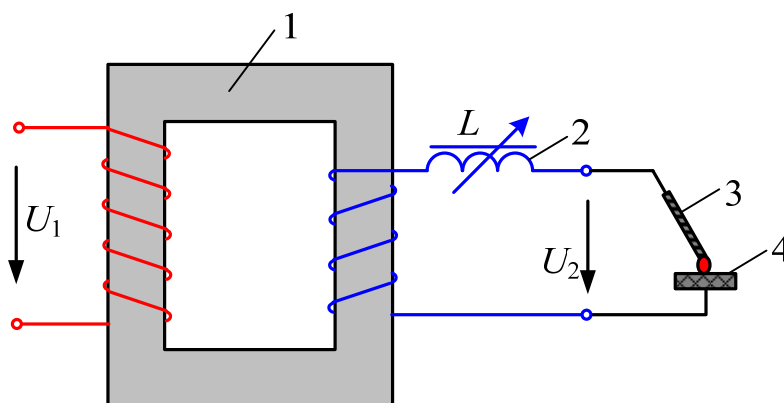


Рисунок 1.54 – Схема вмикання зварювального трансформатора із змінною індуктивністю: 1 – трансформатор; 2 – котушка зі змінною індуктивністю; 3 – електрод; 4 – деталь, що зварюється

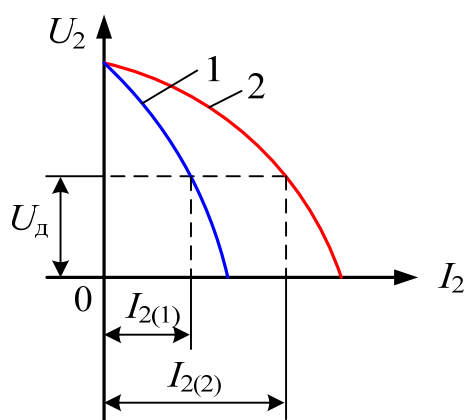


Рисунок 1.55 – Зовнішні характеристики зварювального трансформатора

1.5.4 Трансформатори для автоматичних пристроїв

1.5.4.1 Імпульсні трансформатори

Імпульсні трансформатори (impulse transformer) призначені для зміни амплітуди імпульсів, виключення постійної складової тощо.

Основна вимога до імпульсних трансформаторів – мінімальне викривлення форми імпульсів, що трансформуються.

Розглянемо ідеальний імпульсний трансформатор в режимі холостого ходу, який має сталу часу первинного кола [2]

$$\tau = \frac{L_1}{R_1}. \quad (1.162)$$

Стала часу визначається як дотична до графіка $i_1 = f(t)$.

На вхід трансформатора подамо однополярні імпульси прямокутної форми тривалістю t_i з періодом T (рис. 1.56), причому $t_i \gg \tau$.

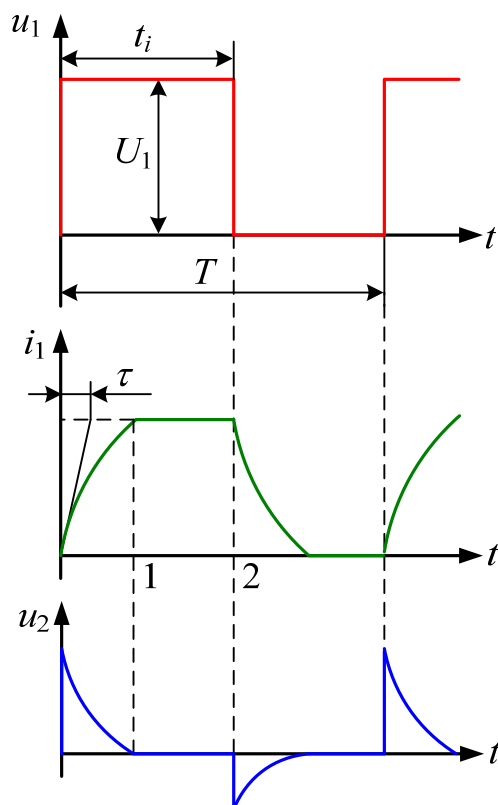


Рисунок 1.56 – Графіки напруг та струму в імпульсному трансформаторі при $t_i \gg \tau$

За таких умов графік струму $i_1 = f(t)$ має вигляд кривої, що відрізняється від прямокутника, а графік $u_2 = f(t)$ зовсім спотворений. Тому при $t_i \gg \tau$ трансформування імпульсів неможливе.

Якщо на вхід імпульсного трансформатора подати імпульси $t_i \ll \tau$ (рис. 1.57), то коли імпульс i_1 припиняється ще до закінчення перехідного процесу в первинному колі, імпульси на виході трансформатора u_2 не мають значних спотворень. При цьому негативна частина імпульсу легко усувається включенням діода у вторинне коло трансформатора [2].

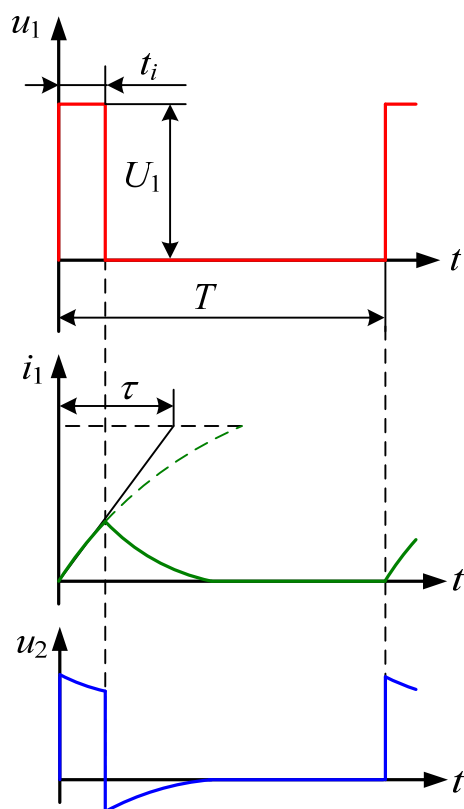


Рисунок 1.57 – Графіки напруг та струму в імпульсному трансформаторі при $t_i \ll \tau$

В реальному імпульсному трансформаторі на перехідні процеси впливають гістерезис, вихрові струми, паразитні ємнісні зв'язки (між витками й обмотками) і індуктивності розсіювання обмоток. Для послаблення небажаного впливу перерахованих факторів імпульсні трансформатори проектують таким чином, щоб вони працювали з лінійною магнітною характеристикою (щоб робоча точка розміщувалася нижче зони магнітного насичення на кривій намагнічування), а магнітний матеріал сердечника мав невелику залишкову індукцію.

Зовнішній вигляд деяких із видів імпульсних трансформаторів подано на рис. 1.58.

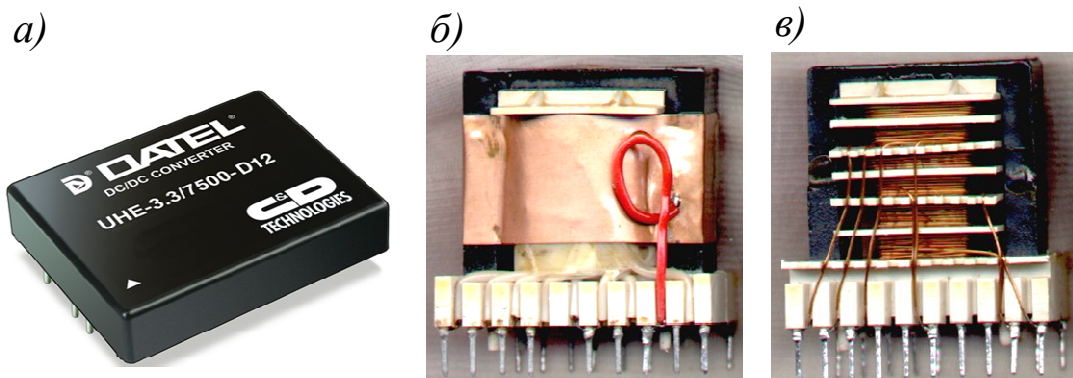


Рисунок 1.58 – Імпульсні трансформатори:
 а) типу UNE [16]; б) типу ТПІЗ [17]; в) типу ТПІ655 [17]

1.5.4.2 Пік-трансформатори

Пік-трансформатори призначені для перетворення синусоїдальної напруги, що подається на первинну обмотку, в імпульси напруги пікоподібної форми на виході вторинної обмотки.

Пік-трансформатори застосовуються в електронній техніці для керування тиристорами, тиратронами та ін. Принцип дії пік-трансформаторів базується на явищі магнітного насичення феромагнітного матеріалу.

Пік-трансформатори виготовляють двох видів:

- з активним опором;
- з магнітним шунтом.

Пік-трансформатор з активним опором має сильно насичений магнітопровід, а його первинна обмотка підключається на синусоїдну напругу u_1 через резистор з великим активним опором $R_{од}$ (рис. 1.59, а), який потрібен для обмеження струму в первинній обмотці.

На холостому ході при синусоїдному струмі первинний струм i_1 магнітний потік Φ має сильно стиснуту форму, в результаті чого вторинна напруга u_2 має пікоподібну форму (рис. 91.59, б).

Пік-трансформатор з магнітним шунтом (рис. 1.60, а) вторинна обмотка трансформатора розташовується на досить тонкому стрижні, паралельно якому встановлюється магнітний шунт із майже лінійною характеристикою. При синусоїдальній формі потоку Φ_1 (рис. 1.60, б) складові потоку шунта $\Phi_{ш}$ і вторинної обмотки Φ_2 будуть

несинусоїдальними. Стиснута форма кривої $\Phi_2 = f(t)$ забезпечує пікоподібну форму кривої напруги u_2 .

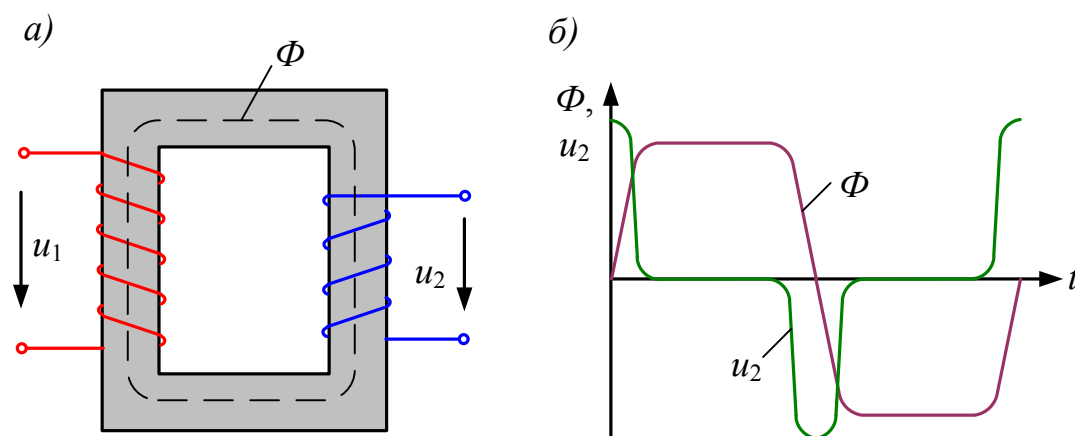


Рисунок 1.59 – Схема пік-трансформатора з активним опором (а) та криві магнітного потоку і вторинної напруги (б)

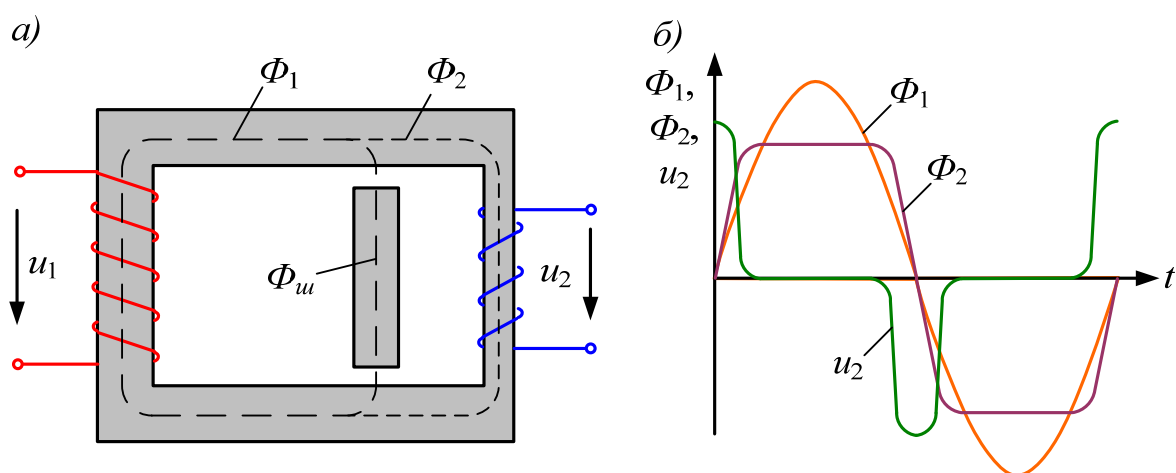


Рисунок 1.60 – Схема пік-трансформатора з магнітним шунтом (а) та криві магнітних потоків і вторинної напруги (б)

Лабораторна робота №1Т

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ДВООБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА



Мета роботи

Ознайомитись з будовою однофазного та трифазного двообмоткових трансформаторів, дослідити їх в режимах холостого ходу і короткого замикання; використовуючи результати проведених дослідів, розрахунковим шляхом отримати характеристики трансформаторів в режимі навантаження й порівняти їх із дослідними; проаналізувати вплив схем з'єднання обмоток трансформатора на величину і форму кривих його струму намагнічування, фазних і лінійних напруг обмоток.

1Т.1 Програма виконання лабораторної роботи

1Т.1.1 Експериментальна частина

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією досліджуваного трансформатора, записати його номінальні параметри та підібрати відповідні вимірювальні прилади.
2. Провести дослід холостого ходу трансформатора.
3. Провести дослід короткого замикання трансформатора.
4. Провести дослід навантаження трансформатора.

1Т.1.2 Розрахункова частина

1. За даними дослідів холостого ходу при номінальній напрузі трансформатора розрахувати:

- коефіцієнт потужності $\cos\varphi_0$;
- коефіцієнт трансформації k ;
- параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення.

Для трифазного трансформатора крім того розрахувати:

- магнітні втрати Δp_m ;

– струм холостого ходу I_0 у відсотках від номінального та його активну і реактивну складові.

2. За даними досліду короткого замикання при номінальному струмі трансформатора розрахувати:

– параметри обмоток R_1, R'_2, X_1, X'_2 ;

– напругу короткого замикання $U_{к.ном} \%$ у відсотках від номінальної первинної напруги та її активну $U_{к.а.ном} \%$ і реактивну $U_{к.р.ном} \%$ складові;

– зовнішні характеристики трансформатора при активному, індуктивному та ємнісному навантаженнях.

3. За даними дослідів холостого ходу та короткого замикання розрахувати залежність ККД трансформатора від навантаження при $\cos\varphi_2 = 1$.

1Т.1.3 Графічна частина

1. За дослідними і розрахунковими даними побудувати:

– графіки залежностей $I_0, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{10})$;

– графіки залежностей $I_{1к}, P_{1к}; \cos\varphi_k = f(U_k)$;

– графіки залежностей $\Delta U_2 \% = f(\beta)$ при $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$;

– зовнішні характеристики $U_2 = f(\beta)$ при $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$; на цих графіках для порівняння нанести дослідні зовнішні характеристики;

– графік залежності $\eta = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2 = 1$; для порівняння побудувати відповідну дослідну залежність.

2. Зобразити електричну схему заміщення трансформатора та позначити на ній всі її параметри.

1Т.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1Т.2.1 Експериментальна частина

1. Для проведення досліду холостого ходу необхідно зібрати схему, подану: для однофазного трансформатора – на рис. 1Т.1, для трифазного – на рис. 1Т.2.

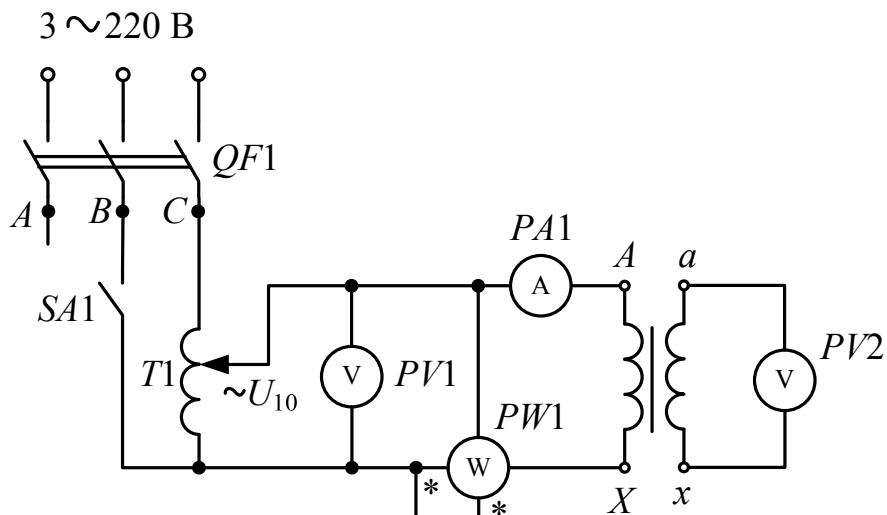


Рисунок 1Т.1 – Схема електрична принципова дослідження холостого ходу однофазного трансформатора

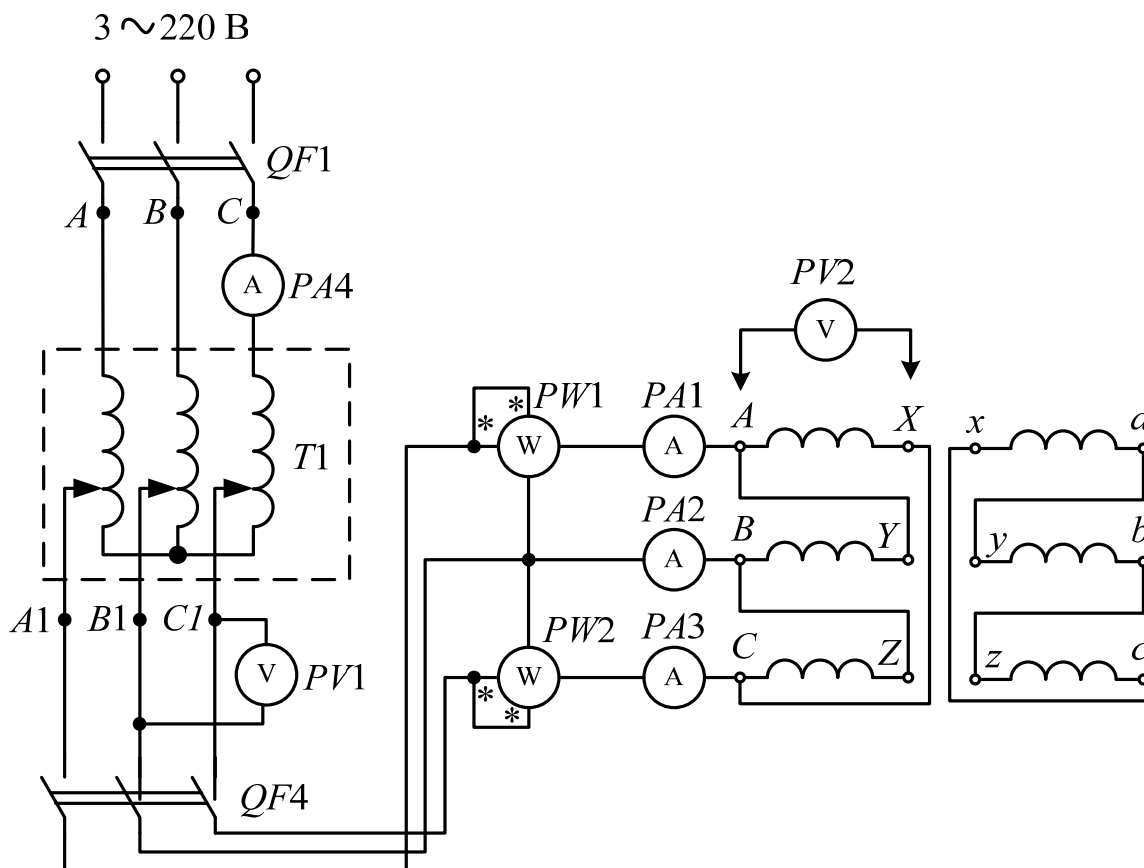


Рисунок 1Т.2 – Схема електрична принципова дослідження холостого ходу трифазного трансформатора

Дослід холостого ходу виконується при розімкненому колі навантаження, тобто при $Z_n = \infty$ і $I_2 = 0$. За допомогою ЛАТРа Т1 підводиться до трансформатора напруга, яка повинна змінюватись у діапазоні $(0,4 \div 1,1)U_{1ном}$. В межах зазначеного діапазону провести вимірювання напруги, струмів та потужностей в 6 – 8 точках. Результати вимірювань занести до табл. 1Т.1 для однофазного трансформатора і до табл. 1Т.2 для трифазного трансформатора.

Таблиця 1Т.1 – Дані досліду холостого ходу однофазного трансформатора

№ досл.	Дослід				Розрахунок	
	I_0 , А	U_{10} , В	P_0 , Вт	U_{20} , В	$\cos\varphi_0$, в.о.	k , в.о.
1						
2						
⋮						

Розрахункові величини табл. 1Т.1: $\cos\varphi_0$ визначають за формулою (1.69), а k – за формулою (1.68).

Розрахункові величини табл. 1Т.2: I_0 визначається за формулою (1.59), P_0 – за формулою (1.61), $\cos\varphi_0$ – за формулою (1.70), k – за формулою (1.68),

$$U_{10} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad (1Т.1)$$

де U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – лінійна напруга між відповідними фазами A і B , B і C та C і A первинної обмотки трансформатора;

$$U_{20} = \frac{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}{3}, \quad (1Т.2)$$

де U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} – лінійна напруга між відповідними фазами a і b , b і c та c і a вторинної обмотки трансформатора.

Таблиця 1Г.2 – Дані досліді холостого ходу трифазного трансформатора

№ ДОСЛ.	Дослід												Розрахунок				
	I_{0A} А	I_{0B} А	I_{0C} А	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	P'_0 Вт	P''_0 Вт	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	I_0 А	U_{10} В	P_0 Вт	U_{20} Вт	$\cos\varphi_0$ В.О.	k В.О.
1																	
2																	
⋮																	

2. Для проведення досліду короткого замикання зібрати схему, подану: для однофазного трансформатора – на рис. 1Т.3, для трифазного – на рис. 1Т.4.

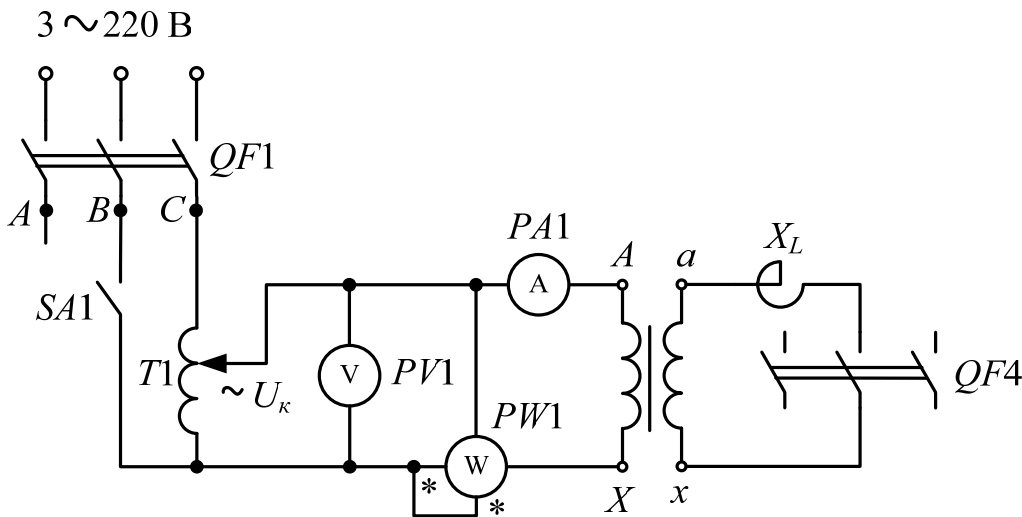


Рисунок 1Т.3 – Схема електрична принципова
досліду короткого замикання однофазного трансформатора

Необхідно пам'ятати, що в досліді короткого замикання до трансформатора повинна підводитись знижена напруга U_k , найбільше значення якої повинно бути таким, щоб йому відповідали номінальні струми в обмотках трансформатора $I_{1ном}$ та $I_{2ном}$.

Перед початком досліду за допомогою ЛАТРа Т1 (рис. 1Т.4) встановлюють $U_k = 0$ і тільки після цього вмикають автомат QF4. Потім напруга повинна плавно збільшуватись до значення U_k , при якому $I_{1к} = 1,2I_{1ном}$. В межах зазначеного діапазону вимірюють напруги, струми і потужності в 6 – 8 точках. Результати вимірювань заносять до табл. 1Т.3 для однофазного трансформатора і до табл. 1Т.4 для трифазного трансформатора.

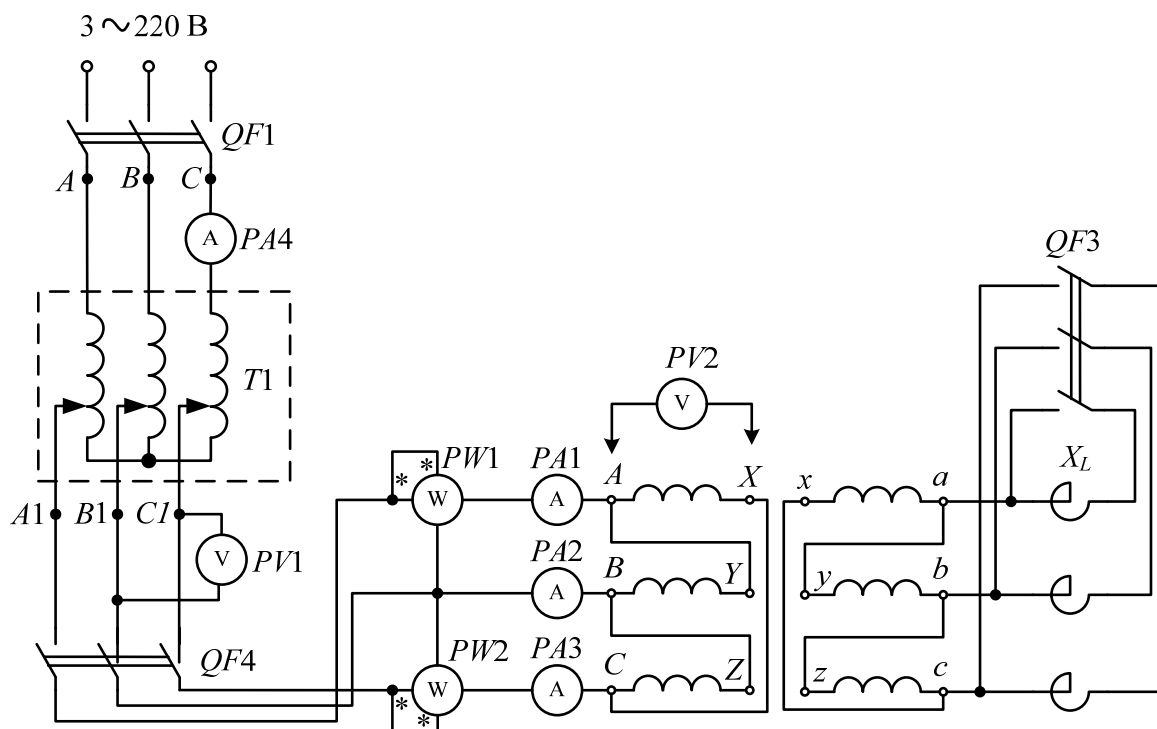


Рисунок 1Т.4 – Схема електрична принципова дослідю короткого замикання трифазного трансформатора

Таблиця 1Т.3 – Дані дослідю короткого замикання однофазного трансформатора

№ ДОСЛ.	Дослід			Розрахунок						
	$I_{1к}$	$U_{к}$	$P_{к}$	$\cos\varphi_{к}$	$U_{к\%}$	$U_{к.а.\%}$	$U_{к.р.\%}$	$Z_{к}$	$R_{к}$	$X_{к}$
	А	В	Вт	в.о.	%	%	%	Ом	Ом	Ом
1										
2										
⋮										

Розрахункові величини табл. 1Т.3: $\cos\varphi_{к}$ визначають за формулою (1.74), напругу короткого замикання $U_{к\%}$ – за формулою

$$U_{к\%} = \frac{U_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100\%, \quad (1Т.3)$$

активну складову напруги короткого замикання $U_{к.а. \%}$ – за формулою

$$U_{к.а. \%} = U_{к \%} \cdot \cos \varphi_{к}, \quad (1Т.4)$$

реактивну складову напруги короткого замикання $U_{к.р. \%}$ – за формулою

$$U_{к.р. \%} = U_{к \%} \cdot \sin \varphi_{к} = \sqrt{U_{к \%}^2 - U_{к.а. \%}^2}, \quad (1Т.5)$$

$Z_{к}$ – за формулою (1.79), $R_{к}$ – за формулою

$$R_{к} = \frac{P_{к}}{I_{1к}^2}, \quad (1Т.5)$$

$X_{к}$ – за формулою

$$X_{к} = Z_{к} \sin \varphi_{к} = \sqrt{Z_{к}^2 - R_{к}^2}. \quad (1Т.6)$$

Розрахункові величини табл. 1Т.4: $I_{1к}$ визначають за формулою (1.75), $U_{к}$ – за формулою

$$U_{к} = \frac{1}{3} \cdot (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}), \quad (1Т.7)$$

$P_{к}$ – за формулою (1.76), $\cos \varphi_{к}$ – за формулою (1.78), $U_{к \%}$ – за формулою (1Т.3), $U_{к.а. \%}$ – за формулою (1Т.4), $U_{к.р. \%}$ – за формулою (1Т.5), пори $Z_{к}$, $R_{к}$ та $X_{к}$ – за системою рівнянь (1.81).

3. Досліди навантаження виконують при активному ($Z_{н} = R_{н}$) навантаженні, для чого на вихідні виводи трансформатора вмикається відповідне навантаження (рис. 1Т.5 – для однофазного трансформатора, рис. 1Т.6 – для трифазного трансформатора). Вимірювальні прилади повинні бути підібрані відповідно до очікуваних величин напруги, струмів і потужностей.

В дослідах навантаження трансформатор повинен працювати при номінальному і постійному значенні напруги живлення $U_{1ном} = \text{const}$. Струм навантаження I_2 повинен змінюватись від нуля до $1,2I_{2ном}$. В цьому діапазоні необхідно провести вимірювання в 6–8 точках, результати

вимірювань занести до табл. 1Т.5 для однофазного трансформатора і до табл. 1Т.6 для трифазного трансформатора.

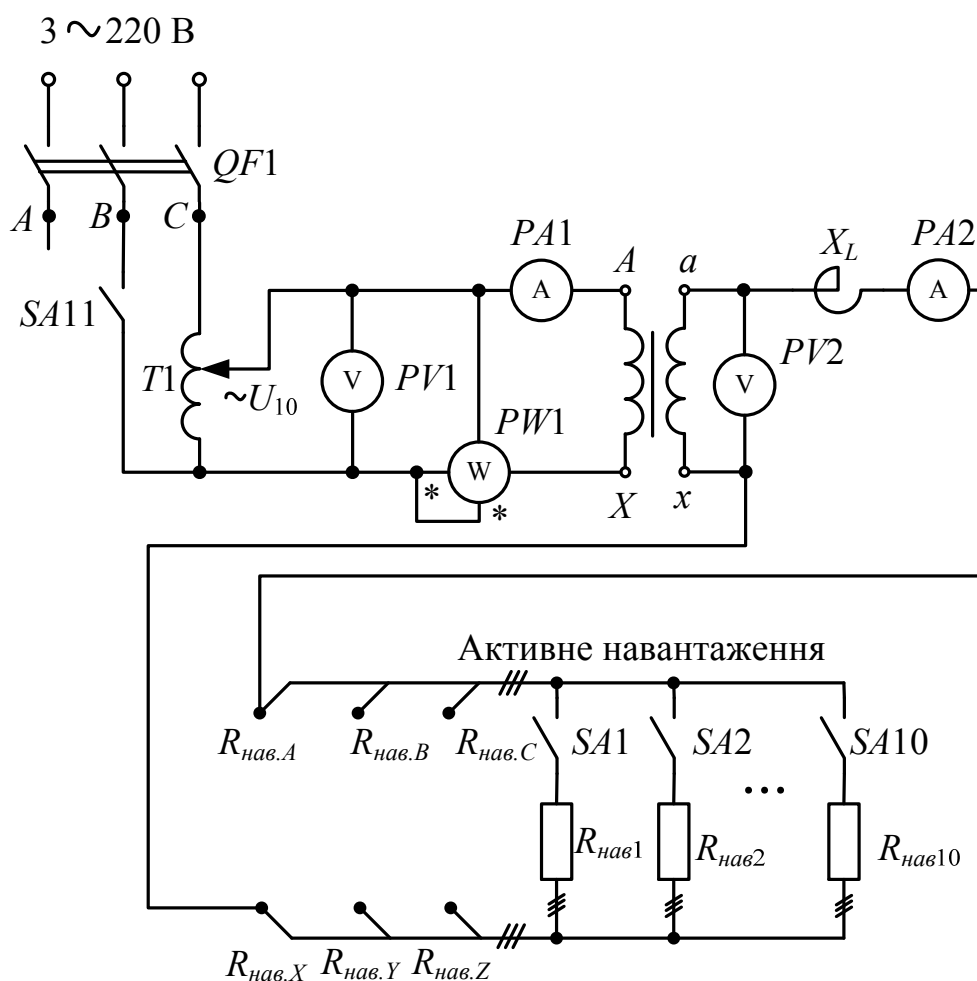


Рисунок 1Т.5 – Схема електрична принципова дослідження навантаження однофазного трансформатора

Розрахункові величини табл. 1Т.3: P_2 визначається за формулою

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2, \quad (1Т.8)$$

β – за формулою (1.95), η – за формулою (1.111), $\Delta U_2\%$ – за формулою

$$\Delta U_2\% = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}}. \quad (1Т.9)$$

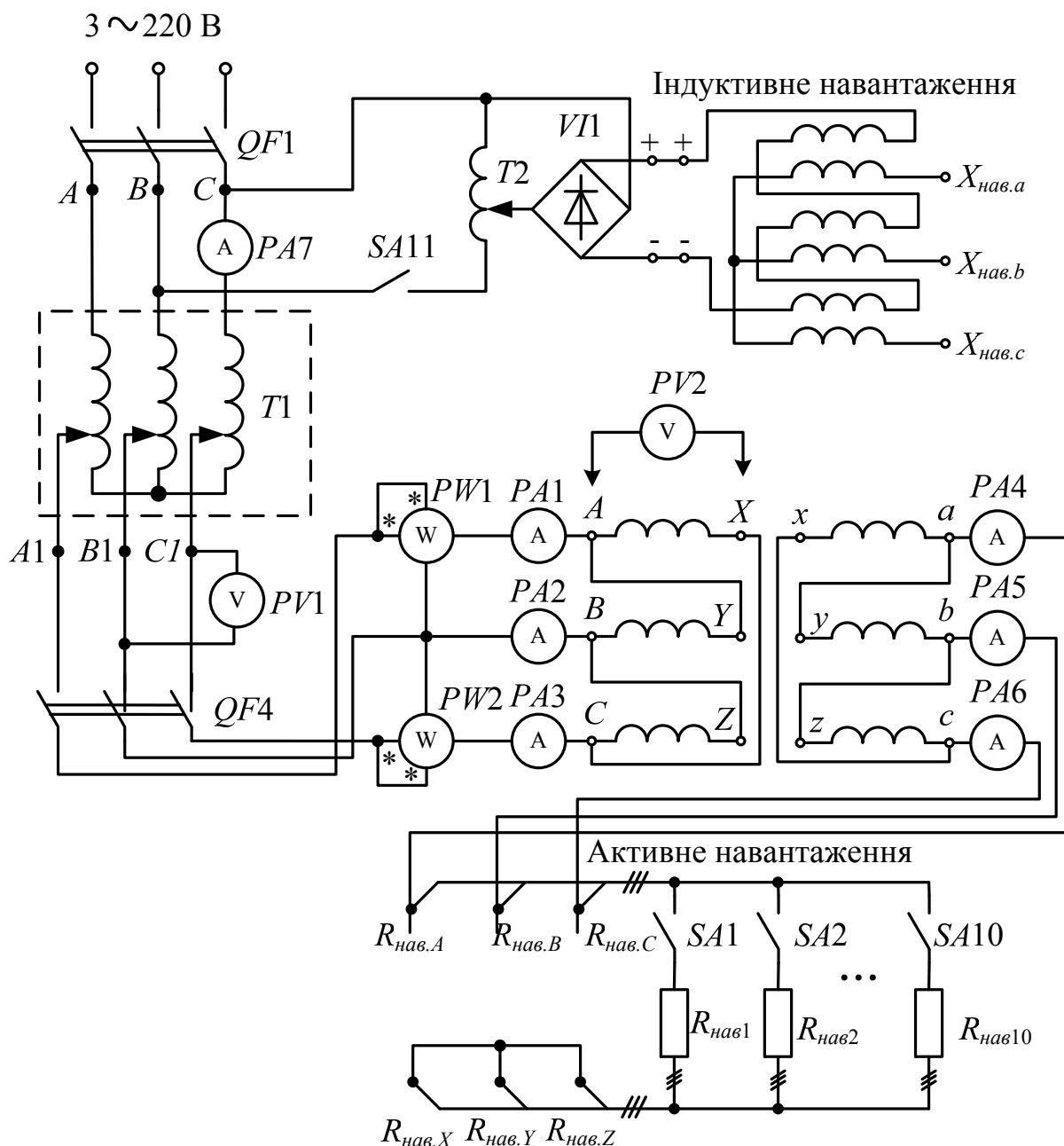


Рисунок 1Т.6 – Схема електрична принципова дослідження навантаження трифазного трансформатора

Розрахункові величини табл. 1Т.6: P_1 визначається за формулою

$$P_1 = P' \pm P'', \quad (1Т.10)$$

де P' , P'' – покази ватметрів в режимі навантаження,

U_2 – за формулою

Таблиця 1Г.4 – Дані досліді короткого замикання трифазного трансформатора

№ ДОСЛ.	Дослід								Розрахунок									
	$I_{KA},$	$I_{KB},$	$I_{KC},$	$U_{AB},$	$U_{BC},$	$U_{CA},$	$P'_K,$	$P''_K,$	$I_{K1},$	$U_{K1},$	$\cos\phi_{K1}$	$U_{K2},$	$U_{K3},$	$U_{K4},$	$U_{K5},$	$Z_{K3},$	$R_{K3},$	$X_{K3},$
	A	A	A	B	B	B	Вт	Вт	A	В	В.О.	В	ОМ	%	ОМ	ОМ	ОМ	
1																		
2																		
⋮																		

Таблиця 1Т.5 – Дані досліду навантаження для однофазного трансформатора

№ досл.	Дослід					Розрахунок			
	$\varphi_2,$ °	$U_1,$ В	$P_1,$ Вт	$I_2,$ А	$U_2,$ В	$P_2,$ Вт	$\beta,$ %	$\eta,$ в.о.	$\Delta U_2 \%,$ %
1	0°								
2									
⋮									

Таблиця 1Т.6 – Дані досліду навантаження для трифазного трансформатора

№ досл.	Дослід										Розрахунок						
	$\varphi_2,$ °	$U_1,$ В	$P',$ Вт	$P'',$ Вт	$I_{2a},$ А	$I_{2b},$ А	$I_{2c},$ А	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$P_1,$ Вт	$U_2,$ В	$I_2,$ А	$P_2,$ Вт	$\beta,$ %	$\eta,$ в.о.	$\Delta U_2 \%,$ %
1	0																
2																	
⋮																	
1	90																
2																	
⋮																	

$$U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}), \quad (1Т.11)$$

I_2 – за формулою

$$I_2 = \frac{1}{3} \cdot (I_{2a} + I_{2b} + I_{2c}), \quad (1Т.12)$$

де I_{2a}, I_{2b}, I_{2c} – струми в лініях a, b та c ;

P_2 – за формулою

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (1Т.13)$$

β – за формулою (1.95), η – за формулою (1.111), $\Delta U_{2\%}$ – за формулою (1Т.9).

1Т.2.2 Розрахункова частина

В реальних умовах експлуатації трансформатор зазвичай працює при номінальному значенні напруги живлення, у зв'язку з чим усі параметри, які характеризують його роботу при холостому ході, повинні визначатися саме для цього значення напруги [18].

Розрахувати зовнішні характеристики трансформатора, використовуючи формулу (1.96) та

$$U_2 = U_{2ном} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{2\%}}{100} \right). \quad (1Т.14)$$

Розрахунок потрібно зробити для трьох граничних значень кута $\varphi_2 = 0^\circ$ (активне навантаження), 90° (індуктивне навантаження) та -90° (ємнісне навантаження) і для робочого діапазону зміни β від нуля до одиниці.

Результати розрахунків занести до табл. 1Т.7.

Таблиця 1Т.7 – Результати розрахунку вторинної напруги та ККД при зміні навантаження

$\varphi_2, ^\circ$		β					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
90	$\Delta U\%$						
	U_2						
-90	$\Delta U\%$						
	U_2						
0	$\Delta U\%$						
	U_2						
	η						

ККД трансформатора можна розрахувати на основі даних, приведених у паспорті трансформатора й отриманих з дослідів холостого ходу і короткого замикання за формулою (1.117).

ККД слід розраховувати при активному характері навантаження. Результати розрахунку занести до табл. 1Т.7.

Необхідно визначити максимальний ККД трансформатора.

1Т.2.3 Графічна частина

За даними дослідів холостого ходу побудувати в одних координатних осях залежності I_0 , P_0 , $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$ і вказати на них значення цих величин, що відповідають номінальній напрузі.

За даними дослідів короткого замикання побудувати в одних координатних осях залежності $I_{1к}$, $P_{1к}$; $\cos\varphi_k = f(U_k)$ і вказати на них значення усіх величин, що відповідають номінальному струму, тобто $I_{1к} = I_{1ном}$.

В одних координатних осях побудувати розрахункові залежності $\Delta U_2 \% = f(\beta)$ при $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$.

В одних координатних осях побудувати розрахункові зовнішні характеристики трансформатора $U_2 = f(\beta)$ при $\varphi_2 = 0^\circ, +90^\circ, -90^\circ$. Там само для порівняння побудувати відповідні дослідні характеристики, зняті при $\varphi_2 = 0^\circ$ і 90° .

Ще в одних координатних осях побудувати розрахункову і дослідну залежності $\eta = f(\beta)$ при активному характері навантаження.

Зобразити в звіті повну електричну схему заміщення досліджуваного трансформатора і вказати на ній кількісні значення всіх її параметрів.

1Т.3 Питання до захисту



1. Будова і призначення основних вузлів трансформатора.
2. Магнітні потоки і рівняння трансформатора в режимі холостого ходу.
3. Електрична схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу та фізичний зміст її параметрів.
4. Призначення і методика проведення дослідів холостого ходу.

5. Довести, що вольт-амперна характеристика трансформатора на холостому ході, тобто $U_{10} = f(I_{10})$, повторює характер кривої намагнічування сталі магнітопроводу, тобто $B_{cm} = f(H_{cm})$, а залежність $U_{10} = f(I_{10})$ має параболічний характер.
6. Пояснити форми кривих струмів і напруги в режимі холостого ходу трифазного трансформатора при різних схемах з'єднання його обмоток.
7. Електрична схема заміщення трансформатора при короткому замиканні та фізичний зміст її параметрів.
8. Призначення і методика проведення досліду короткого замикання.
9. Пояснити вигляд зовнішніх характеристик трансформатора при різних характерах навантаження.
10. Пояснити вигляд залежності $\eta = f(\beta)$. Методика визначення максимального значення ККД.
11. Векторні діаграми трансформатора на холостому ході і при різних характерах навантаження; методика їх побудови.

1Т.4 Задачі для самостійного розв'язування

1. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю $S_{ном} = 1,5$ кВ·А і з'єднанням обмоток ВН і НН в трикутник розрахувати фазні та лінійні номінальні струми обох обмоток, корисну та споживану активні потужності, споживану реактивну потужність, якщо номінальні лінійні напруги обмоток дорівнюють 220 і 133 В, номінальний ККД $\eta_n = 92\%$, коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi_2 = 0,8$.

2. Трифазний трансформатор з номінальними параметрами, наведеними в попередній задачі, працює як знижувальний в режимі холостого ходу і споживає з мережі струм, який складає 10% номінального. Активний опір фази первинної обмотки $R_1 = 1,8$ Ом. Коефіцієнт потужності трансформатора в цьому режимі $\cos\varphi_0 = 0,2$. Визначити магнітні втрати трансформатора.

3. Для трифазного трансформатора з номінальною потужністю 1,5 кВ·А і номінальним ККД, рівним 92%, визначити постійні та змінні втрати в

номінальному режимі при $\cos\varphi_2 = 0,8$, якщо відомо, що постійні втрати складають $1/4$ змінних втрат при номінальному навантаженні трансформатора. Розрахувати також значення максимального ККД трансформатора.

4. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю $S_{ном} = 1,5$ кВ·А, $U_{1ном} = 220$ В, $U_{2ном} = 133$ В та з'єднанням обох обмоток в трикутник розрахувати процентне значення напруги короткого замикання та його активну і реактивну складові, якщо опори фаз обмоток трансформатора складають $R_1 = R_2' = 1,80$ Ом, $X_1 = X_2' = 0,35$ Ом. Визначити також усталене значення експлуатаційного струму короткого замикання кожної з обмоток трансформатора.

5. Для трифазного трансформатора з номінальною потужністю $S_{ном} = 1,5$ кВ·А, $U_{1ном} = 220$ В, $U_{2ном} = 230$ В та з'єднанням первинної обмотки в трикутник, а вторинної в зірку визначити в режимі номінального навантаження при $\cos\varphi_2 = 0,8$ вихідну фазну напругу, якщо опори обмоток трансформатора складають $R_1 = R_2' = 1,8$ Ом, $X_1 = X_2' = 0,35$ Ом. Струмом холостого ходу трансформатора знехтувати.

6. В результаті вимірювання мостом постійного струму отримані опори обмоток трансформатора $R_1 = 1,8$ Ом, $R_2 = 0,6$ Ом. Номінальні фазні напруги обмоток $U_{1фном} = 220$ В, $U_{2фном} = 127$ В. Визначити активні та індуктивні опори обох обмоток приведенного трансформатора, якщо напруга короткого замикання трансформатора $U_k \% = 4\%$, $I_{1фном} = 2,28$ А.

7. Знайти діюче значення ЕРС одного витка і числа витків обмоток трансформатора, якщо номінальні напруги обмоток $U_{1ном} = 220$ В, $U_{2ном} = 230$ В і схеми їх з'єднання відповідно трикутник і зірка. Активний переріз стрижня магнітопроводу $P_{ст} = 26$ см², індукція в стрижні $B_{ст} = 1,3$ Тл.

8. В режимі холостого ходу трифазний знижувальний трансформатор потужністю $S_{ном} = 1,5$ кВ·А, $U_{1ном} = 220$ В, $U_{2ном} = 133$ В та з'єднанням обмоток в трикутник споживає з мережі струм, рівний 10% від номінального значення. Споживана з мережі активна потужність $P_0 = 60$ Вт. Опори первинної обмотки $R_1 = 1,8$ Ом, $X_1 = 0,35$ Ом. Визначити параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення трансформатора.

Лабораторна робота №2Т

ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА



Мета роботи

Дослідним шляхом визначити групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора для різного сполучення схем з'єднання обмоток ВН і НН та різного маркування їх початків і кінців; зробити початкове маркування виводів усіх фаз обох обмоток трансформатора.

2Т.1 Короткі теоретичні відомості

Залежно від маркування початків і кінців обмоток трансформатора та напрямку їх намотування вектори ЕРС обмоток можуть мати різні напрямки.

Наприклад, якщо дві обмотки ВН $A-X$ і НН $a-x$, намотані в одному напрямку і мають однакове маркування початків і кінців (рис. 2Т.1, *а*), то відповідно до закону електромагнітної індукції позитивні напрямки індуктованих в них ЕРС пов'язані з напрямком магнітного потоку Φ правилом правого гвинта, внаслідок чого обидві вони (\dot{E}_{XA} – вектор ЕРС між виводами X і A , \dot{E}_{xa} – вектор ЕРС між виводами x і a) спрямовані від нижнього кінця обмотки до верхнього, тобто від їхніх кінців до початків. При однаковому маркуванні ці ЕРС будуть однойменними і їх вектори збігатимуться [18].

Якщо в обмотці НН поміняти місцями маркування початків і кінців, то в самій обмотці напрямок ЕРС не зміниться (рис. 2Т.1, *б*), але тепер відповідно до нового маркування вона повинна бути спрямована не від кінця до початку, як у першому випадку, а від початку до кінця. Внаслідок цього з вектором \dot{E}_{XA} повинен збігатися вектор \dot{E}_{ax} , а однойменний вектор \dot{E}_{xa} буде спрямований назустріч \dot{E}_{XA} .

Такий самий результат буде спостерігатися й у випадку незмінного маркування початків і кінців обох обмоток, але при зміні напрямку намотування обмотки НН на протилежний (рис. 2Т.1, *в*).

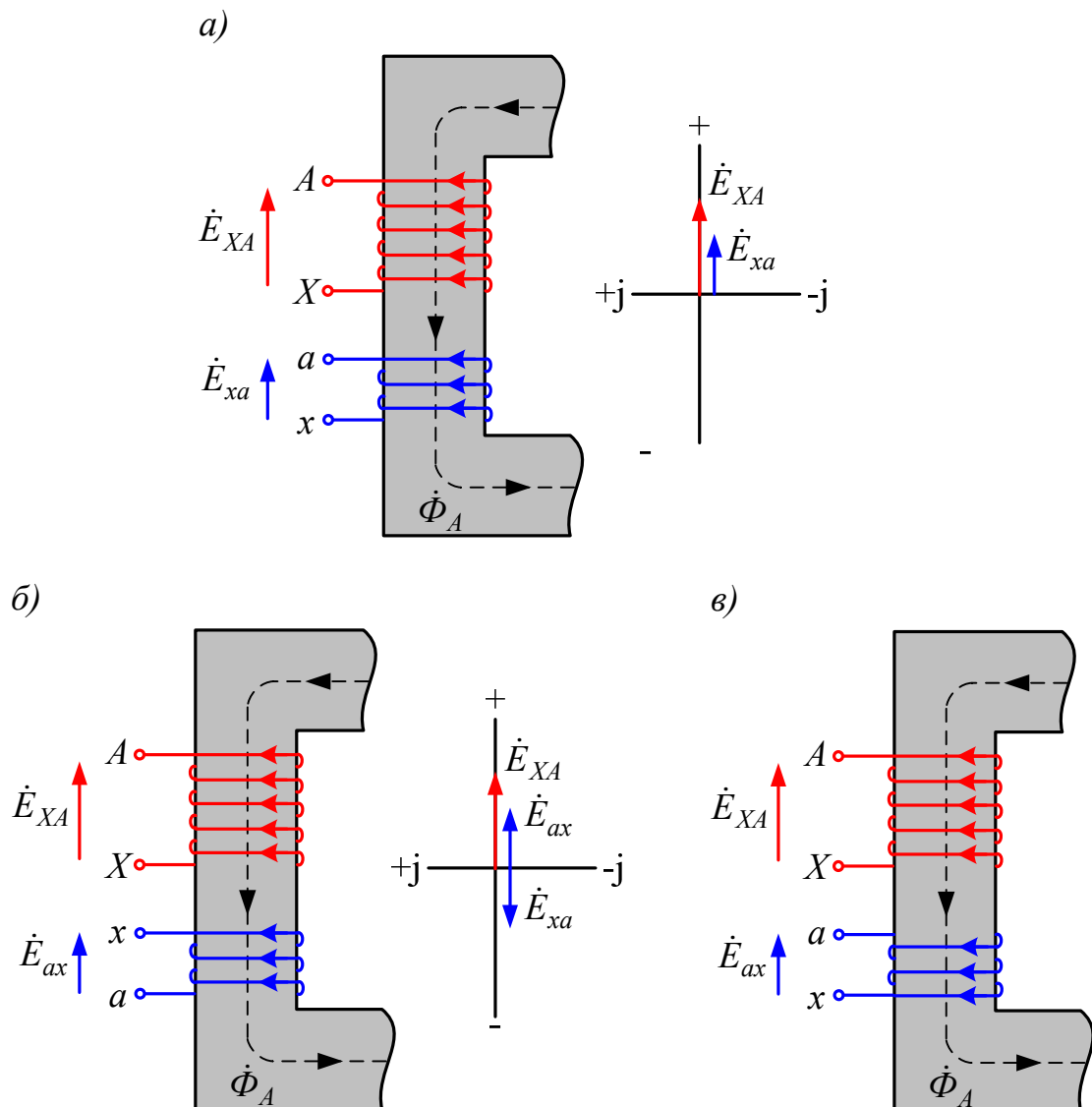


Рисунок 2Т.1 – До визначення груп з'єднання обмоток

Таким чином, якщо дві обмотки розташовані на одному стрижні магнітопроводу, намотані в одному напрямку і мають однакове маркування початків і кінців, то напрямки їх однойменних векторів ЕРС збігаються.

Якщо при незмінному напрямку намотування змінити маркування початків і кінців обмотки, то вектор її однойменної ЕРС повернеться на 180° .

Якщо при незмінному маркуванні початків і кінців обмотки змінити на протилежний напрямок її намотування, то вектор її однойменної ЕРС також повернеться на 180° .

Якщо трансформатор однофазний, то кут між однойменними векторами ЕРС обмоток ВН і НН може бути рівним 0° або 180° .

У трифазному трансформаторі однойменні фази обмоток ВН і НН можуть розташовуватися як на одному, так і на різних стрижнях, внаслідок чого кут між векторами однойменних ЕРС може приймати значення, кратні 30° .

Група з'єднання визначається кутом зсуву α між векторами однойменних лінійних ЕРС обмоток ВН і НН. Кут відраховується за годинниковою стрілкою від вектора ЕРС обмотки ВН до вектора ЕРС обмотки НН.

З розглянутого випливає, що якщо обмотки ВН і НН, розташовані на одному стрижні, з'єднати між собою послідовно, то їх ЕРС при цьому можуть додаватися або відніматися. При однакових напрямках намотування і маркуванні початків і кінців обмоток (рис. 2Т.1, *a*) послідовне включення називається узгодженим, якщо ЕРС обмоток додаються (початок *a* з'єднується з кінцем *X*), і зустрічним, якщо їх ЕРС віднімаються (кінець *x* з'єднується з кінцем *X*). Це необхідно враховувати при маркуванні обмоток. Якщо обмотки, з'єднані послідовно, будуть розташовані на різних стрижнях магнітопроводу, то висновок про їх узгоджене і зустрічне включення буде протилежним відносно попереднього.

Якщо до однієї з двох послідовно з'єднаних обмоток підвести напругу, то з двох обмоток можна знімати напругу, значення якої може бути більшим або меншим за значення тієї напруги, яка підводиться. Такий пристрій називається відповідно підвищувальним чи знижувальним **автотрансформатором**. Перший буде мати місце при узгодженому включенні обмоток (рис. 2Т.2, *a*), другий – при зустрічному (рис. 2Т.2, *б*).

При послідовному з'єднанні обмоток, розташованих на різних стрижнях, висновки про отримання підвищувального і знижувального автотрансформаторів будуть протилежні попередньому випадку.

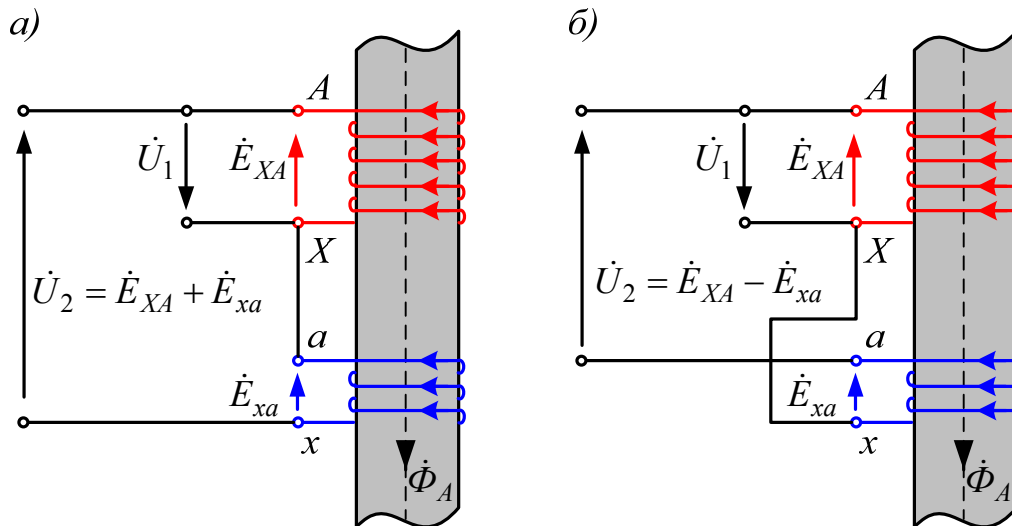


Рисунок 2Т.2 – Отримання автотрансформатора:

а) – підвищувального; б) – знижувального

2Т.2 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією випробуваного трансформатора, записати його номінальні величини і підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. За допомогою контрольної лампи і вольтметра зробити маркування початків і кінців усіх фаз обох обмоток трансформатора.

3. Дослідним шляхом визначити групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора для заданих схем з'єднання обмоток ВН і НН і маркування їх початків і кінців.

4. Теоретично визначити маркування початків і кінців фаз обмоток ВН і НН для таких заданих схем і груп: У/У-8; У/У-10; У/Д-3; Д/У-1.

2Т.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Для випробовувань використовується трифазний двообмотковий трансформатор із тристрижневим плоскими магнітопроводом (рис. 2Т.3, а). Кінці всіх його обмоток виведені на похилу панель лабораторного стенда, причому їх маркування невідоме (рис. 2Т.3, б).

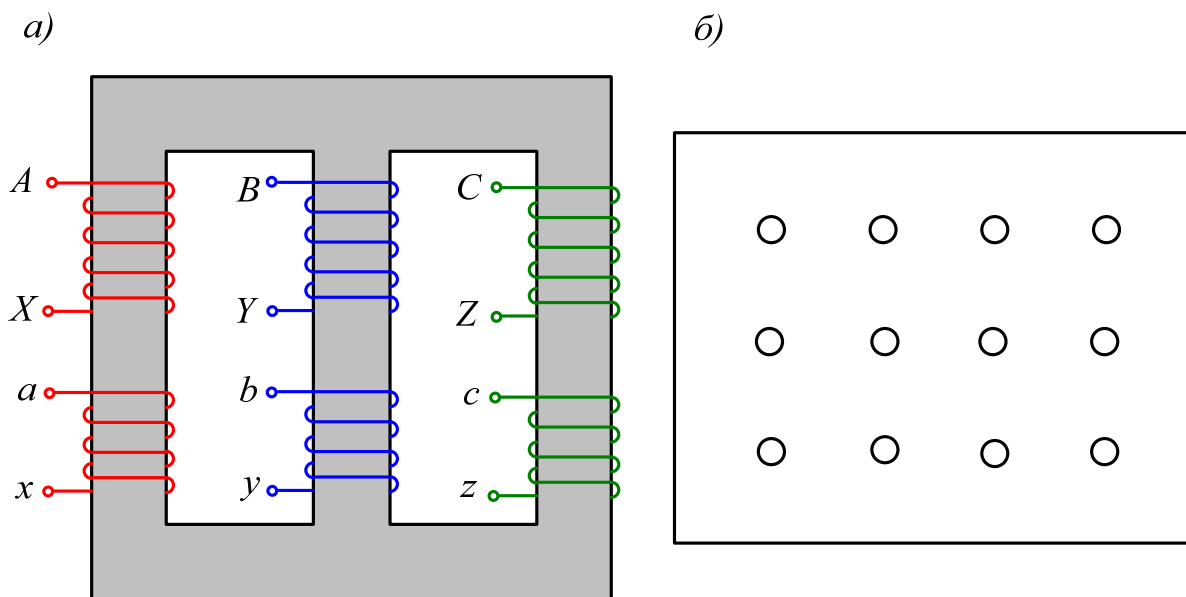


Рисунок 2Г.3 – До визначення початків і кінців обмоток

2. Маркування початків і кінців обмоток повинно виконуватись за допомогою контрольної лампи і вольтметра. Як джерело живлення потрібно використовувати мережу з лінійною напругою 220 В. Напрямок намотування всіх обмоток однаковий.

Маркування виконувати в такій послідовності:

а) за допомогою контрольної лампи знайти пари кінців усіх шести фаз обмоток ВН і НН, одночасно при цьому визначити фази, що належать обмоткам ВН і НН;

б) за допомогою вольтметра знайти фази, розташовані на середньому стрижні магнітопроводу; початок *B* та кінець *Y* обмотки ВН відмітити довільно;

в) за допомогою вольтметра виконати маркування початків і кінців фаз *A* і *C* обмотки ВН та усіх фаз обмотки НН.

Електричні схеми для маркування кінців обмоток розробити самостійно, попередньо вивчивши для цього теоретичну частину роботи і розв'язавши всі задачі.

Перед виконанням дослідів схеми повинні бути показані викладачеві і перевірені ним або лаборантом.

Усі схеми й остаточне маркування кінців обмоток повинні бути занесені до робочого протоколу випробувань.

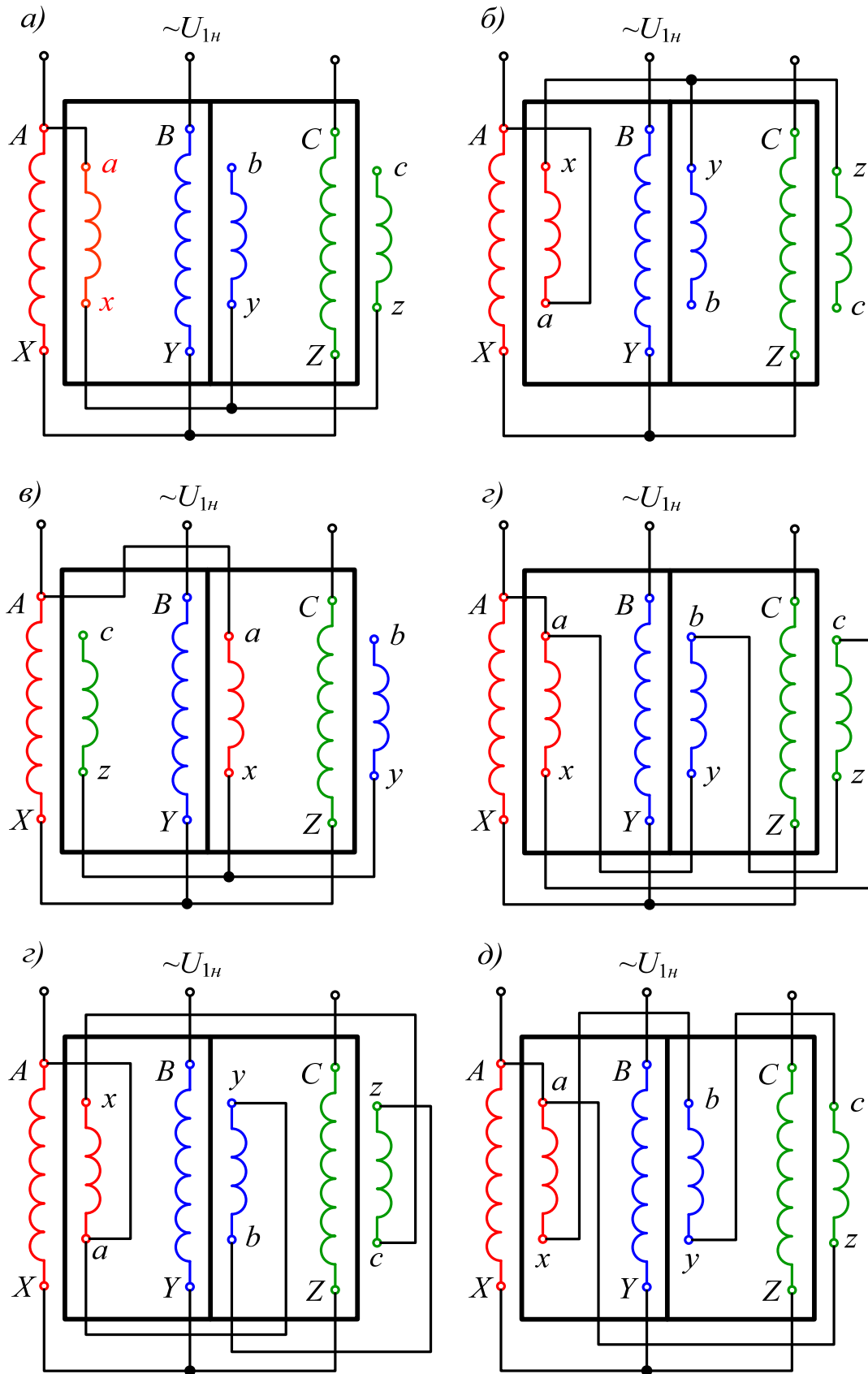


Рисунок 2Т.4 – Схеми електричні принципи для визначення груп з'єднання обмоток трансформатора

3. Схеми електричні принципові, для яких необхідно дослідним шляхом визначити відповідні їм групи з'єднань обмоток, зображені на рис. 2Т.4. Перша схема на рис. 2Т.4, *a* відповідає початковому маркуванню початків і кінців фаз обмоток ВН і НН. Наступні схеми відрізняються від вихідної тим, що в них змінені маркування початків і кінців фаз обмотки НН або схема їх з'єднання. Маркування і схема з'єднання обмотки ВН залишаються незмінними в усіх випадках.

В усіх випадках на обмотку ВН подається трифазна номінальна напруга $U_{1ном}$ і вольтметром вимірюються напруги між виводами B і b , B і c , c і C , C і b . Результати вимірювань заносяться до табл. 2Т.1.

Таблиця 2Т.1 – Результати дослідів

Схема на рис. 2Т.4	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_{Bb} , В	U_{Bc} , В	U_{Cc} , В	U_{Cb} , В	Номер групи
<i>a</i>								
<i>б</i>								
<i>в</i>								
<i>г</i>								
<i>д</i>								
<i>e</i>								

За результатами експерименту необхідно побудувати в масштабі векторні діаграми лінійних ЕРС (напруги) обмоток ВН і НН та визначити за ними номер групи для кожної схеми трансформатора.

Векторна діаграма ЕРС повинна будуватися в такий спосіб. Спочатку будують трикутник ЕРС (напруг) обмотки ВН за значеннями U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , які були виміряні. Для побудови трикутника ЕРС (напруг) обмотки НН потрібно визначити положення його вершин *a*, *b* та *c*. Оскільки виводи *A* і *a* на всіх схемах електрично з'єднані, то і на векторних діаграмах ці точки повинні бути суміщені. Положення двох інших вершин *b* і *c* визначаються засічками. Наприклад, якщо з вершин *B* і *C* радіусами, рівними відповідно U_{Bb} і U_{Cb} , зробити засічки, то їх перетин дає положення точки *b*. Аналогічно знаходиться і положення точки *c*.

У звіті під кожною схемою повинна бути приведена відповідна їй векторна діаграма і зазначені схеми з'єднання обмоток і номер групи, наприклад, У/У – 6.

4. Теоретичне маркування початків і кінців фаз обмоток за заданими схемами їх з'єднання і номера групи повинно виконуватись на підставі векторної діаграми ЕРС, яка може бути побудована за заданим номером групи. Трикутники ЕРС обмоток ВН і НН брати таких самих розмірів, як в експерименті.

Маркування виводів обмотки ВН слід вибирати стандартне, тобто таке, як в експерименті, а для маркування виводів потрібно виходити з теоретичних положень, наведених на початку роботи. Напрямок намотування всіх фаз обмоток вважати однаковим.

У звіті повинні бути наведені векторні діаграми ЕРС для кожної групи і відповідні їм схеми, а також маркування виводів обмоток.

2Т.4 Питання до захисту



1. Як за допомогою контрольної лампи знайти виводи, що належать одній фазі?
2. Як знайти фази обмотки ВН і НН, розташовані на середньому стрижні магнітопроводу?
3. Як виконати маркування початків і кінців фаз обмоток ВН і НН?
4. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора і який порядок її визначення?
5. Суть експериментального визначення номера групи з'єднання обмоток трансформатора.
6. Які групи з'єднання обмоток можна одержати при схемах з'єднання У/У; У/Д; Д/У; Д/Д.
7. Зробити перемаркування виводів обмотки НН для переходу від нульової групи до другої; від нульової до четвертої; від нульової до шостої; від одинадцятої до першої; від одинадцятої до третьої; від одинадцятої до п'ятої.

2Т.5 Задачі для самостійного розв'язування

1. Для трифазного знижувального трансформатора з номінальною потужністю 1,5 кВ·А, номінальними напругами $U_{1ном} = 220$ В, $U_{2ном} = 133$ В і схемами з'єднання обмоток Д/Д розрахувати номінальні фазні струми обох обмоток і поперечні перерізи їх проводів, якщо густина струму обох обмоток однакова і дорівнює $\Delta = 2,5$ А/мм².

2. Для трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в попередній задачі, визначити опір вітки намагнічування електричної схеми заміщення однієї фази при живленні його як зі сторони ВН, так і зі сторони НН, якщо відомо, що його струм холостого ходу при номінальних напругах живлення в обох випадках складає 10% номінального струму відповідної обмотки.

3. Для трифазного трансформатора, номінальні параметри якого наведені в задачі 1, визначити дійсні активні опори обмоток, якщо втрати короткого замикання трансформатора при номінальних струмах $P_k = 285$ Вт.

4. В трифазному трансформаторі з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, подана номінальна напруга на фазу *B* обмотки ВН, розташовану на середньому стрижні магнітопровода, а всі інші фази розімкнуті. Знайти значення напруг, що виникнуть на розімкнутих фазах обмотки ВН і НН.

5. Обмотки ВН і НН середньої фази *B* трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, намотані в одному напрямку і з'єднані між собою послідовно. На обмотку ВН подана номінальна напруга. Визначити сумарну напругу двох обмоток при узгодженому і зустрічному включеннях.

6. На обмотку ВН крайнього стрижня (фазу *A*) трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, подана номінальна напруга. Всі інші обмотки розімкнуті. Розрахувати значення ЕРС, що наводяться у всіх розімкнутих обмотках, якщо відомо, що магнітний опір середньої фази в 2 рази менший за опір крайніх.

7. При відомому маркуванні початку і кінця середньої фази *B* обмотки ВН сформулювати правила для дослідного визначення за допомогою

вольтметра початків і кінців двох інших фаз обмотки ВН, а також початків і кінців усіх фаз обмотки НН. Всі обмотки намотані в одному напрямку.

8. Для трифазного трансформатора з номінальними параметрами, наведеними в задачі 1, сформулювати правило для дослідного знаходження за допомогою вольтметра обмоток трансформатора, розташованих на середньому стрижні тристрижневого плоского магнітопроводу. Напруга мережі живлення складає 220 В.

Лабораторна робота №3Т

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРИФАЗНИХ ДВООБМОТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи

Дослідити умову включення трансформаторів на паралельну роботу та дослідним шляхом з'ясувати принципи розподілу навантаження між паралельно працюючими трансформаторами за умови, що в них різні:

- коефіцієнти трансформації;
- напруги короткого замикання;
- коефіцієнти трансформації і напруги короткого замикання.

3Т.1 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією трансформаторів, записати їх номінальні величини та підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. За допомогою вольтметра визначити коефіцієнти трансформації трансформаторів.

3. Переконайтесь в рівності груп з'єднання обмоток трансформаторів.

4. Дослідити паралельну роботу трансформаторів при таких умовах:

а) $k_I = k_{II}$ (де k_I, k_{II} – відповідно коефіцієнти трансформації першого та другого трансформаторів) і $U_{кI} = U_{кII}$ (де $U_{кI}, U_{кII}$ – відповідно напруги короткого замикання першого та другого трансформаторів);

б) $k_I < k_{II}$ і $U_{кI} = U_{кII}$ при активному та індуктивному характерах навантаження;

в) $k_I = k_{II}$ і $U_{кI} > U_{кII}$;

г) $k_I < k_{II}$ і $U_{кI} > U_{кII}$.

У випадках а), в) та г) дослідження проводити тільки при активному навантаженні.

5. Для досліду 4, б) визначити значення струму врівноваження і порівняти його з дослідним значенням.

6. Для досвіду 4, в) розрахувати розподіл струмів навантаження між трансформаторами і порівняти його з дослідними даними.

7. За даними дослідів 4, а) – 4, г) побудувати окремо для кожного досліду залежності I_1 , $I_{II} = f(I)$. Теоретично розраховані залежності для випадку 4, в) сумістити з дослідними.

3Т.2 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Для випробовувань використовуються два однакових трифазних триобмотувальних сухих трансформатори з тристрижневим плоским магнітопроводом, номінальні параметри яких наведені в їх паспортних даних. Трансформатори розташовані під лабораторним стендом, а кінці їх обмоток виведені на похилу панель стенда.

Для штучної зміни коефіцієнта трансформації у вторинній обмотці другого трансформатора зроблені проміжні відпайки a , b , c . (рис. 3Т.1).

Напруга короткого замикання збільшується введенням у коло первинної обмотки першого трансформатора додаткового індуктивного опору X_L .

2. Коефіцієнти трансформації трансформаторів вимірюють у режимі холостого ходу, тобто при $Z_n = \infty$. Для цього при розімкнутому автоматі $QF4$ і замкнутому $QF3$ вимірюють первинні напруги:

- $U_{A_1B_1}$ – лінійну між фазами A_1 і B_1 першого трансформатора;
- $U_{B_1C_1}$ – лінійну між фазами B_1 і C_1 першого трансформатора;
- $U_{C_1A_1}$ – лінійну між фазами C_1 і A_1 першого трансформатора

і вторинні напруги

- $U_{a_1b_1}$ – лінійну між фазами a_1 і b_1 першого трансформатора;
- $U_{b_1c_1}$ – лінійну між фазами b_1 і c_1 першого трансформатора;
- $U_{c_1a_1}$ – лінійну між фазами c_1 і a_1 першого трансформатора,

а також лінійні напруги між відпайками другого трансформатора U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} .

Коефіцієнти трансформації визначаються за відношеннями середніх значень лінійної напруги:

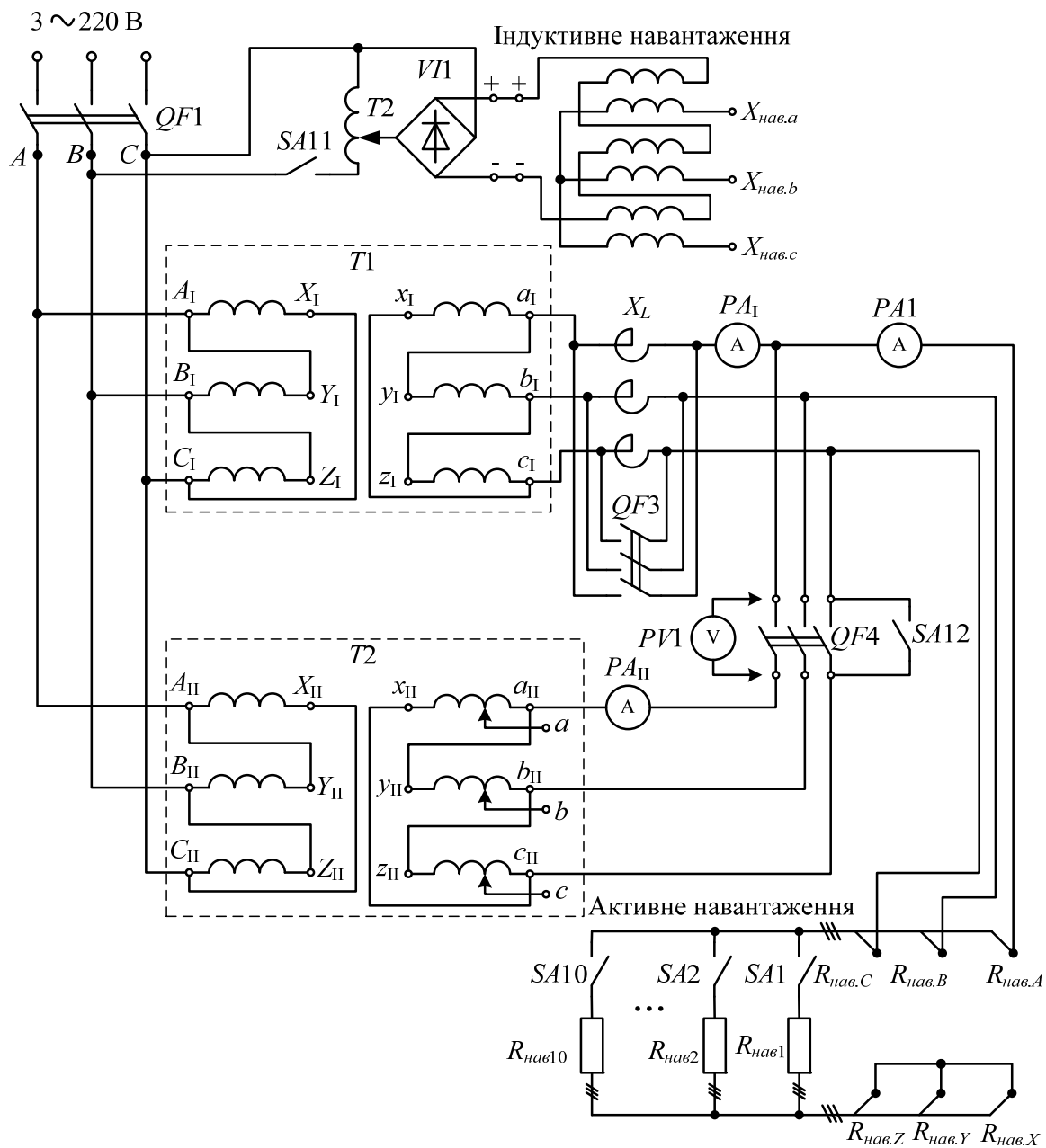


Рисунок 3Т.1 – Схема електрична принципова включення трансформаторів на паралельну роботу

$$k_I = \frac{U_{A_I B_I} + U_{B_I C_I} + U_{C_I A_I}}{U_{a_I b_I} + U_{b_I c_I} + U_{c_I a_I}}, \quad (3Т.1)$$

$$k_{II} = \frac{U_{A_1B_1} + U_{B_1C_1} + U_{C_1A_1}}{U_{a_{II}b_{II}} + U_{b_{II}c_{II}} + U_{c_{II}a_{II}}}, \quad (3Т.2)$$

$$k'_{II} = \frac{U_{A_1B_1} + U_{B_1C_1} + U_{C_1A_1}}{U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}}, \quad (3Т.3)$$

де k'_{II} – коефіцієнт трансформації другого трансформатора на відпайках a, b, c .

3. Трансформатори, що включаються на паралельну роботу, повинні мати однакові групи з'єднання обмоток. Для цього різниця напруг між однойменними виводами вторинних обмоток трансформаторів повинна дорівнювати нулю.

Для того, щоб переконатися в рівності груп, необхідно вольтметром *PV1* виміряти напругу $U_{b_1b_{II}}$ і $U_{c_1c_{II}}$ (при замкнутому тумблері *SA4*). Якщо ці напруги дорівнюють нулю, то групи з'єднання обмоток однакові.

4. Трансформатори мають однакові коефіцієнти трансформації ($k_I = k_{II}$), якщо другий трансформатор працює на відпайках a_{II}, b_{II}, c_{II} . При роботі на відпайках a, b, c $k'_{II} > k_{II}$, а отже, $k_I < k_{II}$.

При зашунтованому автоматом *QF3* додатковому опорі обидва трансформатори мають однакові напруги короткого замикання $U_{кI} = U_{кII}$. При включеному X_L (автомат *QF3* виключений) перший трансформатор має підвищене значення $U_{кI}$.

Трансформатори включаються на паралельну роботу автоматом *QF4*. При цьому в кожному досліді необхідно вимірювати струми врівноваження, що можна зробити в режимі холостого ходу.

Після цього збільшують струм навантаження до номінального значення та експериментально визначають розподіл струмів по кожному з трансформаторів. Результати вимірювань заносять до табл. 3Т.1.

5. Струм врівноваження струм для досліду 4, б) потрібно розраховувати відповідно до теорії, викладеної в п. 1.2.3. У звіті подати дослідні та розрахункові значення цих струмів.

6. Розподіл навантажувальних струмів трансформаторів при різних значеннях їх напруги короткого замикання можна визначити з рівнянь

$$I_{\text{I}} = \frac{U_{\text{кII}}}{U_{\text{кI}} + U_{\text{кII}}} I, \quad (3\text{T.4})$$

$$I_{\text{II}} = \frac{U_{\text{кI}}}{U_{\text{кI}} + U_{\text{кII}}} I,$$

де I – сумарний струм навантаження, значення якого вибираються довільно в діапазоні $0 \dots I_{\text{ном}}$.

У звіті слід навести виведення виразів, використаних раніше для розрахунку струмів трансформаторів.

Таблиця 3Т.1 Результати дослідів

Струм, А	1	2	3	4	5	6	7	8	Примітки
I_{I}									$k_{\text{I}} = k_{\text{II}}$ $U_{\text{кI}} = U_{\text{кII}}$
I_{II}									
I									
I_{I}									$k_{\text{I}} < k_{\text{II}}$ $U_{\text{кI}} = U_{\text{кII}}$ $Z_{\text{H}} = R_{\text{H}}$
I_{II}									
I									
I_{I}									$k_{\text{I}} < k_{\text{II}}$ $U_{\text{кI}} = U_{\text{кII}}$ $Z_{\text{H}} = jX_{\text{H}}$
I_{II}									
I									
I_{I}									$k_{\text{I}} = k_{\text{II}}$ $U_{\text{кI}} > U_{\text{кII}}$
I_{II}									
I									
I_{I}									$k_{\text{I}} < k_{\text{II}}$ $U_{\text{кI}} > U_{\text{кII}}$
I_{II}									
I									

7. Окремо для кожного дослідів побудувати залежності I_{I} , $I_{\text{II}} = f(I)$. Для випадку 4, в) теоретично розраховані залежності сумістити з дослідними.

3Т.3 Питання до захисту



1. Переваги паралельної роботи трансформаторів.
2. Умови включення трансформаторів на паралельну роботу.
3. Чому неможлива паралельна робота при різних групах з'єднання обмоток?
4. Як експериментально перевірити рівність груп з'єднання обмоток?
5. Явища, що виникають при паралельній роботі трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації на холостому ході та при різних характерах навантаження. Розрахунок струму врівноваження.
6. Розподіл струмів навантаження при паралельній роботі трансформаторів з різними напругами короткого замикання. Розрахунок струмів навантаження.
7. Як можна вирівняти розподіл струмів між трансформаторами з різними напругами короткого замикання?

3Т.4 Задачі для самостійного розв'язування

Є два трансформатори з однаковими номінальними потужностями $S_{I\text{ ном}} = S_{II\text{ ном}} = 1,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і номінальними первинними напругами $U_{I\text{ ном}} = U_{II\text{ ном}} = 220 \text{ В}$. Первинні і вторинні обмотки обох трансформаторів з'єднані в трикутник.

Для цих трансформаторів, включених на паралельну роботу, потрібно:

1. Розрахувати значення струмів врівноваження, що протікають у первинних і вторинних обмотках трансформаторів, якщо вони працюють без навантаження при однакових значеннях напруги короткого замикання $U_{кI} = U_{кII} = 4,3\%$, однакових групах з'єднання обмоток і таких значеннях коефіцієнтів трансформації: $k_I = 1,65$; $k_{II} = 1,69$.
2. При умовах попередньої задачі визначити значення напруги, яка встановиться на вторинних шинах трансформаторів.
3. Використовуючи умови, наведені в задачі 1 і нехтуючи активними складовими напруги короткого замикання, розрахувати вторинні струми

трансформаторів, якщо на вторинні шини включений споживач з еквівалентним навантажувальним опором однієї фази:

а) $Z_H = R_H = 17 \text{ Ом};$

б) $Z_H = jX_H = j17 \text{ Ом};$

в) $Z_H = -jX_H = -j17 \text{ Ом}.$

Опори навантаження з'єднані в трикутник.

4. Розрахувати усталені значення струмів врівноваження обох обмоток трансформаторів, що мають однакові значення напруг короткого замикання $U_{кІ} = U_{кІІ} = 4,3\%$ та коефіцієнти трансформації $k_I = k_{II} = 1,65$ і включених на паралельну роботу з різницею в номерах груп з'єднання обмоток:

а) у дві групи;


б) у чотири групи;

в) у шість груп.

5. Розрахувати пік навантаження кожного з трансформаторів, включених на паралельну роботу, якщо вони мають однакові коефіцієнти трансформації $k_I = k_{II} = 1,65$ і групи з'єднання обмоток, але різні напруги короткого замикання: $U_{кІ} = 5,3\%$, $U_{кІІ} = 4,3\%$. Повний струм, який віддається обома трансформаторами в навантаження, дорівнює 10 А.

6. Використовуючи умову попередньої задачі, знайти найбільші значення потужностей, якими можуть бути завантажені трансформатори.

Лабораторна робота №4Т ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

 **Мета роботи** | Ознайомитись з будовою триобмоткового трансформатора; освоїти практичні прийоми лабораторного дослідження триобмоткових трансформаторів за допомогою дослідів холостого ходу та короткого замикання.

4Т.1 Короткі теоретичні відомості

За аналогією з двообмотковим трансформатором для розрахунку зовнішніх характеристик використовуються поняття зміни напруги кожної із вторинних обмоток [18]:

$$\begin{aligned}\Delta U'_{12} &= U_1 - U'_2 = \\ &= I'_2(R_{12\kappa} \cos \varphi_2 + X_{12\kappa} \sin \varphi_2) + I'_3(R_1 \cos \varphi_3 + X_1 \sin \varphi_3),\end{aligned}\quad (4Т.1)$$

$$\begin{aligned}\Delta U'_{13} &= U_1 - U'_3 = \\ &= I'_3(R_{13\kappa} \cos \varphi_3 + X_{13\kappa} \sin \varphi_3) + I'_2(R_1 \cos \varphi_2 + X_1 \sin \varphi_2),\end{aligned}\quad (4Т.2)$$

де $\Delta U'_{12}$, $\Delta U'_{13}$ – спади напруг в другій і третій обмотках триобмоткового трансформатора, відповідно;

$R_{12\kappa}$, $R_{13\kappa}$ – активні опори короткого замикання першої і другої обмоток та першої і третьої обмоток, відповідно;

$X_{12\kappa}$, $X_{13\kappa}$ – реактивні опори короткого замикання першої і другої обмоток та першої і третьої обмоток, відповідно,

$$R_{12\kappa} = R_1 + R'_2; \quad (4Т.3)$$

$$R_{13\kappa} = R_1 + R'_3; \quad (4Т.4)$$

$$X_{12\kappa} = X_1 + X'_2; \quad (4Т.5)$$

$$X_{13\kappa} = X_1 + X'_3, \quad (4Т.6)$$

де R'_3 , X'_3 – відповідно активний та реактивний опори третьої обмотки, приведених до первинної.

Тоді приведені напруги обмоток

$$U'_2 = U_1 - \Delta U'_{12}, \quad (4Т.7)$$

$$U'_3 = U_1 - \Delta U'_{13}. \quad (4Т.8)$$

ККД триобмоткового трансформатора [18]:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2 + P_3}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta p_{\Sigma}}{P_1} = \\ &= 1 - \frac{\Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}{\beta_2 S_{2\text{ном}2} \cos \varphi_2 + \beta_3 S_{2\text{ном}3} \cos \varphi_3 + \Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}, \end{aligned} \quad (4Т.9)$$

де β_2 , β_3 – коефіцієнти навантаження другої та третьої обмоток, відповідно:

$$\beta_2 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}, \quad (4Т.10)$$

$$\beta_3 = \frac{I_3}{I_{3\text{ном}}}, \quad (4Т.11)$$

де $I_{3\text{ном}}$ – номінальний струм третьої обмотки;

$S_{2\text{ном}2}$, $S_{2\text{ном}3}$ – номінальні потужності другої та третьої обмоток, відповідно.

Змінні втрати для триобмоткового трансформатора [18]:

$$\Delta p_{\text{зм}} = 3\beta_1 I_{1\text{ном}}^2 R_1 + 3I_{2\text{ном}}'^2 R_2' + 3I_{3\text{ном}}'^2 R_3'. \quad (4Т.12)$$

4Т.2 Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою лабораторного стенда, конструкцією трансформатора, записати його номінальні величини і підібрати відповідні вимірювальні прилади.

2. Провести дослід холостого ходу трансформатора.

3. Виконати досліди короткого замикання трансформатора.
4. Провести контрольний дослід короткого замикання.
5. Провести дослід номінального навантаження трансформатора при коефіцієнті потужності другої обмотки $\cos\varphi_2 = 1$ і коефіцієнті потужності третьої обмотки $\cos\varphi_3 = 0$ (індуктивний характер).
6. За даними дослідів холостого ходу розрахувати коефіцієнти трансформації обмоток, постійні втрати і струм холостого ходу, а також параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення.
7. За даними дослідів короткого замикання визначити всі параметри обмоток і значення напруг короткого замикання:
 - $U_{\kappa 12}$ – першої і другої обмоток;
 - $U_{\kappa 13}$ – першої і третьої обмоток;
 - $U_{\kappa 23}$ – другої і третьої обмоток.
8. Використовуючи знайдені параметри обмоток, розрахувати вихідні напруги обмоток для тих самих параметрів навантаження, що й у досліді п.5. Розрахункові значення порівняти з дослідними. Розрахувати номінальне значення ККД трансформатора.

4Т.3 Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

1. Для випробовувань використовується трифазний сухий триобмотковий трансформатор із плоским тристрижневим магнітопроводом. Кінці всіх його обмоток виведені на похилу панель лабораторного стенда. Номінальні параметри трансформатора наведені на стенді. Відповідно до них потрібно підібрати вимірювальні прилади.

Схема електрична принципова для дослідження показана на рис. 4Т.1.

2. Дослід холостого ходу слід виконувати при номінальній напрузі, яка підводиться до первинної обмотки, і розімкнених вторинних обмотках, тобто $I_2 = I_3 = 0$. Межі вимірювання всіх приладів повинні відповідати очікуваним значенням напруги і струмів.

Необхідно виміряти такі величини:

- U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} (значення яких повинні бути рівні);
- $U_{1ном}, I_{10A}, I_{10B}, I_{10C}$;
- P'_0, P''_0 ;

- U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ;
- $U_{AmBm}, U_{BmCm}, U_{CmA_m}$.

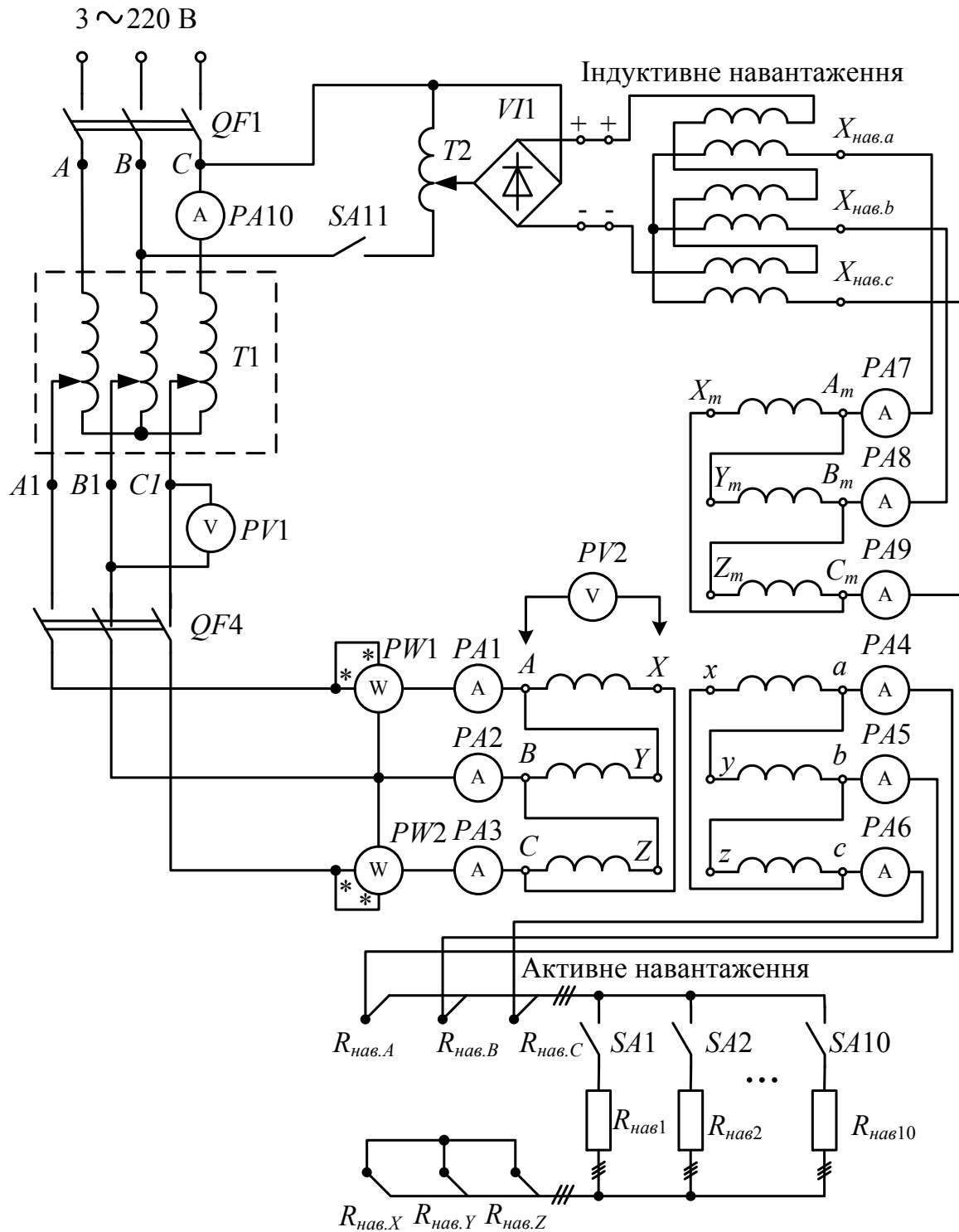


Рисунок 4Т.1 – Схема електрична принципова проведення дослідів

В триобмотковому трансформаторі проводять три досліди короткого замикання:

1. При розімкнутій обмотці 3 (СН) і замкнутій накоротко обмотці 2 (НН) подають на обмотку 1 (ВН) таку напругу $U_{к12}$, яка викликає в первинній обмотці протікання номінального струму. Необхідно пам'ятати, що $U_{к12} \ll U_{1ном}$. Тому перед включенням автомата $QF4$ необхідно установити за допомогою регулятора РНТ Т1 напругу $U_1 \approx 0$. Попередньо межі вимірювань приладів потрібно узгодити з очікуваними значеннями струмів і напруги.

Вимірити такі величини:

- $U_{к.АВ}, U_{к.ВС}, U_{к.СА}$;
- $I_{кА}, I_{кВ}, I_{кС}$;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$.

2. При розімкнутій обмотці 2 і замкнутій накоротко обмотці 3 подають на обмотку 1 таку напругу $U_{к13}$, яка викличе струм $I_{1ном}$. Дослід повинен проводитись аналогічно до попереднього і вимірювати потрібно ті ж величини.

3. При розімкнутій обмотці 1 і замкнутій накоротко обмотці 3 подають на обмотку 2 таку напругу $U_{к23}$, яка викличе в обмотці 2 протікання номінального струму $I_{2к} = I_{2ном}$. Дослід проводиться аналогічно до двох попередніх. Вимірюють такі величини:

- $U_{кab}, U_{кbc}, U_{кca}$;
- $I_{ка}, I_{кb}, I_{кc}$;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$.

4. Контрольний дослід короткого замикання проводиться при замкнутих накоротко обмотках 2 і 3 одночасно та при напрузі $U_{к123}$, яка викликає номінальний струм у первинній обмотці. Вимірюють такі величини:

- $U_{к.АВ}, U_{к.ВС}, U_{к.СА}$;
- $I_{кА}, I_{кВ}, I_{кС}$;
- $P'_{\hat{e}}, P''_{\hat{e}}$.

5. Для проведення досліду номінального навантаження трансформатора необхідно в коло обмотки 2 включити активне навантаження R_n , а в коло

обмотки 3 – індуктивну X_n , з'єднавши їх фази в трикутник і включивши в їх середні фази амперметри для вимірювання лінійних струмів навантаження.

До первинної обмотки підвести номінальну напругу і завантажити всі обмотки номінальними струмами. Виміряти такі величини:

- U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ;
- I_A, I_B, I_C ;
- P', P'' ;
- U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ;
- $I_{2ном}, I_{3ном}$;
- $U_{AmBm}, U_{BmCm}, U_{CmAм}$.

6. Коефіцієнти трансформації, магнітні (постійні) втрати, струм холостого ходу і його активну та реактивну складові (у відсотках від номінального значення струму), а також параметри вітки намагнічування потрібно розраховувати відповідно до електричної схеми заміщення і теорії трансформатора.

Коефіцієнти трансформації і параметри схеми заміщення повинні бути визначені для однієї фази.

7. Для кожного з трьох дослідів короткого замикання може бути отримана електрична схема заміщення, яка складається з послідовно з'єднаних опорів двох обмоток, що беруть участь у досліді. Струмом намагнічування в цьому режимі нехтують.

Тоді сумарні опори відповідних пар обмоток можуть бути знайдені за результатами дослідів з таких виразів [18]:

$$\begin{cases} Z_{к12} = \frac{U_{к12ф}}{I_{1фном}}; \\ R_{к12} = \frac{P_{к12}}{I_{1фном}^2}; \\ X_{к12} = \sqrt{Z_{к12}^2 - R_{к12}^2}, \end{cases} \quad (4Т.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{\kappa 13} = \frac{U_{\kappa 13\phi}}{I_{1\phi\text{ном}}}; \\ R_{\kappa 13} = \frac{P_{\kappa 13}}{I_{1\phi\text{ном}}^2}; \\ X_{\kappa 13} = \sqrt{Z_{\kappa 13}^2 - R_{\kappa 13}^2}, \end{array} \right. \quad (4\text{T.14})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z'_{\kappa 23} = \frac{U'_{\kappa 23\phi}}{I'_{2\phi\text{ном}}}; \\ R'_{\kappa 23} = \frac{P_{\kappa 23}}{I'_{2\phi\text{ном}}^2}; \\ X'_{\kappa 23} = \sqrt{Z'_{\kappa 23}{}^2 - R'_{\kappa 23}{}^2}, \end{array} \right. \quad (4\text{T.15})$$

де усі величини повинні відповідати одній фазі трансформатора і для визначення яких потрібно врахувати схеми з'єднання обмоток і значення величин, що вимірюються (фазні чи лінійні).

Напруги $U_{\kappa 12}$, $U_{\kappa 13}$ визначаються як середні з трьох напруг відповідних дослідів:

$$U_{\kappa 12}(U_{\kappa 13}) = \frac{U_{\kappa AB} + U_{\kappa BC} + U_{\kappa CA}}{3}. \quad (4\text{T.16})$$

У третьому досліді короткого замикання вимірюють дійсні значення напруги і струмів обмотки 2, а для знаходження приведених параметрів вони повинні бути приведені до обмотки 1. Тоді

$$U'_{\kappa 23} = k_{12}U_{\kappa 23}, \quad (4\text{T.17})$$

$$I'_{\kappa 23} = \frac{I_{2\text{ном}}}{k_{12}}. \quad (4\text{T.18})$$

Зі схем заміщення при короткому замиканні впливає, що

$$R'_{к23} = R'_2 + R'_3, \quad (4Т.19)$$

$$X'_{к23} = X'_2 + X'_3. \quad (4Т.20)$$

Для кожного з опорів є три рівняння і три невідомих опори обмоток, які можна знайти, розв'язавши ці рівняння:

$$R_1 = 0,5(R_{к12} + R_{к13} + R'_{к23}); \quad (4Т.21)$$

$$R'_2 = 0,5(R_{к12} + R'_{к23} - R_{к13}); \quad (4Т.22)$$

$$R'_3 = 0,5(R_{к13} + R'_{к23} - R_{к12}); \quad (4Т.23)$$

$$X_1 = 0,5(X_{к12} + X_{к13} - X'_{к23}); \quad (4Т.24)$$

$$X'_2 = 0,5(X_{к12} + X'_{к23} - X_{к13}); \quad (4Т.25)$$

$$X'_3 = 0,5(X_{к13} + X'_{к23} - X_{к12}); \quad (4Т.26)$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}; \quad (4Т.27)$$

$$Z'_2 = \sqrt{R_2'^2 + X_2'^2}; \quad (4Т.28)$$

$$Z'_3 = \sqrt{R_3'^2 + X_3'^2}. \quad (4Т.29)$$

Якщо всі досліди проведені правильно, то всі значення активних опорів повинні бути додатними. Індуктивний опір середньої обмотки повинен мати мінімальне (з трьох) значення і навіть може бути від'ємним.

За даними контрольного досліду короткого замикання визначають опори

$$X_{к123} = \frac{U_{к123\phi}}{I_{1\phi.ном}}; \quad (4Т.30)$$

$$R_{к123} = \frac{P_{к123}}{I_{1\phi.ном}^2}; \quad (4Т.31)$$

$$X_{\kappa 123} = \sqrt{Z_{\kappa 123}^2 - R_{\kappa 123}^2}. \quad (4Т.32)$$

Відповідно до схеми заміщення для цього досліду при $I_0 \approx 0$ її еквівалентний опір [18]

$$\begin{aligned} Z_{екв} &= Z_1 + \frac{Z'_2 Z'_3}{Z'_2 + Z'_3} = \\ &= R_1 + jX_1 + \frac{(R'_2 + jX'_2)(R'_3 + jX'_3)}{(R'_2 + jX'_2) + (R'_3 + jX'_3)} = \\ &= R_{екв} + jX_{екв}. \end{aligned} \quad (4Т.33)$$

При правильно визначених параметрах схеми заміщення повинні дотримуватися рівності $R_{екв} = R_{\kappa 123}$; $X_{екв} = X_{\kappa 123}$; $Z_{екв} = Z_{\kappa 123}$.

За даними перших трьох дослідів короткого замикання потрібно розрахувати процентні значення напруги короткого замикання для відповідних пар обмоток:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\kappa 12 \%} &= \frac{U_{\kappa 12}}{U_{1ном}} \cdot 100; \\ U_{\kappa 13 \%} &= \frac{U_{\kappa 13}}{U_{1ном}} \cdot 100; \\ U_{\kappa 23 \%} &= \frac{U_{\kappa 23}}{U_{1ном}} \cdot 100. \end{aligned} \right. \quad (4Т.34)$$

8. Вихідні напруги обмоток при номінальному навантаженні потрібно розраховувати з використанням значень $\Delta U'_{12}$ і $\Delta U'_{13}$, які можна визначити, знаючи параметри обмоток і навантаження. Розраховані значення напруги порівняти з дослідними, для чого знайти їх фазні значення.

Розрахунок ККД виконувати з використанням дослідних параметрів трансформатора.

4Т.4 Питання до захисту



1. Будова та область застосування триобмоткового трансформатора.
2. Основні рівняння, електрична схема заміщення триобмоткового трансформатора та фізичний зміст її параметрів.
3. Методика проведення і призначення дослідів холостого ходу трансформатора.
4. Методика проведення і призначення дослідів короткого замикання трансформатора.
5. Суть і призначення контрольного дослідів короткого замикання.
6. Суть взаємного впливу вторинних обмоток і спосіб його зменшення.
7. Методика розрахунку вторинної напруги трансформатора.
8. Векторна діаграма трансформатора при різних характерах навантаження і методика її побудови.

4Т.5 Задачі для самостійного розв'язування

Трифазний триобмотковий трансформатор має такі номінальні параметри: $S_{1ном} = S_{2ном} = S_{3ном} = 1,5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_{1ном} = 220 \text{ В}$, всі обмотки з'єднані трикутником.

Для цього трансформатора потрібно:

1) визначити номінальні фазні і лінійні струми та напруги всіх обмоток і коефіцієнти їх трансформації;

2) розрахувати втрати і струм холостого ходу трансформатора, якщо він у цьому режимі живиться номінальною напругою зі сторони обмотки ВН, опір якої $R_1 = 1,8 \text{ Ом}$, а опори вітки намагнічування електричної схеми заміщення однієї фази $R_0 = 38 \text{ Ом}$, $X_0 = 134 \text{ Ом}$. Розрахувати також магнітні втрати, коефіцієнт потужності, повну, активну та реактивну потужності, що споживаються;

3) визначити активні та індуктивні опори всіх трьох обмоток електричної схеми заміщення трансформатора, якщо в результаті проведення трьох дослідів короткого замикання отримано такі результати:

$$U_{к12} = 12,5 \text{ В}; \quad I_{к12} = 4 \text{ А}; \quad P_{к12} = 74 \text{ Вт};$$

$$U_{к13} = 15 \text{ В}; \quad I_{к13} = 4 \text{ А}; \quad P_{к13} = 82 \text{ Вт};$$

$$U_{к23} = 8 \text{ В}; \quad I_{к23} = 6,5 \text{ А}; \quad P_{к23} = 93 \text{ Вт}.$$

В кожному досліді вимірювались дійсні значення лінійних напруг та струмів і сумарних потужностей трьох фаз;

4) використовуючи результати розв'язку попередніх задач, обчислити ККД трансформатора в номінальному режимі його роботи;

5) використовуючи результати розв'язку задачі, розрахувати вихідні лінійні напруги обох вторинних обмоток трансформатора при номінальній первинній напрузі і номінальних струмах обмоток при $\cos\varphi_2 = 0,8$ і $\cos\varphi_3 = 0,6$.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Розглянемо моделювання трансформаторів в ППП MathCAD та Simulink (MATLAB).

2.1 Моделювання трансформаторів в ППП MathCAD

В даному програмному середовищі можна провести моделювання всіх режимів роботи трансформатора та дослідити його робочі характеристики.

2.1.1 Розрахунок струму намагнічування

Розглянемо моделювання трансформатора в режимі холостого ходу на прикладі задачі:

- 1) за відомим аналітичним виразом магнітної характеристики та вказаних у вихідних умовах даних потрібно побудувати залежність миттєвого значення струму холостого ходу трансформатора протягом півперіоду напруги з наступним розкладанням його на вищі гармоніки;
- 2) побудувати характеристику холостого ходу трансформатора – залежність діючого значення струму холостого ходу від напруги.

Нижче наводиться приклад розв'язання першої задачі – побудови кривої миттєвого значення струму холостого ходу з розкладанням його на вищі гармоніки.

Дано: _____

Проміжок часу:

$$K := \pi \quad t := 0,001 .. K$$

Діюче значення напруги первинної обмотки:

$$U_{1ном} := 660 \text{ (В)}$$

Кількість витків первинної обмотки:

$$w_1 := 1500 \text{ (витків)}$$

Частота напруги в мережі:

$$f := 50 (\text{Гц})$$

Залежність струму намагнічування від магнітного потоку:

$$I_0 = 0.8 \text{ sh } (1600 \Phi)$$

Розв'язок: _____

1. Визначаємо максимальне значення магнітного потоку:

$$\Phi_{max} := \frac{U_{I_{ном}}}{4.44 \cdot w_I \cdot f}$$

$$\Phi_{max} = 1.982 \times 10^{-3} \quad (\text{Вб})$$

2. Визначаємо миттєве значення магнітного потоку на заданому проміжку часу:

$$\phi(t) := \Phi_{max} \cdot \sin(t)$$

Зміна магнітного потоку в часі показана на рис. 2.1.

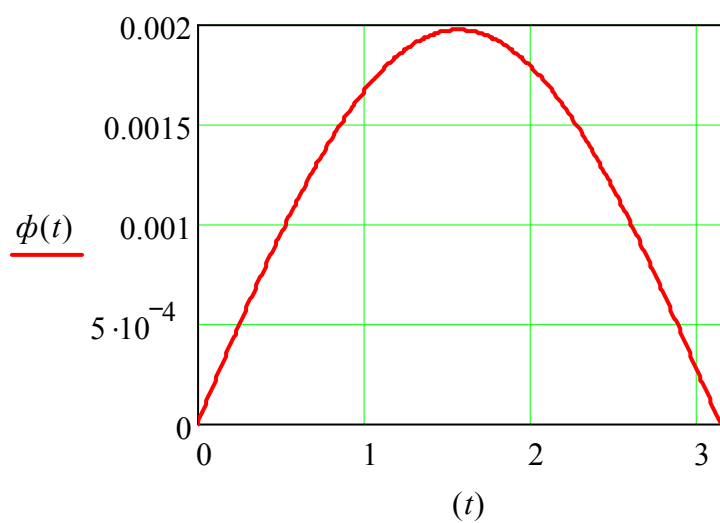


Рисунок 2.1 – Зміна магнітного потоку в часі

3. Визначаємо миттєве значення намагнічуючого струму на заданому проміжку часу:

$$iI(t) := 1.1 \sinh(1600 \cdot \phi(t))$$

Зміна струму, що протікає в первинній обмотці трансформатора, в часі показана на рис. 2.2, а залежність магнітного потоку від струму в первинній обмотці – на рис. 2.3.

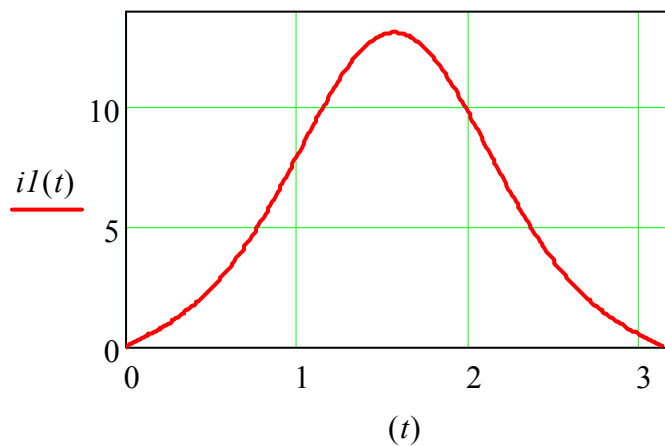


Рисунок 2.2 – Зміна струму, що протікає в первинній обмотці трансформатора, в часі

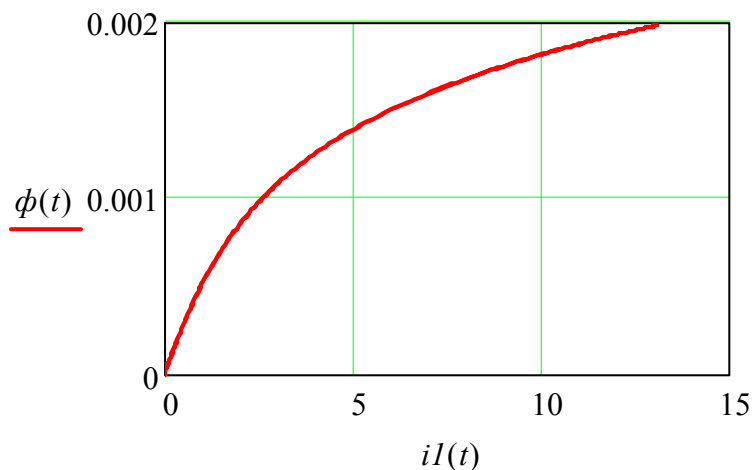


Рисунок 2.3 – Залежність магнітного потоку від струму в первинній обмотці

4. Розкладання кривої намагнічуючого струму в спектр гармонік:

Порядок полінома Фур'є (номер найвищої гармоніки):

$$M := 5$$

Програма до обчислення коефіцієнтів в ряді Фур'є
(відповідно до номера гармоніки (від 0 до M)
на визначеному інтервалі дослідження ($0 \dots K$))

$$FC(i, M, K) := \left[\begin{array}{l} R^{(0)} \leftarrow \left(\frac{1}{2 \cdot K} \cdot \int_0^K il(t) dt \right) \\ \text{for } n \in 1 \dots M \\ R^{(n)} \leftarrow \left(\begin{array}{l} \frac{1}{K} \cdot \int_0^K il(t) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot t}{K}\right) dt \\ \frac{1}{K} \cdot \int_0^K il(t) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot t}{K}\right) dt \end{array} \right) \\ R^T \end{array} \right]$$

Обчислені коефіцієнти ряду Фур'є:

$$res := FC(il, M, K) \quad A := res^{(0)} \quad B := res^{(1)}$$

Поліном Фур'є (за означенням):

$$p(t) := A_0 + \sum_{n=1}^M \left(A_n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot t}{K}\right) + B_n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot t}{K}\right) \right)$$

Перша (основна) гармоніка струму:

$$p_1(t) := A_1 \cdot \cos(t) + B_1 \cdot \sin(t)$$

Третя гармоніка струму:

$$p_3(t) := A_3 \cdot \cos(3t) + B_3 \cdot \sin(3t)$$

П'ята гармоніка струму:

$$p_5(t) := A_5 \cdot \cos(5t) + B_5 \cdot \sin(5t)$$

За результатами розрахунків можна побудувати графік зміни струму намагнічування в часі, поданий на рис. 2.4.

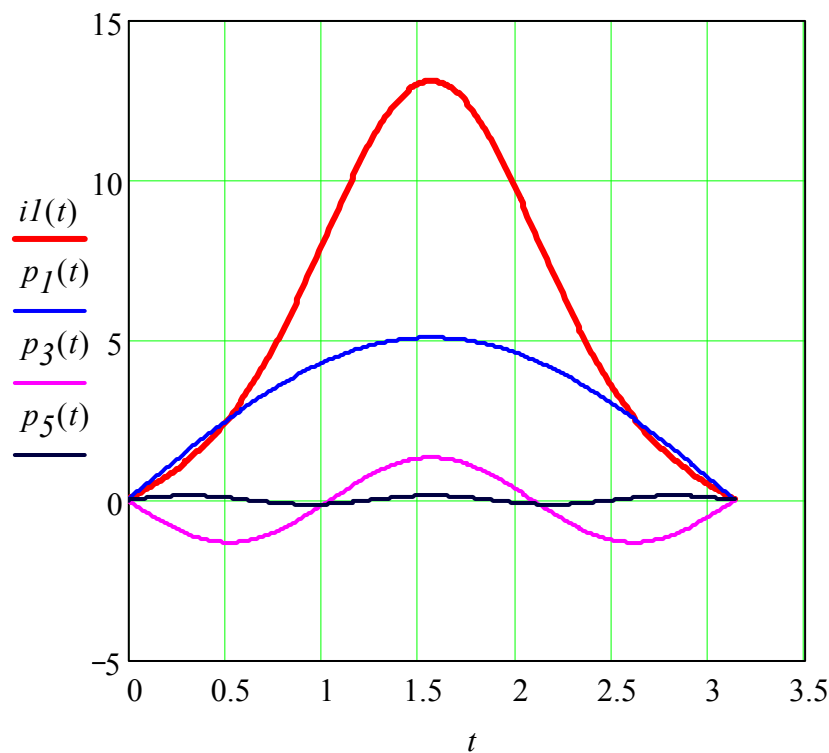


Рисунок 2.4 – Зміна струму намагнічування в часі

Побудуємо характеристику холостого ходу трансформатора – залежність $I_1 = f(U_1)$ при відомій площі перерізу магнітопроводу трансформатора та заданому робочому значенні магнітної індукції в стрижнях при номінальній напрузі. Магнітна характеристика сталі при цьому задається емпіричним виразом: $I_0 = 0.08 \cdot \text{sh}(200 \cdot \Phi)$.

Дано: _____

Номинальна напруга первинної обмотки трансформатора:

$$U_{I_{НОМ}} := 10 \text{ (кВ)}$$

Робоча індукція в стрижнях при номінальній напрузі:

$$B_{ст} := 1.6 \text{ (Тл)}$$

Площа перерізу стрижня магнітопроводу:

$$S_{ст} := 0.008 \text{ (м}^2\text{)}$$

Залежність струму намагнічування від магнітного потоку:

$$I_{\mu} = 0.08 \operatorname{sh}(200 \Phi)$$

Діапазон зміни напруги первинної обмотки:

$$n := 0, 0.01 \dots 1.2$$

Розв'язок: _____

1. Визначаємо робоче значення магнітного потоку в стрижнях:

$$\Phi := B_{ст} \cdot S_{ст} \quad \Phi = 0.013 \text{ (Вб)}$$

2. Коефіцієнт пропорційності між значенням напруги та магнітним потоком ($4.44 \times w_1 \times f$):

$$K := \frac{U_{I_{НОМ}}}{\Phi \cdot \sqrt{2}} \quad K = 552.427$$

3. Діапазон зміни магнітного потоку в межах зміни напруги $U_{I_{H}} n$:

$$\phi(n) := \frac{U_{I_{НОМ}} \cdot n}{K}$$

$$U_I(n) := U_{I_{НОМ}} \cdot n$$

4. Залежність струму намагнічування в межах зміни напруги $U_{I_{НОМ}} n$:

$$i_{\mu}(n) := 0.08 \cdot \operatorname{sinh}(200 \cdot \phi(n))$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності показана на рис. 2.5.

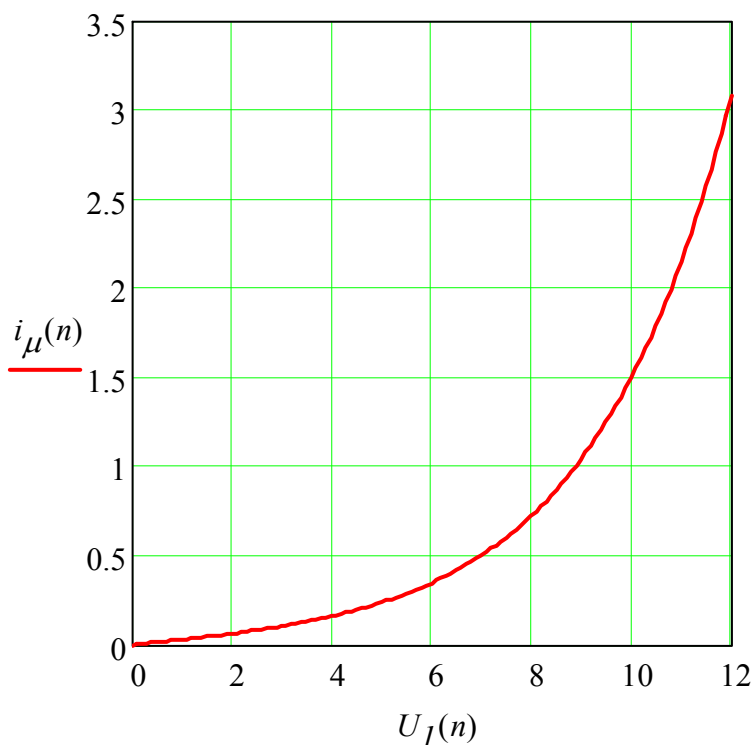


Рисунок 2.5 – Графік залежності $I_1 = f(U_1)$

2.1.2 Моделювання зміни напруги трансформатора

При виборі трансформаторів під час проектування електричних систем та мереж важливо передбачити зміну напруги на виводах вторинної обмотки. Наведена нижче математична модель дозволяє при заданих вихідних умовах (потужність трансформатора, параметри схеми заміщення) визначити зміну напруги на виводах вторинної обмотки в діапазоні зміни навантаження від 0 до 1,2 потужності трансформатора та його характеру від ємнісного до повністю індуктивного.

Дано: _____

Номінальна потужність трансформатора:

$$S_{ном} := 200 \text{ (кВА)}$$

Номінальні напруги первинної і вторинної обмоток:

$$U_{Iном} := 35 \text{ (кВ)} \quad U_{2ном} := 10 \text{ (кВ)}$$

Діапазон коефіцієнта навантаження:

$$\beta := 0, 0.1 \dots 1$$

Діапазон коефіцієнта потужності навантаження:

$$\phi_2 := -\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2} + 0.1 \dots \frac{\pi}{2}$$

Параметри схеми заміщення:

$$R_K := 0.05 (Ом) \quad X_K := 0.85 (Ом)$$

Схема з'єднання обмоток: Δ / Δ

Розв'язок: _____

1. Визначаємо номінальний лінійний струм трансформатора:

$$I_{1ном} := \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} \quad I_{1ном} = 3.299 (A)$$

2. Визначаємо номінальний фазний струм трансформатора:

$$I_{1фном} := \frac{I_{1ном}}{\sqrt{3}} \quad I_{1фном} = 1.905 (A)$$

3. Повний опір короткого замикання однієї фази та його аргумент:

$$Z_K := \sqrt{R_K^2 + X_K^2} \quad Z_K = 0.851 (Ом)$$

$$\phi_K := \operatorname{atan}\left(\frac{X_K}{R_K}\right) \quad \phi_K = 1.512 (rad)$$

4. Напряга короткого замикання:

$$U_K := \frac{I_{1фном} \cdot Z_K}{U_{1ном}} \cdot 100 \quad U_K = 4.634 (\%)$$

5. Сумісна залежність зміни напруги:

$$\Delta U(\beta, \phi_2) := U_K \cdot \beta \cdot \cos(\phi_2 - \phi_K)$$

Графічна інтерпретація отриманого співвідношення напруги $\Delta U = f(\beta, \phi_2)$ показана на рис. 2.6.

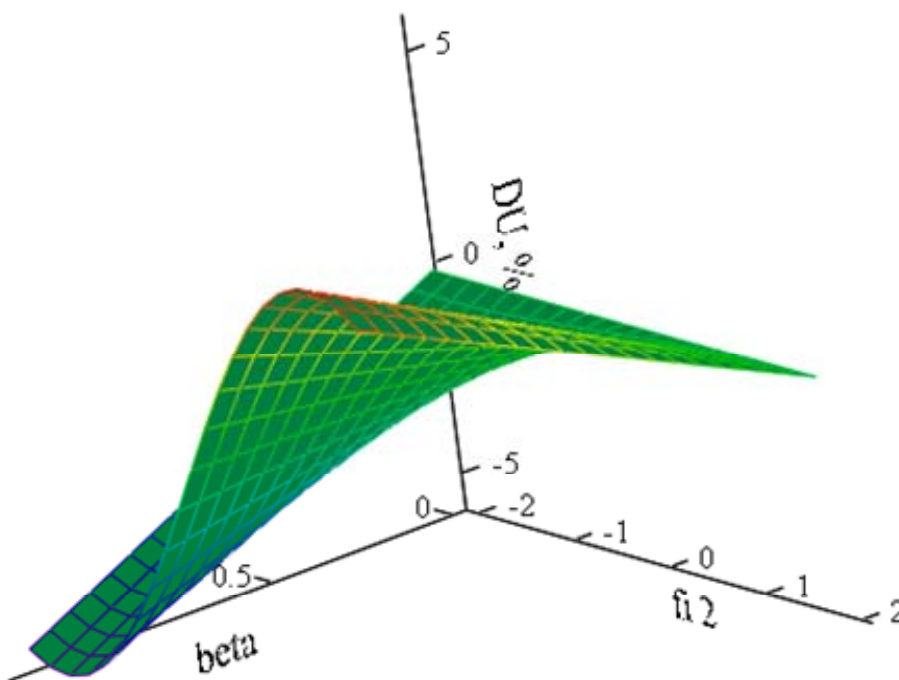


Рисунок 2.6 – Залежність спаду напруги ΔU від коефіцієнта навантаження β та кута навантаження ϕ_2 (на графіку $\Delta U - DU$; $\beta - \text{beta}$; $\phi_2 - \text{fi } 2$)

2.1.3 Розрахунок ККД

Важливою робочою характеристикою трансформатора є залежність його ККД від величини навантаження. Вибір трансформатора з виконанням умови оптимального ККД дозволить зменшити втрати електроенергії. Запропонована далі математична модель цього параметра трансформатора дозволяє визначити максимальний ККД та відповідний йому коефіцієнт навантаження трансформатора (у відносних одиницях).

Дано: _____

Номинальна потужність трансформатора:

$$S_{ном} := 200 \text{ (кВА)}$$

Номинальна напруга первинної обмотки:

$$U_{Iном} := 10 \text{ (кВ)}$$

Діапазон коефіцієнта навантаження:

$$T := 1.2 \quad \beta := 0,0.01 .. T$$

Активна складова напруги короткого замикання:

$$U_{ка} := 2.85 \text{ (\%)}$$

Коефіцієнт потужності навантаження:

$$\cos \phi_2 := 0.8$$

Схема з'єднання: Δ / Δ

Кратність втрат холостого ходу до втрат короткого замикання:

$$K := 5$$

Розв'язок: _____

1. Визначаємо номінальний лінійний струм трансформатора:

$$I_{Iном} := \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{Iном}} \quad I_{Iном} = 11.547 \text{ (А)}$$

2. Визначаємо номінальний фазний струм трансформатора:

$$I_{Iфном} := \frac{I_{Iном}}{\sqrt{3}} \quad I_{Iфном} = 6.667 \text{ (А)}$$

3. Активний опір короткого замикання однієї фази:

$$R_K := \frac{U_{ка} \cdot U_{I_{ном}} \cdot 10^3}{100 \cdot I_{I\phi_{ном}}} \quad R_K = 42.75 \text{ (Ом)}$$

4. Втрати короткого замикання при номінальному навантаженні:

$$P_K := 3 \cdot I_{I\phi_{ном}}^2 \cdot R_K \quad P_K = 5.7 \times 10^3 \text{ (Вт)}$$

5. Втрати холостого ходу за умовою задачі:

$$P_0 := \frac{P_K}{K} \quad P_0 = 1.14 \times 10^3 \text{ (Вт)}$$

6. Залежність ККД трансформатора в заданому діапазоні навантаження:

$$\eta(\beta) := 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot \cos \phi_2 \cdot S_{ном} \cdot 10^3 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K}$$

Графічна інтерпретація залежності $\eta = f(\beta)$ подана на рис. 2.7.

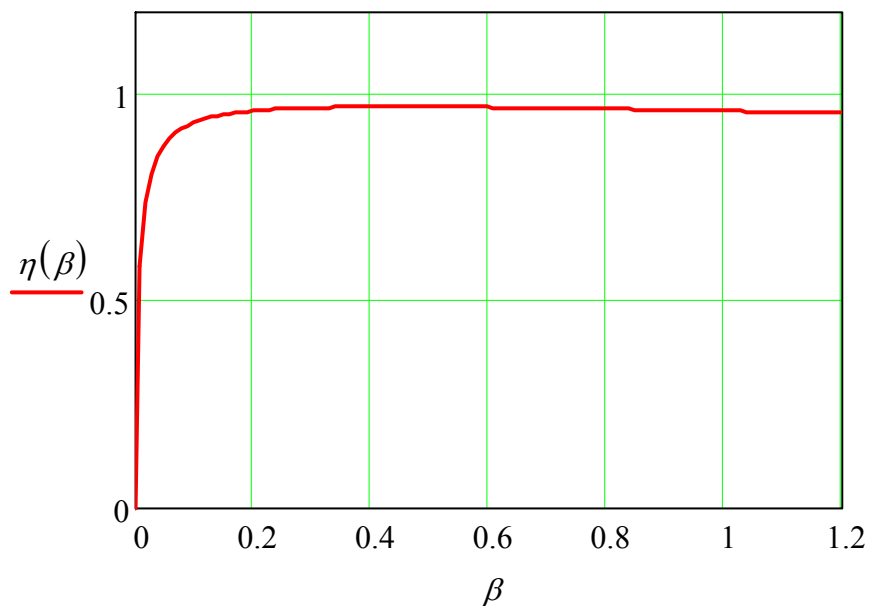


Рисунок 2.7 – Графік залежності $\eta = f(\beta)$

7. Визначаємо максимальний ККД та відповідний йому коефіцієнт навантаження:

$$\eta \cdot 100 := \eta(\beta)$$

$$\eta_{max} := \max(\eta) \quad \eta_{max} = 0.969$$

$$\beta := 1$$

Given

$$1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_K}{\beta \cdot \cos \phi_2 \cdot S_{ном} \cdot 10^3 + P_0 + \beta^2 \cdot P_K} = \eta_{max}$$

$$\beta_{max} := \text{Find}(\beta) \quad \beta_{max} = 0.45$$

2.1.4 Розрахунок параметрів схеми заміщення та ударного струму короткого замикання

Практичною задачею є вибір захисної апаратури в системах електропостачання, при цьому потрібно враховувати струм короткого замикання при виникненні такого на шинах трансформаторної підстанції, а також ударне значення цього струму. Наведена математична модель ілюструє послідовність визначення параметрів схеми заміщення трансформатора за його паспортними даними та визначення ударного струму короткого замикання.

Дано: _____

Номінальна потужність трансформатора:

$$S_{ном} := 250 \text{ (кВА)}$$

Номинальна напруга первинної обмотки:

$$U_{I_{ном}} := 10 \text{ (кВ)}$$

Напруга короткого замикання:

$$U_k := 4 \text{ (\%)}$$

Активна складова напруги короткого замикання:

$$U_{ка} := 1 \text{ (\%)}$$

Момент часу короткого замикання:

$$\alpha_k := \frac{\pi}{4}$$

Схема з'єднання: $\Delta / Y-11$

Частота напруги мережі:

$$f := 50 \text{ (Гц)}$$

Розв'язок: _____

1. Визначаємо номінальний лінійний струм трансформатора:

$$I_{I_{ном}} := \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{I_{ном}}} \quad I_{I_{ном}} = 14.434 \text{ (А)}$$

2. Визначаємо номінальний фазний струм трансформатора:

$$I_{I_{фном}} := \frac{I_{I_{ном}}}{\sqrt{3}} \quad I_{I_{фном}} = 8.333 \text{ (А)}$$

3. Повний опір короткого замикання:

$$Z_k := \frac{U_k \cdot U_{I_{ном}} \cdot 10^3}{100 \cdot I_{I_{фном}}} \quad Z_k = 48 \text{ (Ом)}$$

4. Активний опір короткого замикання:

$$R_K := \frac{U_{ка} \cdot U_{Iном} \cdot 10^3}{100 \cdot I_{Iфном}} \quad R_K = 12 \quad (Ом)$$

5. Реактивний опір короткого замикання:

$$X_K := \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad X_K = 46.4 \quad (Ом)$$

6. Аргумент опору короткого замикання:

$$\phi_K := \operatorname{atan}\left(\frac{X_K}{R_K}\right) \quad \phi_K = 1.318 \quad (рад)$$

7. Індуктивність схеми заміщення фази трансформатора при к.з.:

$$L_K := \frac{X_K}{2\pi f} \quad L_K = 0.148 \quad (Гн)$$

8. Стала часу аперіодичної складової струму короткого замикання:

$$T_K := \frac{L_K}{R_K} \quad T_K = 0.012 \quad (с)$$

9. Амплітудне значення струму короткого замикання:

$$I_{кmax} := \sqrt{2} \cdot \frac{U_{Iном} \cdot 10^3}{Z_K} \quad I_{кmax} = 294.628 \quad (А)$$

10. Рівняння струму короткого замикання:

$$t := 0, 0.001 .. 6\pi$$

$$i_K(t) := I_{кmax} \cdot \left(\sin(2\pi f \cdot t + \alpha_K - \phi_K) - \sin(\alpha_K - \phi_K) \cdot e^{\frac{-t}{T_K}} \right)$$

Графічна інтерпретація отриманої залежності подана на рис. 2.8.

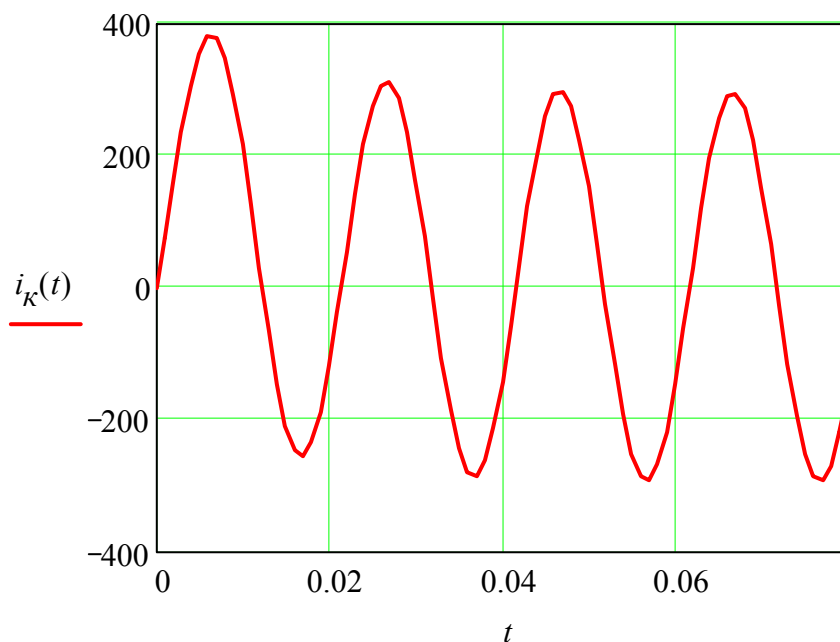


Рисунок 2.8 – Графік зміни ударного струму

11. Ударний струм короткого замикання:

$$i_{k_{t \cdot 1000}} := i_k(t)$$

$$i_{kmax} := \max(i_k) \quad i_{kmax} = 379.593 \text{ (A)}$$

2.1.5 Моделювання паралельної роботи трансформаторів

Окремим випадком експлуатації трансформаторів є їх паралельна робота. При цьому, внаслідок виконання регулювальних відпайок на обмотках ВН силових трансформаторів, можливі такі випадки, коли паралельно працюючі трансформатори мають різні коефіцієнти трансформації. Це супроводжується появою струмів врівноваження та нерівномірним розподілом навантаження між трансформаторами. За допомогою наступною моделі можна дослідити паралельну роботу трансформаторів в діапазоні зміни навантаження від 0 до 1,2 сумарної потужності трансформаторів, задаючись різними значеннями коефіцієнтів трансформації та характеру навантаження.

Дано: _____

Номінальна потужність паралельно працюючих трансформаторів:

$$S_{I\text{НОМ}} := 40 \text{ (кВА)} \quad S_{II\text{НОМ}} := 40 \text{ (кВА)}$$

Номінальні напруги обмоток трансформаторів:

$$U_{I\text{НОМ}} := 10 \text{ (кВ)} \quad U_{II\text{НОМ}} := 0.4 \text{ (кВ)}$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I := 25 \quad k_{II} := 22$$

Напруги короткого замикання першого та другого трансформаторів:

$$U_k := 4.5 \text{ (\%)}$$

Діапазон зміни навантаження:

$$\beta := 0, 0.01 \dots 1.2$$

Коефіцієнт потужності схеми заміщення трансформаторів:

$$\cos\phi_k := 0.5$$

Розв'язок: _____

1. Середнє значення напруги на виводах трансформаторів при паралельній роботі:

$$U_{2c} := \frac{\frac{U_{I\text{НОМ}}}{k_I} + \frac{U_{I\text{НОМ}}}{k_{II}}}{2} \quad U_{2c} = 0.427 \text{ (кВ)}$$

2. Визначаємо різницю ЕРС на вторинних обмотках трансформаторів на холостому ході:

$$\Delta E := \frac{\left| \frac{U_{I\text{НОМ}}}{k_I} - \frac{U_{I\text{НОМ}}}{k_{II}} \right|}{U_{2c}} \cdot 100 \quad \Delta E = 12.766 \text{ (\%)}$$

3. Номінальний струм трансформаторів:

$$I_{2НОМ} := \frac{S_{IНОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{2С}} \quad I_{2НОМ} = 54.05 \text{ (A)}$$

4. Врівноважувальний струм трансформаторів:

$$I_{3р} := \frac{\Delta E}{2 \cdot U_{К}} \cdot I_{2НОМ} \quad I_{3р} = 76.666 \text{ (A)}$$

5. Струм навантаження:

$$I_{нав}(\beta) := \frac{(S_{IНОМ} + S_{IIНОМ}) \cdot \beta}{\sqrt{3} \cdot U_{2С}}$$

6. Аргумент опору короткого замикання трансформаторів:

$$\phi_{К} := \arccos(\cos \phi_{К}) \quad \phi_{К} = 1.047 \text{ (рад)}$$

7. Струм трансформатора з більшим коефіцієнтом трансформації:

$$I_I(\beta) := \sqrt{I_{нав}(\beta)^2 + I_{3р}^2 - 2 \cdot I_{нав}(\beta) \cdot I_{3р} \cdot \cos(\pi - \phi_{К})}$$

8. Струм трансформатора з меншим коефіцієнтом трансформації:

$$I_{II}(\beta) := \sqrt{I_{нав}(\beta)^2 + I_{3р}^2 - 2 \cdot I_{нав}(\beta) \cdot I_{3р} \cdot \cos(\phi_{К})}$$

Графічна інтерпретація отриманих залежностей подана на рис. 2.9.

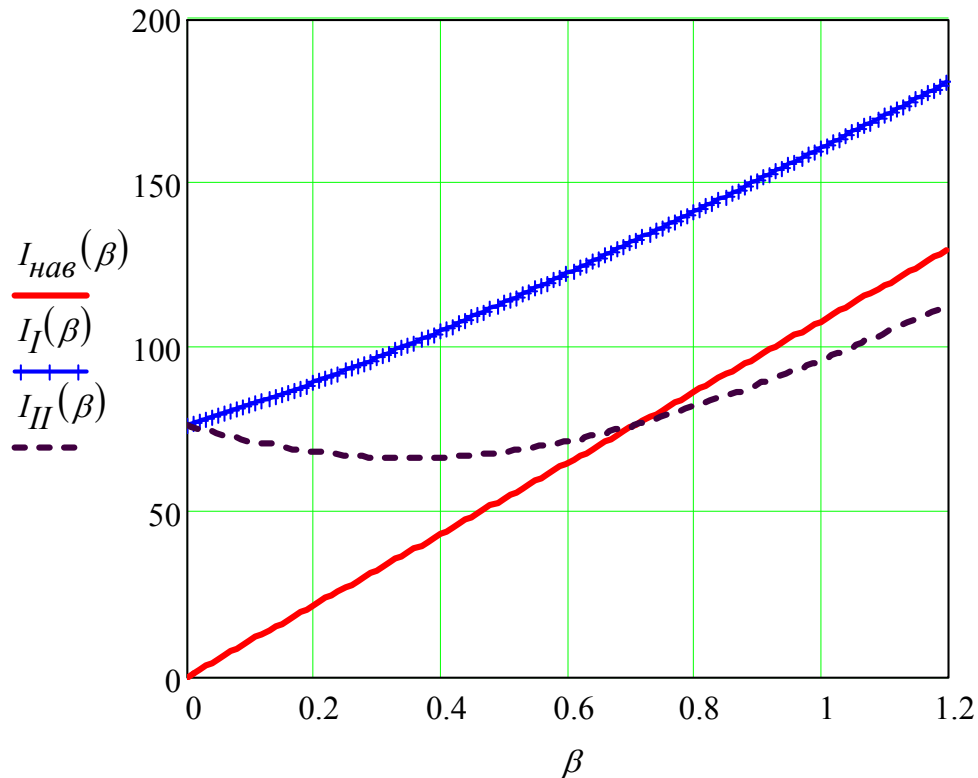


Рисунок 2.9 – Графік залежності струмів трансформаторів, що працюють на паралельній роботі, від їх навантаження

2.2 Моделювання трансформаторів в ППП Simulink

2.2.1 Загальні відомості про елементну базу Simulink

В Simulink моделювання електротехнічних систем та окремо трансформаторів здійснюється з використанням спеціальної прикладної бібліотеки *SimPowerSystems*. Для розробки моделей з застосуванням, наприклад, трифазного двообмоткового силового трансформатора в цій бібліотеці слід знайти вкладку *Elements* і вибрати в ній блок *Three-phase Transformer (Two Windings)* та перетягнути його у вікно створеного файлу нової моделі (рис. 2.10).

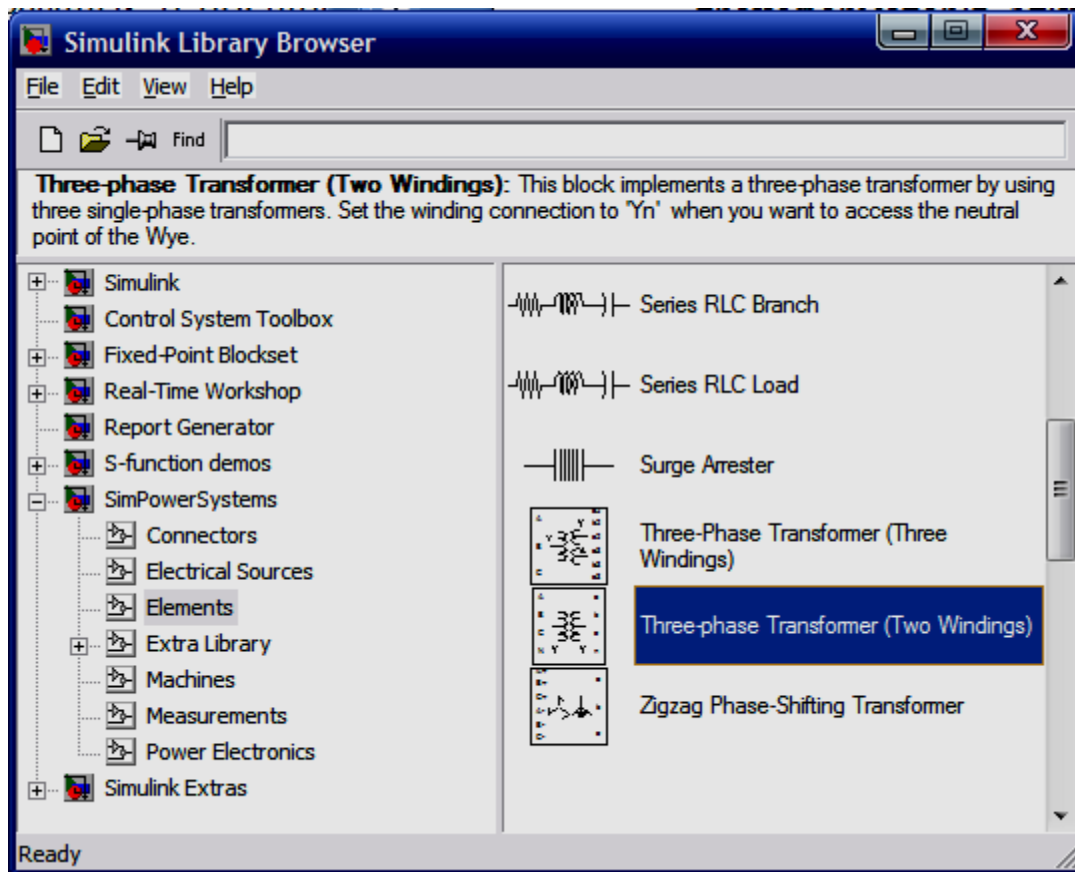
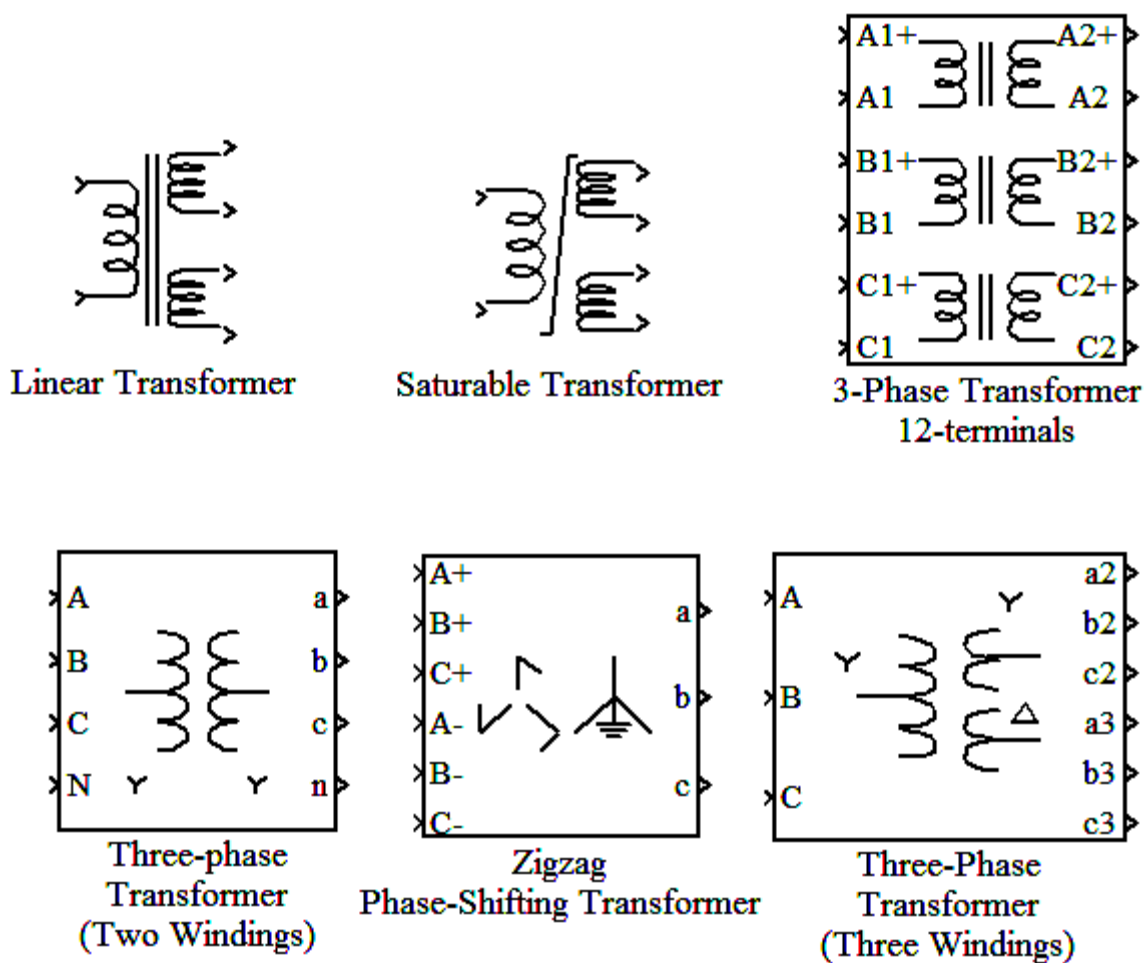


Рисунок 2.10 – Вікно вибору елементів у Simulink

Розглянемо детальніше елементу базу бібліотеки *SimPowerSystems* (рис. 2.11):

- Linear Transformer – лінійний трансформатор;
- Saturable Transformer – нелінійний трансформатор;
- Three-phase Linear Transformer (12-terminals) – трифазний лінійний трансформатор (12 виводів);
- Three-phase Transformer (Two Windings) – трифазний двообмотковий трансформатор;
- Zigzag Phase-Shifting Transformer – трифазний трансформатор з первинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг;
- Transformer (Three Windings) – трифазний триобмотковий трансформатор.

Рисунок 2.11 – Елементна база бібліотеки *SimPowerSystems*

2.2.1.1 Лінійний трансформатор

Моделює три- або двообмотковий однофазний трансформатор (нелінійність характеристики намагнічування матеріалу осердя не враховується) [11].

Вікно задання параметрів лінійного трансформатора показано на рис. 2.12.

Параметри блоку [11]:

- Nominal power and frequency [$P_n(\text{VA})$ $f_n(\text{Hz})$] – номінальна повна потужність (ВА) і номінальна частота (Гц);
- Winding 1 parameters [$V_1(\text{V}_{\text{rms}})$ $R_1(\text{pu})$ $L_1(\text{pu})$] – параметри першої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;

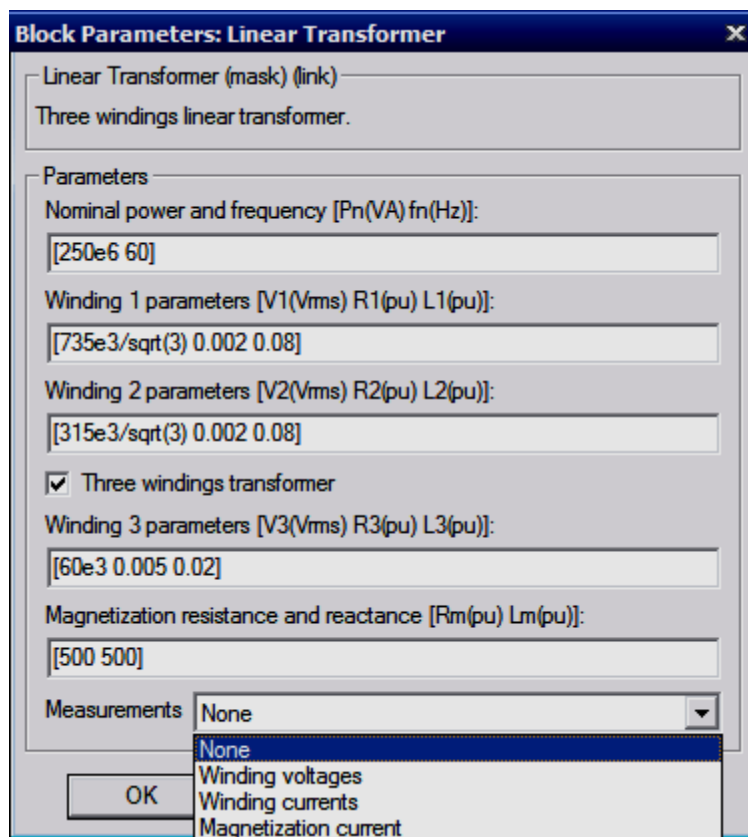


Рисунок 2.12 – Вікно задання параметрів лінійного трансформатора

- Winding 2 parameters – параметри другої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Three windings transformer – триобмотковий трансформатор: при встановленому прапорці трансформатор має дві вторинні обмотки, а якщо прапорець знятий, то одну;
- Winding 3 parameters – параметри третьої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Magnetization resistance and reactance [Rm(pu) Lm(pu)] – активний опір кола намагнічування (в.о.) та індуктивність кола намагнічування (в.о.);
- Measurements – змінні, що вимірюються (значення параметра вибирається зі списку):
 - Winding voltages – напруги обмоток;
 - Winding currents – струми обмоток;

- Magnetization current – струм намагнічування;
- All voltages and currents – всі напруги й струми.

Активні опори та індуктивності обмоток, а також кола намагнічування задаються у відносних одиницях. Для кожної обмотки відносні значення опору й індуктивності розраховуються за формулами:

$$R_* = \frac{R}{R_{\delta}}, \quad (2.1)$$

$$L_* = \frac{L}{L_{\delta}}, \quad (2.2)$$

де R, L – абсолютні значення активного опору й індуктивності;

R_*, L_* – відносні значення активного опору та індуктивності:

$$R_{\delta} = \frac{U_{ном}^2}{P_{ном}}, \quad (2.3)$$

$$L_{\delta} = \frac{R_{\delta}}{2\pi f}. \quad (2.4)$$

Параметри кола намагнічування можна знайти, використовуючи величину струму намагнічування, що задається в відсотках відносно номінального струму.

2.2.1.2 Нелінійний трансформатор

Моделює три- або двообмотковий однофазний трансформатор (у моделі враховується нелінійність характеристики намагнічування матеріалу осердя) [11, 19, 20].

У моделі опір кола намагнічування R_m враховує активні втрати в осерді. Нелінійна індуктивність L_m кола намагнічування враховує насичення осердя трансформатора.

Вікно завдання параметрів нелінійного трансформатора подано на рис. 2.13.

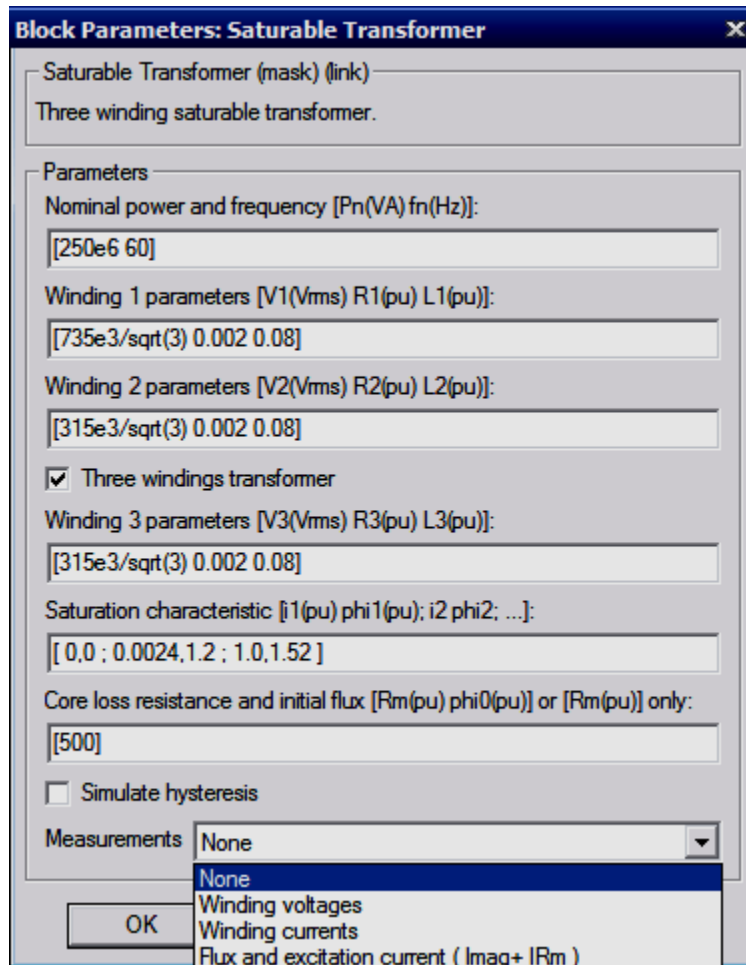


Рисунок 2.13 – Вікно задання параметрів нелінійного трансформатора

Параметри блоку [11]:

- Nominal power and frequency $[P_n(\text{VA}) f_n(\text{Hz})]$ – номінальна повна потужність (ВА) і номінальна частота (Гц);
- Winding 1 parameters $[V_1(\text{Vrms}) R_1(\text{pu}) L_1(\text{pu})]$ – параметри першої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Winding 2 parameters – параметри другої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Three windings transformer – триобмотковий трансформатор: при встановленому прапорці трансформатор має дві вторинні обмотки, а якщо прапорець знятий, то одну;

- Winding 3 parameters – параметри третьої обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Saturation characteristic [i1(pu) phi1(pu); i2 phi2; ...] – характеристика насичення сердечника;
- Core loss resistance and initial flux [Rm(pu) phi(pu)] or [Rm(pu)] only – опір кола намагнічування (в.о.) та залишковий магнітний потік (в.о.) або тільки опір кола намагнічування (в.о.);
- Simulate hysteresis – моделювати гістерезис: при встановленому прапорці в характеристиці намагнічування враховується гістерезис (рис. 2.14);

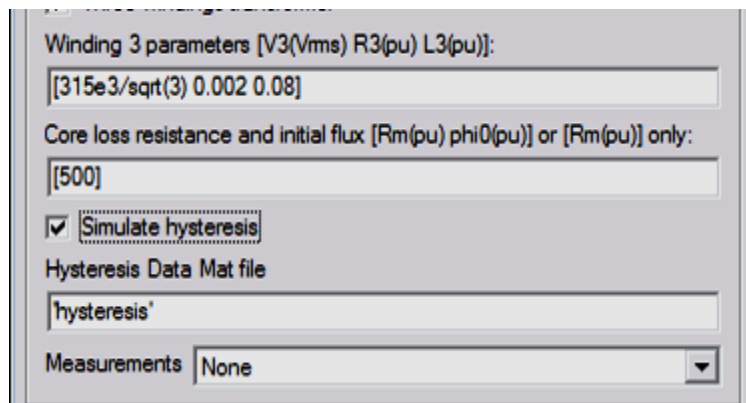


Рисунок 2.14 – Фрагмент вікна задання параметрів нелінійного трансформатора

- Hysteresis Data Mat file – ім'я файлу даних, що містить гістерезисну характеристику (файл даних може бути створений за допомогою блоку *Powergui*);
- Measurements – змінні, що вимірюються (значення параметра вибирається зі списку):
 - Winding voltages – напруги обмоток;
 - Winding currents – струми обмоток;
 - Flux and excitation current (Imag_IRm) – потік і струм холостого ходу,
 - Flux and magnetization current (Imag) – намагнічування;
 - All Measurements (V, I, Flux) – всі напруги, струми й потік.

Активні опори й індуктивності обмоток, а також опори кола намагнічування задаються у відносних одиницях аналогічно до моделі лінійного трансформатора.

Характеристика намагнічування задається парами значень струму намагнічування і магнітного потоку у відносних одиницях, починаючи із точки (0, 0).

Відносні значення струму I_* й потоку Φ_* визначаються за формулами:

$$I_* = \frac{I}{I_\sigma}, \quad (2.5)$$

$$\Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_\sigma}, \quad (2.6)$$

де I_σ – базисний струм:

$$I_\sigma = \sqrt{2} \frac{P_{ном}}{U_1}; \quad (2.7)$$

Φ_σ – базисний потік:

$$\Phi_\sigma = \sqrt{2} \frac{U_1}{2\pi f}. \quad (2.8)$$

2.2.1.3 Трифазний лінійний трансформатор (12 виводів)

Моделює трифазний лінійний трансформатор. Модель побудована на основі трьох однофазних лінійних трансформаторів. Блок має окремі затискачі для всіх виводів обмоток трансформатора.

Вікно задання параметрів трифазного лінійного трансформатора (12 виводів) показано на рис. 2.15.

Параметри блоку [11]:

- Three-phase rated power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – трифазна номінальна повна потужність (ВА) і номінальна частота (Гц);
- Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)] – параметри первинної обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;

- Winding 2 parameters – параметри вторинної обмотки: діюче значення напруги обмотки (В), активний опір (в.о.) та індуктивність розсіювання (в.о.) обмотки;
- Magnetization branch [Rm(pu) Lm(pu)] – активний опір кола намагнічування (в.о.) та індуктивність кола намагнічування (в.о.).

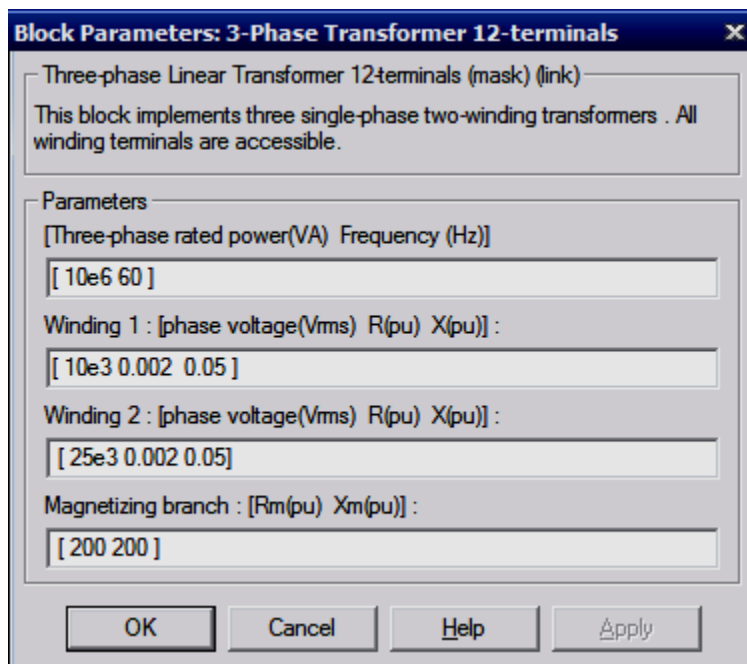


Рисунок 2.15 – Вікно задання параметрів трифазного лінійного трансформатора (12 виводів)

2.2.1.4 Трифазний двообмотковий трансформатор

Моделює двообмотковий трифазний трансформатор. Модель побудована на основі трьох однофазних трансформаторів. У моделі може враховуватися нелінійність характеристики намагнічування матеріалу осердя.

Вікно задання параметрів трифазного двообмоткового трансформатора показано на рис. 2.16.

Параметри блоку [11]:

- Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – номінальна потужність (ВА) і частота (Гц) трансформатора;

- Winding 1 (ABC) connection [Y, Yn, Yg, Delta(D1), Delta(D11)] – схема з'єднання первинної обмотки (значення параметра вибирається зі списку):
- Y – зірка (рис. 2.17);
 - Yn – зірка з нейтраллю,
 - Yg – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи;

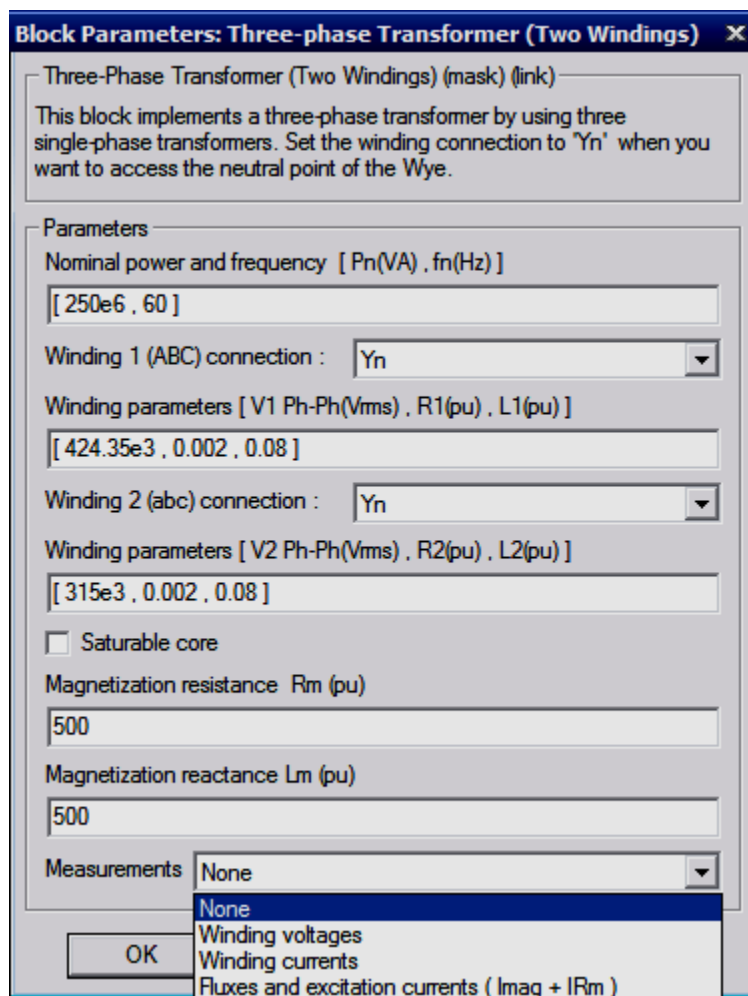


Рисунок 2.16 – Вікно задання параметрів трифазного двообмоткового трансформатора

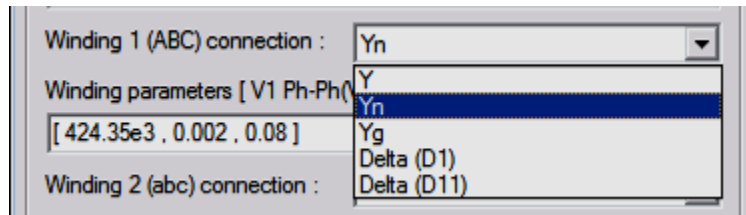


Рисунок 2.17 – Фрагмент вікна задання параметрів трифазного двообмоткового трансформатора

- Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] – параметри первинної обмотки: лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.);
- Winding 2 (abc) connection [Y, Yn, Yg, Delta(D1), Delta(D11)] – схема з'єднання вторинної обмотки (значення параметра вибирається зі списку):
 - Y – зірка;
 - Yn – зірка з нейтраллю;
 - Yg – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи;
- Winding 2 parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] – параметри вторинної обмотки: лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.);
- Saturable core – осердя, що насичується: при встановленому прапорці використовується нелінійна модель трансформатора;
- Magnetization resistance Rm(pu) – опір кола намагнічування (в.о.);
- Magnetization inductance Lm(pu) – індуктивність кола намагнічування (в.о.): параметр доступний при моделюванні лінійного трансформатора (прапорець Saturable core не встановлений);
- Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...] – характеристика насичення осердя: значення струму намагнічування і магнітного потоку задаються у відносних одиницях. Параметр доступний при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core усталовлений);

- Simulate hysteresis – моделювати гістерезис: при встановленому прапорці в характеристиці намагнічування враховується гістерезис;
- Hysteresis Data Mat file – ім'я файлу даних, що містить гістерезисну характеристику: файл даних може бути створений за допомогою блоку Powergui;
- Specify initial fluxes [ϕ_{0A} , ϕ_{0B} , ϕ_{0C}] – початкові потоки для фаз ABC: параметр доступний при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core установлений);
- Measurements – змінні, що вимірюються (значення параметра вибираються зі списку):
 - Winding voltages – напруги обмоток;
 - Winding currents – струми обмоток;
 - Flux and excitation current (I_{mag_IRm}) – потік і струм холостого ходу;
 - Flux and magnetization current (I_{mag}) – намагнічування;
 - All Measurements (V, I, Flux) – всі напруги, струми й потік.

Активні опори й індуктивності обмоток, а також параметри кола намагнічування задаються у відносних одиницях аналогічно до моделі лінійного трансформатора.

Характеристика намагнічування задається аналогічно до моделі нелінійного трансформатора.

2.2.1.5 Трифазний трансформатор з первинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг

Моделює трифазний трансформатор, первинні обмотки якого з'єднані в зигзаг. Модель побудована на основі трьох однофазних триобмоткових трансформаторів. Всі затискачі первинних обмоток доступні. У моделі може враховуватися нелінійність характеристики намагнічування матеріалу осердя.

Вікно задання параметрів трифазного трансформатора з первинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг, показане на рис. 2.18.

Параметри блока [11]:

- Nominal power and frequency [$P_n(\text{VA})$ $f_n(\text{Hz})$] – номінальна потужність (ВА) і частота (Гц) трансформатора;

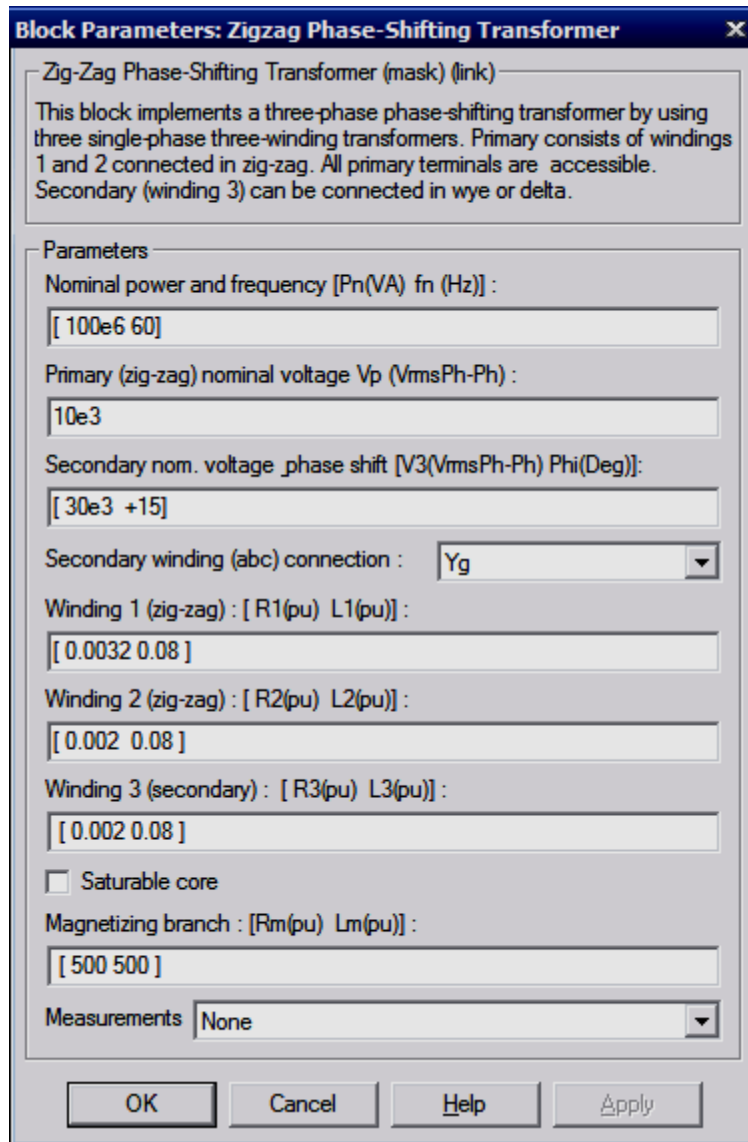


Рисунок 2.18 – Вікно задання параметрів трифазного трансформатора з первинною обмоткою, з'єднаною в зигзаг

- Primary (zigzag) nominal voltage Vp [Vrms Ph-Ph] – діюче значення номінальної лінійної напруги первинної обмотки трансформатора;
- Secondary nominal voltage and phase shift [V3(Vrms Ph-Ph) Phi(Deg)] – діюче значення номінальної лінійної напруги вторинної обмотки трансформатора й фазовий зсув напруги вторинної обмотки (ел. град);
- Secondary winding (abc) connection – схема з'єднання вторинної обмотки: (значення параметра вибирається зі списку):
 - Y – зірка;

- Y_n – зірка з нейтраллю;
 - Y_g – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи;
- Winding 1 (zig-zag) : [R1(pu) L1(pu)] – параметри першої обмотки: активний опір (в.о.) та індуктивність (в.о.) першої обмотки однофазного триобмоткового трансформатора;
 - Winding 2 (zig-zag) : [R2(pu) L2(pu)] – параметри другої обмотки: активний опір (в.о.) та індуктивність (в.о.) другої обмотки однофазного триобмоткового трансформатора;
 - Winding 3 (secondary): [R3(pu) L3(pu)] – параметри третьої обмотки: активний опір (в.о.) та індуктивність (в.о.) третьої (вторинної) обмотки однофазного триобмоткового трансформатора;
 - Saturable core – насичуване осердя: при встановленому прапорці використовується нелінійна модель трансформатора;
 - Magnetizing branch: [Rm(pu) Lm(pu)] – параметри кола намагнічування: активний опір (в.о.) та індуктивність (в.о.) кола намагнічування. Параметр доступний, якщо прапорець Saturable core не встановлений (моделюється лінійний трансформатор);
 - Magnetization resistance Rm(pu) – опір кола намагнічування (в.о.): параметр доступний, якщо встановлено прапорець Saturable core;
 - Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2; ...] – характеристика насичення осердя: значення струму намагнічування і магнітного потоку задаються у відносних одиницях. Параметр доступний при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core установлений);
 - Measurements – змінні, що вимірюються (значення параметра вибираються зі списку):
 - None – немає змінних для вимірювання;
 - Phase voltages – фазні напруги обмоток;
 - Phase currents – фазні струми обмоток;
 - Fluxes and excitation currents (Imag + IRm) – потоки й струми холостого ходу;

- Fluxes and magnetization currents (Imag) – потік і струм намагнічування;
- All measurements (V I Fluxes) — всі напруги, струми й потік.

Активні опори й індуктивності обмоток, а також параметри кола намагнічування задаються у відносних одиницях аналогічно до моделі лінійного трансформатора

2.2.1.6 Трифазний триобмотковий трансформатор

Моделює триобмотковий трифазний трансформатор. Модель побудована на основі трьох однофазних трансформаторів. У моделі може враховуватися нелінійність характеристики намагнічування матеріалу сердечника.

Вікно задання параметрів трифазного триобмоткового трансформатора показано на рис. 2.19.

Параметри блоку [11]:

- Port configuration – конфігурація портів: параметр дозволяє змінювати тип портів (вхідного або вихідного) блоку. Значення параметра вибирається зі списку:
 - ABC as input terminals – затискачі первинної обмотки (A, B і C) є вхідними, затискачі вторинних обмоток (abc) при цьому будуть вихідними;
 - ABC as output terminals – затискачі первинної обмотки (A, B і C) є вихідними, затискачі вторинних обмоток (abc) при цьому будуть вхідними;
- Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – номінальна потужність (ВА) і частота (Гц) трансформатора;
- Winding 1 (ABC) connection – схема з'єднання першої обмотки (значення параметра вибирається зі списку):
 - Y – зірка;
 - Yn – зірка з нейтраллю;
 - Yg – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи.

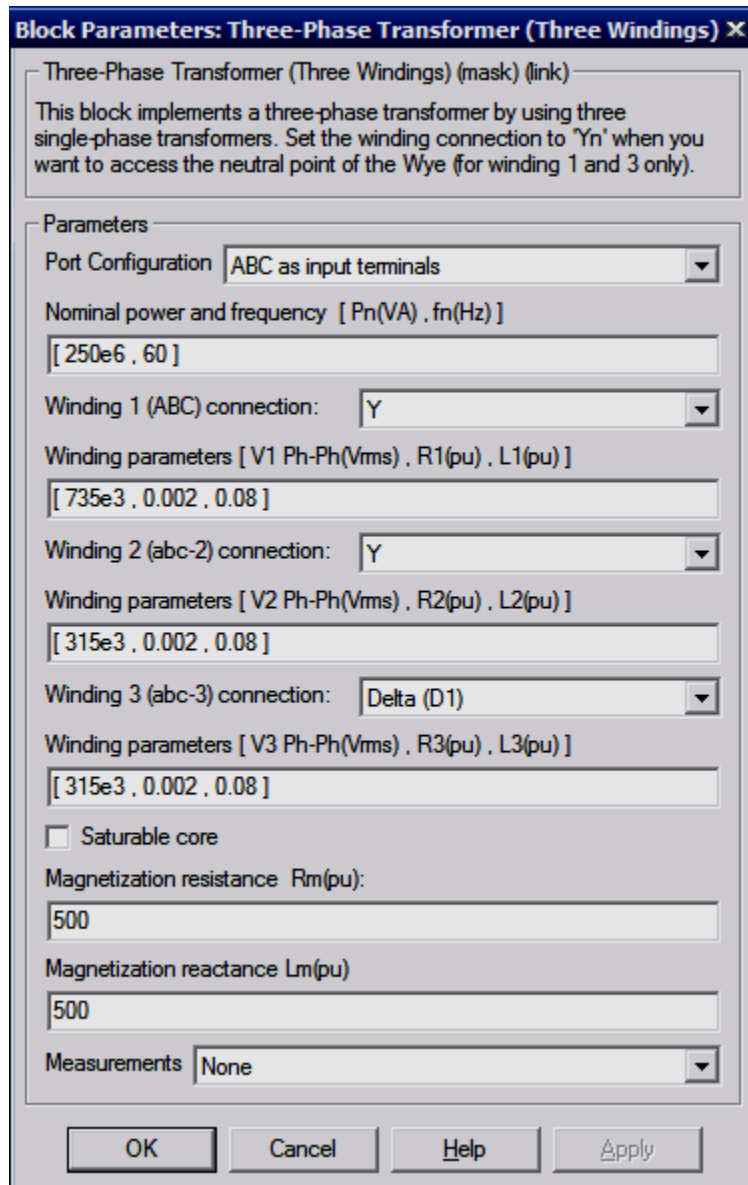


Рисунок 2.19 – Вікно задання параметрів трифазного триобмоткового трансформатора

- Winding parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] – параметри першої обмотки: лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.);
- Winding 2 (abc) connection – схема з'єднання другої обмотки (значення параметра вибирається зі списку):
 - Y – зірка;
 - Yn – зірка з нейтраллю;
 - Yg – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи;

- Winding parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] – параметри другої обмотки: лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.);
- Winding 3 (abc) connection – схема з'єднання третьої обмотки (значення параметра вибирається зі списку):
 - Y – зірка;
 - Yn – зірка з нейтраллю;
 - Yg – зірка із заземленою нейтраллю;
 - Delta(D1) – трикутник першої групи;
 - Delta(D11) – трикутник одинадцятої групи;
- Winding parameters [U3 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)] – параметри третьої обмотки: лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.);
- Saturable core – насичує вальне осердя: при встановленому прапорці використовується нелінійна модель трансформатора;
- Magnetization resistance Rm(pu) – опір кола намагнічування (в.о.);
- Magnetization inductance Lm(pu) – індуктивність кола намагнічування (в.о.): параметр доступний при моделюванні лінійного трансформатора (прапорець Saturable core не встановлений);
- Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...] – характеристика насичення осердя: значення струму намагнічування і магнітного потоку задаються у відносних одиницях. Параметр доступний при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core установлений);
- Simulate hysteresis – моделювати гістерезис: при встановленому прапорці в характеристиці намагнічування враховується гістерезис;
- Hysteresis Data Mat file – ім'я файлу даних, що містить гістерезисну характеристику: параметр доступний при встановленому прапорці Simulate hysteresis.;
- Specify initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C] – початкові потоки для фаз АВС: параметр доступний при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core установлений);
- Measurements – змінні, що вимірюються (значення параметра вибираються зі списку):
 - Winding voltages – напруги обмоток;

- Winding currents – струми обмоток;
- Flux and excitation current (I_{mag_IRm}) – потік і струм холостого ходу;
- Flux and magnetization current (I_{mag}) – потік і струм намагнічування;
- All Measurements (V, I, Flux) – всі напруги, струми й потік.

Активні опори й індуктивності обмоток, а також параметри кола намагнічування задаються у відносних одиницях аналогічно до моделі лінійного трансформатора

Характеристика намагнічування задається аналогічно до моделі нелінійного трансформатора.

2.2.2 Приклади програм

2.2.2.1 Моделювання холостого ходу трансформаторів

Моделювання в середовищі Simulink проводиться в часовій координаті. Як найпростіший випадок можна розглянути модель однофазного трансформатора з насиченням магнітопроводу. Така модель зображена на рис. 2.20.

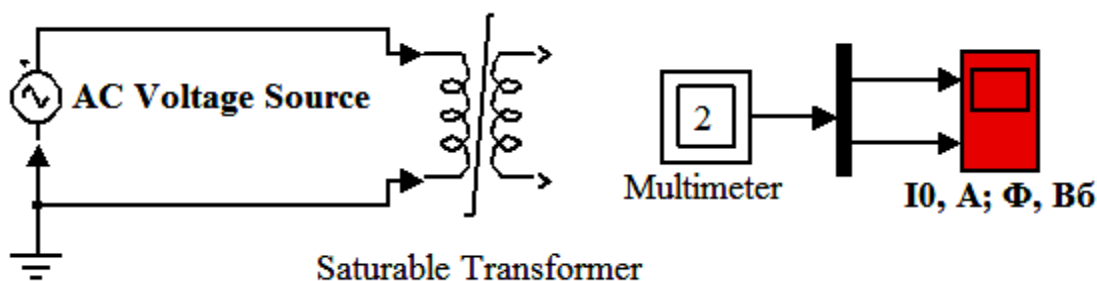


Рисунок 2.20 – Модель для дослідження холостого ходу однофазного трансформатора

Слід зауважити, що для моделювання систем з трансформаторами потрібно в вікні *Simulation / Parameters* вибрати метод числення *ode15s*, який дозволяє проводити моделювання з нелінійними елементами. Для вимірювання величин під час моделювання доцільно використовувати блок вимірювання *Multimeter*, а у вікні властивостей об'єктів моделі потрібно активувати меню *Measurement*, встановивши відповідну позначку

та вказати вимірювані величини (*All measurement (V I Fluxes)*) – всі вимірювані величини – напруги, струми та магнітні потоки в стрижнях).

При застосуванні мультиметра для вимірювання параметрів моделі потрібно в вікні його властивостей вибрати величини, що надходять на вихід цього блоку під час моделювання. Для цього в панелі *Available Measurements* (доступні вимірювання) відмітити необхідні для вимірювання і перевести їх в панель *Selected Measurements* (обрані вимірювання) натисненням кнопки >> (рис. 2.21).

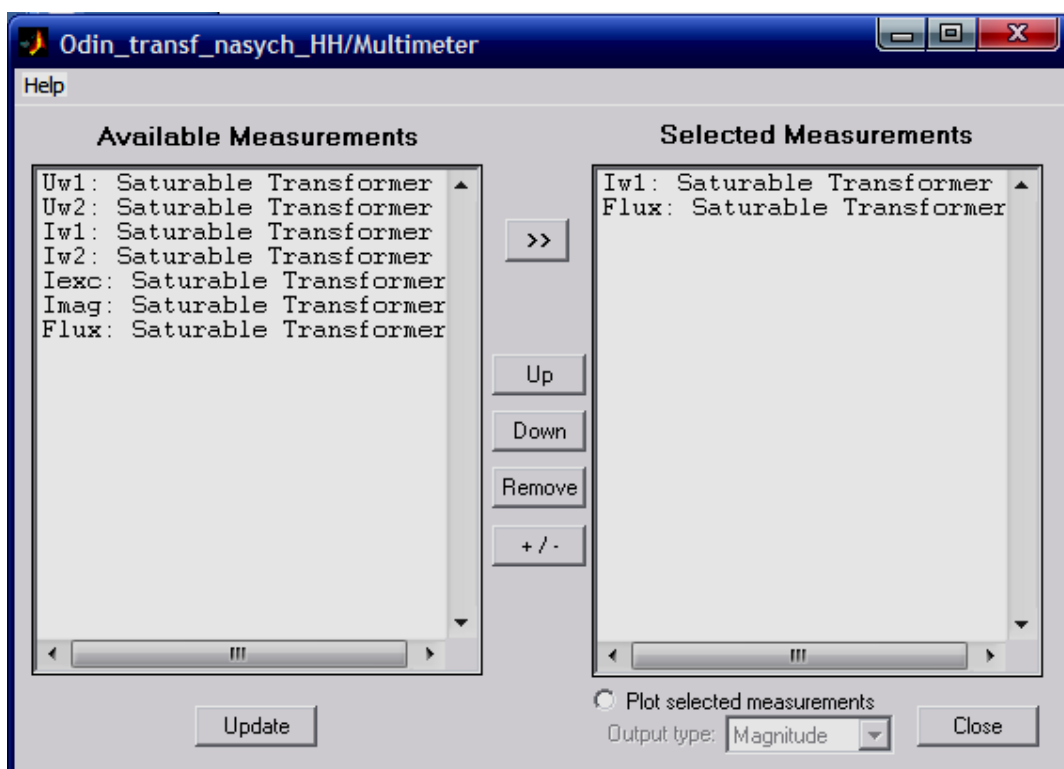


Рисунок 2.21 – Вікно властивостей мультиметра для вимірювання магнітного потоку в стрижнях досліджуваного трансформатора

Результати моделювання системи з однофазним трансформатором в режимі холостого ходу показано на рис. 2.22.

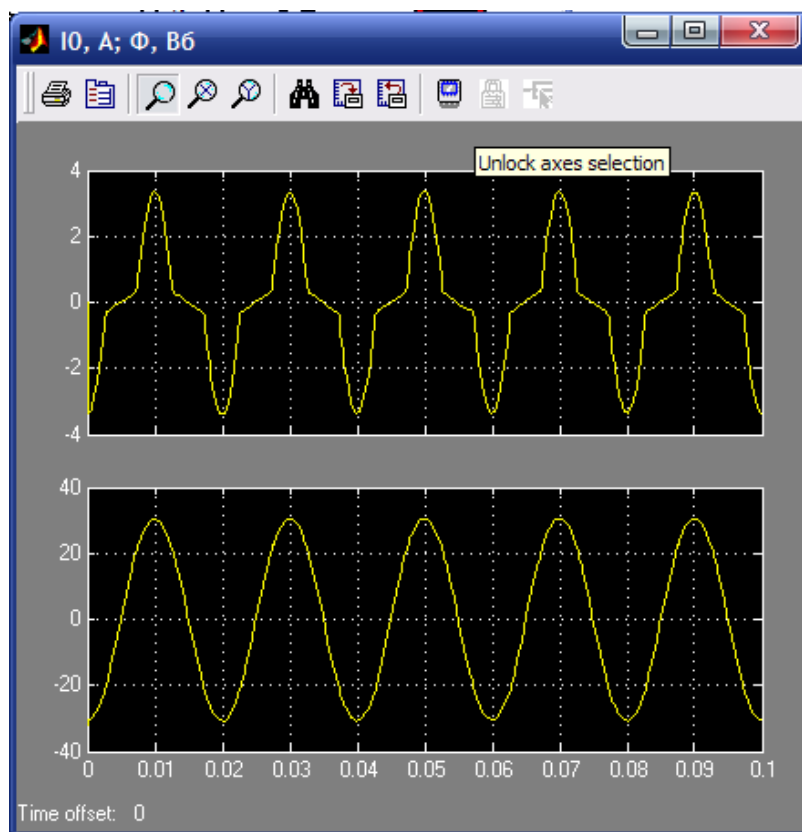


Рисунок 2.22 – Струм холостого ходу та магнітний потік однофазного трансформатора з насиченням магнітопроводу

Модель системи з трифазним трансформатором в режимі холостого ходу наведено на рис. 2.23.

Графіки перехідних процесів напруги U_1 , струму холостого ходу I_0 та магнітного потоку Φ трифазного трансформатора показано на рис. 2.24.

В системі (рис. 2.23) як джерела трифазної напруги застосовується спеціальний прикладний блок *3-Phase Source*. Його частота повинна дорівнювати робочій частоті моделі трансформатора, а напруга не перевищувати лінійну напругу первинної обмотки трансформатора.

При використанні схеми обмотки джерела живлення «зірка з нейтраллю» потрібно вивід нейтральної точки приєднати до блоку *Ground output*, а вивід нейтральної точки навантаження (в наступних моделях) потрібно приєднувати до блоку *Ground input*. Для зменшення впливу внутрішнього опору та індуктивності джерела на вимірювані струми потрібно їх значення *Source Resistance* та *Source inductance*, відповідно, встановлювати на порядок меншими ніж ці ж величини в досліджуваному трансформаторі.

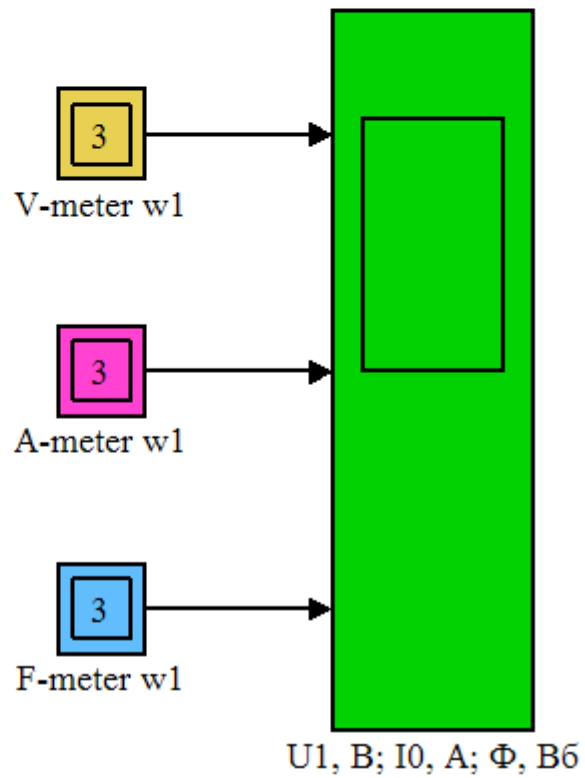
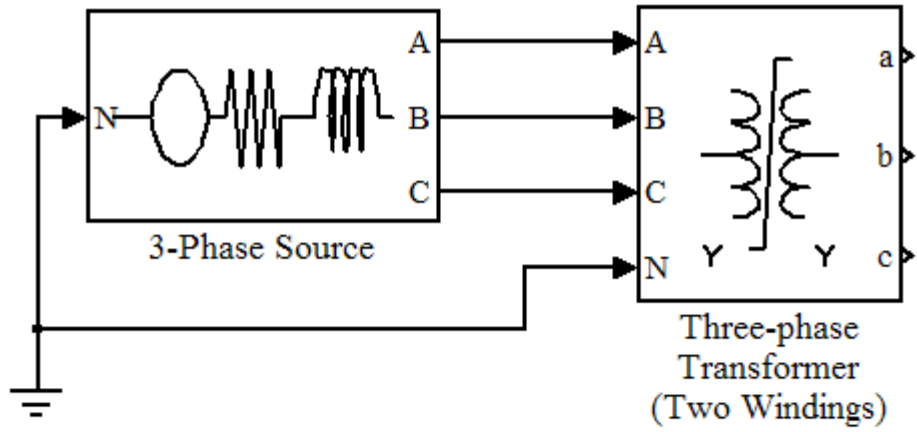


Рисунок 2.23 – Модель трифазного трансформатора в режимі холостого ходу

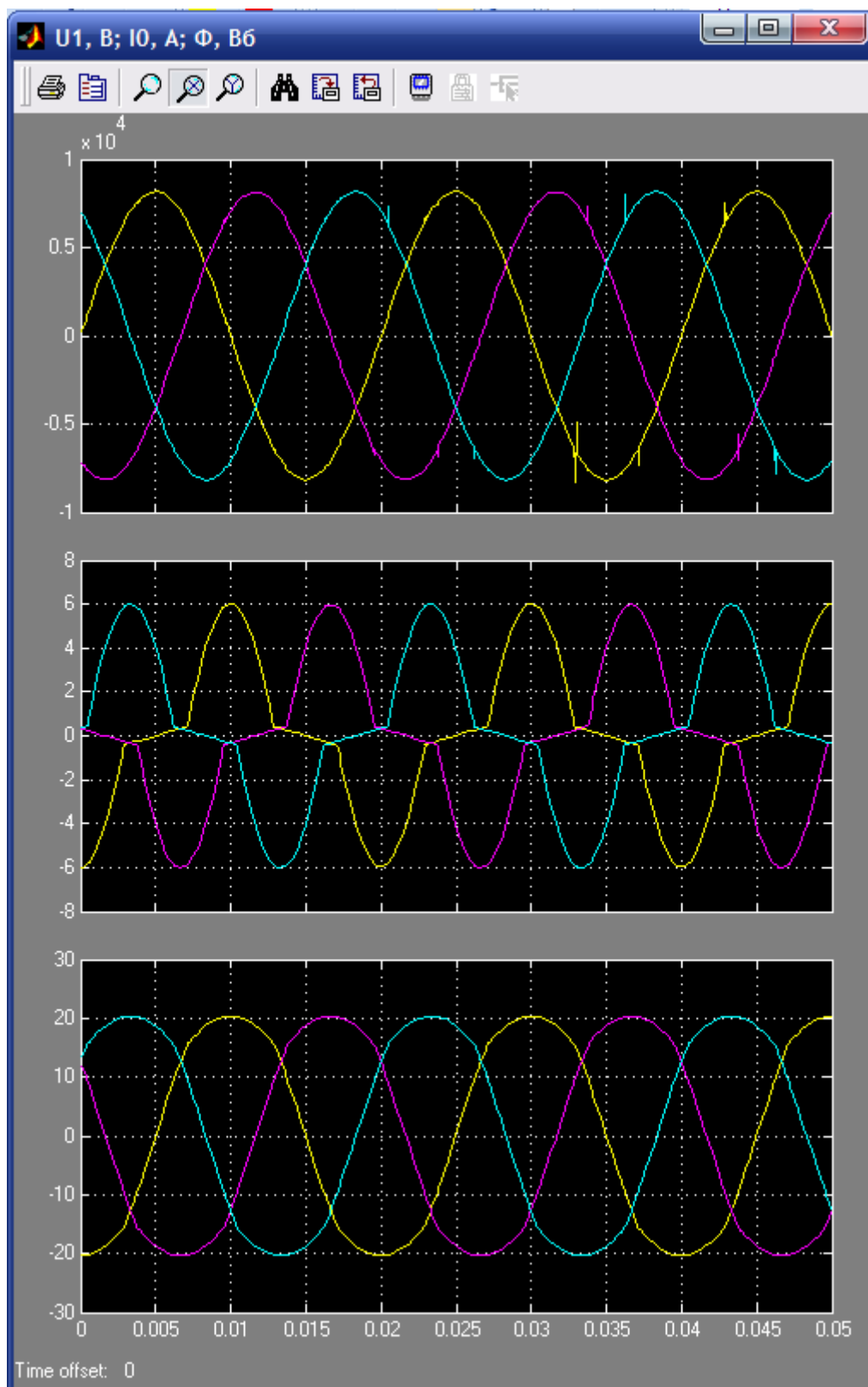


Рисунок 2.24 – Графік перехідних процесів U_1 , струму I_0 первинної обмотки та магнітного потоку Φ трифазного трансформатора на холостому ході (фази А, В, С)

2.2.2.2 Моделювання режиму короткого замикання

Моделі для дослідження трансформаторів при короткому замиканні на обмотках ВН та НН показано на рис. 2.25 та на рис. 2.26, відповідно. В наведених моделях передбачається, що коротке замикання трапилося в момент часу 0,1 с від початку моделювання, а до цього трансформатор працював з номінальним навантаженням.

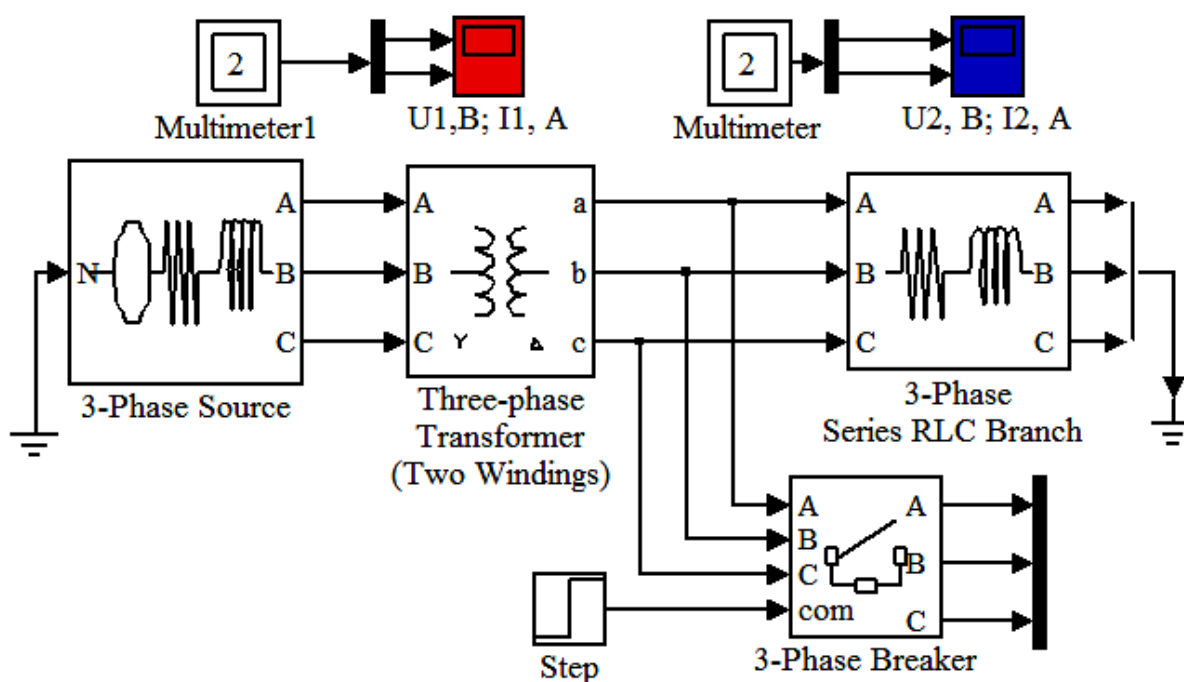


Рисунок 2.25 – Модель системи з трифазним трансформатором Y/ Δ і коротким замиканням на обмотці НН

Навантаження трансформатора в наведених моделях (рис. 2.25 та рис. 2.26) задається блоком *3-Phase Series RLC Branch*. У вікні властивостей цього блоку (рис. 2.27) встановлюються значення окремо активного опору навантаження *Resistance R (Ohms)*, індуктивності *Inductance L (H)* та ємності *Capacitance C (F)*.

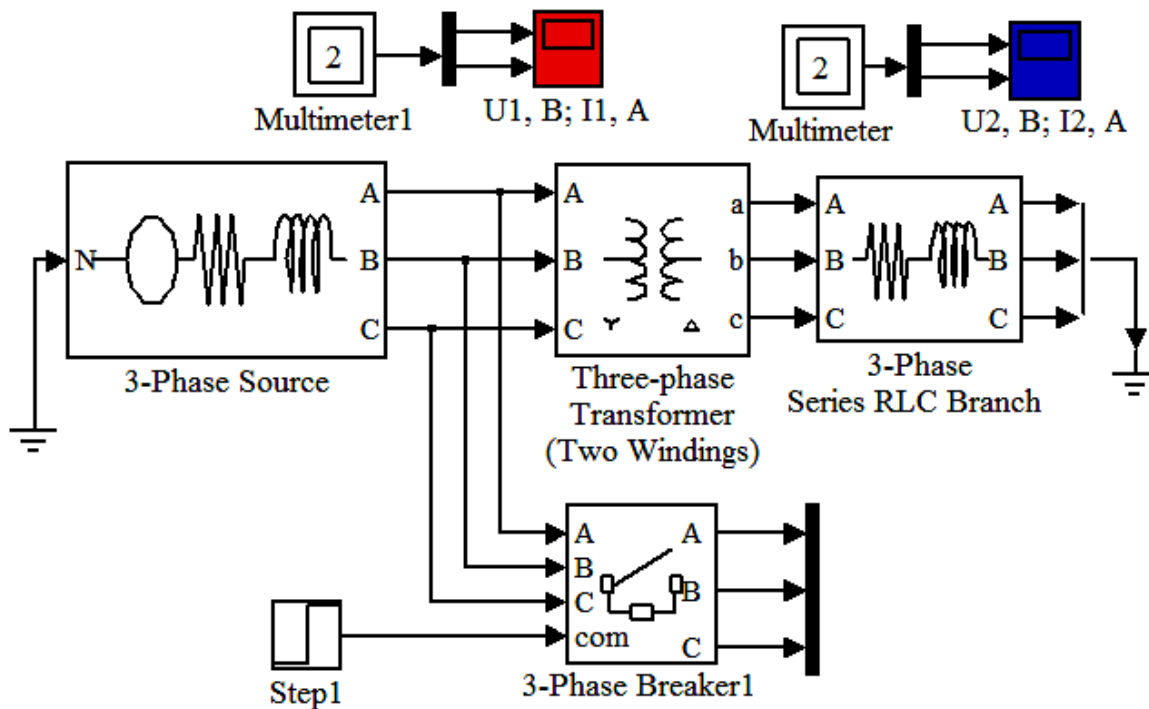


Рисунок 2.26 – Модель системи з трифазним трансформатором Y/Δ і коротким замиканням на обмотці ВН

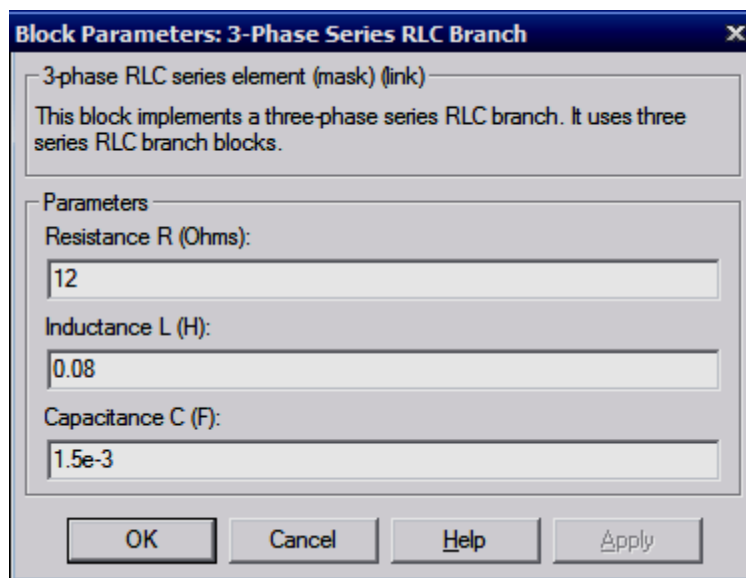


Рисунок 2.27 – Вікно властивостей блоку трифазного симетричного RLC -навантаження

При моделюванні систем, наведених на рис. 2.25 та на рис. 2.26 отримано графіки залежностей напруг та струмів первинної і вторинної обмоток, поданих на рис. 2.28 – рис. 2.31.

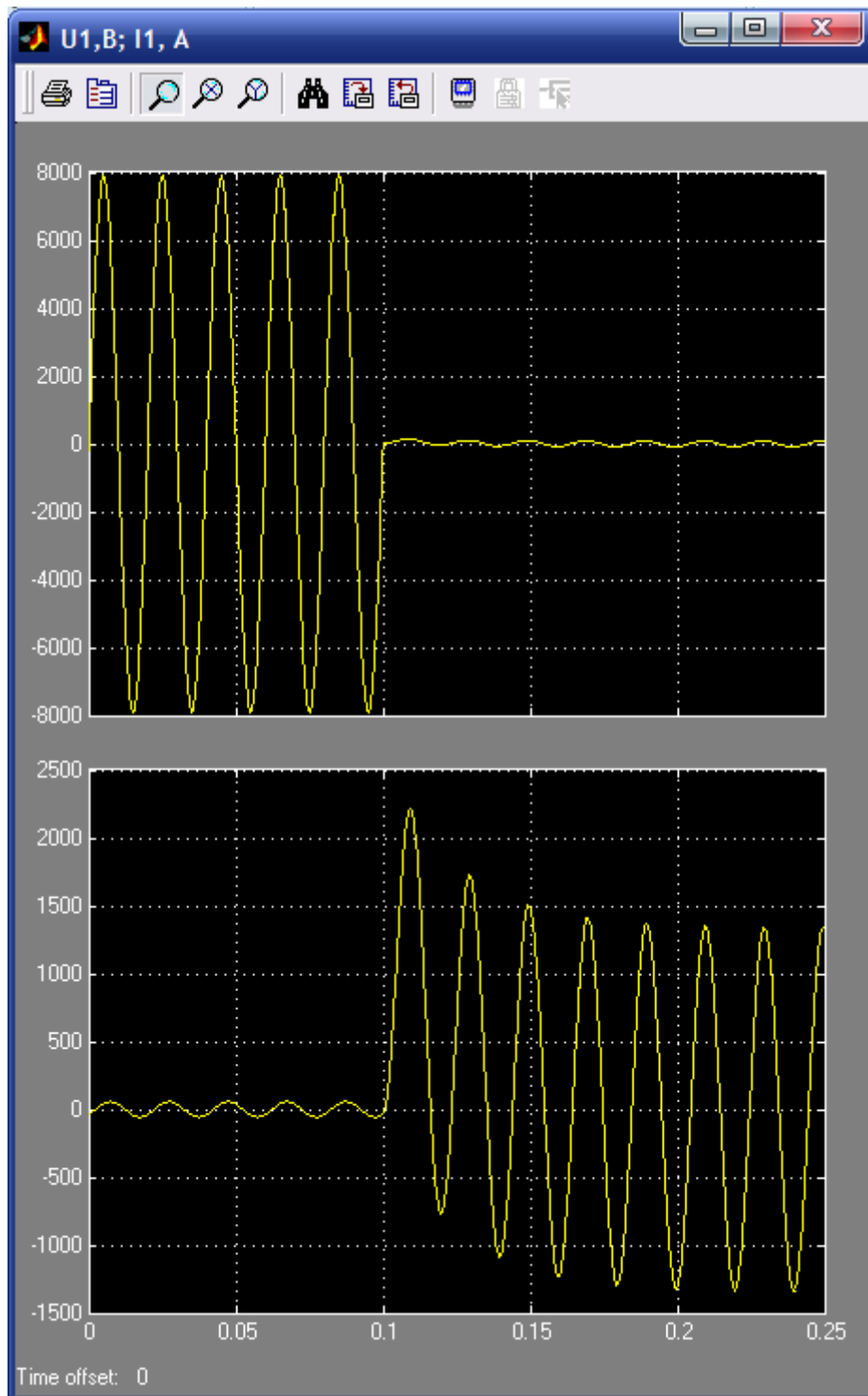


Рисунок 2.28 – Графік перехідних процесів струму та напруги первинної обмотки трансформатора при короткому замиканні обмотки НН трифазного трансформатора (фаза А)

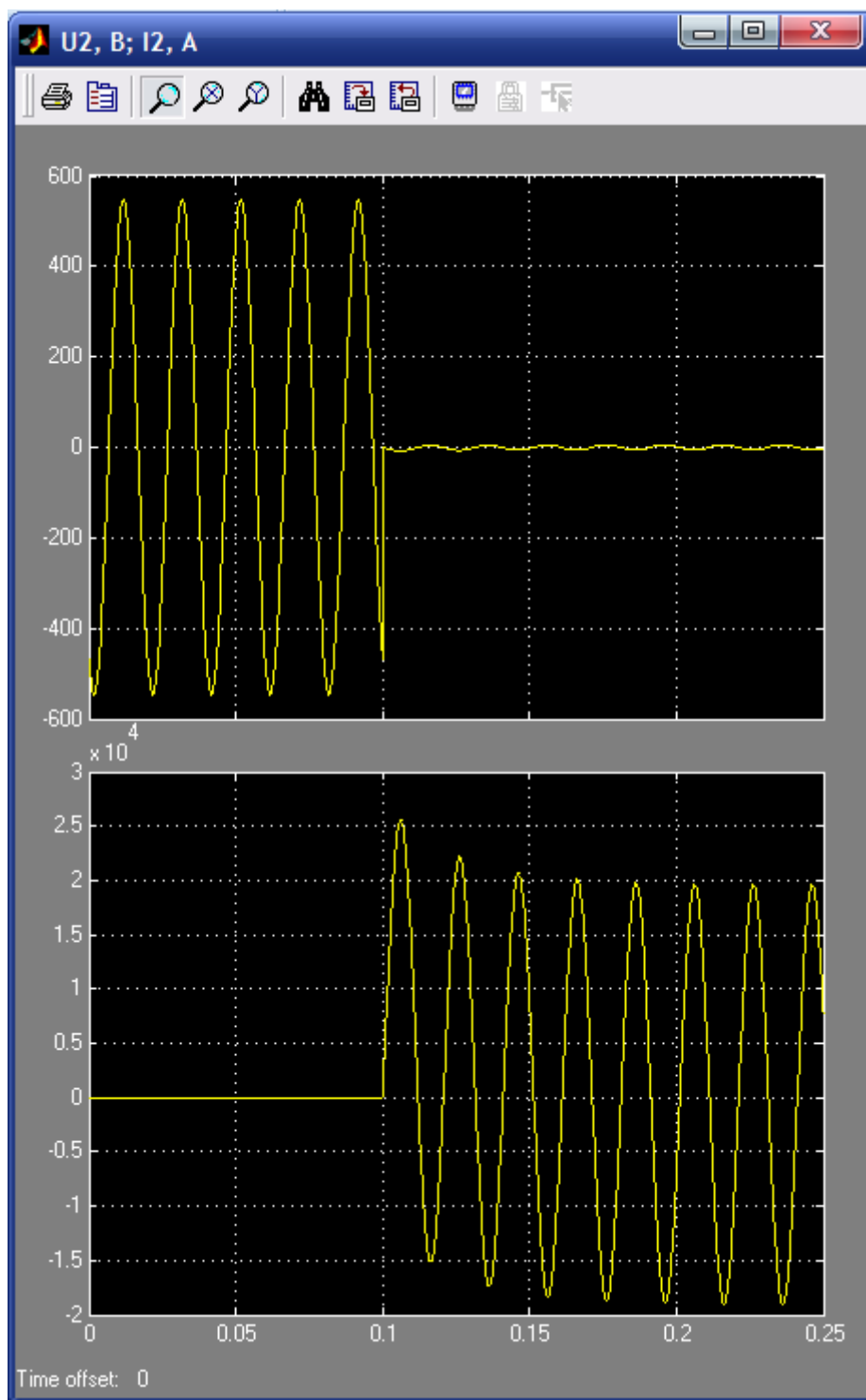


Рисунок 2.29 – Графік перехідних процесів струму та напруги вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні обмотки НН трифазного трансформатора (фаза А)

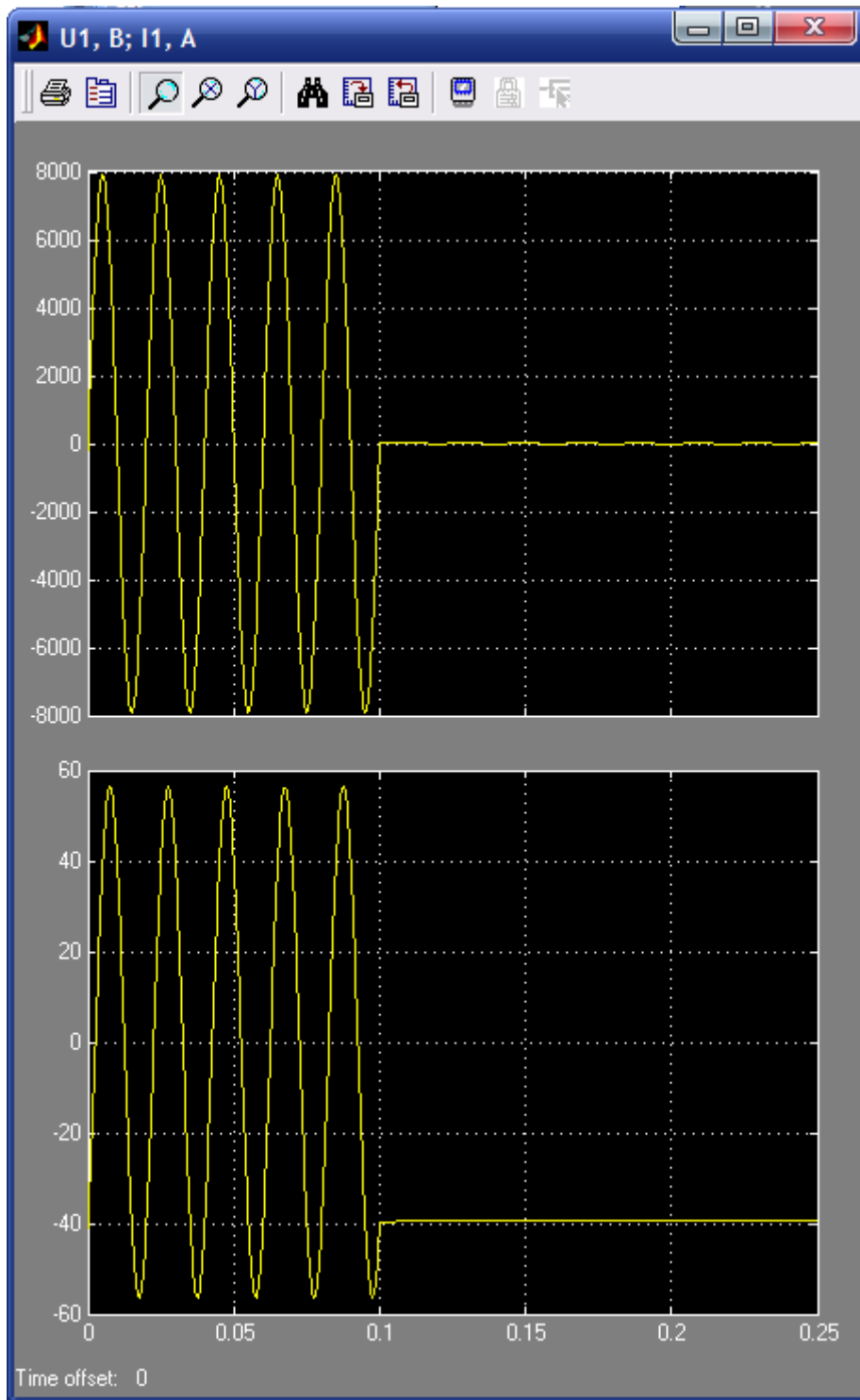


Рисунок 2.30 – Графік перехідних процесів струму та напруги первинної обмотки трансформатора при короткому замиканні обмотки ВН трифазного трансформатора (фаза А)

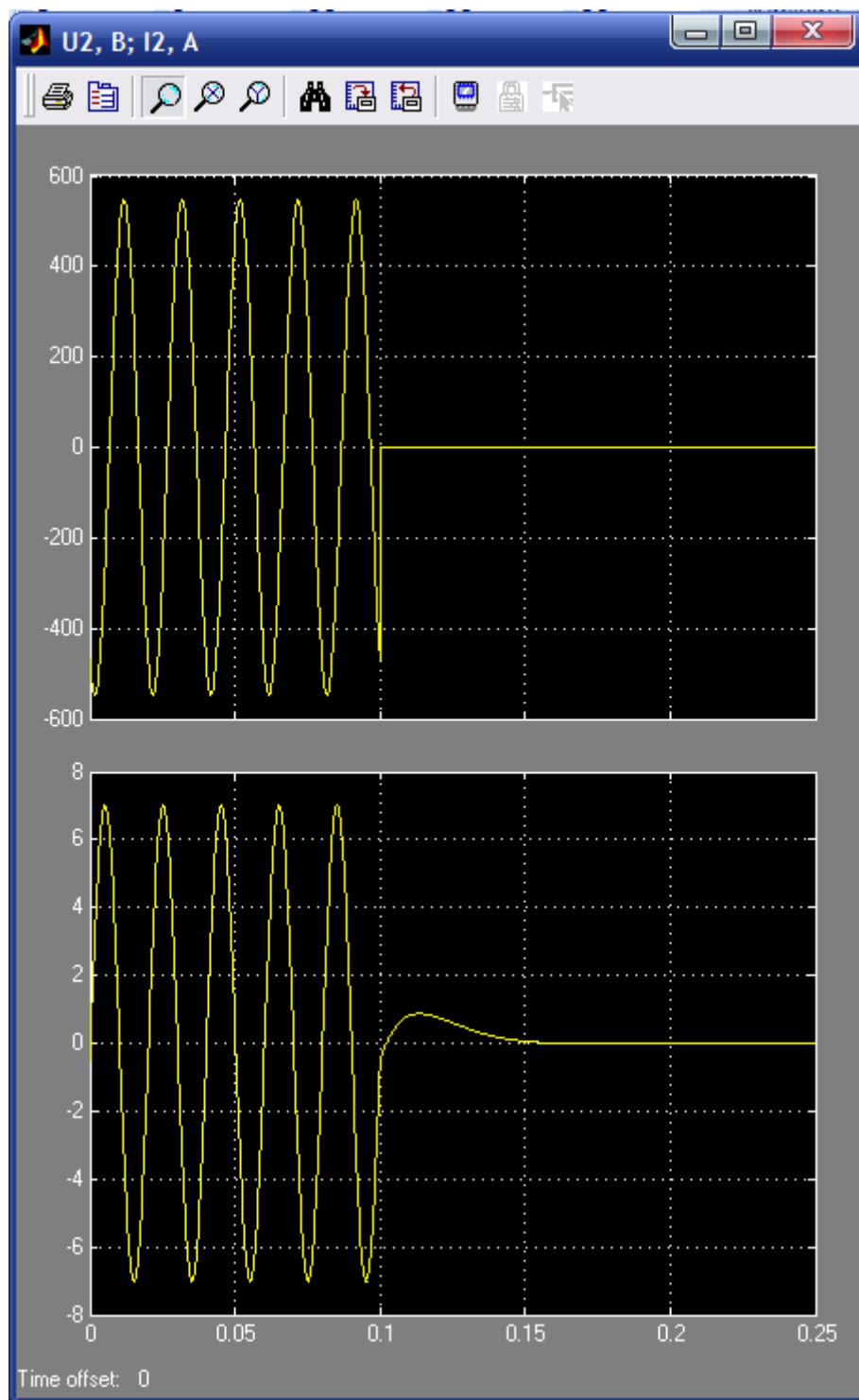


Рисунок 2.31 – Графік перехідних процесів струму та напруги вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні обмотки ВН трифазного трансформатора (фаза А)

2.2.2.3 Моделювання несиметричного режиму роботи трансформатора

За допомогою засобів *SimPowerSystems* можна провести моделювання роботи трансформатора з несиметричним навантаженням. Як відомо, найбільш чутливі до несиметрії навантаження трифазні трансформатори з схемою з'єднання Y/Y_n , оскільки в них несиметрія супроводжується значним перекосом фазних напруг та появою струму в нульовому проводі. Модель роботи такого трансформатора наведена на рис. 2.32.

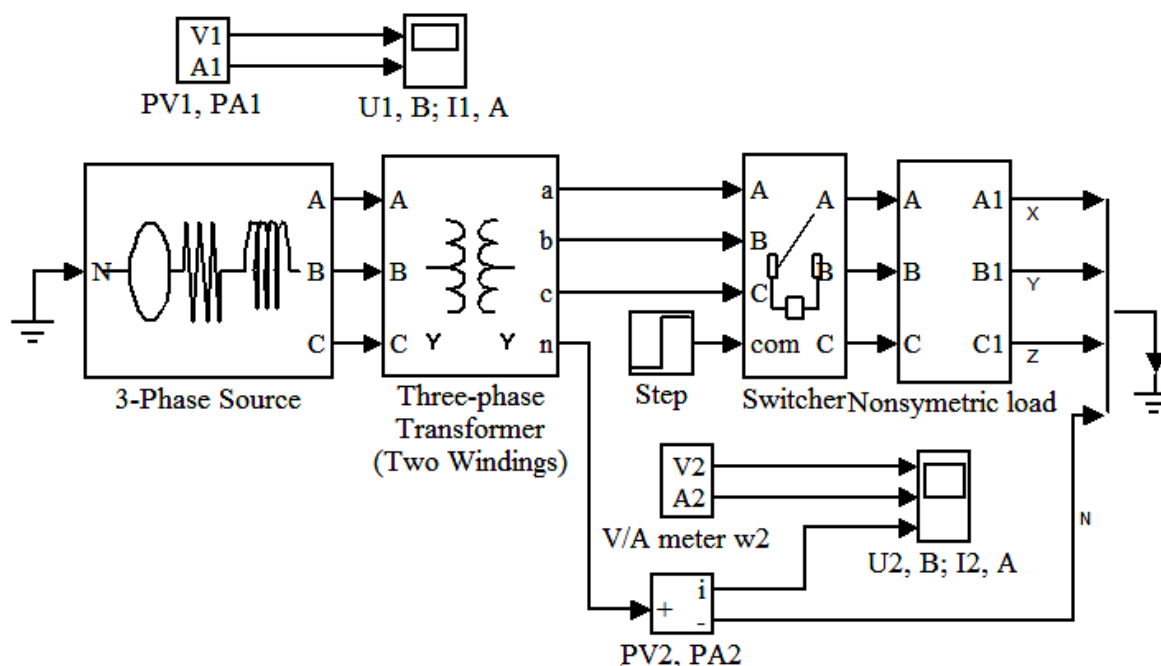


Рисунок 2.32 – Модель системи з трифазним трансформатором Y/Y_n та несиметричним навантаженням

Несиметричне навантаження реалізоване створеною підсистемою *Nonsymmetric load*, що складається з трьох однофазних *RLC*-ланок. Внутрішня будова блоку *Nonsymmetric load* показана на рис. 2.33.

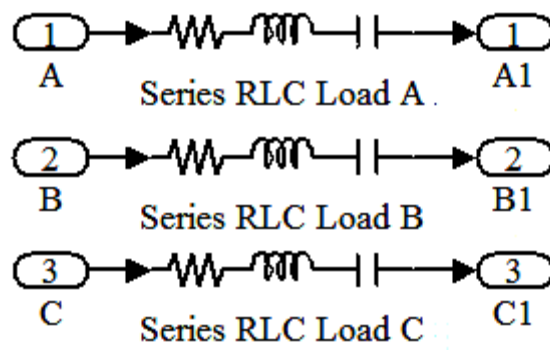


Рисунок 2.33 – Модель несиметричного навантаження, що подана підсистемою *Nonsymetric load*

Графіки залежностей струмів та напруг трансформатора з несиметричним навантаженням зображено на рис. 2.34 та рис. 2.35.



Рисунок 2.34 – Графіки перехідних процесів напруги U_1 та струму I_1 первинної обмотки трансформатора з несиметричним навантаженням (фази A, B, C)

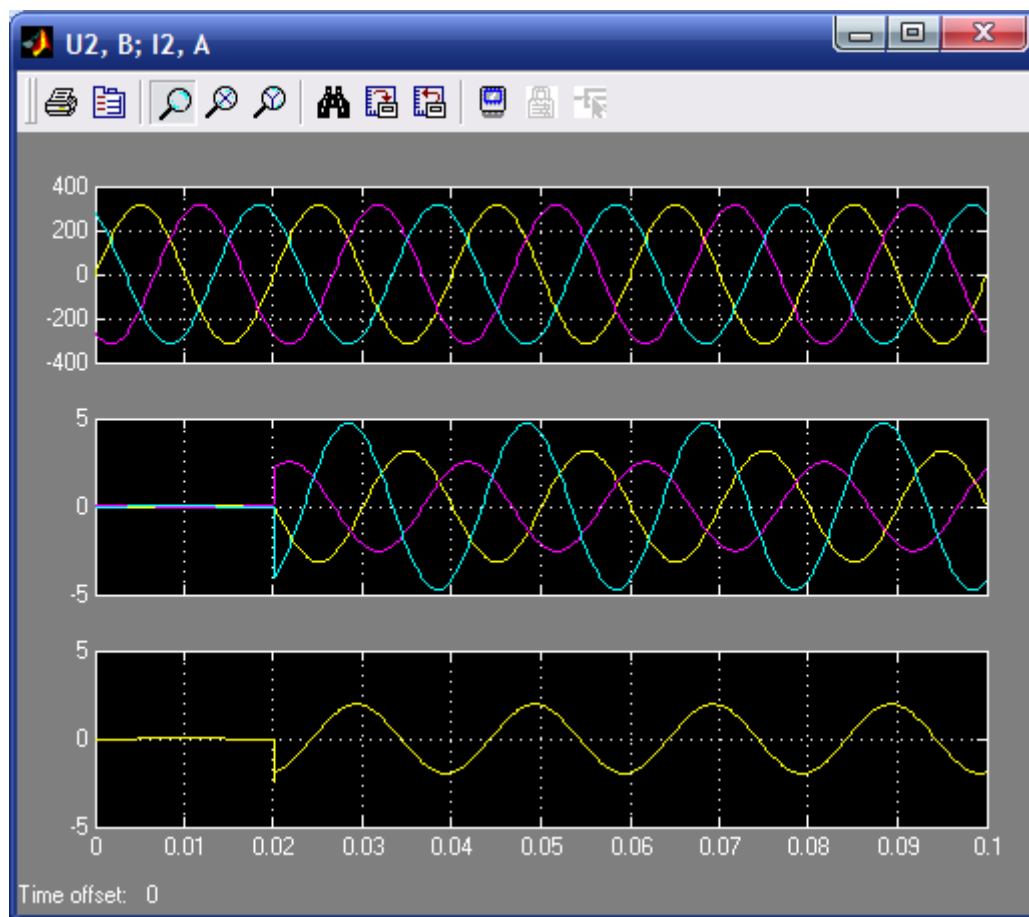


Рисунок 2.35 – Графіки перехідних процесів напруги U_2 , струму I_2 вторинної обмотки трансформатора з несиметричним навантаженням

2.2.2.4 Моделювання паралельної роботи трансформаторів

Модель паралельної роботи трифазних трансформаторів зображена на рис. 2.36. В моделі передбачено, що спочатку два трансформатори працюють паралельно на холостому ході (це дає можливість розглянути графіки струмів врівноваження), а потім за допомогою керованого вимикача *Switcher* та блоку *Step* до паралельно працюючих трансформаторів підключається навантаження.

Вимірювання напруги та струму навантаження здійснюється окремим вимірювальним трифазним блоком, а вимірювання струмів та напруг обмоток трансформаторів – за допомогою мультиметрів, що вимірюють окремо напруги та струми і поєднані в підсистеми з назвами T1: PV1, PA1; T1: PV2, PA2; T2: PV1, PA1; T2: PV2, PA2. Внутрішня будова таких підсистем показана на рис. 2.37 (для першого трансформатора на стороні ВН).

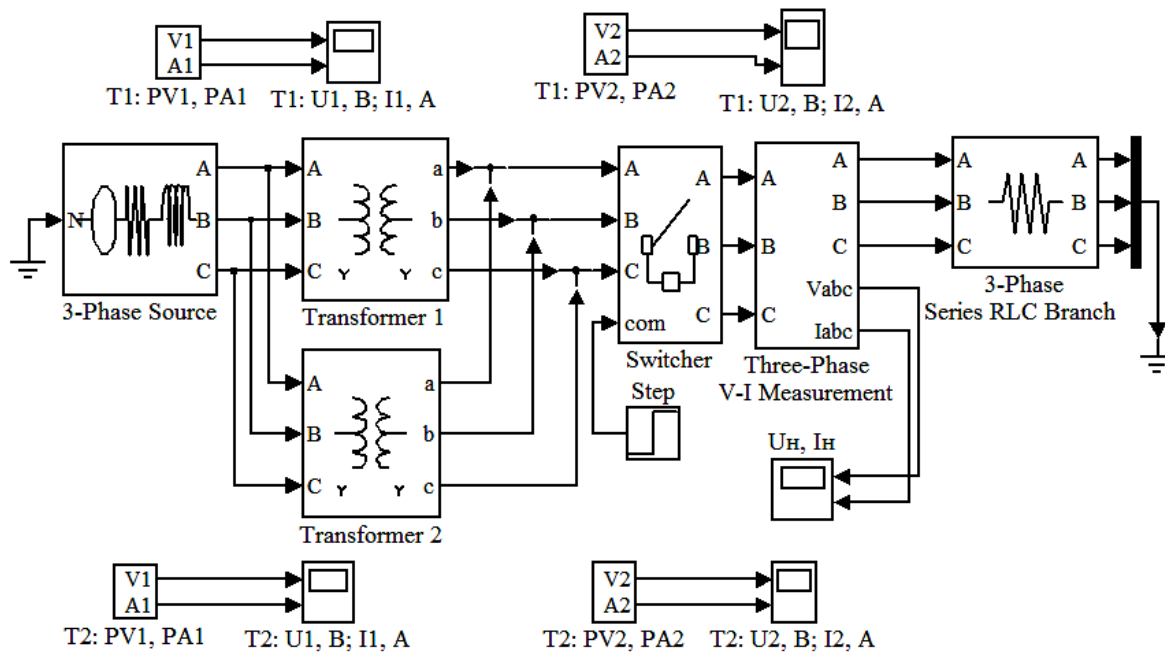


Рисунок 2.36 – Модель паралельної роботи трифазних трансформаторів

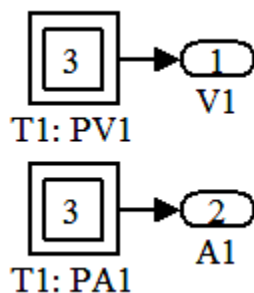


Рисунок 2.37 – Підсистема вимірювання напруг та струмів обмоток трансформаторів на базі мультиметрів

Моделювання здійснимо для трансформаторів потужністю 25 кВА напругою 10/0,4 кВ трансформатора Т1 і напругою 10/0,42 кВ трансформатора Т2. Вікно властивостей трансформатора Т1 показано на рис. 2.38 (вплив насичення магнітопроводу не враховано).

Результати моделювання паралельної роботи трансформаторів подано на рис. 2.39 – 2.43.

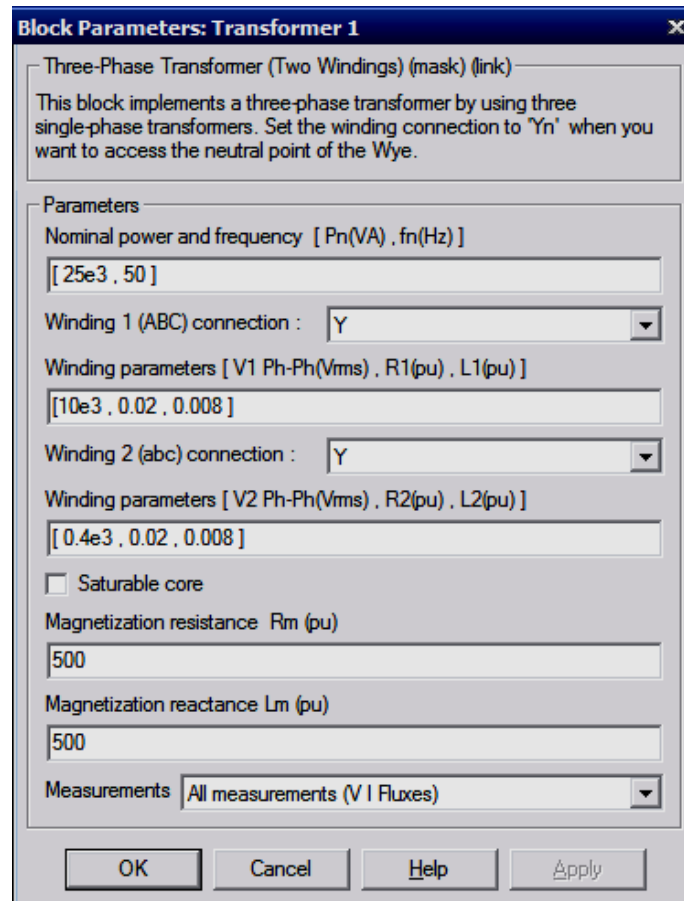
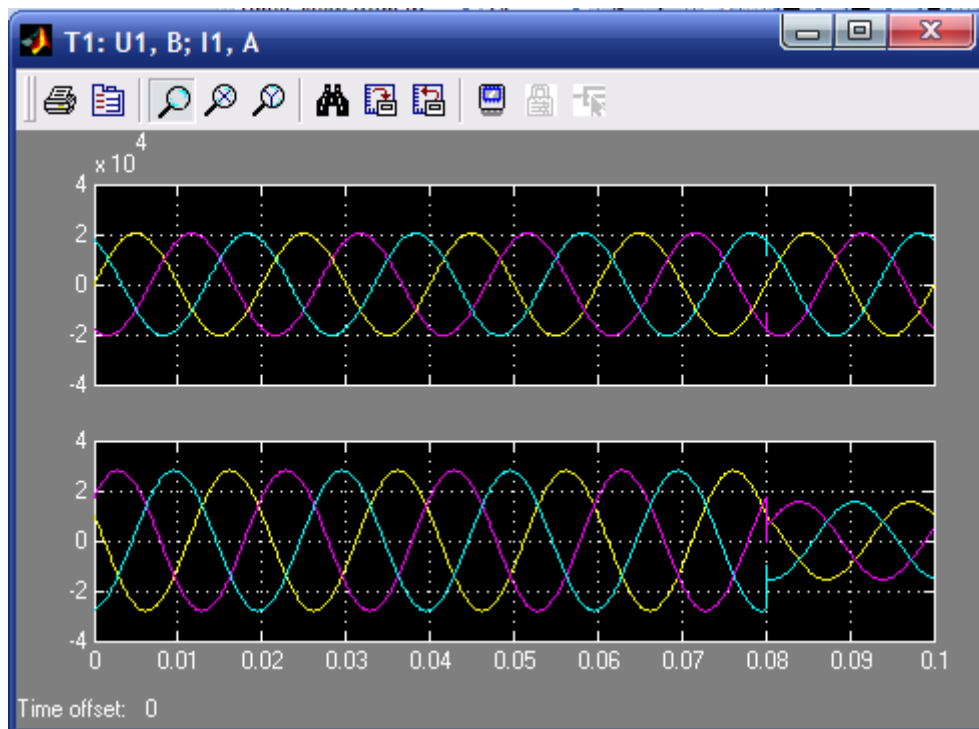


Рисунок 2.38 – Вікно властивостей трансформатора T1

Рисунок 2.39 – Графіки зміни напруги U_1 та струму I_1 первинної обмотки першого трансформатора T1 (фази А, В, С)

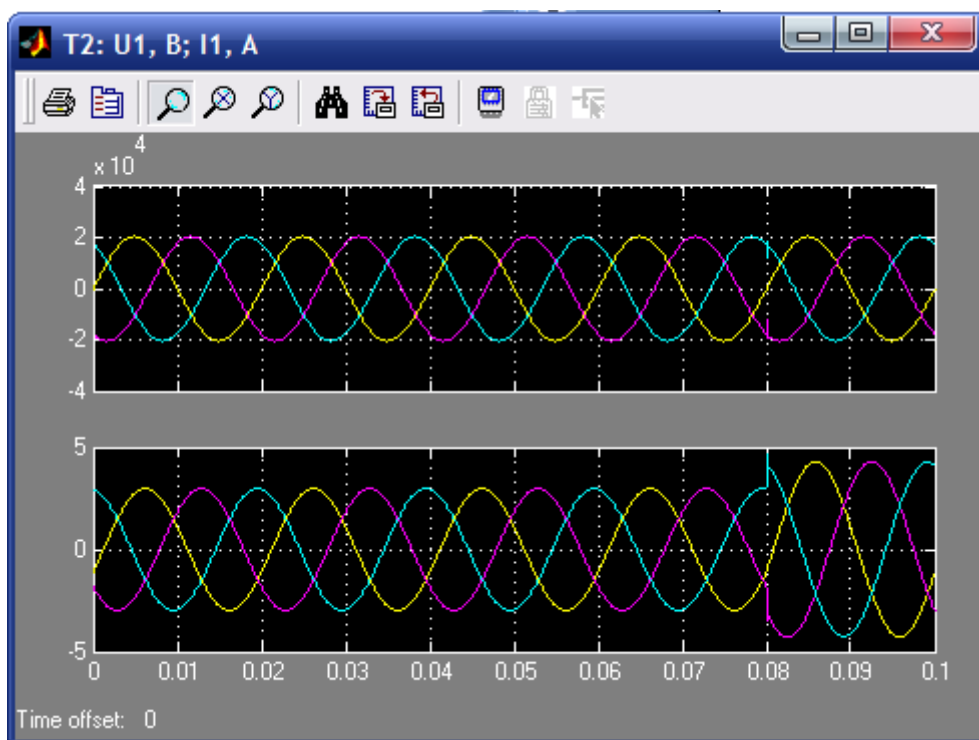


Рисунок 2.40 – Графіки зміни напруги U_1 та струму I_1 первинної обмотки другого трансформатора T2 (фази А, В, С)

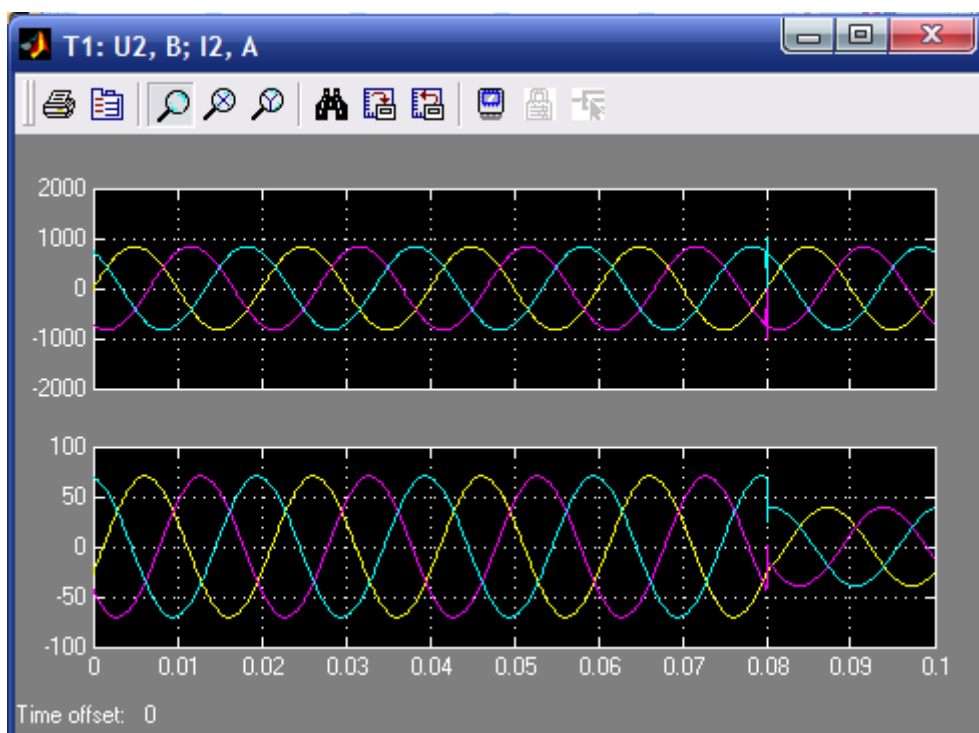


Рисунок 2.41 – Графіки зміни напруги U_2 та струму I_2 вторинної обмотки першого трансформатора T1 (фази a, b, c)

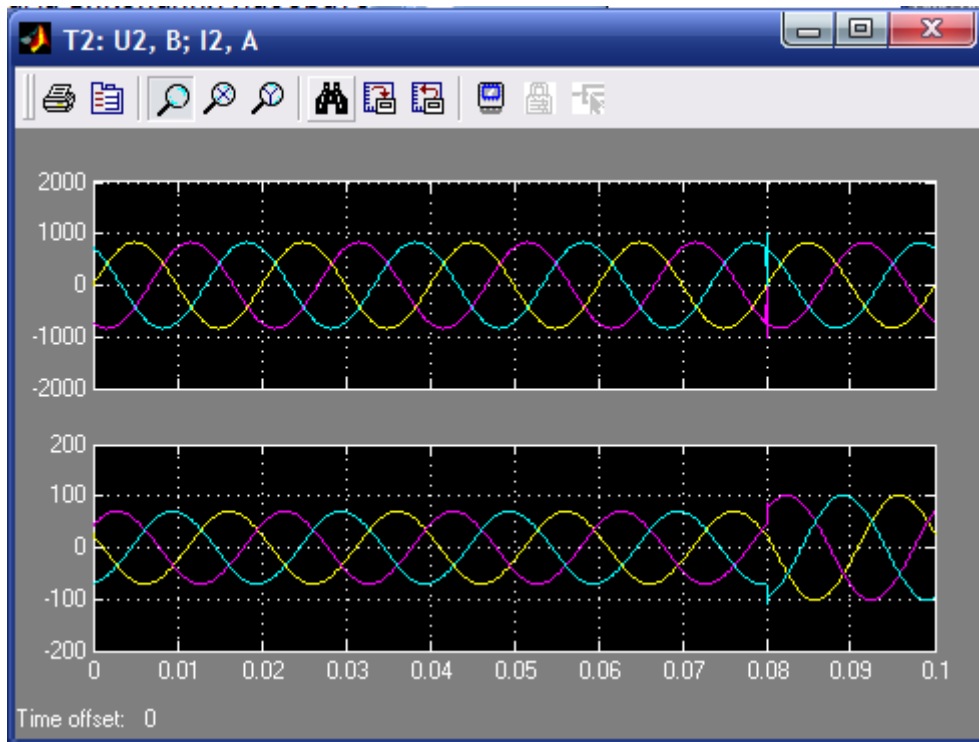


Рисунок 2.42 – Графіки зміни напруги U_2 та струму I_2 вторинної обмотки другого трансформатора T2 (фази a, b, c)

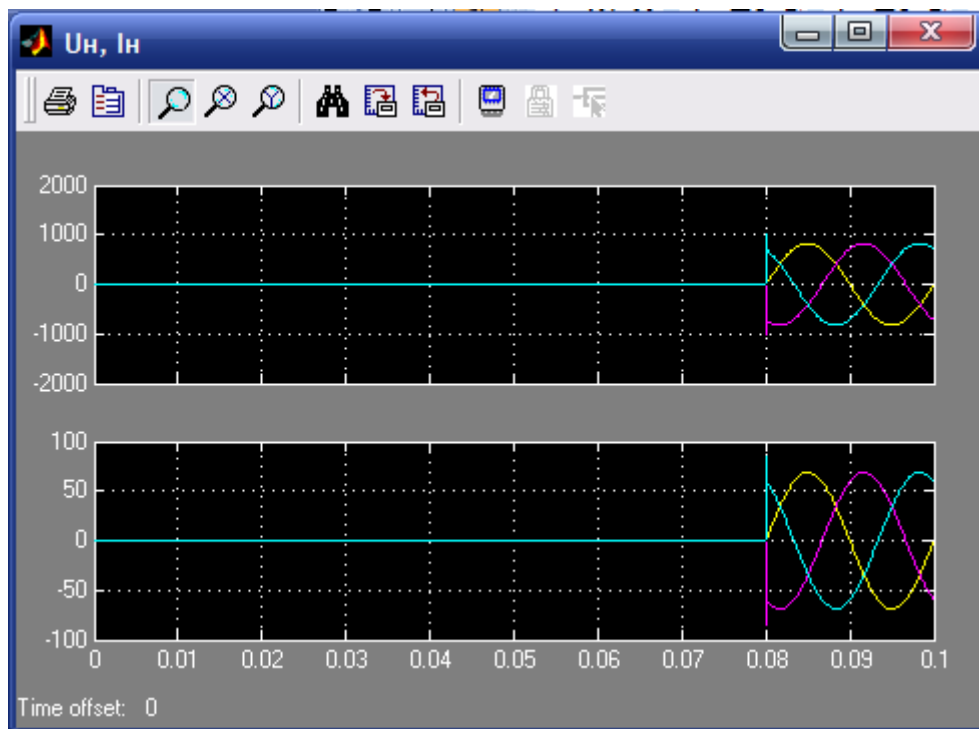


Рисунок 2.43 – Графіки зміни напруги навантаження U_n та струму навантаження I_n при паралельній роботі трансформаторів T1 і T2

Предметний покажчик

- MathCAD, 19, 162
MATLAB, 19, 162
 Simulink, 162, 179, 180, 196, 216
Векторна діаграма, 42, 43, 52, 53, 54, 55, 100, 101, 107, 110, 140, 160
Втрати
 електричні, 47, 67, 73, 74, 78, 105
 електричні втрати, 11, 57, 73, 74, 78, 104
 змінні, 74
 магнітні, 11, 18, 47, 57, 62, 73, 75, 77, 78, 118, 132, 160
 постійні, 75
 сумарні, 76
 сумарні втрати, 11, 73
Група з'єднання, 86, 88, 89, 90, 91, 93, 100, 134, 136, 137, 140, 141, 147, 150
Еквівалентний опір, 9, 56, 159
Енергетична діаграма, 76
Зміна напруги, 69, 71, 72, 151, 168, 211, 212, 213
Зовнішня характеристика, 72, 73, 113, 119, 130, 131
ККД, 7, 10, 11, 16, 19, 73, 77, 78, 79, 110, 119, 130, 131, 132, 152, 153, 159, 161, 170
Коефіцієнт навантаження, 10, 11, 78, 170
Коефіцієнт потужності, 58, 61, 64, 65, 67, 71, 132
Коефіцієнт трансформації, 10, 11, 12, 37, 50, 61, 79, 93, 118, 147, 150
Магнітопровід, 27
 активна частина, 25
 бронестрижневий, 28
 броньового типу, 27
 неактивна частина, 25
 стиковий, 28
 стрижневого типу, 27
 шихтований, 28
Номінальні величини, 25
 повна потужність, 38
Обмотка, 30
 ВН, 31, 35, 82, 89, 90, 92, 100, 105, 134, 136, 138, 140, 141, 142, 143, 160, 205, 206
 вторинна, 35
 концентрична, 30
 НН, 30, 31, 35, 82, 89, 90, 92, 98, 100, 105, 134, 136, 138, 140, 141, 143, 203, 204
 первинна, 35
 переміжна, 30, 31
Перемикання відгалужень, 82
 без збудження, 82
 під навантаженням, 84
Режим
 коротке замикання, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 25, 57, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 71, 72, 74, 79, 84, 93, 94, 95, 96, 99, 105, 108, 112, 118, 119, 123, 124, 125, 131, 133, 142, 144, 145,

- 147, 149, 150, 151, 153, 155,
156, 157, 158, 159, 160, 173,
201
- навантаження, 53, 73, 144
- холостий хід, 40, 57, 59
- Спад напруги, 70, 170
- Струм
- компенсаційний, 43
- намагнічування, 16, 44, 45, 46,
47, 109, 118, 162, 166, 183,
186, 189, 192, 195
- первинний, 44, 54, 56
- холостого ходу, 8, 10, 16, 17, 29,
41, 44, 46, 47, 56, 57, 58, 59,
60, 107, 108, 109, 119, 142,
153, 156, 160, 162, 185, 190,
196, 198
- Схема з'єднання, 86
- Схема заміщення, 55, 56, 57, 58,
59, 63, 65, 100, 119, 131, 159
- Трансформатор, 20
- автотрансформатор, 100, 105,
136
- багатообмотковий, 97, 98
- вентильний, 111
- вимірювальний, 23, 24, 105, 106,
108
- зварювальний, 22, 112, 113
- знижувальний, 37
- ідеалізований, 40
- імпульсний, 113, 114, 115, 116
- масляний, 24, 32
- однофазний, 24, 36, 38, 40, 57,
60, 61, 63, 64, 89, 119, 120,
121, 123, 124, 125, 126, 129,
196, 198
- перетворювальний, 21
- підвищувальний, 37
- пік-трансформатор, 116
- приведений, 50, 56
- реальний, 47
- силовий, 24
- сухий, 24, 32
- триобмотковий, 10, 11, 12, 15,
17, 18, 98, 100, 101, 151, 152,
160, 193, 194
- трифазний, 24, 28, 57, 59, 60, 61,
63, 64, 65, 67, 90, 118, 120,
121, 123, 124, 125, 126, 127,
129, 131, 132, 133, 134, 137,
142, 143, 190, 191, 198, 199,
200, 203, 204, 205, 206

Література

1. Электрические машины: В 2-х ч. Ч.1: Учеб. для электотехн. спец. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
2. Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 463 с.
3. Кацман М. М. Электрические машины.– 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа; Изд. центр "Академия", 2001.– 461 с.
4. Яцун М. А. Електричні машини: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
5. http://www.avtotransformator.ru/input_HV.html – Вводы высоковольтные
6. http://www.permgres.ru/elektro/index.php?id=m_5&cn=5_1 – Открытое акционерное общество ПЕРМГРЭСЭЛЕКТРОРЕМОНТ
7. <http://power-transformer.ru/neobhodimost-zameny-vvodov-bmt-110-na-vvody-s-rip-izolyaciej.html> – Необходимость замены вводов БМТ-110 на вводы с RIP-изоляцией
8. Вольдек А. И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1978. – 832 с.
9. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
10. Электротехника / А. П. Трегуб; Под ред. Э. В. Кузнецова. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1987. – 600 с.
11. <http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/index.php>: И. В. Черных "SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink"
12. http://elmech.mpei.ac.ru/em/EM/EM_cont_0.htm: Электронный учебник "Электрические машины" (кафедра Электромеханики Московского энергетического института)
13. <http://uiits.miem.edu.ru/Falk/Book%202006/book/about.html>: Учебное пособие «Электромеханические устройства автоматики»
14. <http://www.snabelektro.ru/eltech2.htm> – Автотрансформаторы (ЛАТР)
15. <http://www.mo-sokol.ru/?pId=16&cId=1365>
16. <http://www.mt-system.ru/index.php?id=90> – Murata-PS

17. <http://radiodetali.narod.ru/tpi.htm> – Трансформаторы питания импульсные для телевизоров цветного изображения
18. Методические указания к лабораторно-практическим занятиям по курсу «Электрические машины» для студентов специальностей 10.01, 10.02, 10.03 всех форм обучения. Ч. I. Трансформаторы / Сост. И. Ф. Павлов, С. А. безверхий, В. И. Нагул, В. П. Головин. – Винница: ВПИ, 1989. – 60 с.
19. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. "Электрические машины. Лабораторные работы на ПК". – СПб.: КОРОНАпринт, 2003. – 256 с.
20. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. – СПб.: КОРОНАпринт, 2001. – 319 с.

Глосарій

- Автотрансформатор – autotransformer
Багатообмотковий трансформатор – multi-winding transformer
Вимірювальний трансформатор – measuring transformer
Втрати – wastes
Група з'єднання – group of connection
Енергетична діаграма – power diagram
Зварювальний трансформатор – weld transformer
Зміна напруги – voltage change
Зовнішня характеристика – superficial characteristic
Ідеалізований трансформатор – idealized transformer
Імпульсний трансформатор – impulse transformer
Коефіцієнт корисної дії – efficiency factor
Коефіцієнт навантаження – load factor
Коефіцієнт трансформації – transformer factor
Коротке замикання – short circuit
Магнітопровід – magnetic circuit
Навантаження – load
Номінальні величини – nominal values
Обмотка високої напруги – high voltage winding
Обмотка низької напруги – low voltage winding
Охолодження – cooling
Паралельна робота – parallel work
Регулювання напруги – voltage regulation
Спад напруги – volt drop
Струм намагнічування – magnetization current
Схема з'єднання – connection scheme
Схема заміщення – replacement scheme
Трансформатор – transformer
Трансформатор напруги – voltage transformer
Трансформатор струму – current transformer
Триобмотковий трансформатор – threewinding transformer
Холостий хід – idling

Навчальне видання

Володимир Віталійович Грабко

Михайло Петрович Розводюк

Сергій Михайлович Левицький

Експериментальні дослідження електричних машин

Частина IV. Трансформатори

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено М. П. Розводюком

Редактор Т. О. Старічек

Науково-методичний відділ ВНТУ

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 30.12.2008 р. Гарнітура Times New Roman

Формат 29,7 x 42 ¼

Папір офсетний

Друк різнографічний

Ум. друк. арк.

Тираж 75 прим.

Зам № 2009-12

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ