

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ФЕРЕНСОВИЧ РОМАН ЯРОСЛАВОВИЧ**

УДК 621.314.224.8

**РЕЖИМИ РОБОТИ ТА ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА  
ОБРИВІВ ВТОРИННИХ КІЛ**

05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Р. Я. Ференсович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Журахівський Анатолій Валентинович, д.т.н., професор

Ідентичність усіх примірників дисертації ЗАСВІДЧУЮ

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 35.052.02

Коруд В. І.

Львів – 2017 р.

## АНОТАЦІЯ

*Ференсович Р. Я.* Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – «Електричні станції, мережі і системи». – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл та розробки системи захисту трансформаторів струму від таких режимів, що сприятиме надійності функціонування електричних систем.

Розглянуто конструкції, технічні характеристики трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом, особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 750 кВ промислової частоти за розімкнених кіл їх вторинних обмоток.

Проведено аналіз публікацій з результатами досліджень режимів роботи трансформаторів струму за обриву кіл вторинних обмоток цих трансформаторів, а також з описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність продовження досліджень таких режимів та розробки відповідних захистів для трансформаторів струму.

Запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму за розмикання його вторинного кола під час протікання у первинній обмотці синусоїдного струму, що дає змогу за допомогою простих аналітичних виразів провести попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму. Підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах трансформаторів струму різних типів.

Розроблено розрахункові схеми для аналізу режимів трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл з врахуванням втрат активної потужності в осерді. По-

казано значний вплив цих втрат на рівень перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат.

У роботі вдосконалено математичну модель для дослідження перехідних процесів під час обриву вторинних кіл трансформаторів струму шляхом застосування керованого активного опору в модельованому контурі комутації, що дало змогу дослідити вплив швидкості зміни струму у вторинному колі трансформатора струму на величини перенапруг.

Запропоновано систему захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл трансформаторів струму, розглянуто основні вимоги до цієї системи та проведені натурними експериментами і комп'ютерним моделюванням режимів роботи системи захисту на прикладі ТС типу ТЛМ-10 (з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості обмежувача перенапруг) підтверджено ефективність її роботи та обмеження вторинних перенапруг до допустимих значень.

Проведеними дослідженнями показана доцільність використання додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл.

Встановлена адекватність відтворення цифровими комплексами режимів роботи системи захисту та підготовлено технічне завдання на виготовлення промислового дослідного взірця пристрою захисту, визначено підстанцію, на якій він буде встановлений у дослідно-промислову експлуатацію.

**Ключові слова:** трансформатор струму, аварійний режим, обрив вторинного кола, розрахункові схеми, високовольтний імпульс напруги, перенапруга, система захисту, пробивний запобіжник.

## ABSTRACT

*Ferensovyh R. Ya.* Operation Modes and Protection of Current Transformers after Disconnection of Secondary Circuits. – On the rights of manuscript.

Thesis for a candidate degree in Technical Science, specialty 05.14.02 – «Power stations, networks and systems». – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to solving of the scientific and technical problem, which is concerned with an analysis of operation modes of current transformers after the emergency disconnection of their secondary circuits and a designing of a protection system of current transformers against such modes, that will promote the reliability of the operation of electrical systems.

The designs, technical characteristics of current transformers with a closed magnetic core, features of operation modes of these transformers in modern electrical networks 6 – 750 kV of industrial frequency after disconnection of their secondary circuits are considered.

The publications with the results of investigations of operation modes of current transformers after disconnection of secondary circuits of these transformers and also with the descriptions of protection devices against overvoltages that arise during such modes are considered. The number of these publications was insignificant, and the analysis confirms the expediency of continuing the research of such modes and the designing of appropriate protections for current transformers.

The method of estimation of the maximum amplitudes of overvoltages on the terminals of current transformer secondary winding after disconnection its secondary circuit, when sinusoid current flows in the primary winding, is proposed in the thesis. The method allows to carry out a preliminary analysis of overvoltages by using simple analytical equations and passport data of current transformers. The presence of dangerous (over 1000 V) overvoltages on the open terminals of the secondary windings of various types of current transformers is confirmed.

The calculation schemes for an analysis of the modes of current transformers after disconnection of their secondary circuits taking into account losses of active power in the magnetic core are developed. The significant impact of these losses on the level of overvoltages is shown in comparison with the modes without taking into account losses.

The mathematical model for the investigation of transients after disconnection of secondary circuits of current transformers was improved by applying a controlled resistance in the simulated secondary circuit, which made it possible to investigate the impact of the velocity of current change in the secondary circuit of current transformer on the values of overvoltages.

The protection system against overvoltages after disconnection of secondary circuits of current transformers is proposed, the basic requirements for this system are considered. The efficiency of protection system operation and a limitation of overvoltages to values no more than 1000 V is confirmed by using experiments and computer simulation of operation modes of protection system for example with the current transformer type TLM-10 (by using the fuse type PP-A/3 as a surge protector).

The expediency of using additional fast shunting of secondary winding of current transformers by contacts of an electromechanical relay after disconnection of their secondary circuits is shown by research.

The adequacy of the digital system simulation of operation modes of the protection system has been determined and a technical specification for the production of an industrial prototype of the protection device has been prepared, a substation has been defined, where it will be installed for experimental and industrial operation.

**Keywords:** current transformer, emergency mode, disconnection of the secondary circuit, calculation schemes, high-voltage pulse, overvoltage, protection system, fuse.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав:*

1. Журахивский А. В. Исследование установившихся режимов работы одноступенчатого трансформатора тока при размыкании под нагрузкой его вторичной обмотки [Текст] / А. В. Журахивский, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович** // Энергетика и ТЭК. – Минск, 2017. – № 1 (166). – С. 23–26.

*Публікації у наукових фахових виданнях України:*

2. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення [Текст] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.

3. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 89–94.

4. Кенс Ю. А. Спрощений аналіз усталеного режиму роботи однокаскадного трансформатора струму за розкорочення його вторинної обмотки [Текст] / Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович**, Н. Б. Дьяченко // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2015. – № 834: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 26–32.

5. Захист від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович**, Н. Б. Дьяченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 5 (134). – С. 74–79.

*Матеріали міжнародних конференцій:*

6. **Ференсович Р. Я.** Дослідження режимів роботи трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // Енергетика та системи керування : Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2011. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 90–91.

7. Яцейко А. Я. Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму [Електронний ресурс] / А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** // Енергетика та системи керування : Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС-2013. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 32–35. – Назва з екрану.

8. **Ferensovych R.** The Operation of Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / **R. Ferensovich** // V Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 196–198. – Назва з екрану.

9. **Ferensovych R.** The Operation Mode of Single-Stage Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / **R. Ferensovich** // VI Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 175–176. – Назва з екрану.

*Тези:*

10. **Ференсович Р. Я.** Аналіз перехідних процесів каскадних трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 70-та студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 125–127.

11. **Ференсович Р. Я.** Аварійні процеси у вимірювальних трансформаторах струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 71-ша студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 123–124.

12. **Ференсович Р. Я.** Режими роботи та захист трансформаторів струму за розкорочення їх вторинних кіл [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 72-а студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 126–128.

13. **Ференсович Р. Я.** Режими роботи та аварійні процеси вимірювальних трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // Збірник тез докладів Всеукраїнсь-

кого конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Енергетика». – Маріуполь : ПДТУ. – 2013. – С. 20.

14. **Ференсович Р. Я.** Аварійні розмикання вторинних обмоток трансформаторів струму [Електронний ресурс] / **Р. Я. Ференсович**, О. І. Жила // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» : збірник тез / ПДТУ. – Маріуполь, 2014. – С. 20. – Режим доступу : <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/6221> (дата звернення 12.11.14). – Назва з екрану.

*Патенти:*

15. Пат. 71385 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201200114 ; заявл. 04.01.2012 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

16. Пат. 89566 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від пошкоджень перенапругами / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201313704 ; заявл. 25.11.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

17. Пат. 111065 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту від перенапруг трансформатора струму та його вторинних кіл / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201605446 ; заявл. 19.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.



## ЗМІСТ

	стор.
<b>Перелік умовних скорочень .....</b>	<b>14</b>
<b>Вступ .....</b>	<b>15</b>
<b>Розділ 1. Давачі струму приєднань електричних мереж промислової частоти .....</b>	<b>21</b>
1.1. Основні характеристики та особливості моделювання трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям .....	21
1.1.1. Характеристики магнітних матеріалів осердь трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом .....	21
1.1.2. Режими роботи трансформаторів струму за типових навантажень вторинних обмоток .....	23
1.1.3. Режими роботи трансформаторів струму за розімкнених вторинних кіл ...	29
1.2. Існуючі захисти від перенапруг за обривів вторинних кіл трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям .....	32
1.3. Сучасні нетрадиційні давачі струму приєднань електричних мереж промислової частоти .....	42
1.3.1. Трансформатори струму з магнітним осердям з немагнітним проміжком .	42
1.3.2. Давачі струму з використанням ефекту Фарадея .....	45
1.3.3. Давачі струму з застосуванням поясу Роговського .....	49
1.4. Висновки до розділу 1 .....	50
<b>Розділ 2. Метод оцінки максимальної амплітуди усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки одноступеневого трансформатора струму .....</b>	<b>52</b>
2.1. Спрощена розрахункова схема одноступеневого трансформатора струму за розімкненого вторинного кола .....	52
2.2. Потокозчеплення обмоток трансформатора струму та напруга на розімкнених виводах його вторинної обмотки за протікання синусоїдного	

первинного струму .....	54
2.3. Метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки трансформатора струму за протікання синусоїдного первинного струму .....	58
2.3.1. Застосування для аналітичних розрахунків двокускової вебер-амперної характеристики обмоток трансформатора струму .....	58
2.3.2. Застосування для аналітичних розрахунків апроксимації $i_{\text{нам}} = a \cdot sh(b \cdot \Psi_1)$ вебер-амперної характеристики первинної обмотки трансформатора струму .....	62
2.4. Порівняльна оцінка аналітичних розрахунків та результатів комп'ютерного моделювання усталених електромагнітних процесів в одноступневих трансформаторах струму за розмикання їх вторинних кіл .....	64
2.4.1. Особливості моделювання за спрощеною розрахунковою схемою усталених режимів роботи одноступневих трансформаторів струму за розімкнених їх вторинних кіл .....	64
2.4.2. Особливості режимів роботи одноступневих трансформаторів струму за обриву кіл вторинного навантаження за різних рівнів їх первинних струмів .....	72
2.5. Висновки до розділу 2 .....	81
<b>Розділ 3. Аналіз режимів роботи трансформаторів струму за обривів вторинних кіл струму .....</b>	<b>83</b>
3.1. Усталені режими трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл.	83
3.1.1. Усталені режими одноступневих трансформаторів струму за обриву кіл вторинного навантаження .....	83
3.1.2. Аварійний усталений режим роботи каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 за розімкненого вторинного кола .....	93
3.2. Перехідні режими трансформаторів струму за обриву кіл їх вторинних обмоток .....	101
3.2.1. Увімкнення ненавантаженого силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1 з трансформаторами струму типу ТВ-35 до трифазного джерела	

живлення 35 кВ промислової частоти 50 Гц .....	102
3.2.2. Особливості перехідних режимів трансформатора струму типу ТШЛ-20 10000/5 за розмикання кола його вторинного навантаження .....	105
3.2.3. Особливості перехідних режимів каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 за розмикання його вторинних кіл .....	113
3.3. Висновки до розділу 3 .....	120
<b>Розділ 4. Система захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму .....</b>	<b>122</b>
4.1. Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму .....	122
4.1.1. Основні вимоги до системи захисту .....	122
4.1.2. Призначення та основні режими роботи системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму .....	123
4.2. Режими роботи трансформаторів струму з системою захисту від перенапруг з застосуванням джерела оперативного струму .....	130
4.2.1. Режими роботи одноступневих трансформаторів струму з системою захисту від перенапруг .....	130
4.2.2. Режими роботи каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 з системою захисту від перенапруг .....	141
4.3. Експериментальні дослідження системи захисту трансформатора струму та його вторинних кіл від перенапруг .....	148
4.3.1. Дослідження рівнів напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму типу ТЛМ-10 .....	148
4.3.2. Дослідження режиму системи захисту трансформатора струму типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 .....	152
4.4. Висновки до розділу 4 .....	157
<b>Загальні висновки .....</b>	<b>159</b>
<b>Список використаних джерел .....</b>	<b>161</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>178</b>

	12
<b>Додаток А</b> .....	179
А.1. Особливості конструкції та режимів роботи трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям .....	179
А.2. Основні технічні параметри і характеристики досліджуваних трансформаторів струму .....	194
<b>Додаток Б</b> .....	205
Б.1. Розрахунок коефіцієнтів функції апроксимації $i_{\text{нам}} = a \cdot sh(b \cdot \Psi_1)$ вебер-амперної характеристики первинної обмотки трансформатора струму типу ТЛМ-10 .....	205
Б.2. Аналітичні розрахунки амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму .....	206
<b>Додаток В</b> .....	211
В.1. Розрахунок опору $r_m$ , що симулює втрати активної потужності у магнітопроводі трансформатора струму .....	211
В.2. Залежності усталених вторинних напруг $U_{2m} = f(K_{I_1})$ на розімкнених виводах вторинних обмоток та похибок напруги $\delta_{U_{2m}} = f(K_{I_1})$ від кратностей первинних струмів трансформаторів струму .....	215
<b>Додаток Г</b> Апроксимація розрахункових функцій вторинних напруг $U_{2m} = f(K_{I_1})$ для одноступеневих трансформаторів струму .....	221
<b>Додаток Д</b> Технічні параметри та характеристики каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 .....	229
<b>Додаток Е</b> .....	237
Е.1. Технічні параметри та характеристики силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1 .....	237
Е.2. Параметри керуючого R-С кола постійної напруги .....	239
<b>Додаток Ж</b> .....	241
Ж.1. Режими роботи трансформатора струму типу ТШЛ-20 з системою захисту від перенапруг .....	241
Ж.2. Режими роботи трансформаторів струму з системою захисту від	

перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування вторинної обмотки трансформатора струму .....	243
<b>Ж.3. Розрахункові параметри режимів спрацювання систем захисту трансформаторів струму від перенапруг та оцінка можливості застосування в системах захисту серійних ОПН без іскрового проміжку .....</b>	<b>247</b>
<b>Додаток И</b> Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації .....	<b>251</b>
<b>Додаток К</b> Акти впровадження результатів дисертаційної роботи .....	<b>255</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ТС	трансформатор струму
РЗА	релейний захист й автоматика
ЕРС	електрорушійна сила
КРЗ	комплектна розподільна злагода
МРС	магніторушійна сила
ТСНП	трансформатор струму нульової послідовності
ВАХ	вольт-амперна характеристика
ПХН	прямокутна характеристика намагнічування
КЗ	коротке замикання
ОПН	обмежувач перенапруг
ОТС	оптико-електронний трансформатор струму
ЕЕС	електроенергетична система
ВБАХ	вебер-амперна характеристика
КАО	керований активний опір
ВН	висока напруга
НН	низька напруга
СЗ	система захисту
ПШС	пристрій шунтування-сигналізації
РПН	регулювання під навантаженням
ЕБ	електронний блок
БЕР	блок електромеханічних реле

## ВСТУП

Сучасна електроенергетична система (ЕЕС) України містить широко розгалужені електричні мережі номінальних класів напруг 0,4 – 750 кВ систем генерації, пересилання, розподілу та споживання електричної енергії. Керування технологічними режимами таких систем забезпечується застосуванням ефективних та надійних автоматизованих систем управління і неперервного контролю параметрів режимів роботи електричних мереж, використанням пристроїв релейного захисту й автоматики (РЗА), зокрема, широко розповсюджених мікропроцесорних систем, які поєднують у собі функції керування, моніторингу стану та захисту електроустановок енергосистеми.

Електроустановки повинні виконувати задані функції у всіх нормальних (неаварійних) режимах роботи та забезпечувати неперервне живлення споживачів електричною енергією з визначеними параметрами її якості і безпечну експлуатацію електрообладнання обслуговуючим персоналом.

Трансформатори струму (ТС) у складі систем генерації, розподілу та споживання електричної енергії є важливою ланкою їх кіл вимірювання, РЗА, керування тощо, оскільки забезпечують дані пристрої відповідною вхідною інформацією. Їм доводиться працювати як за усталених, так і перехідних режимів роботи електричних мереж, що характеризуються відповідними особливостями протікання електромагнітних процесів. Також ТС виконують важливі функції відокремлення високовольтних первинних кіл від низьковольтних вторинних.

Обрив вторинних кіл ТС є аварійним режимом роботи ТС. За такого режиму на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС виникають високовольтні імпульси напруги, небезпечні для обладнання вторинних кіл і, насамперед, для обслуговуючого персоналу електроустановок. Також зростають втрати активної потужності у магнітопроводі ТС, що призводить до перегрівання його осердя і у кінцевому випадку – пошкодження ізоляції осердя та ізоляції обмоток трансформатора.

У літературі аналізу режимів роботи ТС з феромагнітними осердями за розмикання їх вторинних кіл приділено недостатньо уваги. Лише у роботах В. Гуревича,

Н. Бачуріна, А. Кошмідера розглянуто режими обриву кіл вторинного навантаження ТС та запропоновано можливі шляхи їх захисту від індукованих перенапруг. Однак, пропонувані авторами рішення, на наш погляд, містять ряд недоліків. Теоретичні та практичні дослідження таких режимів роботи ТС також проведені у недостатньому обсязі, як і не впроваджено в експлуатацію ефективного та дієвого пристрою захисту ТС від вторинних перенапруг.

**Актуальність теми.** Враховуючи відсутність у відомих публікаціях ґрунтовних досліджень режимів роботи ТС за обриву кіл, під'єднаних до вторинних обмоток цих трансформаторів, а також практичну відсутність пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів, досліджувана проблема є актуальною. Як вказують доступні джерела інформації, пошкодження ТС та обладнання їх вторинних кіл, а також ураження персоналу в діючих електроустановках від дії перенапруг, що виникають під час обриву вторинних кіл ТС, на жаль, продовжуються.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає науковому напрямку «Моделювання, аналіз, синтез і оптимізація електроенергетичних й енергозабезпечувальних систем та інтелектуалізація управління ними» кафедри електроенергетики та систем управління (колишнє найменування кафедри електричних систем та мереж) Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Аналіз перенапруг в електричних мережах та режими роботи вимірних трансформаторів струму й напруги в цих умовах» (№ держреєстрації 0115U004699, 2015 – 2017 р.р.), а також госпдоговірної роботи № 738 для ПрАТ «Львівобленерго» «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації» (2017 – 2018 р.р.). Окремі результати роботи використовуються під час викладання навчальних дисциплін «Оптимізація режимів роботи електроенергетичних систем», «Перенапруги та координація ізоляції в електричних мережах», «Релейний захист електроенергетичних систем (ч. 1, 2)».

Автор брав участь у цих роботах як виконавець.



**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження режимів роботи та створення захисту ТС електричних мереж від перенапруг за обривів вторинних кіл ТС.

Виконання поставленого завдання передбачає розв'язання наступних задач:

1. Аналіз публікацій щодо досліджень режимів ТС та захисту їх від перенапруг під час обривів вторинних кіл ТС.

2. Отримання аналітичних виразів для розрахунку параметрів координат усталеного режиму роботи ТС за обриву його вторинного кола під час протікання у первинній обмотці ТС синусоїдного струму.

3. Розробка методологічних основ побудови структурних схем захисту ТС та їх вторинних кіл від перенапруг.

4. Розробка системи захисту (СЗ) від перенапруг ТС за обриву вторинних кіл та проведення досліджень з метою обґрунтування необхідності додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС під час розмикання вторинного кола ТС.

5. Підтвердження проведеними дослідженнями ефективності запропонованої СЗ і обмеження перенапруг до рівня спрацювання обмежувача перенапруг (ОПН) – пробивного запобіжника типу ПП-А/3 (не більше 1000 В).

*Об'єктом дослідження* є процеси в електричних мережах з вимірювальними трансформаторами струму.

*Предметом дослідження* є усталені та перехідні режими роботи трансформаторів струму за обривів їх вторинних кіл, способи та методи їх захисту.

*Методи дослідження.* В основу досліджень покладено методи теорії лінійних і нелінійних кіл, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням методів комп'ютерного симулювання, натурального експерименту та дослідження процесів у діючих електроустановках.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на виводах вторинної обмотки трансформатора струму за обриву його вторинного ко-

ла, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму.

2. Вперше досліджено вплив втрат активної потужності в магнітопроводах трансформаторів струму на рівень максимальних перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток, що дає змогу моделювати режими трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл та розраховувати величини перенапруг на вторинних виводах.

3. Вдосконалено математичну модель для дослідження перехідних процесів під час обриву вторинних кіл трансформаторів струму шляхом застосування керованого активного опору в модельованому контурі комутації, що дає змогу досліджувати вплив швидкості зміни струму у вторинному колі трансформатора струму на величини перенапруг.

4. Запропоновано принципи побудови системи захисту трансформаторів струму від перенапруг за обривів їх вторинних кіл, що дає змогу здійснювати вибір параметрів елементів системи захисту та аналізувати ефективність її роботи.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Розроблено методологію побудови структурних схем захисту трансформаторів струму та їх вторинних кіл від перенапруг, що виникають за аварійного розмикання цих кіл.

2. Запропоновано систему захисту трансформатора струму та його вторинного кола від перенапруг, яка в якості обмежувача перенапруг містить пробивний запобіжник типу ПП-А/З та схему швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки після спрацювання обмежувача перенапруг.

3. Результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень підтверджено ефективну роботу запропонованої системи захисту від перенапруг для основних типів трансформаторів струму, які експлуатуються в електричних мережах України, що дає змогу рекомендувати її практичне застосування.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, що є в дисертації, отримані здобувачем самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах автору належать: [1] – проведено теоретичний аналіз режимів роботи ТС з розімкненими вторинними

колами; [2] – запропоновано методи аналітичних розрахунків амплітуди імпульсу усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС і проведено порівняльний аналіз результатів комп’ютерного моделювання та аналітичних обчислень на прикладі ТС типу ТЛМ-10; [3] – проведено загальний аналіз режиму роботи трансформатора струму за розмикання його вторинного кола з використанням двокусково-лінійної вебер-амперної характеристики його вторинної обмотки, досліджено аварійний режим роботи трансформатора струму типу ТПШЛ-10 з використанням спрощеної розрахункової схеми; [4] – досліджено вплив втрат активної потужності в осерді ТС на рівень перенапруг на розімкнених виводах вторинної обмотки в залежності від величини первинного струму; [5] – проведено комп’ютерне моделювання та аналіз усталених і перехідних режимів роботи каскадного двоступеневого ТС типу ТФЗМ-500 за розмикання його вторинних кіл; [6] – розроблено СЗ від перенапруг розімкненого вторинного кола ТС, створено розрахункові схеми і досліджено шляхом натурного експерименту та комп’ютерного моделювання режими роботи запропонованої СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10; [7 – 9] – розроблено структурні схеми пристроїв захисту ТС: з виконавчим елементом з автоматичним фіксованим замиканням контактів [7], з застосуванням блоку мікроконтролера [8], з елементом захисту та сигнальним елементом [9].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися на III, IV Міжнародних конференціях молодих вчених EPECS-2011, 2013, V і VI Міжнародних молодіжних наукових форумах “Litteris et Artibus”: конференції EPECS-2015, 2016 (м. Львів, 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2016 р.); 70-й, 71-й, 72-й студентських науково-технічних конференціях (м. Львів, 2012 р., 2013 р., 2014 р.); Всеукраїнських конкурсах студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» (м. Маріуполь, 2013 р., 2014 р.); науково-практичній конференції «Діагностування електричного обладнання електростанцій, підстанцій, повітряних ліній та трансформаторних олив. Обмін досвідом та перспективи удосконалення» (с. Славсько, 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015)» (м. Вінниця, 2015 р.); науково-практичній конференції «Діагностика технічного стану електричного обладнання електростанцій, підстанцій, по-

вітряних ліній та трансформаторних олив. Нормативна база, проблеми та перспективи покращення» (с. Славсько, 2017 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2017» (м. Вінниця, 2017 р.); семінарах НАН України (м. Львів, 2014 р., 2017 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 17 наукових робіт, з них 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, 5 тез доповідей у збірниках наукових конференцій, 4 матеріали міжнародних конференцій, 3 патенти на корисні моделі.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та 9 додатків. Повний обсяг дисертації складає 256 сторінок, із них: 105 рисунків по тексту, 26 таблиць, 9 додатків на 79 сторінках, 139 найменувань використаних джерел на 17 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

# ДАВАЧІ СТРУМУ ПРИЄДНАНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ

### 1.1 Основні характеристики та особливості моделювання трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям

У роботі розглянуті особливості конструктивного виконання та режимів роботи ТС різних класів номінальних напруг та призначення, акцентуючи увагу на найбільш характерних їх типах. Враховуючи рекомендовані обмеження щодо об'єму рукопису, особливості конструктивного виконання та режимів роботи ТС різних класів номінальних напруг наведені в додатку А.

#### 1.1.1 Характеристики магнітних матеріалів осердь трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом

Як відомо, характеристика намагнічування магнітного матеріалу осердя ТС – це залежність максимальної індукції  $B_m$ , Тл, від напруженості магнітного поля  $H$ , А/м, матеріалу [10 – 13].

$$B_m = f(H), \quad (1.1)$$

На рисунку 1.1 наведено усереднені характеристики намагнічування стрічкових магнітопроводів, виготовлених з холоднокатаної сталі марки Э310 (криві 1, 1') та гарячекатаної сталі марки Э42 (криві 2, 2'), взяті з [11].

В інформаційних матеріалах до ТС заводи-виробники повинні наводити їх типові вольт-амперні характеристики (ВАХ), зняті при підведенні струму до їх вторинних обмоток, які використовують як давачі струму систем РЗА об'єктів електричних мереж, електростанцій тощо. Ці характеристики знімають, підводячи до вторинних обмоток ТС практично синусоїдну напругу промислової частоти. Також до-

цільно вказувати МРС за номінального первинного струму трансформатора, переріз магнітопроводу та середню довжину магнітної силової лінії.

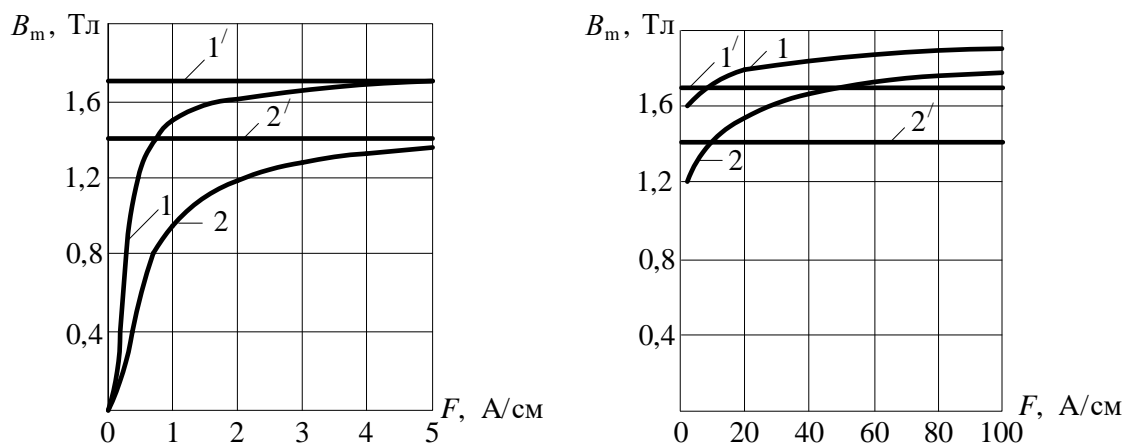


Рисунок 1.1 – Усереднені характеристики намагнічування стрічкових осердь за різних значень МРС  $F$ :

1 – холоднокатана сталь марки Э310; 2 – гарячекатана сталь марки Э42;  
1', 2' – прямокутні характеристики намагнічування відповідно для сталей марок Э310 і Э42 [11]

Прямокутні характеристики намагнічування (ПХН) (рисунок 1.1, криві 1', 2') використовують для аналізу роботи ТС за режимів глибокого насичення їх осердя. Приймають, що до настання насичення магнітопроводу струм намагнічування осердя ТС практично рівний нулеві і ТС працює без похибок [11, 14].

ВАХ ТС – це залежність ЕРС на виводах вторинної обмотки від струму намагнічування в первинній обмотці за розімкнутого кола вторинної обмотки ТС [11]. Відомо, що порівняння ВАХ, знятої під час експлуатації ТС, з типовою характеристикою намагнічування магнітопроводу, вказаною заводом-виготівником у каталогових даних трансформатора, є одною з основних перевірок справності трансформатора, оскільки дозволяє судити про наявність чи відсутність в ньому виткового замикання. Також ці характеристики використовують для визначення похибок ТС.

Несиметрія первинної обмотки в багатьох ТС зумовлює можливе насичення сталі окремих ділянок осердя та спотворення їх ВАХ. Оскільки типова характерис-

тика намагнічування будується за однакової магнітної індукції на всіх ділянках магнітопроводу, тому струм намагнічування підводять до вторинної обмотки ТС [11]. Як правило, вторинна напруга  $U_2$ , за відповідної потужності джерела живлення, незначно відрізняється від електрорушійної сили  $E_2$  (за подачі струму намагнічування у первинну обмотку ТС).

### 1.1.2 Режими роботи трансформаторів струму за типових навантажень вторинних обмоток

Для розрахунків режимів роботи ТС застосовують ряд відомих заступних (розрахункових) схем [11, 15 – 18]. Для двообмоткових ТС часто застосовують схему, наведену на рисунку 1.2 [11]. Ця схема відображає параметри елементів ТС та зв'язок між ними.

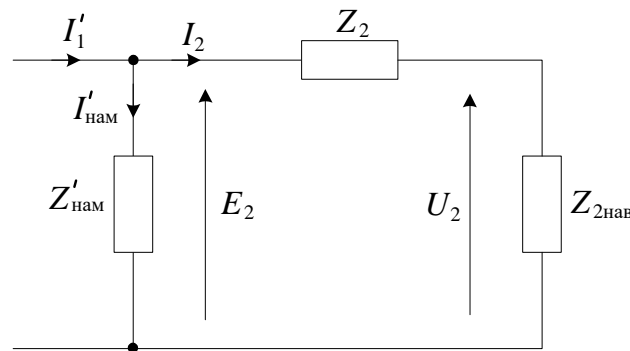


Рисунок 1.2 – Розрахункова схема двообмоткового ТС

У цій схемі  $Z'_{\text{нам}}$  – зведений (до вторинної обмотки ТС) повний опір вітки намагнічування, по якій протікає струм, що відповідає результуючій МРС в осерді ТС;  $Z_2$  – повний опір вторинної обмотки, який має активну  $r_2$  та реактивну (індуктивну)  $x_2$  складові;  $Z_{2\text{нав}}$  – навантаження (як правило – активно-індуктивне), під'єднане до вторинної обмотки ТС.

Опір первинної обмотки не впливає на роботу ТС, тому його не враховують у цій схемі [11].

Історично склалося та відображено в ряді публікацій, що для інженерних розрахунків режимів роботи ТС в колишньому СРСР та тепер і у державах СНД за по-

зитивні напрями струмів в обмотках трансформатора прийнято напрям струму від затискачів Л1 до Л2 по первинній обмотці та від затискача И1 по зовнішньому колу вторинного навантаження до затискача И2 вторинної обмотки ТС [19]. Затискачі обмоток ТС Л1, И1 та Л2, И2 – однополярні. Як відомо, за підведення струмів до однополярних затискачів обмоток ТС ці струми створюють в осерді ТС МРС, що співпадають за напрямом (фазою). Відповідні напрямам МРС мають напрям і відповідні магнітні потоки в осерді ТС. У відповідності з зазначеними вище позитивними напрямками струмів нижче на рисунках наведено відповідні позитивні напрямки струмів та напруг, ЕРС (див. рисунки А.1, 1.2). За таких прийнятих позитивних напрямів вектори первинного і вторинного струмів в обмотках ТС, за відсутності кутової похибки ТС, співпадатимуть за фазою, а миттєва вторинна ЕРС буде рівна взятій із знаком «плюс» першій похідній потокозчеплення вторинної обмотки по часу [19]. Внаслідок нелінійності опору вітки намагнічування  $Z'_{\text{нам}}$  струми  $I'_{\text{нам}}$  та  $I_2$ , як правило, є несинусоїдними. Тому, за певного наближення, для побудови векторних діаграм ці несинусоїдні струми та напруги (рисунок 1.2) замінюють еквівалентними синусоїдними з аналогічними діючими значеннями [11].

Як видно зі схеми заміщення (див. рисунок 1.2), величина струму намагнічування  $I'_{\text{нам}}$  залежить від співвідношення опорів вітки намагнічування  $Z'_{\text{нам}}$  і кола вторинного струму ( $Z_2 + Z_{2\text{нав}}$ ). Чим більший струм протікає віткою намагнічування, тим більші відповідно похибки ТС.

На рисунку 1.3 [20] наведені принципова електрична схема каскадного двоступеневого ТС із довільною кількістю трансформаторів нижнього ступеню (а) та відповідна їй розрахункова схема (б). За такою принциповою схемою виконані ТС напругою 500 кВ типу ТФЗМ-525 (старий тип ТФНКД-500,  $n = 4$  або 5) та напругою 750 кВ типів ТФРМ-750 (старий тип ТРН-750,  $n = 5$ ), ТОГ-765 ( $n = 5$  або 6) [20].

На рисунку 1.3 позначено:  $I_1''$  – первинний струм каскадного ТС;  $I_0''$  – струм намагнічування верхнього ступеню;  $I_2'$  – вторинний струм верхнього ступеню;  $I_{0i}^H$  – струм намагнічування  $i$ -го трансформатора нижнього ступеню,  $i = 1, \dots, n$ ;  $I_{2i}^H$  – вторинний струм  $i$ -го трансформатора нижнього ступеню;  $Z_0^{B''}$  – опір вітки намагнічування верхнього ступеню;  $Z_{2\text{обм}}^{B'}$  і  $Z_{1\text{обм}}^{H'}$  – відповідно опір вторинної обмотки верх-



нього ступеню та опір первинної обмотки нижнього ступеню (остання спільна для всіх трансформаторів нижнього ступеню);  $Z_{0i}^H$  – опір намагнічування  $i$ -го трансформатора нижнього ступеню;  $Z_{2обмi}^H$  – опір вторинної обмотки  $i$ -го трансформатора нижнього ступеню;  $Z_{hi}$  – опір вторинного навантаження для  $i$ -го трансформатора нижнього ступеню.

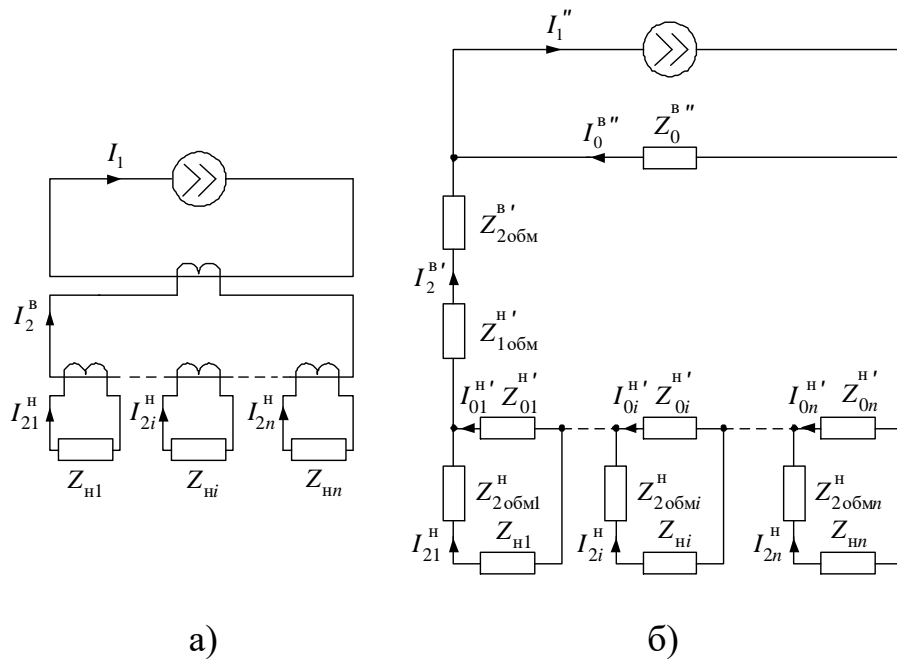


Рисунок 1.3 – Електрична принципова схема (а) та розрахункова схема (б) каскадного двоступеневого ТС

Струми та опори, позначені «штрихом», є зведеними до вторинних обмоток каскадного ТС – з врахуванням номінальних коефіцієнтів трансформації кожного ступеню. Кількість «штрихів» визначає кількість таких зведень.

Як видно з наведених розрахункових схем (рисунки 1.2 та 1.3) похибки ТС спричинені протіканням скінченних струмів у опорах віток намагнічення. Струми намагнічення необхідні для створення робочих магнітних потоків в осердях реальних ТС. В результаті протікання скінченних струмів намагнічення у вітках розрахункової схеми, струми, що протікають у колах вторинних обмоток ТС, у загальному випадку, не дорівнюють за модулем і фазою зведеному первинному струму  $I_1'$ . Тобто у ТС виникає похибка трансформації (за модулем і фазою) струму з первинної об-

мотки ТС у вторинні, до яких підключають кола струму вимірювальних приладів і пристроїв РЗА.

У наукових публікаціях та нормативних документах прийнято розрізняти струмову (за модулем струму), кутову (за фазою струму) та повну похибки ТС. Вони залежать від конструктивного виконання магнітопроводу, величини МРС. Розрахункові формули для визначення похибок ТС, їх нормовані величини відповідно до класу точності ТС, ряд методів для їх зменшення наведено в [10, 11, 15, 20 – 23].

Як видно із наведених вище принципів та розрахункових схем ТС, у первинній обмотці ТС протікає струм приєднання, що підключене до електричної мережі. Тому ТС доводиться працювати як в усталеному, так і в перехідному режимах електричних мереж.

*Усталений режим* роботи ТС характеризується відсутністю у струмах його обмоток вільних згасаючих складових. Одним із видів цього режиму є *нормальний режим* роботи ТС. За цього режиму струми, напруги обмоток та похибки ТС не перевищують довготривало допустимих значень для заданих умов експлуатації [20]. До усталеного режиму також прийнято відносити трансформацію струму короткого замикання чи іншого струму, відмінного від нормального робочого струму електроустановки, після затухання вільних складових.

Відомо [15, 16, 20], що *перехідний режим* роботи ТС настає під час різкої зміни параметрів режиму роботи мережі (наприклад, виникнення короткого замикання (КЗ) в мережі тощо) чи навантаження ТС. Такий режим супроводжується протіканням у первинній та вторинній обмотках ТС вільних згасаючих складових струмів, а за КЗ – і надструмів.

Умови роботи ТС у колах вимірювальних пристроїв частково відрізняються від умов їх роботи у колах захисту й автоматики. Для вимірювань необхідна робота ТС визначеного класу точності за усталеного режиму та первинного струму, що не перевищує номінальну величину. В пристроях захисту й автоматики ТС ж повинні виконувати свої функції за струмів, значно більших від номінальної величини, за умов перехідного режиму [20].

На точність роботи ТС суттєво впливають вільні аперіодичні складові первинного струму, що з'являються за перехідних режимів [16, 24]. Ці складові трансформуються у вторинне коло трансформатора з тим більшою похибкою, чим повільніше вони згасають. Тому все більша частка аперіодичної складової первинного струму намагнічуватиме осердя ТС зі зростанням її часу згасання.

За перехідних режимів можливе глибоке насичення замкнених сталених магнітопроводів ТС аперіодичними складовими магнітного потоку осердя, що супроводжується різким зменшенням його магнітної проникності та недопустимим збільшенням похибок ТС [15, 16, 20, 25, 26].

Після вимкнення струмів короткого замикання, включення ненавантажених силових трансформаторів тощо у замкнених сталених магнітопроводах ТС може тривалий час залишатися значна залишкова індукція магнітного поля. Її величину можна визначити з симетричної гістерезисної кривої намагнічування осердя трансформатора [16, 20].

Найбільш несприятливими умовами для роботи ТС за перехідних режимів є співпадіння за знаком залишкової магнітної індукції та магнітного потоку, створеного вільною аперіодичною складовою струму намагнічення ТС. При цьому спостерігається значне насичення осердя трансформатора та зростають його похибки трансформації первинного струму у вторинне коло [16, 27 – 29].

Під час аналізу режимів роботи ТС з замкненими магнітопроводами необхідно враховувати нелінійність кривої намагнічування магнітопроводу, що дещо ускладнює розрахунки. В перехідних режимах осердя ТС перемагнічується за частковими гістерезисними кривими намагнічування [20].

Для дослідження ТС з нелінійними характеристиками намагнічування користувались принципом накладання складових первинного струму, окремо розглядаючи вплив його аперіодичної та періодичної складових [20]. Однак з розвитком електронно-обчислювальної техніки запропоновано більш точні методи аналізу нелінійних динамічних систем, зокрема, метод змінних стану [30].

За режиму насичення магнітопроводу ТС у його вторинному струмі з'являються парні та непарні вищі гармоніки, найбільш вираженими з яких є друга

та третя. При цьому величина першої гармоніки суттєво зменшується [24]. За таких режимів зменшення вторинного навантаження ТС не зумовлює значного зменшення його похибок.

За відсутності аперіодичної складової в надструмі первинної обмотки ТС (наприклад, за КЗ в мережі) та насиченні осердя ТС у його вторинному струмі присутні лише непарні гармоніки і величина похибки практично є незмінною. У цьому випадку зменшення вторинного навантаження дозволяє зменшити похибки ТС [24].

За перехідних режимів первинний струм ТС, крім вимушеної періодичної та вільних аперіодичних складових, може містити й згасаючі вільні періодичні складові, що особливо характерні для електричних мереж з пристроями ємнісної компенсації та довгими лініями електропередавання напругою 330 кВ і вище [20]. Трансформацію вільних періодичних складових первинного струму в ТС описують відповідними амплітудно-частотною та фазочастотною характеристиками [15, 16, 20]. Однак для розрахунків режимів роботи ТС часто нехтують вільними згасаючими періодичними складовими первинного струму і вважають, що він змінюється за законом [20]

$$i_1 = I_{1\text{пер м}} \cos(\omega t - \delta_1) + I_{1\text{а поч}} e^{-t/T_1}, \quad (1.2)$$

де  $I_{1\text{пер м}}$  – амплітуда первинного періодичного струму, яка залежить від умов короткого замикання, А;

$\delta_1$  – фаза первинного струму у початковий момент перехідного процесу, гр.;

$I_{1\text{а поч}}$  – початкове значення аперіодичної складової первинного струму, А;

$T_1$  – постійна часу згасання аперіодичної складової первинного струму, рівна відношенню індуктивності первинного кола до його активного опору, с.

Як показано у [20], на протікання перехідного процесу в ТС значно впливають фаза  $\delta_1$  та постійна часу  $T_1$ , особливо, чим менше значення  $\delta_1$  та чим більша величина  $T_1$ . Також помітний вплив мають величина та вид вторинного навантаження ТС.

### 1.1.3 Режими роботи трансформаторів струму за розімкнених вторинних кіл

Відомо [1, 5, 22, 31 – 37], що розмикання вторинного кола ТС є *аварійним режимом* його роботи. За цього режиму значно зростає магнітний потік в осерді ТС внаслідок зникнення розмагнічуючої МРС вторинної обмотки (вторинний струм рівний нулю). Це призводить до збільшення втрат активної потужності у магнітопроводі, що, в свою чергу, за тривалої дії, викликає так звану «пожежу сталі» осердя, в результаті чого пошкоджується ізоляція осердя і обмоток та у кінцевому випадку – пошкоджується весь ТС. У більшості випадків такий процес призводить до КЗ в мережі та вимкнення приєднання, де увімкнутий аварійний ТС.

Крім цього, магнітний потік індукуює у вторинній обмотці ТС високовольтні імпульси напруги, які можуть руйнувати ізоляцію обладнання та призводити до електричного ураження обслуговуючого персоналу. Такі явища мають місце в процесі експлуатації ТС. В [31, 32, 36] описані випадки вибухів ТС внаслідок накопичення в їх конструкціях вибухонебезпечних газів, що виділялися під дією інтенсивних часткових розрядів у низьковольтній ізоляції за довготривалого режиму роботи з розімкненими вторинними обмотками. Вибухи супроводжувалися пошкодженням поблизу розташованого електрообладнання і призводили до системних аварій – одного разу відключився блок потужної теплової електростанції [31]. Як зазначено у наведених статтях, такий режим роботи ТС найчастіше наступав за випадання перемичок з клемів вторинних обмоток, які не використовувалися і були замкнені цими перемичками.

Попри те, що режими роботи ТС з розімкненими вторинними колами в експлуатації не є частими, однак, рівні вторинних перенапруг за настання таких режимів є досить небезпечними, особливо для обслуговуючого персоналу, що проводить роботи у вторинних колах.

Тому питання безпечної експлуатації ТС та створення ефективних і надійних способів захисту від перенапруг за розмикання їх вторинних кіл на сьогоднішній день є вкрай актуальними.

У літературі значну увагу приділено дослідженням усталених та перехідних режимів роботи ТС. Так у 60-70-ті роки минулого століття видатні вчені Б. Стогній, І. Сирота, Є. Танкевич, В. Черненко, В. Рогоза, А. Дроздов, В. Гармаш, Н. Бачурін та інші проводили широкомасштабні дослідження усталених та перехідних режимів роботи ТС, що дало змогу створити нові конструкції трансформаторів з покращеними характеристиками.

Також О. Рассальським, П. Андрієнком, О. Сахном, А. Яцейком у [38 – 42] приділена значна увага удосконаленню існуючих та розробці нових систем діагностики і контролю характеристик ізоляції ТС, а П. Лежнюком у [43 – 45] розглянуто задачі оптимізації режимів електричних мереж.

Однак питання аналізу режимів роботи ТС за розмикання їх вторинних кіл залишаються майже поза увагою. Лише у [1, 31 – 34, 36] описано режими розмикання кіл вторинного навантаження ТС, наведено методики визначення рівня перенапруг та запропоновано деякі можливі рішення щодо захисту ТС за таких режимів. Однак, як буде показано нижче в п. 1.2, пропоновані рішення містять ряд недоліків.

Середнє значення напруги на виводах розімкненої вторинної обмотки можна визначити за формулою [33]

$$E_{20cp} = 4fw_2\Phi_{\max}, \quad (1.3)$$

де  $f$  – частота, Гц;

$w_2$  – кількість витків вторинної обмотки;

$\Phi_{\max}$  – амплітуда магнітного потоку в осерді ТС, Вб.

На рисунку 1.4 зображено осцилограму вторинної напруги ТС за розмикання його вторинного кола [1, 37].

Як видно з рисунку 1.4, у початковий момент часу після розмикання вторинного кола виникає імпульс напруги амплітудою  $U_{\text{імп}}$ , після чого встановлюється усталена несинусоїдна періодична напруга  $u_{\text{уст}}(t)$ . Перевищення вторинною напругою допустимої для ізоляції апаратури та обслуговуючого персоналу величини  $u_{\text{доп}}$  спричиняє пошкодження обладнання чи смертельне ураження людини.

Відомо, що миттєве значення індукованої вторинної напруги ТС рівне

$$u_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.4)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік в осерді, зчеплений з вторинною обмоткою, Вб;  
 $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки.

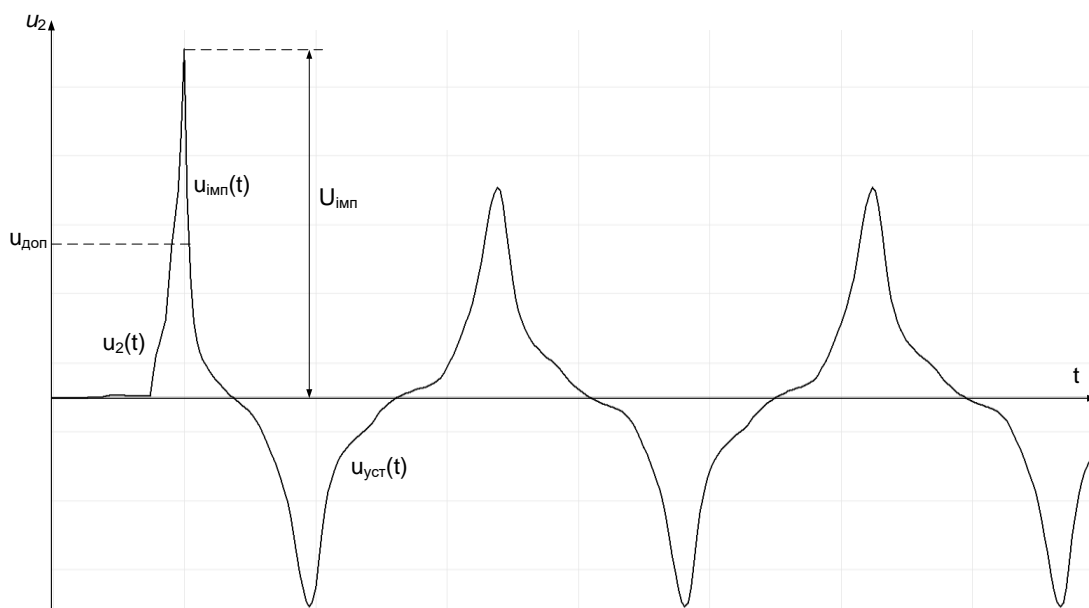


Рисунок 1.4 – Осцилограма вторинної напруги ТС за розмикання його вторинного кола

Як бачимо з рисунку 1.4, внаслідок насичення осердя ТС крива індукованої вторинної напруги спотворюється та з'являються чергування ділянок із її гострими піками (коли похідна магнітного потоку по часу найбільша) і більш похилих ділянок за малих значень напруги, коли осердя насичене і зміна потоку  $\Phi$  різко сповільнюється.

Варто відмітити [1], що за розмикання вторинної обмотки ТС в момент проходження синусоїди первинного струму через нуль на її виводах спостерігається лише періодична несинусоїдна напруга  $u_{уст}(t)$ . Якщо ж розмикання вторинного кола від-

будеться у момент проходження синусоїди первинного струму через свій максимум, амплітуда початкового імпульсу  $u_{\text{імп}}$  вторинної напруги буде максимальною.

Для ТС з великими первинними номінальними струмами та за переходу від значення номінального вторинного струму 5 А до 1 А має місце зростання рівня перенапруг на розімкнених виводах вторинної обмотки. Це, як відомо, викликане необхідністю застосування для таких ТС осердь з більшим перерізом та вторинними обмотками з більшим числом витків.

Як відмічено вище, режим роботи ТС з розімкненим вторинним колом є недопустимим і повинен якомога швидше усуватися. Більш детально процес індукування високовольтних імпульсів вторинної напруги за розімкненого кола вторинного навантаження ТС буде розглянуто у наступному розділі.

## **1.2 Існуючі захисти від перенапруг за обривів вторинних кіл трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям**

Згідно [11] заборонено розривати вторинні кола ТС. Перед проведенням робіт у цих колах або ж на самих трансформаторах обслуговуючий персонал повинен замкнути вручну виводи вторинної обмотки спеціальною перемичкою. Однак ручне встановлення перемички не усуває повністю небезпеки електричного ураження обслуговуючого персоналу внаслідок можливого обриву вторинних кіл трансформатора.

Одним із альтернативних методів є спосіб автоматичного замкнення вторинної обмотки, наведений у [46] (рисунок 1.5).

Дана система ефективна тим, що перемичка 9 встановлюється автоматично під дією пружини 8. Обслуговуючому персоналу перед роботою у вторинних колах достатньо лише розімкнути блок-вилку 6 та блок-розетку 11. Однак дана система не забезпечує захист обладнання і персоналу за непередбачуваного розмикання вторинного кола ТС внаслідок, наприклад, погіршення стану контактів, обриву з'єднувальних проводів чи необережних дій персоналу.



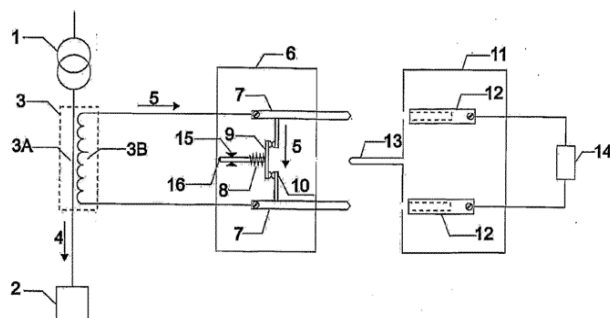


Рисунок 1.5 – Система швидкого замикання і розмикання вторинного кола трансформатора струму з автоматичним замкненням його вторинної обмотки [46]

У літературі наведено ще кілька способів захисту ТС від дії перенапруг за розмикання їх вторинних кіл. Так, Н. Бачурінім запропоновано схему захисту, де одна обмотка (захисна) електромагнітного балансного реле підключена до спеціального захисного витка, намотаного на магнітопровід ТС, а друга (блокувальна) – увімкнена послідовно в коло вторинної обмотки ТС [33] (рисунок 1.6, а). Як видно з рисунку 1.6, а, ліва обмотка реле блокує його роботу за протікання струму в колі вторинної обмотки ТС. За розмикання ж вторинного кола під дією магнітного поля, створеного струмом у правій захисній обмотці, коромисло реле обертається і своїми контактами замикає вторинну обмотку ТС на навантажувальний опір.

Однак автором не наводиться інформація про параметри моделі, її швидкодію та використання таких схем захисту в експлуатації. Намотування одного або кількох (для забезпечення низького порогу спрацювання реле [33]) спеціальних захисних витків на основний магнітопровід ТС, безумовно, вноситиме додаткову похибку у трансформацію первинного струму у нормальному режимі роботи ТС. Застосування ж механічних елементів у реле зумовлює інерційність його спрацювання.

У [47] наведено пристрій захисту для малопотужних вимірювальних ТС з низьким рівнем вторинної напруги за нормального робочого режиму. Цей пристрій базується на під'єднанні до вторинних виводів ТС виводів змінного струму діодного моста з напругою відкриття кремнієвих силових діодів близько 0,7 В [32] (див. рисунок 1.6, б). Виводи постійної напруги моста є закороченими. Таким чином, паралельно вторинній обмотці ТС включено у прямому напрямку два послідовно

з'єднані діоди, що шунтують цю обмотку за перевищення вторинною напругою рівня  $1,2 \div 1,4$  В і підтримують цей рівень практично не залежним від рівня струму в діодах (за струму в діодах, не більше допустимого).

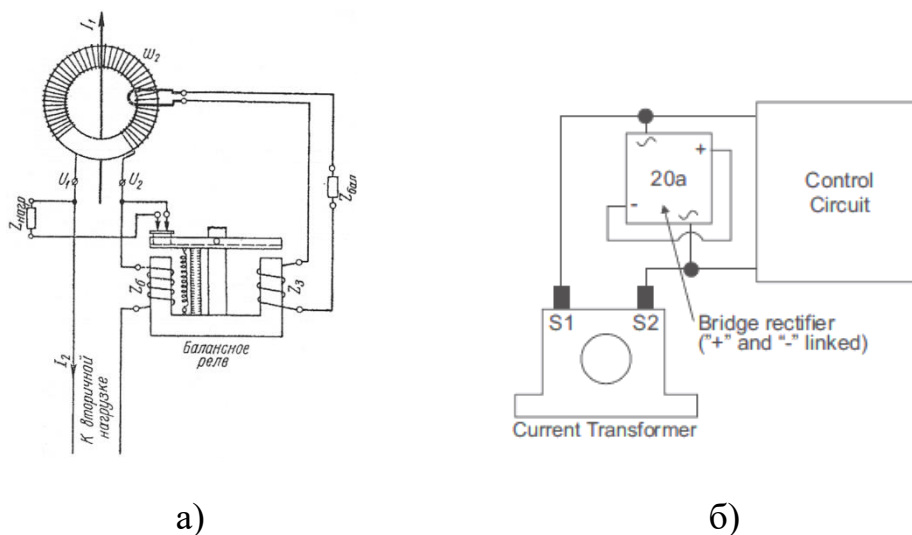


Рисунок 1.6 – Схеми захисту ТС від перенапруг за розмикання його вторинного кола:

а) з застосуванням балансного реле [33]; б) з застосуванням діодного моста [47]

Високовольтні ТС, що застосовують в мережах промислової частоти для пристроїв вимірювання та РЗА, характеризуються вищими рівнями вторинних напруг як за нормального, так і за аварійних режимів (надструми в мережі, розмикання вторинного кола ТС тощо). Тому для них необхідно застосовувати більш потужні пристрої захисту з більшими напругою і струмом спрацювання.

У [48, 49] наведено пристрої захисту, що ґрунтуються на під'єднанні до виводів вторинної обмотки ТС двох зустрічно включених стабілітронів. У разі розмикання вторинного кола ТС і перевищення вторинною напругою допустимої величини стабілітрони почергово протягом періоду зміни напруги відкриваються та обмежують її значення до допустимого рівня (рисунок 1.7).

У [48] для обмеження струму через стабілітрони послідовно до них може включатися додатковий опір. У [49] послідовно до стабілітронів підключені діод для сигналізації про спрацювання захисту та паралельно йому захисний стабілітрон. У літе-

ратурі не наводиться інформація про параметри пристроїв захисту, тому не можливо оцінити їх ефективність застосування в електроустановках. Також відсутність у пристрої захисту, наведеного в [49], обмежувального опору в колі з стабілітронами може призвести до перегрівання їх структури внаслідок тривалого протікання через них струму в режимі розімкненого вторинного кола.

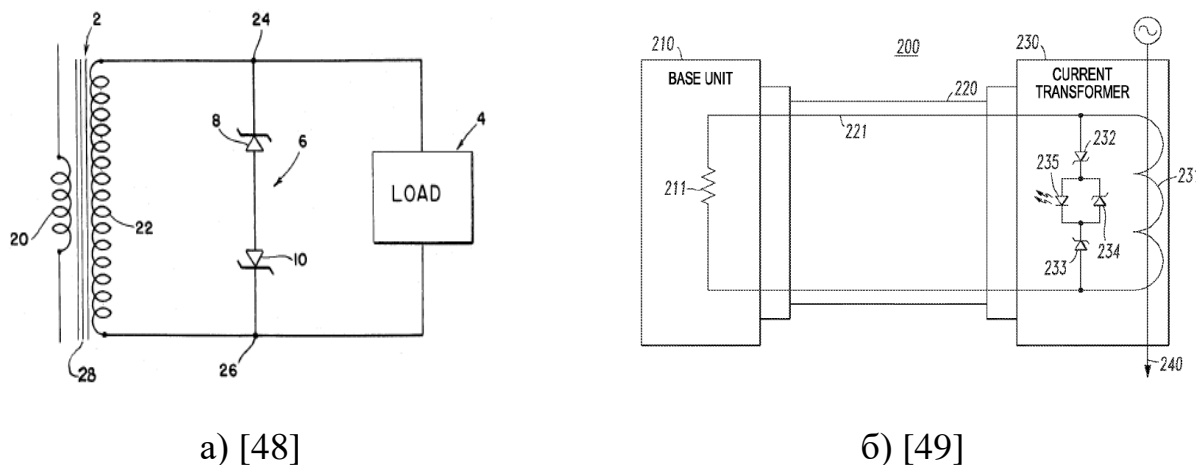


Рисунок 1.7 – Пристрої захисту ТС від перенапруг за розмикання його вторинного кола з застосуванням напівпровідникових стабілітронів

У [50] запропоновано пристрій захисту, що базується на паралельному під'єднанні до вторинної обмотки ТС симістора 15 та двонаправленого диністора 24 (рисунок 1.8, а). Підвищення напруги на виводах вторинної обмотки внаслідок розмикання вторинного кола ТС призводить до відкриття диністора 24, що, у свою чергу, подає керуючий імпульс на відкриття симістора 15, який відкривається і шунтує вторинну обмотку ТС. Додаткові елементи схеми забезпечують необхідні умови для спрацювання напівпровідникових елементів за розмикання вторинного кола ТС.

Однак вагомим недоліком таких схем з напівпровідниковими елементами, як зазначається у [32], є значний нагрів їх структур за тривалого протікання струму, а заміна симістора на більш потужний чи впровадження систем охолодження призведе до зростання вартості та габаритів пристрою захисту.

На рисунку 1.8, б наведено пристрій захисту з застосуванням реле  $R$  з механічним блокуванням, що своїм контактом  $R_1$  замикає виводи  $X$ - $Y$  вторинної обмотки  $T_2$

за розмикання вторинного кола ТС  $T$  [51]. Пусковим органом пристрою захисту є газовий розрядник 5, до якого послідовно під'єднана обмотка 6 реле. Внаслідок перевищення вторинною напругою допустимого рівня розрядник пробивається і напруга прикладається до обмотки 6. Зустрічно включені стабілітрони 7 обмежують рівень цієї напруги до приблизно п'ятикратної величини номінальної напруги спрацювання реле  $R$ , що значно пришвидшує замикання його контактів. Стабілітрони 7 також виконують функцію регулятора напруги для обмотки 6 реле. До контакту  $R_2$  реле підключають пристрої сигналізації про спрацювання захисту і наявність обриву вторинного кола ТС. Як зазначає автор, загальний час спрацювання захисту становить приблизно чверть періоду для частоти 60 Гц (близько 4 мс).

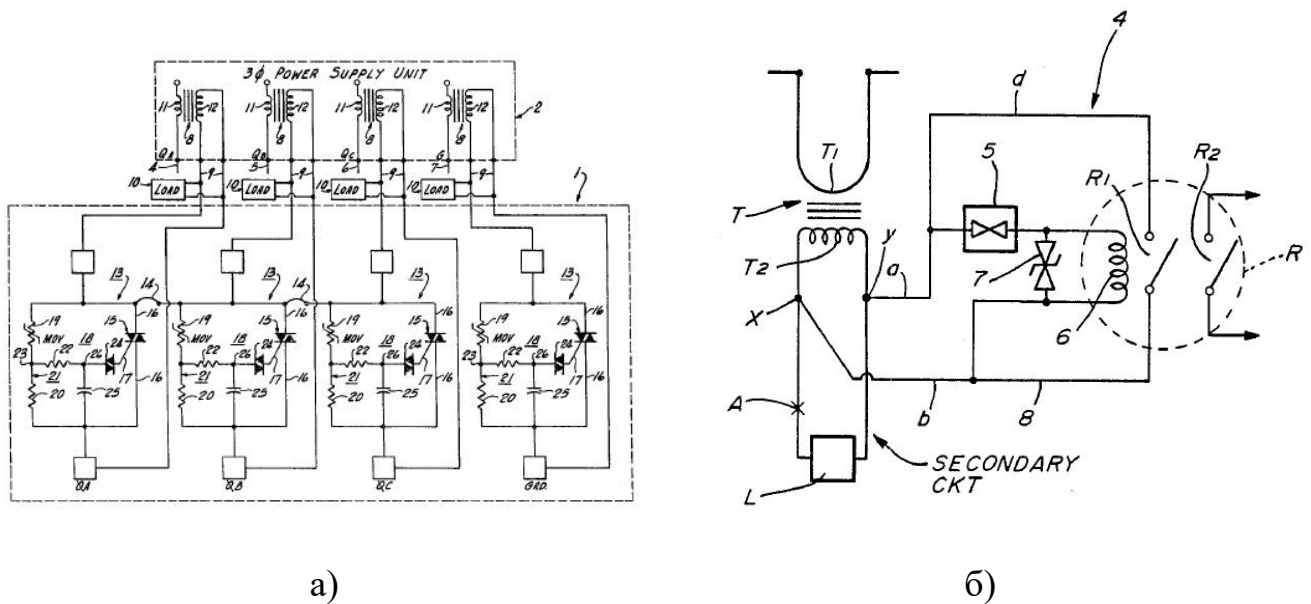


Рисунок 1.8 – Пристрої захисту ТС від перенапруг за розмикання його вторинного кола:

- а) з застосуванням напівпровідникових симістора та двонаправленого диністора [50]; б) з застосуванням реле з механічним блокуванням [51]

Для обмеження величини струму у вітці, що замикає виводи вторинної обмотки трансформатора, доцільно, на мій погляд, встановити додатковий опір, особливо, для потужних ТС (як зазначає автор, контакти  $R_1$  та  $R_2$  реле розраховані на протікання номінального змінного струму величиною 10 А). Як і для попередніх пристроїв захисту, у [51] автор не наводить інформацію про типи та параметри елементів

пропонованого пристрою захисту, не вказує, чи підтверджено натурними осцилограмами ефективність роботи захисту.

В. І. Гуревич пропонує пристрій захисту ТС з використанням напівпровідникових нелінійних елементів, що розряджають на обмотку спеціального двопозиційного поляризованого реле з ручним поверненням  $LR$  попередньо заряджений конденсатор  $C1$  (рисунок 1.9, а) чи  $C4$  (рисунок 1.9, б) [31]. За перевищення вторинною напругою допустимої величини (автор наводить такі величини: 100 В для ТС у колі вимірювання та 800 В для ТС у колі релейного захисту з номінальними вторинними струмами 5 А) реле спрацює і своїм контактом замикає виводи вторинної обмотки ТС. Як зазначає автор, додаткові елементи в схемі (накопичувальний конденсатор  $C1$  чи  $C4$ , стабілітрон  $VD2$ , тиристор  $VD3$ ) необхідні для формування в обмотці цього реле імпульсу струму визначених параметрів для надійного та швидкого його спрацювання. У реле  $LR$  передбачений додатковий контакт для під'єднання кіл сигналізації про спрацювання захисту.

В пристрої захисту, наведеному на рисунку 1.9, б, додатково встановлено дільник напруги (конденсатори  $C1 - C3$  і резистор  $R1$ ) та варистор з напругою спрацювання 600 – 800 В.

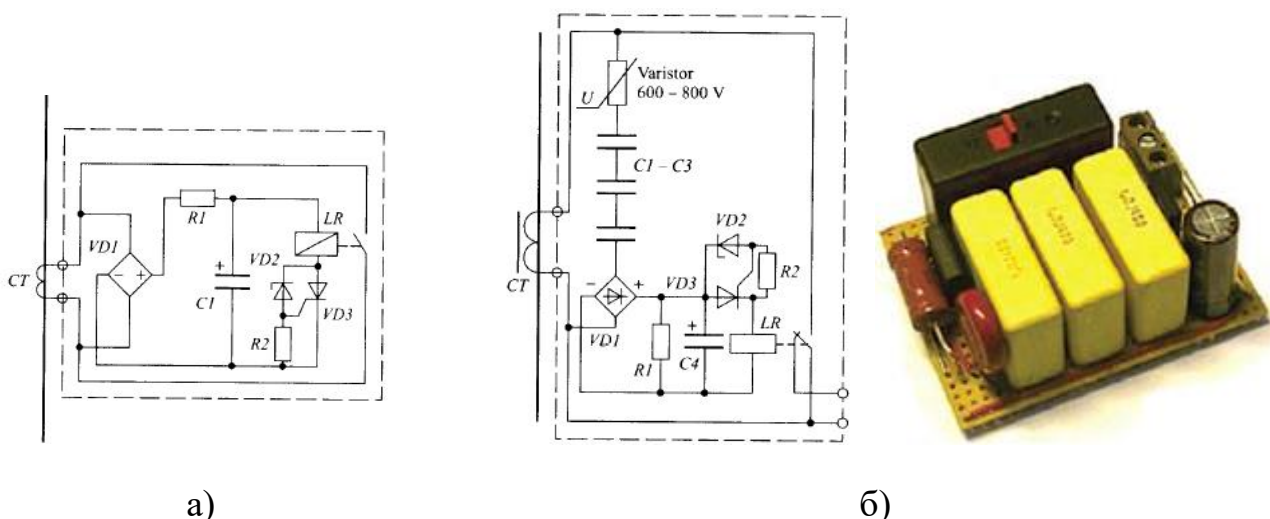


Рисунок 1.9 – Пристрої захисту ТС для вимірювань (а) та релейного захисту (б) [31]

У [32] автор наводить триканальний варіант виконання даного пристрою захисту, кожний незалежний канал якого додатково містить оптрон для під'єднання кіл сигналізації.

Як зазначає сам автор, пристрої захисту знаходились у дослідній експлуатації близько двох років, однак через недостатню дешевизну і недостатньо малі габарити не отримали широкого розповсюдження [32].

У [32, 36, 52] розглядається ще один пристрій захисту, що містить двонаправлений діод 1 і термоконтакт 2, під'єднані до виводів вторинної обмотки ТС (рисунок 1.10, а).

У разі розмикання вторинного кола значне зростання вторинної напруги призводить до пробію діода 1. При цьому напруга різко знижується і починається розігрів структури діода від протікання струму. За досягнення температури спрацювання (як зазначає автор,  $70^{\circ}\text{C}$ ) термоконтакт 2 замикає вторинну обмотку ТС та шунтує коло діода з метою забезпечення його охолодження. Недоліками такого пристрою захисту, на наш погляд, є одноразовість його дії та наявність процесу значного розігрівання структури напівпровідникового елемента, що може призвести до пошкодження обладнання.

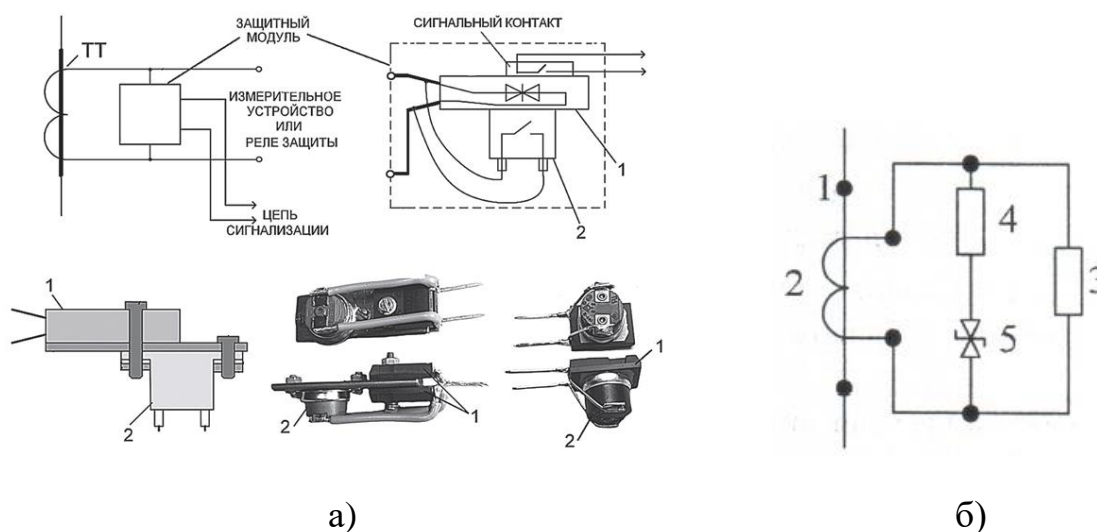
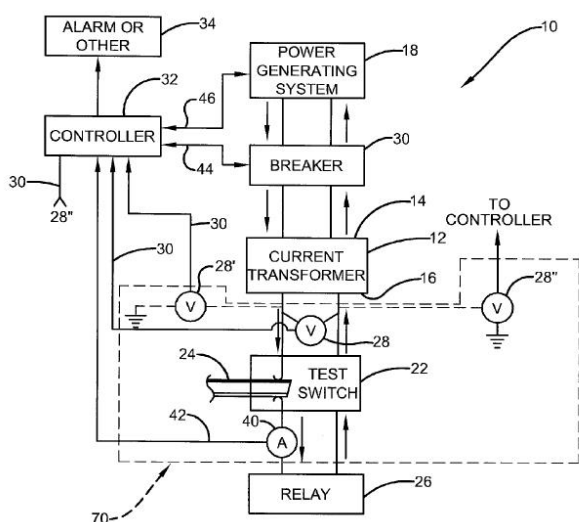


Рисунок 1.10 – Пристрої захисту ТС від перенапруг за розмикання його вторинного кола:

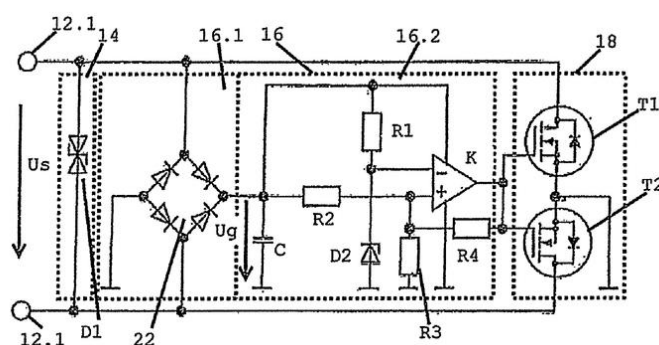
а) з застосуванням двонаправленого діода і термоконтакту [32]; б) з застосуванням стабілітрона і обмежувального опору [35]

Співробітниками кафедри ЕСМ Національного університету «Львівська політехніка» було розроблено ще один пристрій захисту ТС від перенапруг за розмикання його вторинного кола 3, що базується на під'єднанні до виводів вторинної обмотки 2 ТС двонаправленого стабілітрона 5 та обмежувального опору 4 [35] (див. рисунок 1.10, б). За обриву вторинного кола та появи небезпечної перенапруги на виводах вторинної обмотки ТС стабілітрон відкривається і не допускає підвищення вторинної напруги понад допустиму величину. Однак у [35] не наводяться технічні параметри пристрою захисту, внаслідок чого неможливо оцінити його ефективність застосування в діючих електроустановках.

У [53] автором описано методи визначення стану розімкненого вторинного кола ТС. У схемі (рисунок 1.11, а) інформація від датчиків – вольтметри 28, 28', 28'', амперметр 40 – про рівні напруги на виводах вторинної обмотки ТС, наявність струму у вторинному колі, надходить до контролера 32, у якому порівнюється за заданими алгоритмами з уставками (аналіз гармонік сигналів). За обриву кола вторинного навантаження ТС контролер 32, оцінюючи сигнали вторинної напруги 30 і струму 42, діє за заданим алгоритмом 34 – подає сигнал на замикання виводів вторинної обмотки, запускає аварійну сигналізацію тощо.



а) [53]



б) [54]

Рисунок 1.11 – Захист ТС від перенапруг за обриву вторинного кола

У роботі [53] автором не наводиться інформація про технічні параметри та особливості конструктивного виконання пропонованої СЗ, що ускладнює оцінку її вартості та ефективності застосування в діючих електроустановках. Схема захисту, на наш погляд, є габаритною і дороговартісною внаслідок необхідності окремого джерела живлення для забезпечення роботи контролера, облаштування місця його встановлення, прокладення сигнальних кабелів до давачів струму і напруги.

СЗ, наведена у [54] (рисунок 1.11, б), під'єднується до виводів вторинної обмотки ТС і містить: ОПН 14, контрольний модуль 16 (містить випрямляч 16.1 і модуль компаратора 16.2) та модуль потужних транзисторних ключів (MOSFET) 18. За обриву вторинного кола ТС напруга на виводах вторинної обмотки обмежується ОПН до заданого рівня, а контрольний модуль формує сигнал на спрацювання транзисторних ключів Т1, Т2.

Подібна до [54] схема захисту ТС наведена у [55], у якій також використовують ОПН, схему компаратора, транзистора і реле, шунтуючого своїми контактами виводи вторинної обмотки ТС. Недоліками наведених схем захисту ТС [54, 55], на наш погляд, є недостатня надійність та висока вартість елементів.

За кордоном промисловістю серійно випускаються кілька типів захисних модулів для запобігання роботі ТС з розімкненими вторинними колами [56 – 58, 59] (рисунок 1.12).



а) [56]

б) [57]

в) [58]

Рисунок 1.12 – Захисні модулі для запобігання роботі ТС з розімкненим вторинним КОЛОМ



У [56] представлено одно- та триелементний захисні модулі, побудовані на напівпровідникових швидкісних керованих тиристорних ключах (рисунок 1.12, а). У разі перевищення вторинною напругою допустимої величини пристрій спрацьовує і замикає вторинну обмотку ТС, зменшуючи при цьому величину напруги приблизно до 2 В менше, ніж за чверть періоду.

У [57] наведено тестовий пристрій, що дозволяє під'єднати до контрольованих вторинних кіл вимірювальні пристрої через спеціальні тестові ключі (ABB FT test switches) (рисунок 1.12, б). У ньому передбачена функція швидкого замикання вторинної обмотки ТС за розмикання його вторинного кола.

Однак принципові схеми та елементна база виконання захистів у [56, 57] не наводяться, що не дозволяє в достатній мірі оцінити роботу СЗ. Також в літературі не наводиться інформація про роботу пропонованих захистів в діючих електроустановках за обривів вторинних кіл ТС.

У [58] представлено захисний пристрій, що базується на під'єднанні до вторинної обмотки ТС варистора та паралельно йому термореле, встановлених на теплопровідній пластині (рисунок 1.12, в). За розмикання вторинного кола варистор відкривається і обмежує вторинну напругу до допустимого рівня, а термореле контролює температуру пристрою захисту.

У пристрої захисту, наведеному у [59], захисним елементом ТС від вторинних перенапруг є варистор (ZnO), який під'єднують до виводів вторинної обмотки ТС. Недоліком пропонованого пристрою захисту від перенапруг, на наш погляд, є відносно мала напруга спрацювання, що може призвести до хибного спрацювання захисту потужних ТС з вторинним номінальним струмом 1 А за протікання у первинній обмотці струмів КЗ, за яких вторинна напруга значно перевищує напругу спрацювання пристрою захисту.

Для моніторингу параметрів вторинних кіл ТС у [60] авторами запропонована система моніторингу, реалізована на базі моніторингового апаратно-програмного комплексу «Регіна». Система моніторингу контролює параметри вторинного навантаження, основної ізоляції ТС, визначає похибки трансформації первинного струму, а також дозволяє визначати і попереджати про режим обриву вторинного кола ТС.

Однак, система не містить пристроїв захисту ТС і його кіл навантаження від вторинних перенапруг, індукованих за обриву у цих колах, що не забезпечує повну безпеку експлуатації обладнання та роботи оперативного персоналу.

Підсумовуючи вище сказане, на наш погляд, основними недоліками відомих пристроїв захисту ТС від вторинних перенапруг є: відсутність гальванічного розділення кіл вторинного навантаження ТС та кіл пристроїв захисту, що зумовлює можливий витік вторинного струму у кола захисту в нормальному режимі роботи ТС (що недопустимо, особливо для кіл струму систем комерційного обліку споживання електричної енергії), а також підвищує ймовірність пошкодження елементів схем пристроїв захисту (конденсатори, напівпровідникові елементи тощо) від дії вторинних перенапруг і в результаті призводить до відмови захисту; значний нагрів структури напівпровідникових елементів за спрацювання пристроїв захисту внаслідок тривалого протікання через них струму; великі вартість та габарити.

### **1.3 Сучасні нетрадиційні давачі струму приєднань електричних мереж промислової частоти**

#### **1.3.1 Трансформатори струму з магнітним осердям з немагнітним проміжком**

ТС повинні забезпечувати відповідну точність трансформації струму за всіх режимів їх роботи. Як уже зазначалося, за перехідних режимів роботи значно зростають струмові похибки ТС внаслідок сильного насичення їх магнітних кіл за наявності аперіодичної складової в первинному надструмі ТС. Для каскадних ТС на відміну від одноступеневих ТС зниження вторинного навантаження не сприяє значному зменшенню максимальної перехідної похибки, оскільки перші ще й містять значний внутрішній індуктивний опір [61]. За таких умов можливі порушення роботи пристроїв захисту та автоматики.

Тому для зниження впливу аперіодичної складової струму та усунення залишкової магнітної індукції в осердя ТС запропоновано вводити немагнітний проміжок [16, 20, 61 – 71]. Такі ТС мають практично лінійну характеристику намагнічування,

через що й отримали назву *лінійних*. Перевагами лінійних трансформаторів над трансформаторами з суцільним магнітопроводом є понижена залежність їх похибок від величини первинного струму, відсутність впливу залишкової магнітної індукції тощо. Однак введення немагнітного зазору зумовлює зростання похибок та зменшення потужності ТС порівняно з трансформатором з суцільним магнітопроводом.

Варто відмітити також залежність похибок лінійного ТС від його вторинного навантаження [61].

Великі похибки лінійного ТС зумовлюють труднощі у забезпеченні необхідного класу точності його роботи за нормальних та перехідних режимів.

В [62] розглянуто вплив отворів у магнітопроводі ТС на його роботу за усталених та перехідних режимів. Таке виконання магнітопроводу порівняно з замкнутим осердям дозволяє значно зменшити похибки трансформатора за перехідних режимів при великих кратностях первинного струму та постійних часу згасання його аперіодичної складової. Однак похибки за усталених режимів все ж будуть більшими.

Крім ТС з одним чи декількома суцільними немагнітними проміжками застосовуються і трансформатори з частковим немагнітним проміжком у магнітопроводі. За усталеного режиму короткого замикання ці трансформатори працюють із незначною похибкою  $\varepsilon_{уст}$ , зумовленою нерозрізаною частиною осердя, а у перехідному режимі допустима похибка трансформатора  $\varepsilon_{доп}$  забезпечується його розрізаною частиною.

Таке виконання ТС з частковими немагнітним проміжками в осерді дозволяє підключати до них як вимірювальні прилади, так і пристрої релейного захисту й автоматики. Недоліком же таких трансформаторів є спотворення кривої періодичної складової вторинного струму за перехідних режимів [20].

У каскадних ТС виконання осердя трансформатора верхнього ступеню з частковим немагнітним проміжком супроводжується певними труднощами, зумовленими гранично допустимим перерізом магнітопроводу. Прийнятний згідно конструктивних умов переріз все ж зумовлює значну абсолютну похибку трансформатора. Для зменшення перерізу осердя верхнього ступеню його частину, призначену для вимірювань, виконують із невеликим немагнітним проміжком та застосовують ємнісну компенсацію похибок [20].

Магнітопроводи нижнього ступеню каскадного ТС з вторинними обмотками, призначеними для підключення пристроїв РЗА, доцільно виконувати з невеликим немагнітним проміжком, що забезпечує лінійність їх характеристик. Довжину цих проміжків обирають з умов обмеження магнітної індукції в осерді граничним значенням та усунення впливу залишкової магнітної індукції [20].

Для зменшення похибок лінійного ТС застосовують ємнісну компенсацію його струму намагнічування та зменшення впливу магнітного потоку розсіяння вторинної обмотки, що полягає у під'єднанні до виводів цієї обмотки компенсуючого активно-ємнісного навантаження. У каскадних ТС ємнісну компенсацію застосовують для верхнього та за наявності – проміжного ступенів [20, 63 – 67].

Внаслідок уведення ємнісної компенсації у вторинному струмі компенсованого каскадного ТС крім вимушених періодичної та аперіодичної складових струму з'являються ще й вільні згасаючі гармонічні складові. Їх амплітуда, частота і ступінь згасання залежать від параметрів елементів каскадного ТС [64, 67]. Ці вільні згасаючі складові можуть спричиняти помилкові спрацювання пристроїв РЗА, що вважається одним із основних недоліків компенсованого ТС.

Для зменшення впливу вільних гармонічних складових необхідне застосування частотних фільтрів, встановлених перед вимірними органами релейних захистів. Як зазначається в [67], для запобігання неправильної роботи захисту достатньо збільшити частоту вільних гармонічних складових до 180 – 200 Гц. Для цього магнітопровід верхнього ступеню каскадного ТС виконують комбінованим у вигляді двох осердь з різними немагнітними проміжками, що дозволяє значно зменшити вплив похибок таких ТС на роботу швидкодіяного захисту.

У [15, 20, 68 – 71] наведено рівняння струмів намагнічування одноступеневих та каскадних ТС з лінійними характеристиками намагнічування за перехідних режимів роботи. Як зазначають автори, отримані результати також можна використовувати для якісного аналізу перехідних режимів роботи ТС з нелінійними характеристиками намагнічування.

### 1.3.2 Давачі струму з використанням ефекту Фарадея

Впровадження в ЕЕС цифрових пристроїв вимірювання, РЗА та керування постійно супроводжувалося й підвищенням вимог до надійності та технічних характеристик вимірювальних ТС електромагнітного типу. Ряд їх недоліків, таких як явища магнітного гістерезису, залишкового намагнічування та насичення магнітопроводів, що обумовлюють погіршення точності вимірювання струму, труднощі виконання високовольтної ізоляції ТС надвисокої напруги, низька пожежна стійкість паперово-оливної ізоляції, втрата ізоляційних властивостей у процесі експлуатації та інші, зумовили необхідність створення якісно нових типів вимірювальних перетворювачів струму [72]. Одними з таких перетворювачів є оптико-електронні ТС (ОТС).

Принцип роботи таких ТС полягає у використанні магнітооптичного ефекту Фарадея – обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла в оптично активному середовищі під дією створеного вимірюваним струмом магнітного поля. Кут повороту площини поляризації світла в радіанах визначається за формулою [73, 74]

$$\theta = V \cdot l \cdot H, \quad (1.5)$$

де  $V$  – постійна Верде, яка залежить від властивостей вибраного матеріалу комірки Фарадея, його температури та довжини хвилі світла;

$l$  – довжина шляху світлового променя вздовж силової лінії магнітного поля в комірці Фарадея;

$H$  – напруженість магнітного поля, створеного вимірюваним струмом.

Як бачимо, вимірявши кут повороту площини поляризації світла, можна визначити величину напруженості магнітного поля і відповідно значення струму, який створив це поле. Знак кута  $\theta$  зв'язаний з напрямом магнітного поля і не залежить від напрямку розповсюдження променя світла відносно цього поля [73].

В якості оптично активного середовища в комірках Фарадея використовують скло з вмістом оксиду свинцю або плавлений кварц. Досить високу магнітну чутливість мають також ферит-гранатові плівки [75].

Вимірювання кута повороту площини поляризації світла в змінному магнітному полі необхідно проводити окремо для додатного та від'ємного періодів первинного струму з подальшою синхронізацією результатів [76].

На рисунку 1.13 наведена структурна схема ОТС [75].

У ОТС поляризований промінь світла з заземленого джерела 1 по оптичному волокну надходить у комірку Фарадея 2. Внаслідок впливу магнітного потоку, створеного первинним вимірювальним струмом, на оптично активне середовище комірки світловий промінь змінює свій вектор поляризації і далі по оптичному волокну повертається назад до аналізатора світла 3, фотоперетворювача і підсилювача 4. Тут фотосигнал підсилюється і перетворюється в електричний струм, пропорційний первинному струмові ОТС.

Таким чином, магнітооптична комірка Фарадея, що знаходиться під високою напругою, та заземлений приймальний пристрій зв'язані між собою лише світловим потоком.

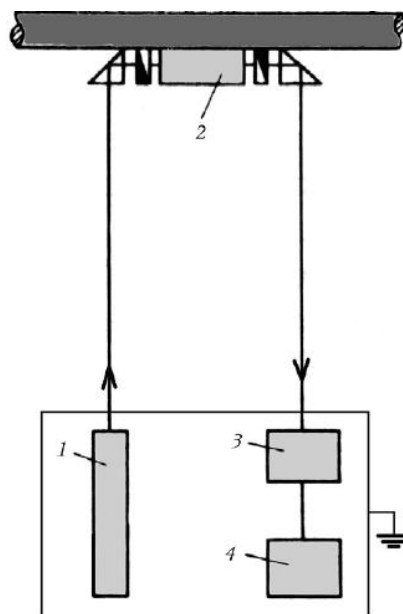


Рисунок 1.13 – Структурна схема ОТС:

1 – джерело поляризованого світла; 2 – оптико-електронний перетворювач;  
3 – аналізатор світла; 4 – фотоперетворювач і підсилювач з вихідним виконавчим елементом

Наведемо коротко конструктивне виконання ОТС. Оптичний світловод складається з циліндричного скляного волокна, розміщеного в захисній оболонці. Скляне волокно ж містить світлопровідне середовище, що виконане з чистого кварцового скла і поміщене в оболонку з іншого скла чи полімеру з меншим показником заломлення для внутрішнього відбиття світлового променя.

Крім оптичного давача в якості давача вхідної інформації в ОТС також можуть використовувати давачі на основі ефектів Холла, Гаусса, пояс Роговського тощо. Вхідний сигнал від цих давачів за визначеним законом модулює інтенсивність світлового потоку, який передають по оптичному волокну до приймального пристрою на потенціалі землі. В останньому здійснюється зворотна трансформація світлового потоку у вимірний електричний сигнал [72, 77].

Сьогодні випускають ОТС на робочу напругу від 69 до 765 кВ з шириною їх вхідного частотного діапазону від 0,5 Гц до 6 кГц та класами точності 0,2S для вимірних кіл і 5P для кіл РЗА [72].

На рисунку 1.14 зображено зовнішній вигляд ОТС типу ОИЦТТ-110 на номінальну напругу 110 кВ [75].

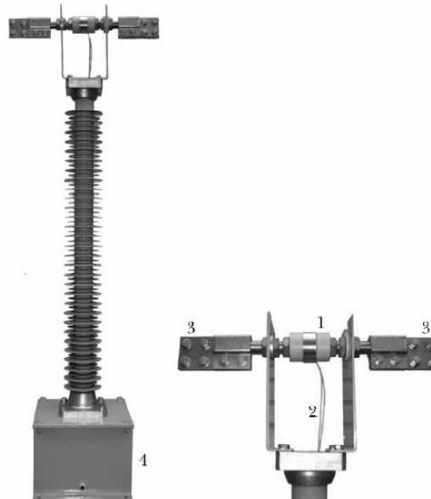


Рисунок 1.14 – Зовнішній вигляд ОТС типу ОИЦТТ-110:

1 – комірка Фарадея; 2 – оптичне волокно; 3 – струмові виводи; 4 – електронний перетворювач

Основними перевагами ОТС є [72, 73]:

- 1) можливість вимірювання як змінного, так і постійного й імпульсного струмів різних рівнів робочих напруг електричних мереж;
- 2) малоінерційне, з високою точністю, вимірювальне перетворення сигналів за відсутності явищ гістерезису, магнітного насичення та залишкового намагнічування, характерних для електромагнітних ТС;
- 3) широкий динамічний та частотний діапазони вимірювань, що дозволяє проводити повний аналіз кількості та якості електроенергії в частині її гармонічного складу, а також аналіз перехідних процесів в ЕЕС;
- 4) можливість інтеграції у вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів;
- 5) малі масо-габаритні параметри трансформаторів, повна їх екологічна, пожежо-, вибухо- та електробезпека;

Однак на думку фахівців [75, 78] та нашу думку, ряд властивостей ОТС, зокрема, широка смуга пропускання сигналу, висока стійкість до електромагнітних завад, довговічність, стабільність параметрів, простота та надійність конструктивного виконання, низька сприйнятливність до впливу вібрацій і зміни температури, не дають їм значних переваг, оскільки притаманні й традиційним ТС.

Тобто витікає, що ОТС доцільно застосовувати, в першу чергу, в мережах високих та надвисоких напруг, коли вартість ізоляції звичайного ТС є дуже високою, за великих кратностей первинного струму, за яких традиційні трансформатори входять у режим насичення [75, 78].

До основних же недоліків ОТС можна віднести необхідність встановлення джерел живлення для блоків перетворення електричного сигналу в оптичний і навпаки, незначна потужність вихідних кіл для приведення в дію електромеханічних захистів і необхідність використання додаткових пристроїв для її підвищення, висока вартість виготовлення.

Таким чином, впровадження ОТС залишається перспективним рішенням, однак на сьогоднішній час для наших ЕЕС необхідно забезпечити відповідну технічну і нормативну базу для експлуатації таких типів ТС.



### 1.3.3 Давачі струму з застосуванням поясу Роговського

Пояс (котушка) Роговського являє собою тороїдальний соленоїд з осердям з неферомагнітного матеріалу, на який рівномірно намотана вторинна обмотка. Соленоїд охоплює струмоведучий провід, струм якого необхідно виміряти. Відсутність магнітопроводу у поясі Роговського забезпечує лінійність його характеристик, високу точність і надійність [79]. Котушки можуть виконуватися як рознімними, так і нерознімними. З'єднання кінців рознімних котушок може здійснюватися встик або внахльост.

Оскільки напруга на виході котушки Роговського пропорційна похідній струму по часу, то для отримання кривої струму використовують відповідні аналогові або цифрові інтегратори [79, 80].

Основними перевагами поясу Роговського є його низька вартість, можливість вимірювання струмів у широкому частотному діапазоні, відсутність насичення осердя, мала потужність споживання, низька температурна залежність. Його ж недоліками є чутливість до зовнішніх магнітних полів, можливість вимірювання лише змінного струму, наявність зсуву по фазі між первинним струмом та вторинною напругою, що зумовлює необхідність використання інтеграторів для отримання вихідного сигналу [79, 74, 80].

На рисунку 1.15 наведено основні конструкції котушок Роговського [79].

Підводячи підсумки, завдяки своїм перевагам котушки Роговського зарекомендували себе як надійні давачі струму. Закордонними фірмами-виробниками (Eltek, ABB Ais, Taehwatrans Co., Rocoil Rogowski Coils тощо) представлена різноманітна типологія котушок Роговського для застосування в ЕЕС. Також перспективним напрямом є розробка цифрових ТС з поясом Роговського у якості вимірювального давача струму.



Рисунок 1.15 – Конструкції котушок Роговського:

а) котушка з гвинтовим з'єднанням встик фірми Rosoil; б) котушка із з'єднанням внахльост (RC1000) фірми Eltec; в) нерознімна котушка Роговського (BU 3410) фірми АВВ Аis

#### 1.4 Висновки до розділу 1

1. Розглянуті конструкції і технічні характеристики ТС з замкнутим магнітопроводом та особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 1150 кВ промислової частоти.

2. Встановлено, що вимірювальні ТС з замкнутим магнітопроводом, незважаючи на їх високу надійність та експлуатаційну придатність мають і суттєві недоліки, що, за певних режимів роботи ТС чи електромережі, призводять до спотворення переданої до вимірювальних пристроїв інформації про вимірюваний струм. Також за таких особливих режимів можливі пошкодження цих трансформаторів, або поява небезпеки для експлуатаційного персоналу, чи пошкодження апаратури, підключеної до вторинних обмоток цих ТС.

3. Дана критична оцінка відомих заходів щодо покращення експлуатаційних характеристик ТС з замкнутим магнітопроводом, зокрема – зменшення впливів перехідних процесів в ТС та електромережах промислової частоти на точність вимірювання струму і на хибну роботу пристроїв РЗА. Відмічено також вищу експлуатаційну надійність та пожежобезпеку ТС з елегазовою ізоляцією порівняно з паперово-оливною ізоляцією.

4. Розглянуті промислові конструкції та принцип роботи нетрадиційних ТС, зокрема – ОТС з застосуванням в якості давачів вхідної інформації давачів на основі магнітооптичного ефекту Фарадея, ефектів Холла, Гаусса, а також електромагнітного ТС чи поясу Роговського тощо. Відмічено переваги таких ТС порівняно з традиційними та проведена оцінка техніко-економічного застосування їх у високовольтних мережах 500 – 1150 кВ промислової частоти. Показано, що для існуючих мереж нетрадиційні ТС поки що практично не застосовують, враховуючи їх високу вартість та особливості експлуатації.

5. Проведено аналіз публікацій з результатами досліджень режимів роботи ТС за обриву кола вторинної обмотки цих трансформаторів, а також джерела з наведеними описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів. Проведений аналіз цих джерел підтверджує доцільність продовження досліджень таких режимів та розробки відповідних СЗ ТС від вторинних перенапруг.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД ОЦІНКИ МАКСИМАЛЬНОЇ АМПЛІТУДИ УСТАЛЕНОЇ НАПРУГИ НА РОЗІМКНЕНИХ ВИВОДАХ ВТОРИННОЇ ОБМОТКИ ОДНОСТУПЕНЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

#### 2.1 Спрощена розрахункова схема одноступеневого трансформатора струму за розімкнутого вторинного кола

Розглянемо роботу ТС за розімкненого його вторинного кола. Як уже зазначалося у попередньому розділі, такий режим роботи трансформатора є аварійним внаслідок індукування на виводах його вторинної обмотки високовольтичних імпульсів напруги, коли у первинній обмотці ТС протікає відповідний струм.

На рисунку 2.1 наведена загальновідома спрощена розрахункова схема ТС з розімкненим його вторинним колом [14].

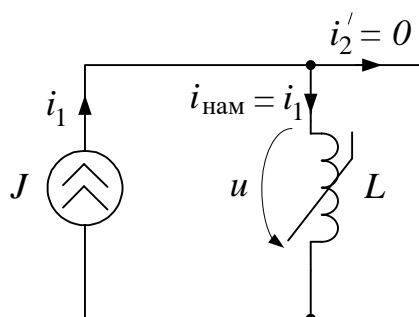


Рисунок 2.1 – Спрощена розрахункова схема ідеального ТС з розімкненим вторинним колом

Джерело струму  $J$  моделює первинний струм  $i_1$  ТС. Вітка намагнічування представлена нелінійною індуктивністю  $L$ , параметри якої задаються відповідно до вебер-амперної характеристики (ВБАХ)  $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$  первинної обмотки ТС.

Спрощена розрахункова схема не враховує втрати активної потужності на гістерезис і вихрові струми в осерді ТС (приймаємо  $r_{\text{нам}} \rightarrow \infty$ ), а також втрати активної потужності в його обмотках.

Як зазначалося у розділі 1, опір первинної обмотки не впливає на режим роботи ТС, тому його в розрахунковій схемі не враховують. Опором вторинної обмотки також нехтують у заданому режимі, оскільки вторинне коло розімкнене.

З метою спрощення розрахунку режимів роботи ТС з замкненими осердями їх нелінійні криві намагнічування апроксимують кусково-лінійними відрізками. Така апроксимація кривої намагнічування забезпечує наочність інтерпретації фізичних процесів зі збереженням допустимої точності розрахунків [14].

У спрощеній розрахунковій схемі ТС його ВБАХ обмоток часто задають двокусково-лінійною апроксимованою характеристикою (рисунок 2.2) [14].

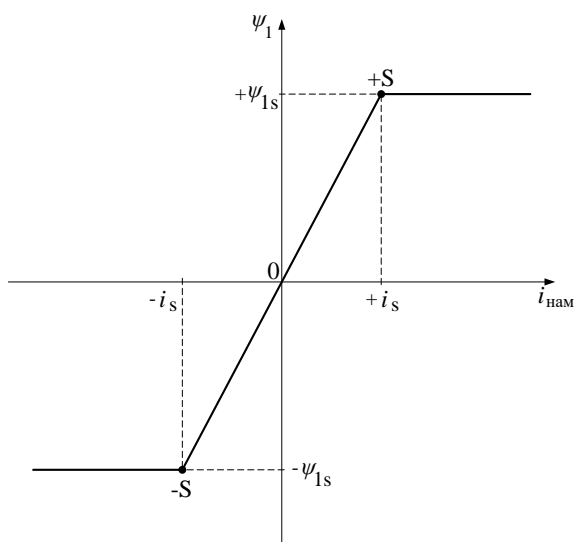


Рисунок 2.2 – Двокусково-лінійна ВБАХ первинної обмотки ТС

Лінійна похила частина кривої на проміжку зміни струму намагнічування  $(-i_s; +i_s)$  відповідає ненасиченому стану магнітопроводу трансформатора. Точки  $+S$ ,  $-S$  (від «Saturation» – насичення) відповідають границям входження осердя в зону насичення. Горизонтальні ділянки кривої характеризують роботу ТС за насичення його осердя з відповідним значенням граничного магнітного потоку (потокочеплення первинної обмотки).

## 2.2 Потокозчеплення обмоток трансформатора струму та напруга на розімкнених виводах його вторинної обмотки за протікання синусоїдного первинного струму

На рисунку 2.3 наведено координати усталеного режиму роботи ТС за розімкненого його вторинного кола при протіканні у первинній обмотці трансформатора синусоїдного струму. Для наглядності, за великої швидкості зміни первинного синусоїдного струму, коли осердя ТС ненасичене, відрізки синусоїди замінюють відповідними лінійними відрізками з постійним нахилом.

За розмикання вторинного кола ТС його намагнічувальний струм  $i_{\text{нам}}$  (див. рисунок 2.1) стає рівним первинному струму  $i_1$ . За такого режиму крива потокозчеплення первинної обмотки ТС  $\Psi_1 = f(t)$  (рисунок 2.3, в) складена з ділянок з лінійним зростанням (спаданням) потокозчеплення (за режиму ненасиченого магнітопроводу) та горизонтальних ділянок (за насичення осердя), на яких потокозчеплення постійне та сягає значень  $\pm\Psi_{1s}$ .

Вторинна напруга  $u$  (рисунок 2.3, г), зведена до первинної обмотки ТС, рівна

$$u = -\frac{d\Psi_1}{dt} \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t}. \quad (2.1)$$

Так для проміжку часу  $[0; t_1]$  запишемо

$$u \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t} = -\frac{\Psi_{1s} - 0}{t_1 - 0} = -\frac{\Psi_{1s}}{t_1},$$

а для проміжку часу  $[t_2; t_3]$  –

$$u \approx -\frac{\Delta\Psi_1}{\Delta t} = -\frac{-\Psi_{1s} - \Psi_{1s}}{t_3 - t_2} = -\frac{(-2 \cdot \Psi_{1s})}{2 \cdot t_1} = \frac{\Psi_{1s}}{t_1}.$$

Аналогічні вирази можна записати і для інших проміжків зміни потокозчеплення.

Як видно з рисунку 2.3, за насичення магнітопроводу, коли потокозчеплення первинної обмотки у часі не змінюється (за реальних процесів змінюється незначно), похідна  $d\Psi_1/dt$  і відповідно зведена вторинна напруга  $u$  рівні нулю (за реальних процесів модуль напруги змінюється незначно, як правило, в межах до 1000 В). Коли ж осердя ТС ненасичене, то швидка зміна потокозчеплення в інтервалах  $[\Psi_{1s}; -\Psi_{1s}]$  та  $[-\Psi_{1s}; \Psi_{1s}]$  індукуює у вторинній обмотці ТС напруги з амплітудами відповідно  $+U_m$  та  $-U_m$ , які за протікання відповідних значень первинного струму  $i_1$  можуть бути значно більші за 1000 В (допустима напруга для ізоляції вторинних кіл систем релейного захисту та автоматики, підключених до вторинної обмотки ТС [11]).

Вищенаведені розрахунки координат режиму роботи ТС у відповідності до рисунку 2.3 можуть бути використані в методі оцінки максимальної амплітуди усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки одноступеневого ТС.

Як зазначено вище, за реальних процесів, коли осердя ТС насичене, модуль напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки змінюється незначно, однак не дорівнює нулю. Для більш чіткого відтворення форми кривої цієї напруги доцільно врахувати зміну потокозчеплення обмотки і під час насичення осердя ТС. У цьому випадку відрізок двокускової ВБАХ первинної обмотки ТС в області насичення осердя матиме кут нахилу до осі абсцис не рівний нулю, але значно менший від такого ж кута нахилу відрізка для області ненасиченого осердя.

Координати режиму за розімкненого вторинного кола ТС з урахуванням зміни потокозчеплення первинної обмотки за насиченого осердя наведені на рисунку 2.4 [3].

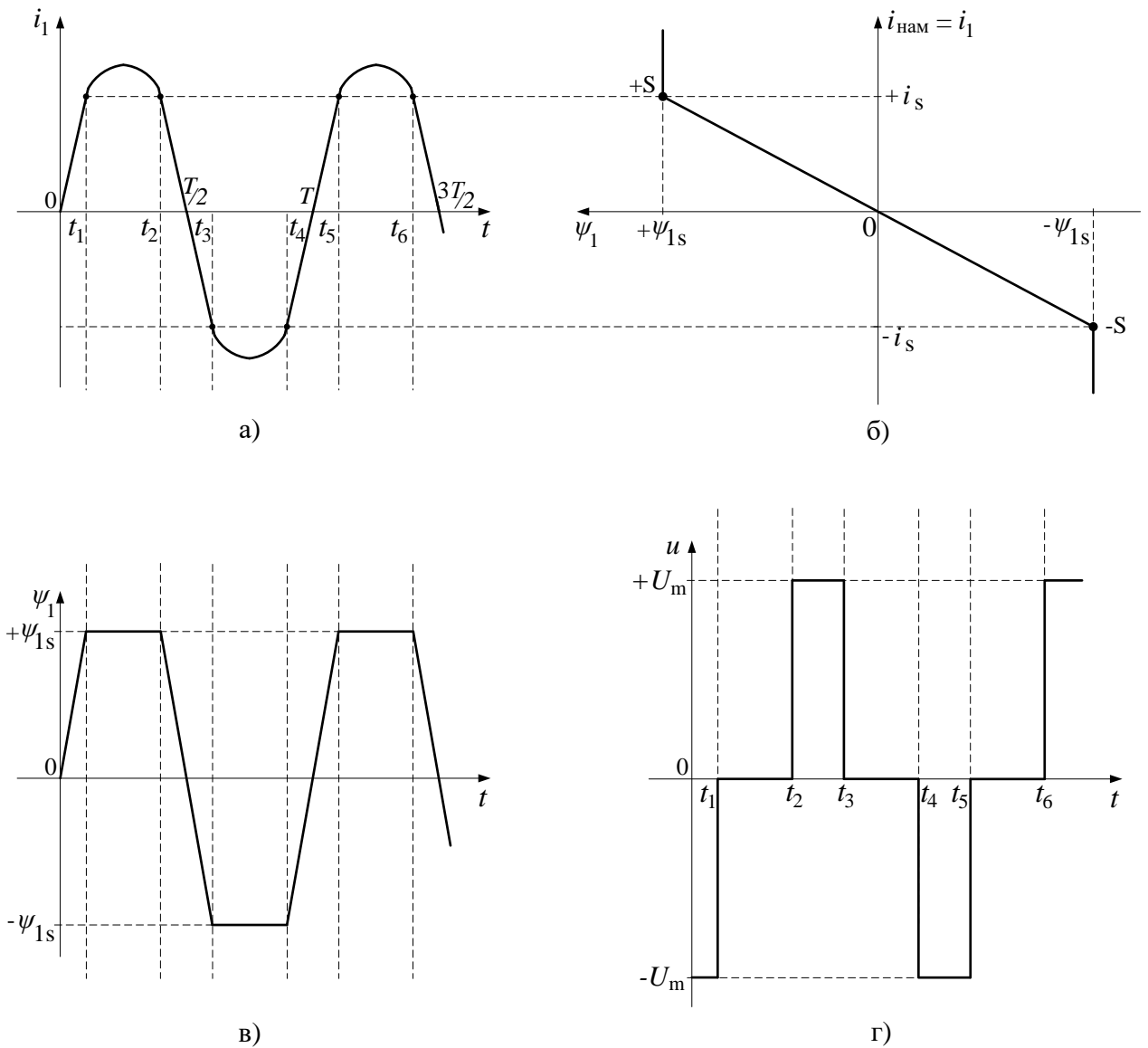


Рисунок 2.3 – Координати усталеного режиму роботи ТС за розімкненого вторинного кола

Як видно з рисунка 2.4, за насиченого осердя модуль приросту потокозчеплення становить  $(\Psi_{1m} - \Psi_{1s})$ , що значно менше такого приросту  $(2 \cdot \Psi_{1s})$  за ненасиченого осердя. При цьому, наприклад, за додатних значень  $\Psi_1$ , коли осердя насичене, приріст потокозчеплення відбувається за інтервал часу  $(t_2 - t_1)$ , що значно більший за інтервал часу  $(t_3 - t_2)$ , коли осердя ненасичене. Такі ж співвідношення параметрів режиму матимемо і за від'ємних значень потокозчеплення.

В результаті, як видно з рисунку 2.4, за ненасиченого осердя, модуль амплітуди напруги  $U_m$  значно більший за модуль напруги  $u_1$ , коли осердя ТС насичене. Також,



за такої апроксимації двокускової ВБАХ первинної обмотки ТС має місце більш чітке відтворення форми кривої напруги на виводах розімкненої його вторинної обмотки. Водночас і частотний спектр такої напруги більш близький до реального, що неабияк важливо для можливості створення ефективного частотного реагуючого органу системи захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл ТС.

Координати режиму роботи ТС (рисунок 2.4) розраховують аналогічно виразам, наведеним вище для розрахунку режиму роботи ТС (рисунок 2.3).

Наведені розрахункові осцилограми наглядно характеризують особливості та небезпеку режиму роботи ТС з розімкненим вторинним колом.

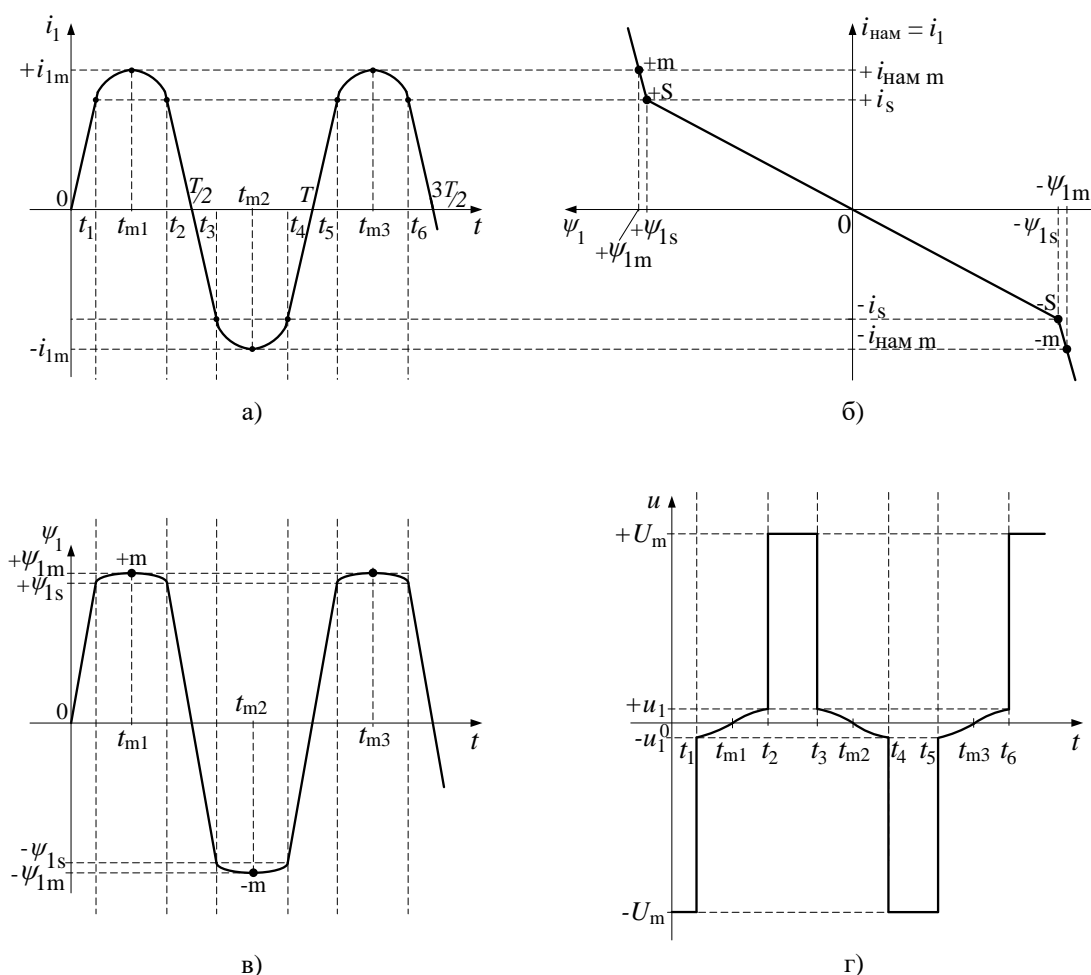


Рисунок 2.4 – Координати режиму за розімкненого вторинного кола ТС з урахуванням зміни потокозчеплення первинної обмотки за насиченого осердя

## 2.3 Метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки трансформатора струму за протікання синусоїдного первинного струму

### 2.3.1 Застосування для аналітичних розрахунків двокускової вебер-амперної характеристики обмоток трансформатора струму

Для усталеного режиму роботи ТС запропоновано простий метод визначення максимальної амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання синусоїдного первинного струму [2]. При цьому користуємось двокусково-лінійною ВБАХ обмоток ТС. Застосування запропонованого методу дозволить швидко розрахувати амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки одноступеневого ТС за протікання синусоїдного первинного струму, використовуючи прості розрахункові формули – без необхідності комп'ютерного моделювання.

Для розрахунку амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС з характеристики намагнічування магнітопроводу трансформатора визначають координати точки «коліна»: магнітну індукцію  $B_s$ , Тл, та напруженість магнітного поля  $H_s$ , А/м.

Далі визначаємо потокозчеплення вторинної обмотки,  $\Psi_{2s}$ , за формулою

$$\Psi_{2s} = B_s \cdot w_2 \cdot S_{ст}, \quad (2.2)$$

де  $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки ТС;

$S_{ст}$  – площа поперечного перерізу сталі магнітопроводу ТС, м<sup>2</sup>.

Визначаємо миттєве значення струму,  $i_{1s}$ , А, первинної обмотки ТС для точки «коліна»

$$i_{1s} = \frac{H_s \cdot l}{w_1}, \quad (2.3)$$

де  $l$  – середня довжина магнітної силової лінії осердя, м;

$w_1$  – кількість витків первинної обмотки ТС.

Миттєве значення первинного струму рівне

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft), \quad (2.4)$$

де  $I_{1m}$  – амплітуда первинного синусоїдного струму ТС, А;

$f$  – промислова частота, рівна 50 Гц.

Визначаємо час  $t_s$ , с, коли миттєве значення первинного струму  $i_1$  трансформатора досягне величини  $i_{1s}$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(i_{1s}/I_{1m}). \quad (2.5)$$

За час  $\Delta t = 2 \cdot t_s$ , коли осердя перемагнітиться від значення магнітної індукції  $(-B_s)$  до значення  $(+B_s)$ , приріст потокозчеплення вторинної обмотки становитиме  $\Delta\Psi_{2s} = 2 \cdot \Psi_{2s}$ .

Тоді амплітуда напруги, В, на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора визначатиметься за формулою

$$U_{2m} = \frac{\Delta\Psi_{2s}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \Psi_{2s}}{2 \cdot t_s} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s}. \quad (2.6)$$

Слід відмітити, що всі наведені співвідношення справедливі за умови лінійної зміни потокозчеплення обмоток ТС, коли  $H_s \ll H_m = I_{1m} \cdot w_1/l$ . За малих значень амплітуди первинного синусоїдного струму  $I_{1m}$  слід користуватися формулами, наведеними нижче.

Модуль піку перенапруги, зведеної до первинної обмотки ТС (за розімкнутої його вторинної обмотки), визначаємо за виразом

$$u_1 = \left. \frac{d\Psi_1}{dt} \right| (i_1 = 0), \quad (2.7)$$

тому що, коли  $i_1$  рівний нулю ( $t = 0$ ), похідні

$$di_1/dt | (t = 0) = d(I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft))/dt | (t = 0) = 2\pi f I_{1m} \cdot \cos(2\pi ft) | (t = 0) = 2\pi f I_{1m}$$

і, як наслідок, похідні  $d\Psi_1/dt$  досягають своїх максимальних значень.

Точне визначення похідної потокозчеплення за струмом  $d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)$  можливе, коли відома залежність динамічної магнітної проникності матеріалу осердя ТС  $\mu_d = dB/dH = f(H)$ .

Наближено  $d\Psi_1/di_1 | (i_1 = 0)$  можна визначити, спрямляючи початковий відрізок кривої намагнічування  $B(H)$ , що і є основним джерелом похибки розрахунку у методі.

Запишемо:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{d\Psi_1}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt}; \quad (2.8)$$

$$\Psi_1 = B \cdot w_1 \cdot S_{ст}; \quad (2.9)$$

$$\Psi_2 = B \cdot w_2 \cdot S_{ст}; \quad (2.10)$$

$$i_1 = \frac{H \cdot l}{w_1}. \quad (2.11)$$

З (2.9, 2.10) отримаємо

$$\Psi_1 = \Psi_2 \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.12)$$

Співвідношення (2.12) справедливе, коли коефіцієнт зв'язку  $K$  між первинною і вторинною обмотками близький до одиниці, що має місце за ненасиченого осердя ТС ( $i_1 \approx 0$ ).

Враховуючи, що пік напруги на виводах вторинної обмотки трансформатора рівний

$$U_{2m} = \frac{d\Psi_2}{dt} \Big|_{(i_1 = 0)}, \quad (2.13)$$

отримаємо з (2.8, 2.12)

$$U_{2m} = [d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)}] \cdot [di_1/dt \Big|_{(i_1 = 0)}] \cdot w_2/w_1. \quad (2.14)$$

За синусоїдного первинного струму ТС

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (2.15)$$

значення похідних у виразі (2.14) з урахуванням (2.9, 2.11) будуть рівні:

$$d\Psi_1/di_1 \Big|_{(i_1 = 0)} = \frac{S_{ст} \cdot w_1^2}{l} \cdot [dB/dH \Big|_{(H = 0)}]; \quad (2.16)$$

$$di_1/dt \Big|_{(i_1 = 0)} = 2\pi f I_{1m}. \quad (2.17)$$

Для лінеаризованого початкового відрізка кривої намагнічування  $B(H)$  можемо записати

$$dB/dH \Big|_{(H = 0)} \approx \Delta B/\Delta H \Big|_{(H = 0)}. \quad (2.18)$$

Підставивши (2.16, 2.17) з врахуванням (2.18) у (2.14), отримаємо остаточний розрахунковий вираз для визначення піку напруги  $U_{2m}$ , В, на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС

$$U_{2m} = 2\pi f \cdot S_{ст} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot [\Delta B/\Delta H \Big|_{(H = 0)}]/l. \quad (2.19)$$

Описані вище аналітичні вирази дають змогу за відомими параметрами обмоток і магнітного кола ТС швидко та з достатньою точністю розрахувати для усталених режимів величини амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за різних значень синусоїдного первинного струму. При цьому виключається необхідність створення громіздких розрахункових схем трансформатора та моделювання його характеристики намагнічування.

### **2.3.2 Застосування для аналітичних розрахунків апроксимації $i_{\text{нам}} = a \cdot sh(b \cdot \Psi_1)$ вебер-амперної характеристики первинної обмотки трансформатора струму**

Кусково-лінійна апроксимація експериментальної кривої намагнічування матеріалу магнітопроводу забезпечує допустиму точність розрахунку магнітних кіл з малою нелінійністю їх магнітних властивостей. Перевагою такої апроксимації є зведення розрахунку до розв'язку лінійної задачі. Однак її недоліком є стрибкоподібна зміна похідної під час переходу від одної лінійної ділянки до іншої, що веде до значного погіршення точності розрахунку [81].

В [81 – 85] описано більш точні методи апроксимації експериментальної кривої намагнічування на всьому діапазоні зміни напруженості магнітного поля: гіперболічна апроксимація за формулою Фреліха; апроксимація степеневим поліномом, функціями арктангенса, гіперболічних синуса і тангенса; експоненційна та логарифмічна апроксимації; апроксимація методом сплайнів тощо.

У [86] також описують методи апроксимації кривої намагнічування неперервними функціями, однією з яких є експонентна характеристика намагнічування  $H = t \cdot e^{aB}$  (сталі коефіцієнти  $t$  та  $a$  залежать від марки електротехнічної сталі). Однак дані методи внаслідок їх наближеності можуть застосовуватися лише для орієнтовної оцінки роботи ТС за перехідних режимів, що супроводжуються глибоким насиченням його осердя.

Апроксимація гіперболічним синусом у літературі наведена у вигляді залежності  $H(B)$ . У нашій роботі дану апроксимацію записуємо у вигляді

$$i_{\text{нам}} = a \cdot sh(b \cdot \Psi_1), \quad (2.20)$$

де  $i_{\text{нам}}$  – струм намагнічування ТС;

$\Psi_1$  – потокозчеплення первинної обмотки ТС;

$a, b$  – коефіцієнти – визначаємо методом вибраних точок.

Для розрахунку функції апроксимації використовуємо математичний інструментарій програмного комплексу «Mathcad» [87]. Коефіцієнти  $a$  і  $b$  розраховуємо за двома обраними характерними точками ВБАХ обмоток трансформатора: точка «коліна» з координатами  $(i_{\text{нам}(1)}; \Psi_{1(1)})$  і точка «максимального насичення» з координатами  $(i_{\text{нам}(2)}; \Psi_{1(2)})$ .

Порядок розрахунку наступний.

Приймаємо  $b = x$  та знаходимо частку ділення більшого струму на менший

$$f(x) = \frac{i_{\text{нам}(2)}(x)}{i_{\text{нам}(1)}(x)} = \frac{a \cdot sh(x \cdot \Psi_{1(2)})}{a \cdot sh(x \cdot \Psi_{1(1)})} = \frac{sh(x \cdot \Psi_{1(2)})}{sh(x \cdot \Psi_{1(1)})}. \quad (2.21)$$

Лише за вказаної умови забезпечується точне проходження апроксимованої залежності через обидві вибрані координати, і тим самим, через решту точок, оскільки функція  $i_{\text{нам}}(\Psi_1)$  монотонна, гладка і без розривів та екстремумів для всіх значень аргументу  $\Psi_1$ .

Далі визначаємо величину функції  $g(x)$

$$g(x) = \frac{i_{\text{нам}(2)}}{i_{\text{нам}(1)}}. \quad (2.22)$$

Коефіцієнт  $b$  визначаємо з допомогою вбудованого оператора *root*

$$b = x = \text{root}[f(x) - g(x), x]. \quad (2.23)$$

Коефіцієнт  $a$  обчислюємо за формулою (2.20) для меншого значення струму намагнічування

$$a = \frac{i_{\text{нам}(1)}}{\text{sh}(b \cdot \Psi_{1(1)})}. \quad (2.24)$$

За обраної апроксимації кривої намагнічування функцією гіперболічного синуса маємо адекватне відтворення ВБХ обмоток ТС в діапазоні від точки «коліна» до точки «максимального насичення», що повністю забезпечує адекватність результатів розрахунку перехідних процесів за глибокого насичення осердя ТС.

## **2.4 Порівняльна оцінка аналітичних розрахунків та результатів комп'ютерного моделювання усталених електромагнітних процесів в одноступневих трансформаторах струму за розмикання їх вторинних кіл**

### **2.4.1 Особливості моделювання за спрощеною розрахунковою схемою усталених режимів роботи одноступневих трансформаторів струму за розімкнених їх вторинних кіл**

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, зокрема, програм комп'ютерного моделювання, дозволяє якісно та кількісно змоделювати і проаналізувати досліджувані процеси та явища. Цифрове моделювання є ефективним методом досліджень. Його інструментарій забезпечує всебічний аналіз створеної моделі, отримання достовірних результатів, можливість швидкої зміни процесів чи параметрів моделі, моделювання різноманітних впливів на неї тощо.

Цифровий комплекс «RE» [88] має зручний графічний інтерфейс та достатньо велику базу для аналізу електромагнітних та електромеханічних процесів у електричних колах, моделювання складних систем та установок, аналізу їх роботи.

Інструментарій комплексу дозволяє також моделювати роботу складних систем керування, пристроїв регулювання, РЗА, розраховувати різні види пошкоджень (КЗ, неповнофазні режими тощо).



У даному програмному середовищі «RE» для дослідження режимів роботи одноступневих ТС була створена розрахункова схема, наведена на рисунку 2.5. Ця схема створена з використанням заступних схем одноступневих ТС, наведених у відомих публікаціях І. М. Сироти [16], Б. С. Стогнія [15] та інших авторів. Для оцінки можливих максимальних усталених перенапруг на розімкнених затискачах вторинної обмотки ТС моделюємо ТС без урахування втрат активної потужності у його феромагнітному осерді та з мінімальним розсіюванням магнітного потоку. Очевидно, що врахування цих реальних параметрів ТС призведе до деякого, як правило – незначного, зменшення розрахованих перенапруг.

Розрахункова схема містить три блоки, кожний з яких моделює певні параметри ТС. Блок 1 призначений для симуляції первинного синусоїдного струму  $i_1(t)$  промислової частоти, що моделюється відповідними параметрами синусоїдної ЕРС  $e_1(t)$  промислової частоти та опору навантаження  $r_{1наб}$ . Індуктивність  $L_1$  характеризує індуктивність розсіювання первинної обмотки ТС.

У блоці 2 параметри нелінійної індуктивності  $L_{11}$  розрахункової схеми ТС задаються відповідно до ВБАХ первинної обмотки трансформатора  $\Psi_1 = f(i_{наб})$ .

У блоці 3 задаються відповідні параметри вторинної обмотки ( $r_2, L_2$ ) та параметри під'єданого до неї навантаження ( $r_{2наб}, L_{2наб}$ ) ТС.

Коефіцієнт  $n_{12}$  між першим та другим блоками рівний одиниці, а коефіцієнт  $n_{23}$  між другим та третім блоками – коефіцієнту трансформації досліджуваного ТС.

Розмикання вторинного кола ТС моделює ключ К1.

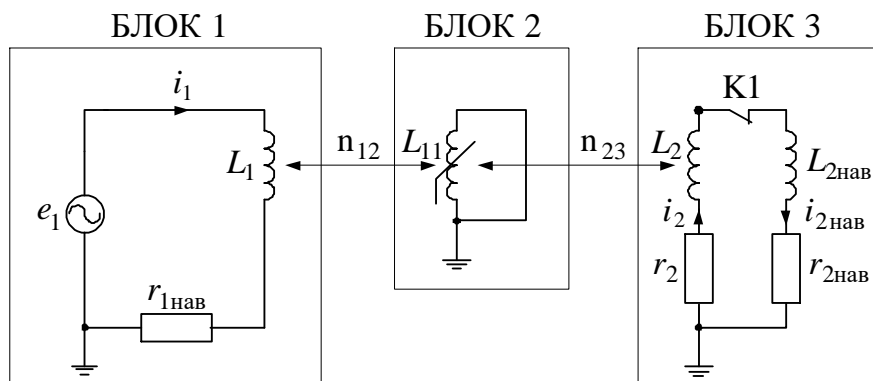


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема одноступеневого ТС у програмному комплексі «RE»

В моделях ТС за спрощеною схемою (рисунки 2.5 і 2.6) втрати активної потужності в осерді ТС не враховуємо (ідеалізований ТС).

З метою оцінки достовірності розрахунку у програмі «RE» режимів роботи ТС було також створено аналогічну розрахункову схему одноступеневого ТС у програмному комплексі «FASTMEAN» [89] та проведено порівняльний аналіз одержаних у цих програмах результатів моделювання аварійного режиму розмикання вторинного кола ТС типу ТЛМ-10.

Програмне середовище «FASTMEAN» дозволяє моделювати та розраховувати кола як постійного, так і змінного струму, аналізувати перебіг усталених та перехідних процесів у колах з лінійними і нелінійними елементами.

Створена у програмі «FASTMEAN» розрахункова схема ТС наведена на рисунку 2.6.

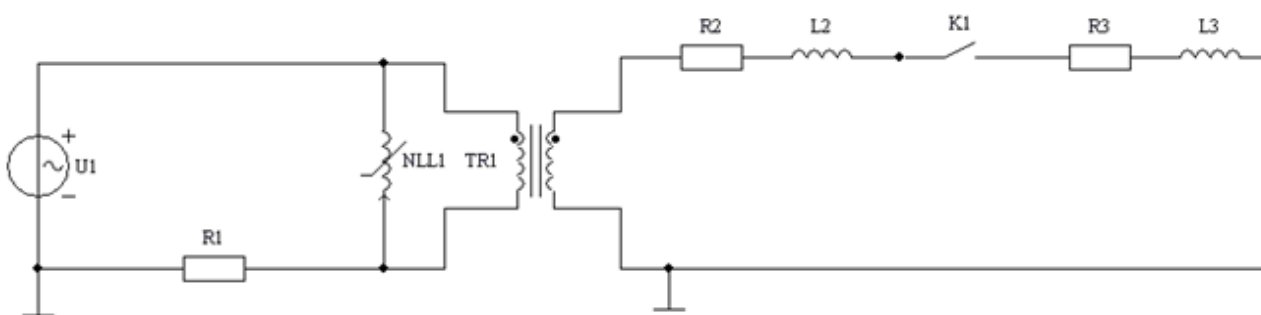


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема одноступеневого ТС у програмі «FASTMEAN»

Джерелом синусоїдної напруги промислової частоти  $U_1$  та опором  $R_1$  моделюємо заданий синусоїдний первинний струм ТС, а параметри нелінійної індуктивності  $NLL1$  задано відповідно до ВБХ первинної обмотки ТС.

Ідеальним трансформатором  $TR1$  задають коефіцієнт трансформації модельованого ТС.

Опором  $R_2$  та індуктивністю  $L_2$  моделюють параметри вторинної обмотки ТС, а опором  $R_3$  та індуктивністю  $L_3$  – параметри його вторинного навантаження.

Розмикання вторинного кола ТС симулює ключ  $K1$ .

### ТС типу ТЛМ-10

Основні технічні параметри і характеристики ТС типу ТЛМ-10 наведені в додатку А, п. А.2.

Нами було експериментально знято ВАХ  $U_2 = f(I'_{\text{нам}})$  досліджуваного ТС типу ТЛМ-10 за подання струму у його вторинну обмотку та вимірювання напруги на її виводах. При цьому первинне коло трансформатора було розімкнене.

За отриманою ВАХ розраховано зведену до первинної обмотки ВБАХ  $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$  вторинної обмотки ТС. Для цього використано формули переходу:

$$\Psi_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2 \cdot w_1}{\omega \cdot w_2}; \quad (2.25)$$

$$i_{\text{нам}} = \sqrt{2} \cdot I'_{\text{нам}} \cdot \frac{w_2}{w_1}, \quad (2.26)$$

де  $\omega$  – кутова частота, рівна 314 рад/с.

Відповідно матимемо:

$$\Psi_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot 1}{314 \cdot 300} \cdot U_2 = 0,15013 \cdot 10^{-4} \cdot U_2 \text{ [Вб]};$$

$$i_{\text{нам}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 300}{1} \cdot I'_{\text{нам}} = 424,26407 \cdot I'_{\text{нам}} \text{ [А]}.$$

Останню точку на ВБАХ визначаємо за десятикратного від номінальної величини значення первинного струму ТС. При цьому величину потокозчеплення розрахованої точки приймаємо на 20 % більшою за попереднє, визначене з ВАХ, значення. Таку інтерпретацію області глибокого насичення осердь ТС з електротехнічних сталей, як показали виконані комп'ютерні симуляції усталених режимів роботи ТС за розімкненого вторинного кола, можна застосовувати для попередніх розрахунків параметрів таких режимів. При цьому слід відмітити, як показали проведені дослідження та комп'ютерні симуляції, що точність відтворення області глибокого насичення електромагнітних осердь ТС мало впливає на похибку отриманої амплітуди

напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС. Важливо адекватно відтворити відрізок ВБАХ, що відповідає області ненасиченого осердя ТС, коли відбувається швидка зміна потокозчеплення обмоток, яка визначає рівень амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС.

Отримані характеристики подано у таблиці 2.1 та у графічному вигляді на рисунку 2.7.

Параметри розрахункової схеми ТС типу ТЛМ-10 такі:

– програма «RE» (див. рисунок 2.5):

1) блок 1: приймаємо  $e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t)$  (В); опір  $r_{1нав}$  за номінального первинного струму трансформатора рівний

$$r_{1нав} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1ном}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 1500} = 47,14045 \text{ (Ом)};$$

$$x_1 = 10^{-6} \text{ (Ом)};$$

2) блок 3:  $r_2 = 0,43$  (Ом);  $x_2 = 0,88$  (Ом) [14, Таблица ПЗ, с. 165]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2нав ном} &= r_{2нав} + jx_{2нав} = \left( \frac{S_{2нав ном}}{I_{2ном}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2нав ном}}{I_{2ном}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( 15/5^2 \right) \cdot 0,8 + j \left( 15/5^2 \right) \cdot 0,6 = 0,48 + j0,36 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

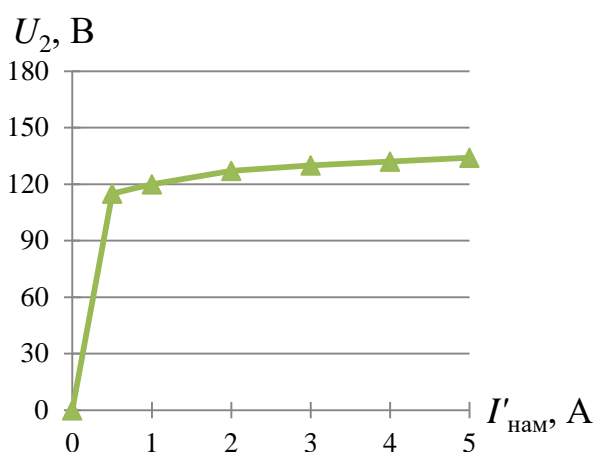
3) коефіцієнти рівні:  $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1ном}/I_{2ном} = 1500/5 = 300$ ;

Таблиця 2.1 – ВАХ і зведена до первинної сторони ВБАХ комбінованої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

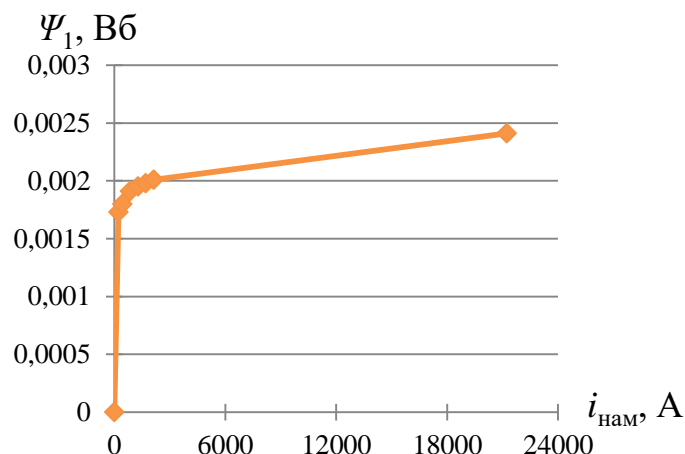
№ з/п	ВАХ		ВБАХ	
	$U_2$ , В	$I'_{нав}$ , А	$\Psi_1$ , Вб	$i_{нав}$ , А
1	0	0	0	0
2	115	0,5	0,00173	212,132
3	120	1	0,00180	424,264

Продовження таблиці 2.1

4	127	2	0,00191	848,528
5	130	3	0,00195	1272,792
6	132	4	0,00198	1697,056
7	134	5	0,00201	2121,320
8			0,00241	21213,204



а)



б)

Рисунок 2.7 – ВАХ (а) та зведена до первинної сторони ВБАХ комбінованої вторинної обмотки (б) ТС типу ТЛМ-10

– програма «FASTMEAN» (див. рисунок 2.6):

приймаємо  $u_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \cos(314t - 90^\circ)$  (В);

$$R1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 1500} = 47,14045 \text{ (Ом)};$$

$$n_{\text{TR1}} = I_{2\text{ном}}/I_{1\text{ном}} = 5/1500 = 0,0033333;$$

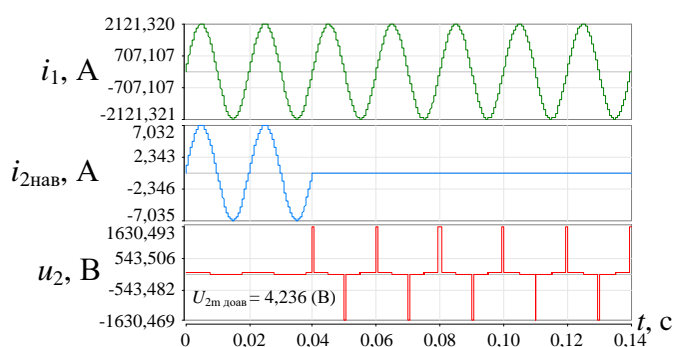
$$R2 = 0,43 \text{ (Ом)}; X2 = 0,88 \text{ (Ом)}; R3 = 0,48 \text{ (Ом)}; X3 = 0,36 \text{ (Ом)}.$$

Варто відмітити, що у програмі «FASTMEAN» задана обмежена кількість точок ВБАХ первинної обмотки (всього дев'ять для додатної і від'ємної осей включно з нулем). Тому для порівняння результатів розрахунку програмами «RE» і

«FASTMEAN» задаватимемо у них 1-у, 2-у, 4-у, 7-у і 8-у точки кривої (див. таблицю 2.1).

Для досліджуваного ТС типу ТЛМ-10 за розмикання його вторинного кола отримані результати комп'ютерного моделювання наведені на рисунку 2.8: осцилограми первинного  $i_1(t)$ , вторинного  $i_2(t)$  струмів та вторинної напруги  $u_2(t)$ . Розмикання вторинного кола у програмі «RE» здійснювалося у момент часу 0,04 с (для відображення на осцилограмі нормального доаварійного режиму ТС), а у програмі «FASTMEAN» ключ К1 спочатку був розімкнений і замикався у момент часу 0,1 с (зумовлено параметрами моделювання ключа у програмі «FASTMEAN»).

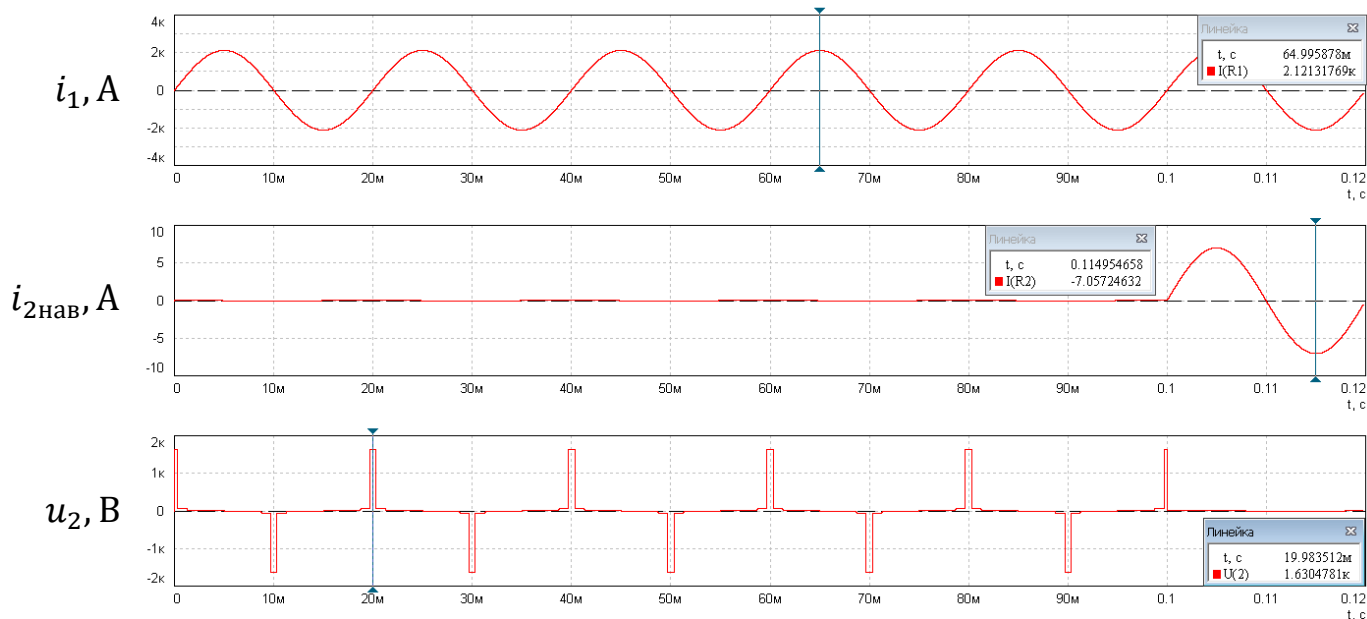
На рисунку також зазначено величину амплітуди вторинної напруги ТС за нормального доаварійного режиму ( $U_{2m \text{ доав}}$ ).



а)

Рисунок 2.8 – Результати комп'ютерного моделювання режиму роботи ТС типу ТЛМ-10 за розмикання його вторинного кола під час протікання номінального первинного струму:

а) розрахунок у програмі «RE»; б) розрахунок у програмі «FASTMEAN»

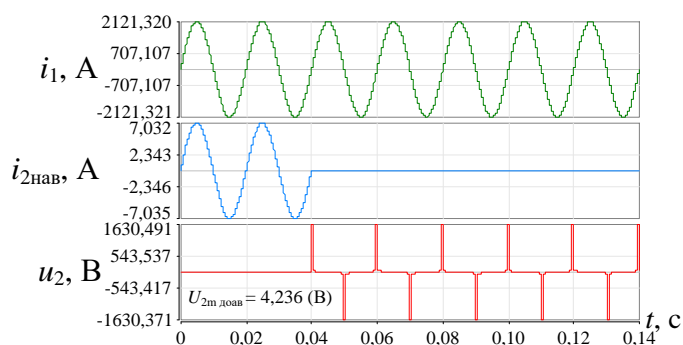


б)

Рисунок 2.8 (продовження)

Аналогічно розрахуємо даний режим ТС типу ТЛМ-10 з використанням апроксимованої гіперболічним синусом ВБАХ його первинної обмотки. Розрахунок функції апроксимації наведено у додатку Б, п. Б.1.

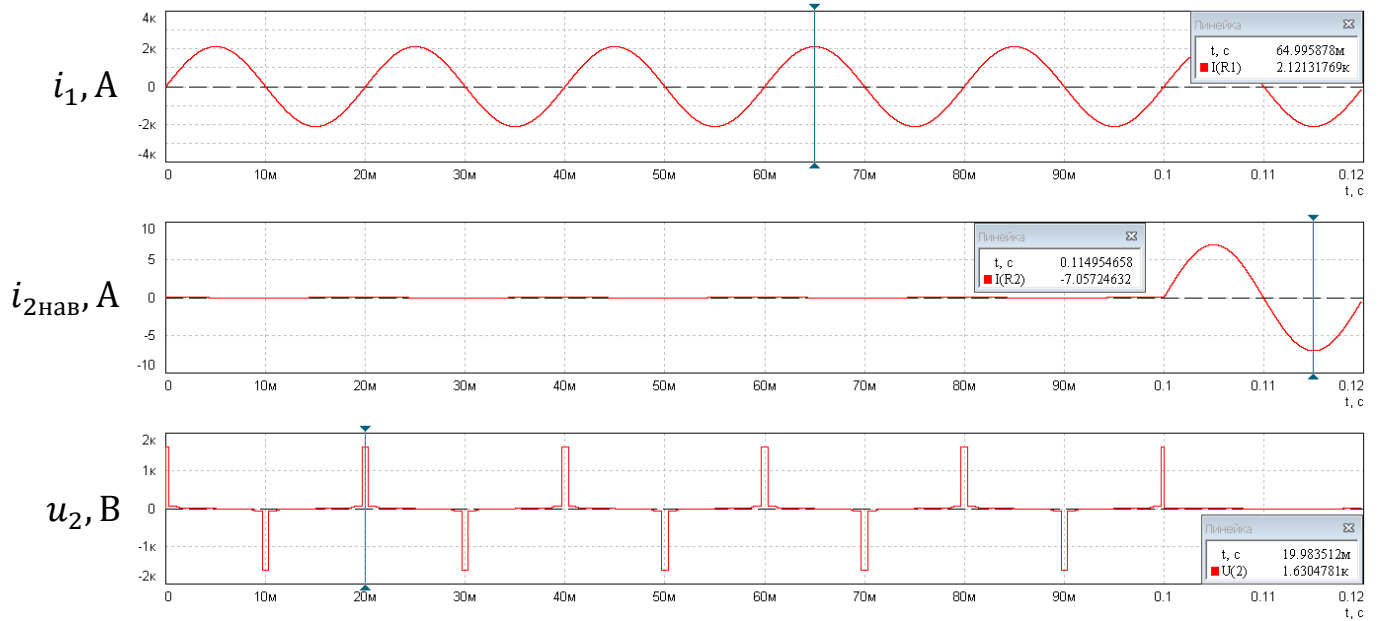
Отримані результати комп'ютерного моделювання режиму досліджуваного ТС наведені на рисунку 2.9.



а)

Рисунок 2.9 – Результати комп'ютерного моделювання режиму роботи ТС типу ТЛМ-10 за розмикання його вторинного кола під час протікання номінального первинного струму:

розрахунок у програмі «RE» (а) і розрахунок у програмі «FASTMEAN» (б) з використанням апроксимованої ВБАХ первинної обмотки



б)

Рисунок 2.9 (продовження)

Як бачимо, отримані результати розрахунку аварійного режиму ТС типу ТЛМ-10 у програмах «RE» та «FASTMEAN» з високою точністю співпадають між собою (похибка розрахунку амплітуди вторинної напруги за розімкненого вторинного кола становить 0,001 %).

Також варто відмітити і досить точне співпадання результатів розрахунку за експериментальною та апроксимованою ВБAX первинної обмотки.

Як видно з наведених вище результатів розрахунків, програмний комплекс «RE» забезпечує високу точність розрахунку і ґрунтовний аналіз досліджуваних режимів роботи ТС. Тому подальше моделювання та дослідження роботи інших типів ТС проводитимемо у даній програмі.

#### 2.4.2 Особливості режимів роботи одноступеневих трансформаторів струму за обриву кіл вторинного навантаження за різних рівнів їх первинних струмів

##### ТС типу ТЛМ-10 1500/5

Дослідимо режим розмикання вторинного кола ТС типу ТЛМ-10 за різних рівнів його первинного струму. Задаватимемо повну експериментальну ВБAX вторинної обмотки, зведену до первинної сторони ТС (див. таблицю 2.1).



На рисунку 2.10 наведено розрахункові осцилограми струмів та вторинної напруги досліджуваного ТС до та після розмикання його вторинного кола за різних величин його первинного струму. Розмикання вторинного кола здійснювалося у момент часу 0,04 с для відображення на осцилограмах нормального доаварійного режиму ТС.

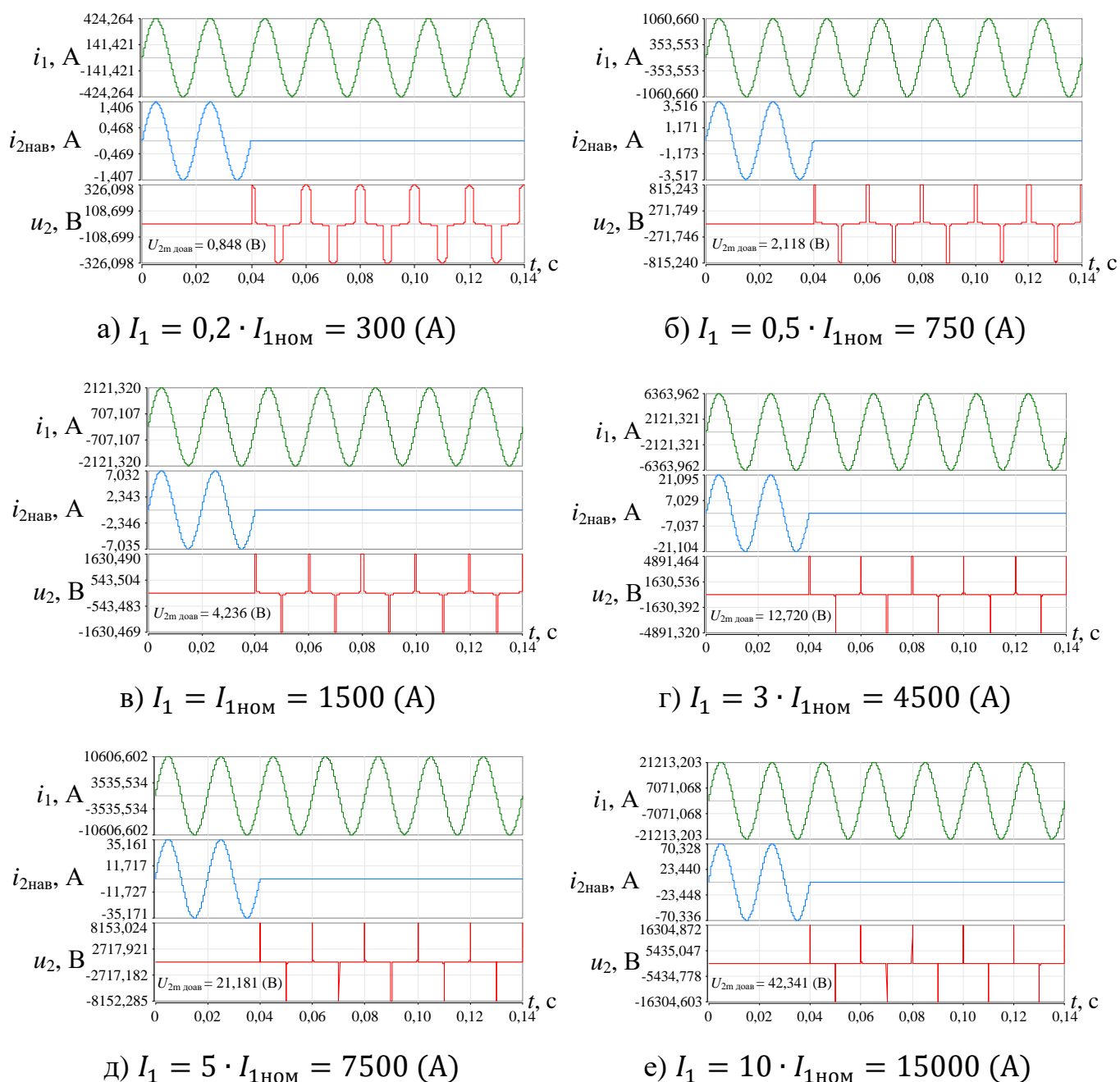


Рисунок 2.10 – Розрахункові осцилограми струмів та напруги до та після розмикання вторинного кола досліджуваного ТС типу ТЛМ-10

Як видно з рисунку 2.10, за розмикання вторинного кола ТС напруга на його вторинних виводах значно зростає порівняно з доаварійним режимом і стає несинусоїдною, з явно вираженими піками, внаслідок трапецевидної зміни кривої потокозчеплення (зведене до первинної сторони ТС, див. рисунок 2.3, в) розімкненої вторинної обмотки ТС, що виникає за глибокого насичення його осердя.

Для ТС типу ТЛМ-10 амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки за номінального первинного струму сягає значення 1630 В (у доаварійному режимі ця амплітуда рівна 4,24 В).

Як зазначено у [11, 90], величина випробувальної напруги для вторинних кіл ТС в умовах експлуатації становить 1000 В.

Отримані рівні вторинної напруги можуть спричинити пошкодження ізоляції ТС, приєднаних до нього пристроїв вимірювання та захисту, а також електричне ураження обслуговуючого персоналу служб РЗА. Тому категорично забороняється розмикати вторинні кола ТС.

Проведемо порівняння результатів розрахунку амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10, отриманих шляхом комп'ютерного розрахунку у програмі «RE» та обчислення за наведеними у п.п. 2.3.1 аналітичними виразами [91].

З ВБАХ (див. рисунок 2.7, б), що відповідає експериментальній ВАХ ТС типу ТЛМ-10 (див. рисунок 2.7, а), отримуємо координати точки «коліна»:  $\Psi_{1s} = 0,00173$  Вб;  $i_{1s} = 212,132$  А. Їм відповідають відповідно індукція і напруженість феромагнітного матеріалу осердя ТС:

$$B_{1s} = \frac{\Psi_{1s}}{w_1 \cdot S \cdot k_{зап}} = \frac{0,00173}{1 \cdot 0,00124 \cdot 0,97} = 1,438 \text{ (Тл)};$$

$$H_{1s} = \frac{i_{1s} \cdot w_1}{l} = \frac{212,132 \cdot 1}{0,434} = 488,783 \text{ (А/м)}.$$

Результати розрахунків:

$$\Psi_{2s} = \Psi_{1s} \cdot w_2/w_1 = 0,00173 \cdot 300/1 = 0,519 \text{ (Вб)};$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{212,132}{I_{1m}}\right);$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,519}{t_s}.$$

$$\Delta B/\Delta H | (H = 0) = \frac{\Psi_{1s} \cdot l}{w_1^2 \cdot k_{зап} \cdot S \cdot i_{1s}};$$

$$\begin{aligned} U_{2mII} &= 2\pi f \cdot k_{зап} \cdot S \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot [\Delta B/\Delta H | (H = 0)]/l = \\ &= \frac{2\pi f \cdot k_{зап} \cdot S \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot I_{1m}}{l} \cdot \left[ \frac{\Psi_{1s} \cdot l}{w_1^2 \cdot k_{зап} \cdot S \cdot i_{1s}} \right] = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \\ &= \frac{314 \cdot 300 \cdot 0,00173 \cdot I_{1m}}{1 \cdot 212,132} = 0,76823 \cdot I_{1m}. \end{aligned}$$

Похибки аналітичних розрахунків визначатимемо за формулою

$$\delta_i = \frac{|U_{2mi} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \%, \quad (2.27)$$

де  $U_{2mi}$  – амплітуда вторинної напруги ТС, розрахована за аналітичними виразами запропонованого методу, наведеного у п. 2.3 (для індексу «i» у роботі приймаємо такі позначення: «I» – для амплітуди вторинної напруги, розрахованої за формулою (2.6); «II» – для амплітуди вторинної напруги, розрахованої за формулою (2.19));

$U_{2ms}$  – амплітуда усталеної вторинної напруги ТС, отримана шляхом комп'ютерної симуляції у програмному комплексі «RE».

За номінального первинного струму ТС матимемо:

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{212,132}{\sqrt{2} \cdot 1500}\right) = 0,319 \cdot 10^{-3} \text{ (с)};$$

$$U_{2mI} = \frac{0,519}{t_s} = \frac{0,519}{0,000319} = 1626,959 \text{ (В)};$$

$$\delta_I = \frac{|1626,959 - 1630,490|}{1630,490} \cdot 100 \% = 0,217 \text{ (\%)}.$$

$$U_{2mII} = 0,76823 \cdot I_{1m} = 0,76823 \cdot \sqrt{2} \cdot 1500 = 1629,662 \text{ (В)}.$$

$$\delta_{II} = \frac{|1629,662 - 1630,490|}{1630,490} \cdot 100 \% = 0,051 \text{ (\%)}.$$

Подальші розрахунки зведено у таблицю 2.2. Отримані результати також представлені у графічному вигляді на рисунку 2.11.

Таблиця 2.2 – Порівняння комп'ютерного та аналітичного розрахунків піків напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

$K_{I_1}$	0,2	0,5	1	3	5	10
<i>Комбінована вторинна обмотка</i>						
$U_{2ms}$ , В	326,098	815,243	1630,490	4891,464	8153,024	16304,872
$U_{2mI}$ , В	311,242	809,335	1626,959	4888,075	8147,758	16296,331
$\delta_I$ , %	4,556	0,725	0,217	0,069	0,065	0,052
$U_{2mII}$ , В	325,932	814,831	1629,662	4888,986	8148,310	16296,619
$\delta_{II}$ , %	0,051	0,051	0,051	0,051	0,058	0,051

Як видно з рисунку 2.11, отримані результати комп'ютерного моделювання та обчислення за аналітичним методом з досить високою точністю співпадають між собою, що свідчить про адекватність створеної розрахункової схеми ТС та комп'ютерного моделювання його режимів роботи.

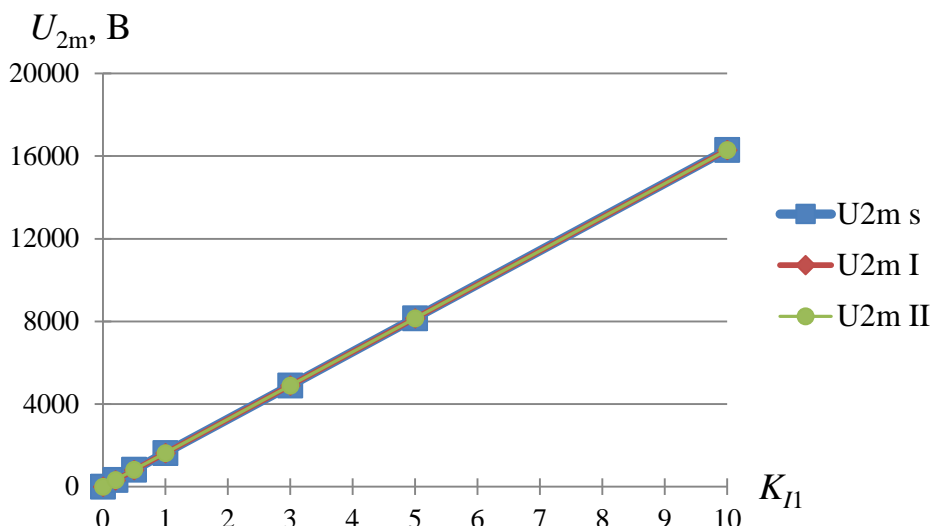


Рисунок 2.11 – Залежності амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 від кратності його первинного струму

### ТС типу ТПШЛ-10 3000/5

Основні технічні параметри і характеристики досліджуваного ТС типу ТПШЛ-10, а також параметри його розрахункової схеми (рисунок 2.5), наведені в додатку А, п. А.2.

На рисунках 2.12, 2.13 наведено розрахункові осцилограми струмів та вторинної напруги досліджуваного ТС до та після розмикання його вторинного кола за номінального та десятикратного первинного струму. Розмикання вторинного кола здійснювалося у момент часу 0,04 с (для аналізу доаварійного режиму роботи ТС).

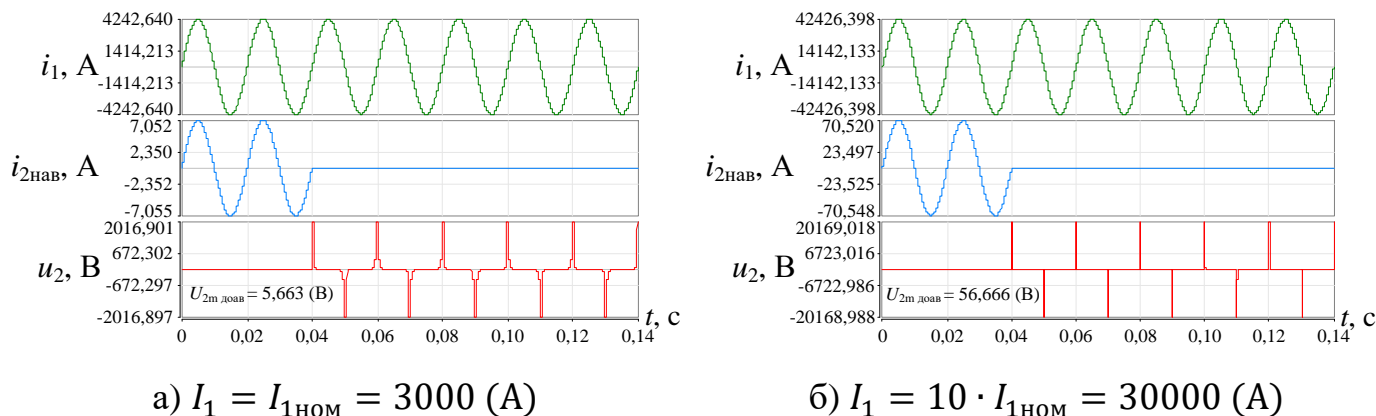


Рисунок 2.12 – Розрахункові осцилограми струмів та напруги до та після розмикання виміральної обмотки класу точності 0,5 ТС типу ТПШЛ-10

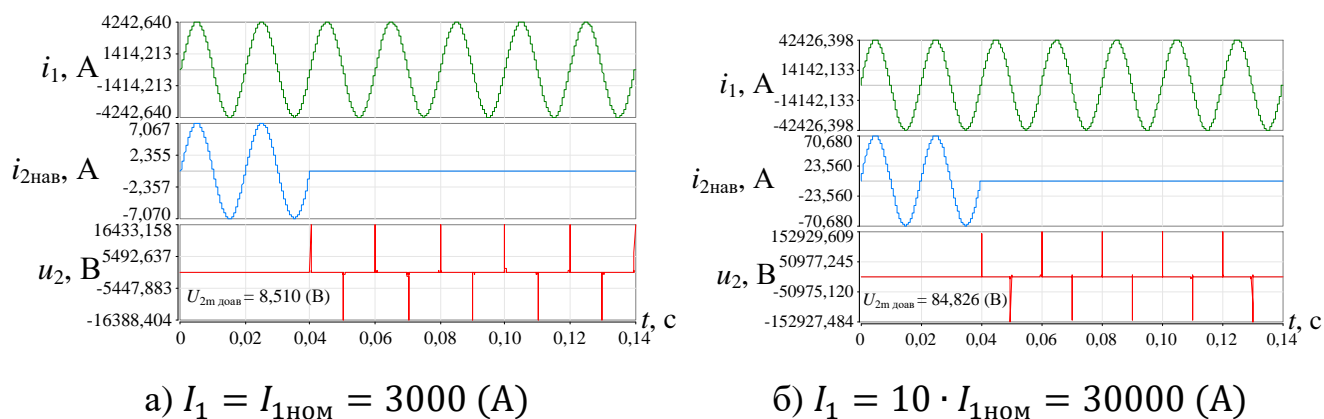


Рисунок 2.13 – Розрахункові осцилограми струмів та напруги до та після розмикання обмотки для захисту класу точності 10P ТС типу ТПШЛ-10

Як бачимо, за номінального первинного струму трансформатора амплітуда напруги на розімкнених виводах його вимірювальної вторинної обмотки сягає значення 2017 В (у доаварійному режимі амплітуда вторинної напруги трансформатора рівна 5,66 В), а на розімкнених виводах вторинної обмотки для захисту – 16433 В (у доаварійному режимі амплітуда вторинної напруги рівна 8,51 В). Такі величини перенапруг, безумовно, становлять небезпеку для обладнання та обслуговуючого персоналу.

Проведемо порівняння результатів розрахунку амплітуд імпульсів напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС типу ТПШЛ-10, отриманих шляхом комп'ютерного розрахунку у програмі «RE» та аналітичного обчислення за методом, наведеним у п. 2.3.

Для вимірювальної вторинної обмотки (координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00107 \text{ Вб}$ ;  $i_{1s} = 424,264 \text{ А}$ ), провівши необхідні розрахунки (див. додаток Б, п. Б.2), отримаємо: за номінального первинного струму ТС амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки рівна  $U_{2mI} = 2012,539 \text{ В}$  ( $\delta_I = 0,216 \%$ );  $U_{2mII} = 2015,88 \text{ В}$  ( $\delta_{II} = 0,051 \%$ ), а за десятикратного відносно номінальної величини первинного струму –  $U_{2mI} = 20158,252 \text{ В}$  ( $\delta_I = 0,053 \%$ );  $U_{2mII} = 20158,803 \text{ В}$  ( $\delta_{II} = 0,051 \%$ ).

Для вторинної захисної обмотки (координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00196 \text{ Вб}$ ;  $i_{1s} = 95,636 \text{ А}$ ) матимемо: за номінального первинного струму

ТС амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки рівна  $U_{2m I} = 16379,971 \text{ В}$  ( $\delta_I = 0,324 \%$ );  $U_{2m II} = 16381,430 \text{ В}$  ( $\delta_{II} = 0,315 \%$ ), а за десятикратного відносно номінальної величини первинного струму –  $U_{2m I} = 163813,398 \text{ В}$  ( $\delta_I = 7,117 \%$ );  $U_{2m II} = 163814,303 \text{ В}$  ( $\delta_{II} = 7,117 \%$ ).

Як бачимо, спостерігається досить висока точність співпадання результатів, отриманих шляхом комп'ютерної симуляції аварійного режиму роботи ТС та розрахунку за аналітичним методом.

За десятикратного первинного струму трансформатора для вторинної обмотки класу точності 10Р похибка між результатами комп'ютерного моделювання та аналітичного розрахунку дещо зростає. У цьому випадку комп'ютерне моделювання більш точно описує процеси у заданому режимі.

Аналогічно, як для наведених вище ТС, вибираємо і розраховуємо параметри та характеристики й інших типів ТС. Для кожного досліджуваного трансформатора наводяться розрахункові осцилограми аварійного режиму розмикання його вторинного кола.

### ТС типу ТВ-35 300/5

Основні технічні параметри і характеристики досліджуваного ТС типу ТВ-35, а також параметри його розрахункової схеми (рисунок 2.5), наведені в додатку А, п. А.2. На рисунку 2.14 наведено розрахункові осцилограми струмів та напруги досліджуваного ТС до та після розмикання його вторинного кола.

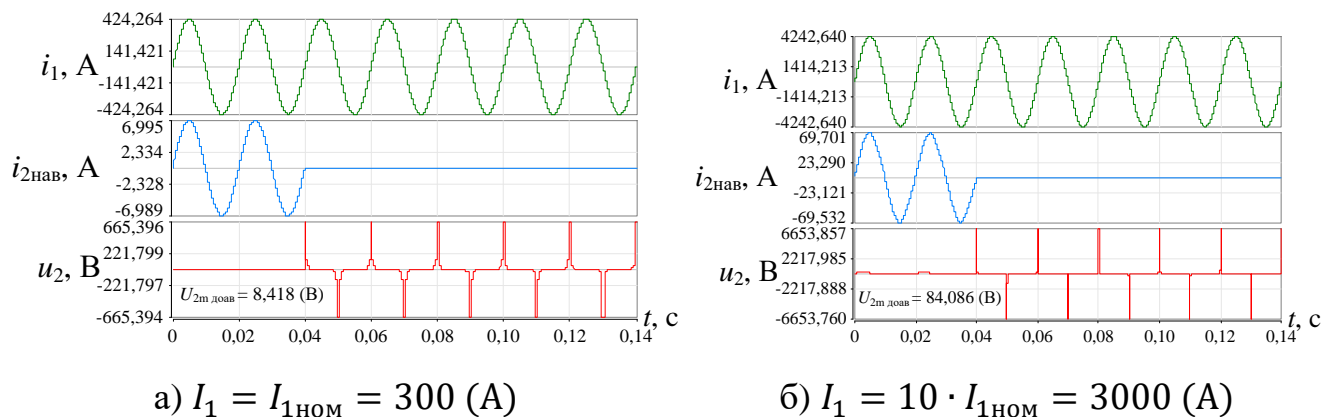


Рисунок 2.14 – Розрахункові осцилограми струмів та напруги ТС типу ТВ-35 до та після розмикання його вторинного кола

Як бачимо, за номінального первинного струму величина напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС не становить небезпеки для обладнання, однак за десятикратного значення первинного струму вона досягає значення 6654 В (у доаварійному режимі амплітуда вторинної напруги рівна 84,1 В).

Порівняємо одержані результати комп'ютерного моделювання з розрахованими значеннями за аналітичним методом (п. 2.3). Для вторинної обмотки ТС (координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00353$  Вб;  $i_{1s} = 42,426$  А), провівши необхідні розрахунки (див. додаток Б, п. Б.2), отримаємо: за номінального первинного струму ТС амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки рівна  $U_{2mI} = 663,95$  В ( $\delta_I = 0,217$  %);  $U_{2mII} = 665,058$  В ( $\delta_{II} = 0,051$  %), а за десятикратного первинного струму –  $U_{2mI} = 6650,548$  В ( $\delta_I = 0,050$  %);  $U_{2mII} = 6650,584$  В ( $\delta_{II} = 0,049$  %).

Як бачимо, для досліджуваного ТС забезпечується висока точність співпадання результатів комп'ютерного розрахунку та обчислення за аналітичним методом.

### **ТС типу ТВТ-110 600/5**

Основні технічні параметри і характеристики ТС типу ТВТ-110, а також параметри його розрахункової схеми (див. рисунок 2.5), наведені в додатку А, п. А.2.

На рисунку 2.15 наведено розрахункові осцилограми струмів та напруги досліджуваного ТС типу ТВТ-110 до та після розмикання його вторинного кола.

Як бачимо, для даного ТС вже за номінального первинного струму напруга на розімкнених виводах вторинної обмотки досягає величини 2325 В (у доаварійному режимі амплітуда вторинної напруги рівна 14,1 В).

Порівняємо отримані результати комп'ютерного моделювання з розрахованими значеннями за аналітичним методом (п. 2.3). Для вторинної обмотки ТС (координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00370$  Вб;  $i_{1s} = 50,912$  А), провівши необхідні розрахунки (див. додаток Б, п. Б.2), отримаємо: за номінального первинного струму ТС амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки рівна  $U_{2mI} = 2322,176$  В ( $\delta_I = 0,111$  %);  $U_{2mII} = 2323,586$  В ( $\delta_{II} = 0,051$  %), а за деся-



тикратного первинного струму –  $U_{2m I} = 23235,125 \text{ В}$  ( $\delta_I = 0,046 \%$ );  
 $U_{2m II} = 23235,858 \text{ В}$  ( $\delta_{II} = 0,049 \%$ ).

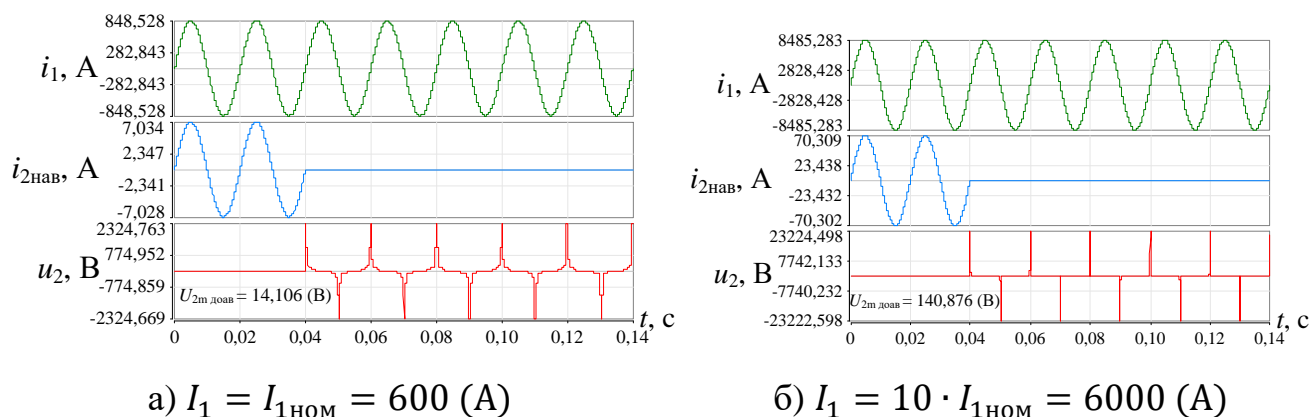


Рисунок 2.15 – Розрахункові осцилограми струмів та напруги ТС типу ТВТ-110 до та після розмикання його вторинної обмотки

Для ТС типу ТВТ-110, як і для інших типів ТС, також спостерігаємо достатньо точне співпадання результатів комп'ютерної симуляції рівнів вторинних перенапруг за розмикання його вторинного кола та їх обчислень за вище наведеним аналітичним методом.

Наведені вище отримані результати досліджень дають загальну характеристику режимів роботи ТС з розімкненими їх вторинними колами. Як бачимо, для всіх типів досліджуваних ТС, окрім ТС типу ТВ-35, за номінальних первинних струмів амплітуди напруг на розімкнених виводах їх вторинних обмоток перевищують допустиму для обладнання вторинних кіл величину 1000 В [11, 90].

Наведені режими роботи ТС є аварійними і повинні якомога швидше усуватися для забезпечення безпечної експлуатації обладнання та роботи обслуговуючого персоналу.

## 2.5 Висновки до розділу 2

1. Для попереднього аналізу усталених режимів роботи одноступеневих ТС за розімкнених їх вторинних кіл отримано розрахункові осцилограми та вирази для па-

раметрів координат усталеного режиму роботи ТС за розімкненого кола вторинного навантаження за протікання у первинній обмотці трансформатора синусоїдного струму.

2. На основі застосування для аналітичних розрахунків двокускової ВБХ обмоток ТС запропоновано метод оцінки максимальної амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання в первинній обмотці синусоїдного струму.

3. Показано ефективність застосування апроксимації гіперболічним синусом залежності  $H(B)$  матеріалу феромагнітних осердь сучасних ТС для аналітичних розрахунків амплітуди вторинної напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за протікання в первинній обмотці синусоїдного струму.

4. Виконано порівняльні аналітичні розрахунки координат усталених режимів роботи різних типів ТС, а також комп'ютерне моделювання таких режимів за розімкнених виводів вторинної обмотки ТС під час протікання в первинній обмотці синусоїдного струму. Показано задовільну збіжність результатів таких розрахунків, отриманих аналітичним методом і комп'ютерним моделюванням.

5. Проведеними розрахунками підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток одноступеневих ТС різних типів навіть за протікання в їх первинних обмотках номінальних синусоїдних струмів. Відсутність ефективних серійних пристроїв для обмеження таких перенапруг з метою забезпечення експлуатаційного персоналу та захисту вторинних кіл ТС підтверджує доцільність їх розробки та дослідження.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА ОБРИВІВ ВТОРИННИХ КІЛ СТРУМУ

#### **3.1 Усталені режими трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл**

##### **3.1.1 Усталені режими одноступеневих трансформаторів струму за обриву кіл вторинного навантаження**

В розділі 2 на основі запропонованого методу розрахунку (п. 2.3) наведено аналітичні вирази для визначення амплітуди напруги на розімкнених затискачах вторинної обмотки одноступеневого ТС за протікання синусоїдного первинного струму. Однак ці вирази справедливі для ідеалізованих ТС – з феромагнітними осердями без втрат активної потужності і можуть використовуватися лише для орієнтовної оцінки реальних величин амплітуд вторинних напруг. Врахування втрат активної потужності, зокрема, від протікання вихрових струмів в осерді ТС, повинно призвести до зменшення амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за рахунок розмагнічення осердя струмами, що протікають у вихрових контурах осердя. Втрати активної потужності на гістерезис менше впливатимуть на такі перенапруги, оскільки для електротехнічних сталей петлі гістерезису досить вузькі, а динамічні магнітні проникності для висхідної і низхідної гістерезисних віток, особливо в областях максимальних значень, практично співпадають. Тому необхідно дослідити вплив сумарних втрат активної потужності в осерді реального ТС на величину амплітуди напруги на розімкнених виводах його вторинної обмотки за різних значень первинного струму промислової частоти. Аналіз таких режимів проводимо, в першу чергу, для типів ТС, досліджуваних у другому розділі. Як і в 2 розділі, розрахункові схеми одноступеневих ТС з урахуванням втрат активної потужності в їх осерді для програмних комплексів «RE» [88] та «FASTMEAN» [89] створені з використанням заступних схем одноступеневих ТС, наведених у відомих публікаціях І. М. Сироти [16], Б. С. Стогнія [15] та інших авторів. Симуляція сумарних втрат ак-

тивної потужності в осерді ТС здійснюється уведенням до розрахункової схеми (рисунк 3.1) зведеного до вторинної обмотки опору  $r'_m$  (програмний комплекс «RE»), а у програмному середовищі «FASTMEAN» (рисунк 3.2) втрати активної потужності в осерді трансформатора симулюються втратами в резисторі R4.

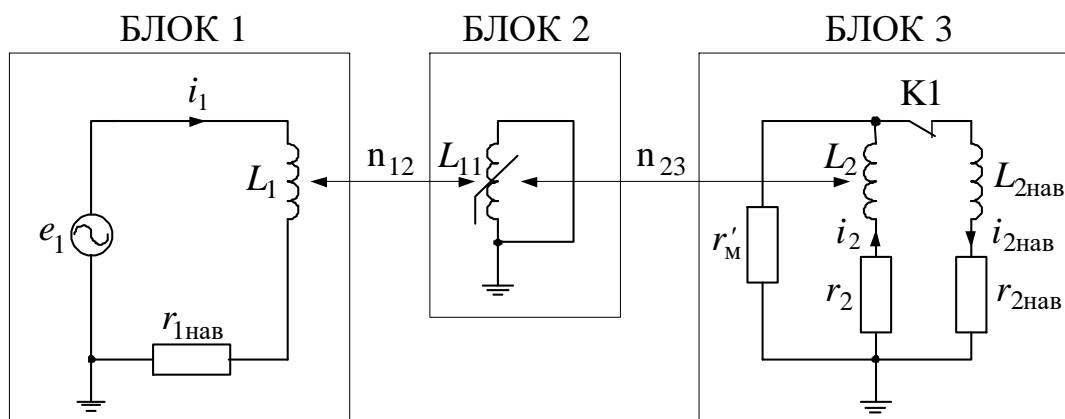


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема ТС у програмному комплексі «RE» з врахуванням втрат активної потужності у його осерді

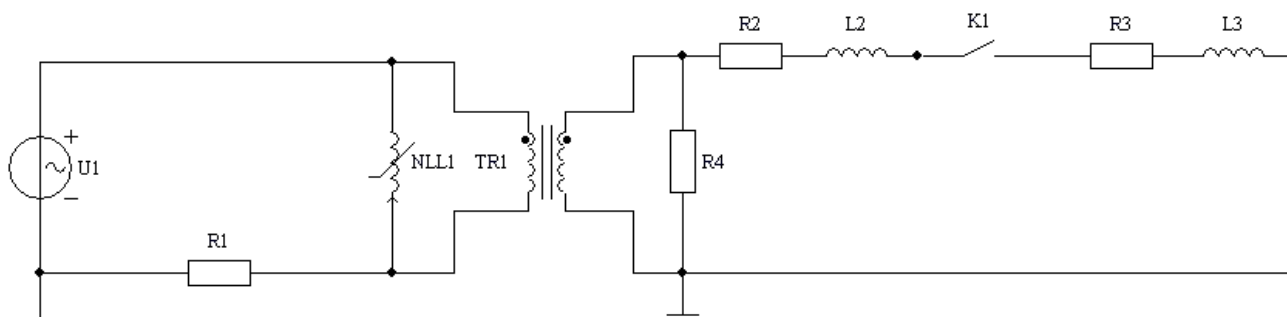


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема ТС у програмному комплексі «FASTMEAN» з врахуванням втрат активної потужності у його осерді

Розрахунок опорів  $r'_m$  і R4 для симуляції втрат активної потужності в осерді для досліджуваних типів ТС наведено у додатку В.

Параметри решти елементів розрахункових схем ТС (рисунки 3.1, 3.2) наведені у розділі 2 та додатку А, п. А.2.

Розмикання вторинного кола ТС здійснювалось за проходження кривої вторинного струму через нуль. За таких умов комутації для даних розрахункових схем (рисунки 3.1, 3.2) слід очікувати практично усталений режим напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС. Це необхідно для порівняння отриманих режимів з подібними (без урахування втрат активної потужності в осерді ТС), наведеними у розділі 2. Нижче наведені результати порівняльних досліджень усталених режимів одноступневих ТС за обриву їх вторинних кіл і протікання у первинній обмотці синусоїдного струму промислової частоти 50 Гц.

### ТС типу ТЛМ-10

На рисунку 3.3 наведено розрахункові осцилограми вторинної напруги ТС типу ТЛМ-10 до та після розмикання його вторинного кола за різних величин первинного струму, отримані шляхом комп'ютерного моделювання заданого режиму трансформатора у програмному комплексі «RE». Розмикання симулювалося ключем К1 (див. рисунок 3.1) у момент часу 0,04 с (з метою аналізу як доаварійного, так і аварійного за обриву вторинного кола режимів ТС).

Для оцінки достовірності отриманих результатів проведено також комп'ютерне моделювання аварійного режиму розмикання вторинного кола досліджуваного ТС у програмному комплексі «FASTMEAN». Одержані розрахункові осцилограми вторинної напруги трансформатора наведені на рисунку 3.4. Під час симуляції ключ К1 (див. рисунок 3.2) спочатку був розімкнений і замикався у момент часу 0,1 с.

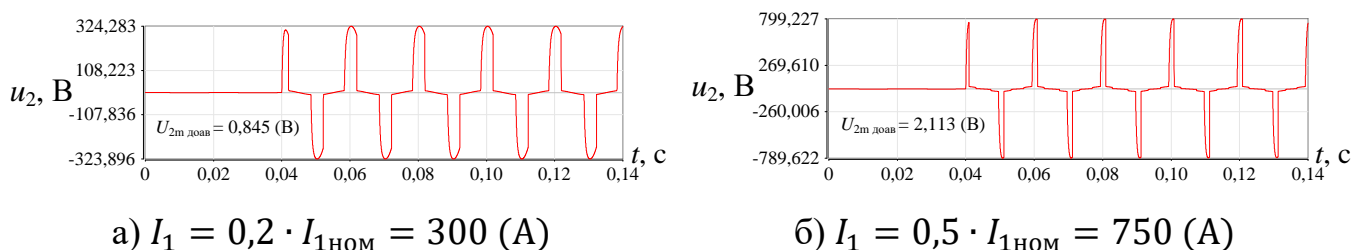


Рисунок 3.3 – Розрахункові осцилограми вторинної напруги ТС типу ТЛМ-10 до та після розмикання його вторинного кола за врахування втрат активної потужності в осерді, отримані у програмному комплексі «RE»

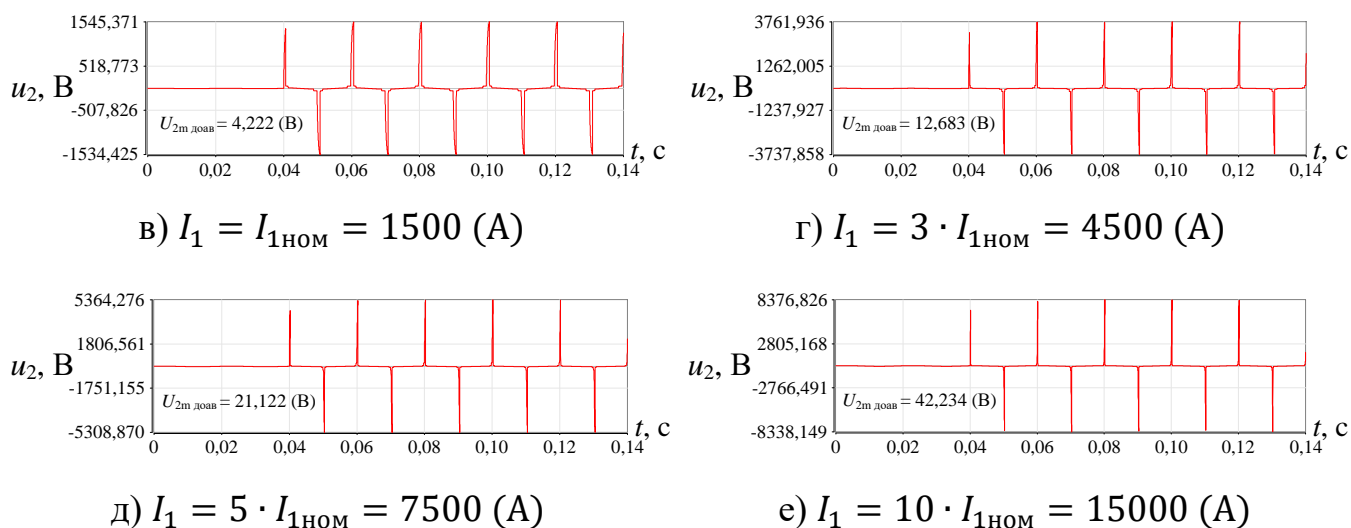


Рисунок 3.3 (продовження)

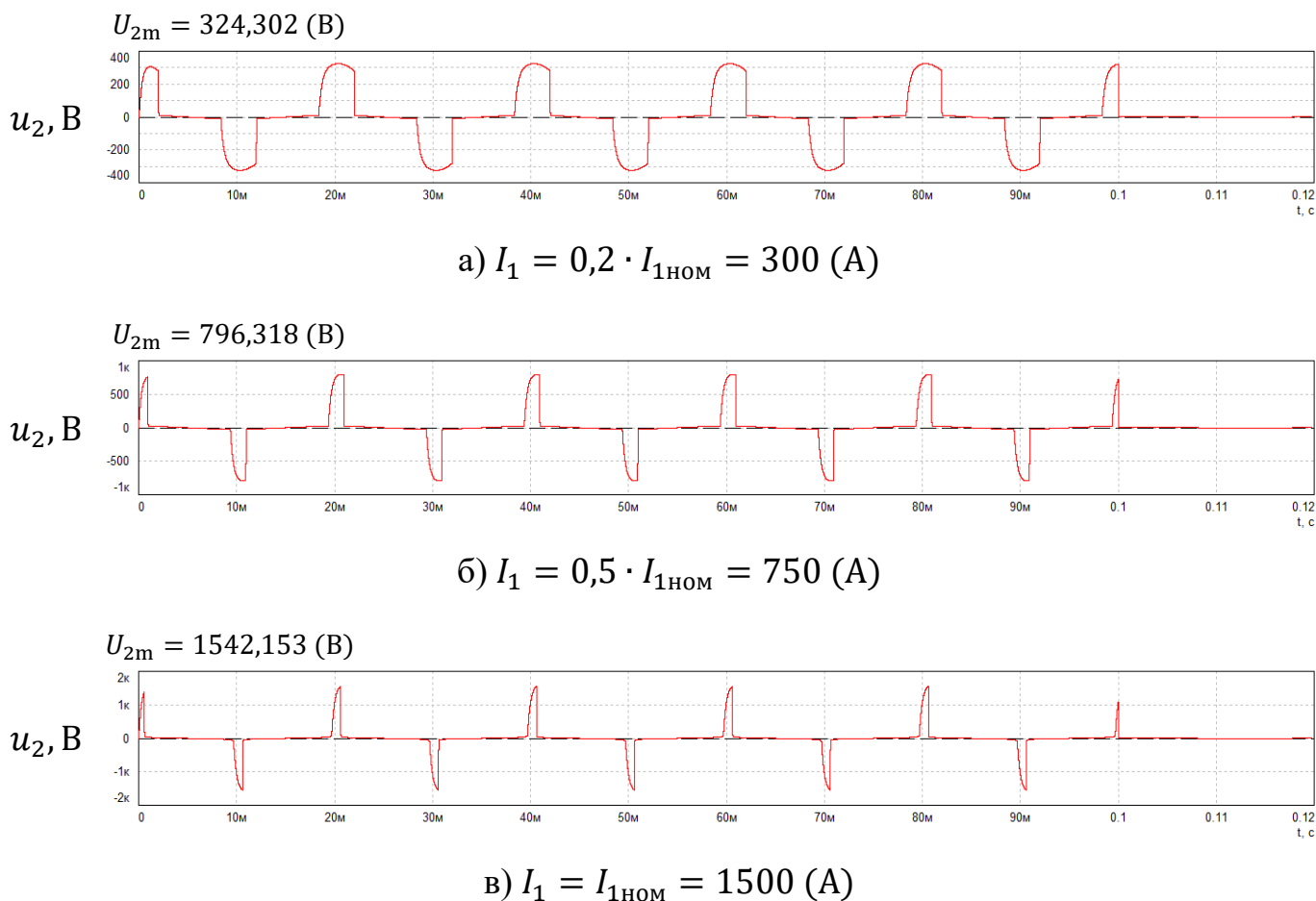
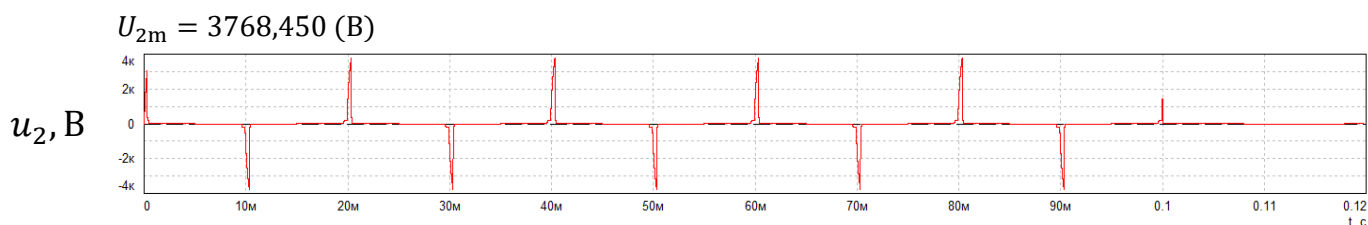
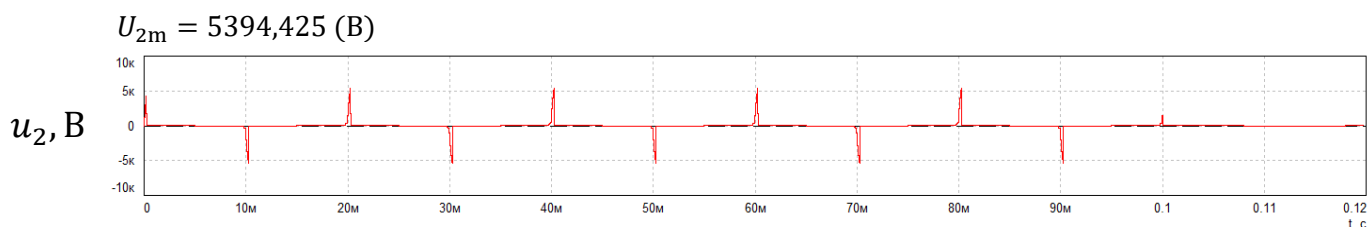


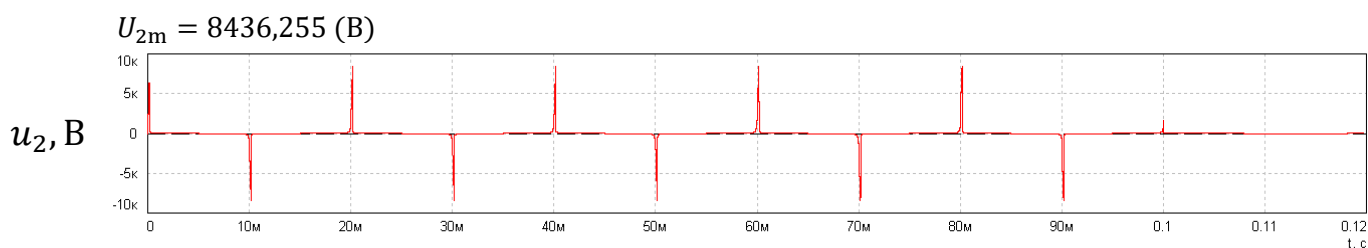
Рисунок 3.4 – Розрахункові осцилограми вторинної напруги ТС типу ТЛМ-10 за розмикання його вторинного кола з врахуванням втрат активної потужності в осерді, отримані у програмному комплексі «FASTMEAN»



$$\text{г) } I_1 = 3 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 4500 \text{ (А)}$$



$$\text{д) } I_1 = 5 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 7500 \text{ (А)}$$



$$\text{е) } I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 15000 \text{ (А)}$$

Рисунок 3.4 (продовження)

Порівнявши отримані результати, можна відмітити досить точне співпадання амплітуд вторинної напруги досліджуваного ТС, розрахованих відповідно у програмних комплексах «RE» та «FASTMEAN». Так, за номінального первинного струму трансформатора відносна різниця між обчисленими величинами амплітуд вторинної напруги становить всього 0,2 %.

На рисунку 3.5 наведено залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки досліджуваного ТС типу ТЛМ-10 від кратності його первинного струму відносно номінального значення без та за врахування втрат активної потужності у магнітопроводі трансформатора, а на рисунку 3.6 – залежність похибки напруги  $\delta_{U_{2m}}$  від кратності первинного струму ТС. Похибку  $\delta_{U_{2m}}$  розраховуємо за формулою

$$\delta_{U_{2m}} = \frac{U_{2m(2)} - U_{2m(1)}}{U_{2m(1)}} \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

де  $U_{2m(1)}$  – амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС, розрахована без врахування втрат активної потужності в його осерді;

$U_{2m(2)}$  – амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС, розрахована за врахування втрат активної потужності в його осерді.

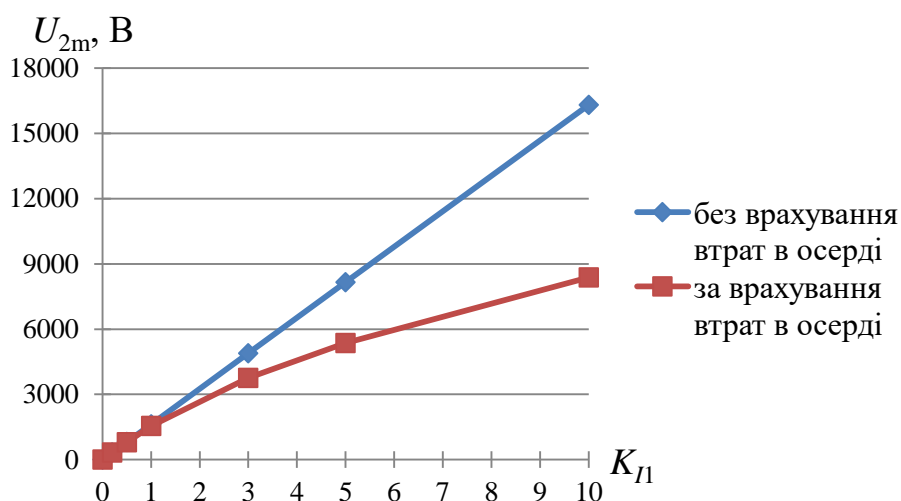


Рисунок 3.5 – Залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 від кратності первинного струму

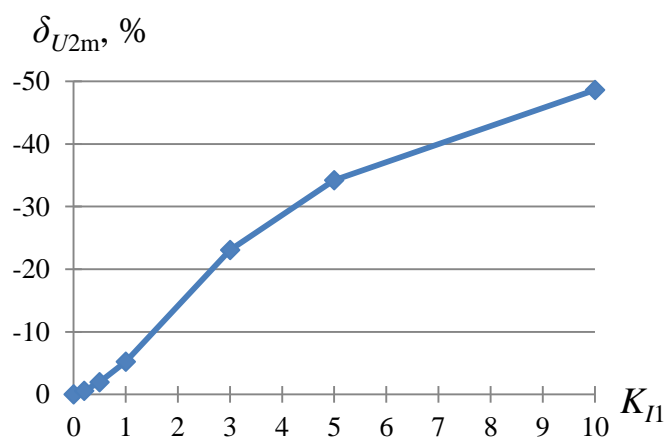


Рисунок 3.6 – Залежність похибки напруги  $\delta_{U_{2m}}$  від кратності первинного струму ТС типу ТЛМ-10



Розраховані значення вторинної напруги  $U_{2m}$  та похибки  $\delta_{U_{2m}}$  залежно від кратності первинного струму досліджуваного ТС наведено у таблиці В.1, додаток В.

Як бачимо з отриманих графіків, за первинних струмів, що не перевищують номінальної величини, амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС, розраховані без та за врахування втрат активної потужності у його магнітопроводі, не дуже різняться (модуль похибки не перевищує 10 %). За більших значень первинного струму трансформатора спостерігаємо зростання розбіжності між розрахованими значеннями амплітуд вторинної напруги у даних режимах. Модуль похибки  $\delta_{U_{2m}}$  за десятикратного зростання величини первинного струму трансформатора відносно його номінального значення досягає величини 49 % ( $U_{2m(1)} = 16304,872$  (В);  $U_{2m(2)} = 8376,826$  (В)).

За великих кратностей первинного струму ТС відносно його номінального значення імпульси вторинної напруги дуже короткотривалі порівняно з піками за малих (як спостерігаємо для досліджуваного ТС ТЛМ-10 за кратностей первинного струму менше номінального значення (див. рисунки 3.3, 3.4)) кратностей первинного струму і вони «зрізаються» за рахунок розмагнічування магнітопроводу вихровими струмами за швидкої зміни потокозчеплення вторинної обмотки. Вплив же втрат активної потужності на амплітуду довготривалих піків вторинної напруги значно менший (потокозчеплення вторинної обмотки змінюється відносно повільно) [4, 92]. Як зазначається у розділі 2, п.п. 2.3.1, тривалість імпульсів вторинної напруги ТС залежить від значення його первинного струму.

Розрахункові схеми ТС з врахуванням сумарних втрат активної потужності у його осерді (див. рисунки 3.1, 3.2) більш точно описують процеси у магнітопроводі та відображають задані режими роботи ТС.

Отримані результати досліджень аварійних режимів розмикання вторинних кіл інших типів одноступневих ТС подано у додатку В. Комп'ютерне моделювання заданих режимів здійснювалося у програмному комплексі «RE».

Як видно з отриманих розрахункових осцилограм (рисунки 3.3, 3.4, В.1, В.2, В.6, В.8) за врахування втрат активної потужності в осерді ТС, після розмикання кола вторинного навантаження практично одразу виникає усталений режим напруги

на затискачах вторинної обмотки ТС. Такий режим виникає тому, що за параметрів розрахункової схеми (див. рисунок 3.1) для зазначених малопотужних ТС за розмикання вторинного кола ТС при переході вторинного струму через нуль у магнітному колі осердя ТС практично одразу встановлюється новий усталений режим – практично за відсутності вільної аперіодичної складової в магнітному потоці осердя.

Нижче більш детально розглянуто параметри режиму обриву кола вторинного навантаження для одного з найбільш потужних досліджуваних одноступеневих ТС – шинного ТС типу ТШЛ-20 10000/5.

### **ТС типу ТШЛ-20**

Технічні параметри ТС типу ТШЛ-20 наведені в додатку А, п.п. А.2.

Нижче наведено результати комп'ютерного моделювання аварійного режиму вмикання синусоїдного струму у первинну обмотку ТС в момент проходження кривої струму через нуль за розімкненої вторинної обмотки для різних кратностей первинного струму (відносно номінальної величини) ТС. Досліджено режими роботи трансформатора без та за врахування втрат активної потужності у його магнітопроводі.

На рисунках 3.7, 3.8 наведено розрахункові осцилограми первинного струму  $i_1(t)$ , зведеного до первинної сторони потокозчеплення вторинної вимірювальної обмотки  $\Psi_1(t)$  та напруги  $u_2(t)$  на виводах вимірювальної обмотки досліджуваного ТС ТШЛ-20 за усталеного режиму роботи з розімкненим його вторинним колом відповідно без та за врахування втрат активної потужності у магнітопроводі трансформатора.

Отримані результати комп'ютерного моделювання свідчать, як і для інших ТС, про значну небезпеку для обслуговуючого персоналу підстанції та високу ймовірність пошкодження ізоляції вторинних кіл, підключених до ТС. Особливо варто відмітити дуже великі небезпечні рівні вторинних перенапруг у досліджуваного ТС ТШЛ-20, зокрема як і для інших типів ТС з первинними струмами у кілька десятків тисяч ампер.

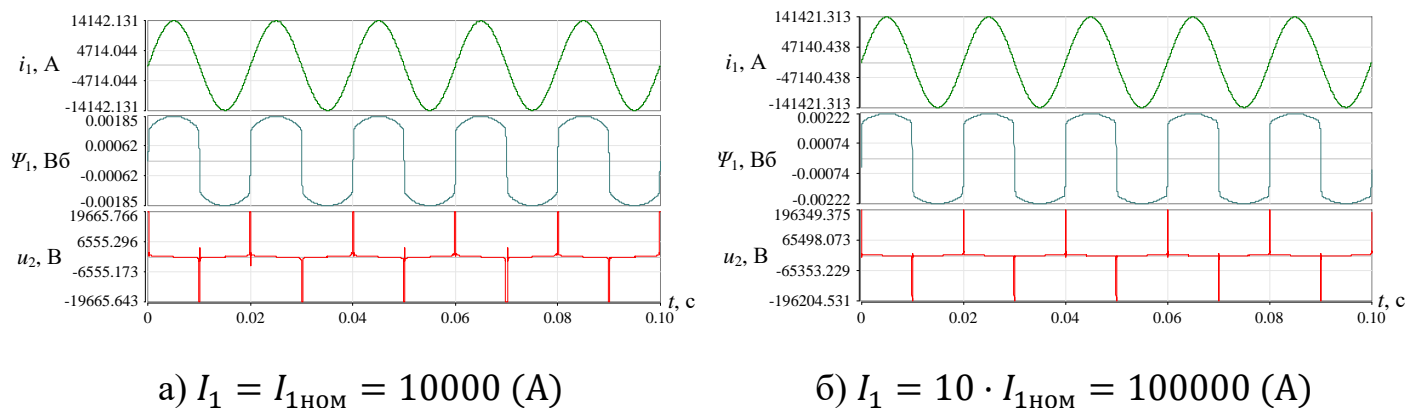


Рисунок 3.7 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму розімкненого вторинного кола ТС типу ТШЛ-20 без врахування втрат активної потужності у його осерді

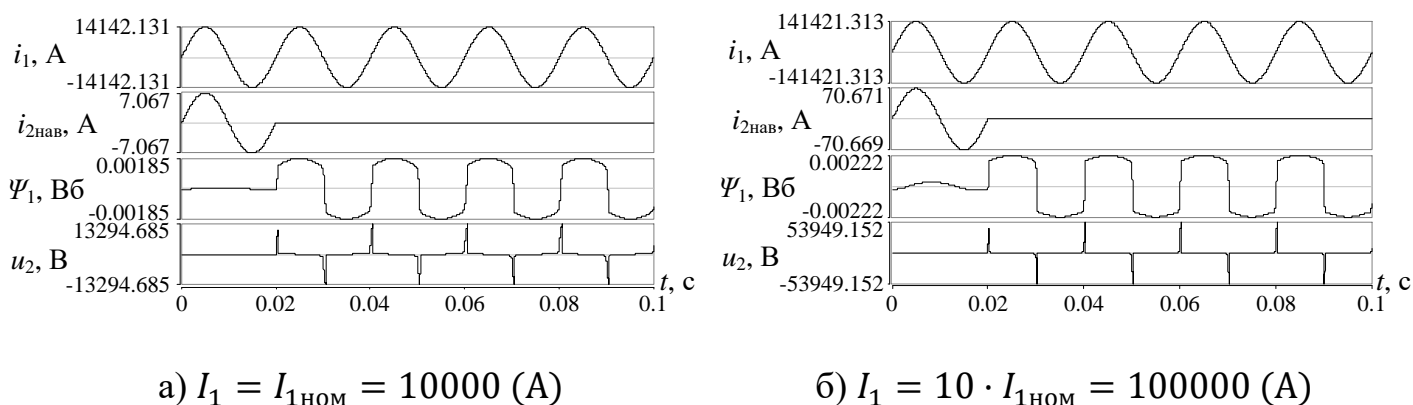


Рисунок 3.8 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму ТС типу ТШЛ-20 за обриву кола його вторинного навантаження з врахуванням втрат активної потужності у магнітопроводі ТС

Так, вже за первинного струму  $I_1 = 0,2 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 2000 \text{ A}$  трансформатора ТШЛ-20 амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної вимірювальної обмотки становить 3927 В (режим без врахування втрат активної потужності в осерді), 3656 В (режим з врахуванням втрат активної потужності в осерді) (див. таблицю В.1, додаток В). Для номінального первинного струму трансформатора маємо – 19666 В (режим без врахування втрат активної потужності в осерді), 13295 В (режим з врахуванням втрат активної потужності в осерді), а для десятикратного первинного струму – 196349 В (режим без врахування втрат активної потужності в осерді),

53949 В (режим з врахуванням втрат активної потужності в осерді). Безумовно, такі рівні вторинних перенапруг є дуже великими (порівняно з попередньо дослідженими типами ТС) і становлять значну небезпеку пошкодження ізоляції обладнання (не виключаються і руйнування з вибухами ТС під дією таких перенапруг) та загибелі внаслідок електричного ураження експлуатаційного персоналу.

Тому насамперед необхідно розробити та впровадити швидкодійні та надійні пристрої захисту для таких типів ТС зі значними величинами первинних струмів з метою забезпечення безпечної їх експлуатації.

На рисунках 3.7, 3.8 наведено розрахункові осцилограми зведеного до первинної сторони потокозчеплення  $\Psi_1(t)$  вторинної вимірювальної обмотки, симульованого відповідно до заданої ВБAX даної обмотки ТС. Потокозчеплення  $\Psi_1(t)$  містить ділянки швидкої зміни у часі за ненасиченого осердя, яким відповідають високовольтні імпульси вторинної напруги, та ділянки входження магнітопроводу в зону насичення, коли потокозчеплення  $\Psi_1(t)$  є відносно сталим.

Залежність вторинної напруги на розімкнених виводах вимірювальної обмотки та похибки  $\delta_{U_{2m}}$  досліджуваного ТС типу ТШЛ-20 за різних кратностей його первинного струму відносно номінальної величини наведено у додатку В.

З отриманих залежностей видно, що врахування втрат активної потужності у магнітопроводі ТС суттєво впливає на рівні вторинних перенапруг ТС. Зокрема, значний вплив має місце за великих (номінальної та вище величин) значень первинного струму трансформатора. Так, для номінального первинного струму ТС амплітуда вторинної напруги за врахування активних втрат в осерді зменшується у 1,5 рази (напруги рівні відповідно 19665,766 В та 13294,685 В, похибка  $\delta_{U_{2m}}$  рівна -32 %), а для десятикратного первинного струму – зменшується у 3,6 рази (напруги рівні відповідно 196349,375 В та 53949,152 В, похибка  $\delta_{U_{2m}}$  рівна -73 %).

Як зазначалось вище, отримані результати розрахунків свідчать про значну небезпеку розкорочення вторинних кіл ТС з великими значеннями первинних струмів. Такі режими не повинні допускатися в експлуатації, а вже за їх виникнення швидко усуватися. Слід відмітити, що результати розрахунків отримані для усталених ре-

жимів роботи ТС типу ТШЛ-20 за розімкненого його вторинного кола і протікання усталених струмів промислової частоти 50 Гц у його первинній обмотці.

Для аналізу рівнів усталених напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток досліджуваних вище типів одноступневих ТС від кратностей їх первинних струмів отримані залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  (наведені вище у розділі 3 та у додатку В) були апроксимовані відповідними функціями, розрахунок яких наведено у додатку Г роботи. Також за отриманими апроксимаційними функціями для досліджуваних ТС було розраховано кратності первинних струмів, за яких амплітуда усталеної напруги на розімкнених виводах їх вторинних обмоток сягала величини 1 кВ (наведені також у додатку Г).

### **3.1.2 Аварійний усталений режим роботи каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 за розімкненого вторинного кола**

Нижче наведені результати комп'ютерної симуляції усталених режимів роботи каскадного ТС за розімкнених його вторинних кіл на прикладі двоступеневого ТС типу ТОМ-765. Технічні параметри та характеристики ТС типу ТОМ-765, а також параметри його розрахункових схем (рисунки 3.9, 3.10), наведені в додатку Д.

Технічні параметри та характеристики досліджуваного ТС типу ТОМ-765 отримані від КТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» [93].

У додатку Д також наведено електричну схему та конструктивні особливості ТС типу ТОМ-765.

На рисунку 3.9 зображено створену розрахункову схему досліджуваного каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 з врахуванням втрат активної потужності у магнітопроводах його ступенів. Наведена розрахункова схема може використовуватися для комп'ютерного моделювання та аналізу режимів роботи й інших типів каскадних двоступневих ТС.

В розрахунковій схемі ТС типу ТОМ-765 особливості конструкції та матеріал осердь враховані у відповідних ВБАХ обмоток  $\Psi = f(i_{\text{нам}})$ .

Блок 1 розрахункової схеми моделює в ТС первинний синусоїдний струм промислової частоти 50 Гц з заданою амплітудою (ЕРС джерела живлення  $e_1$  та опір

навантаження  $r_{1\text{нав}}$ ).  $L_1^B$  – індуктивність розсіювання первинної обмотки каскадного ТС (індекси «в» і «н» відповідно позначають верхній та нижній ступені каскадного трансформатора).

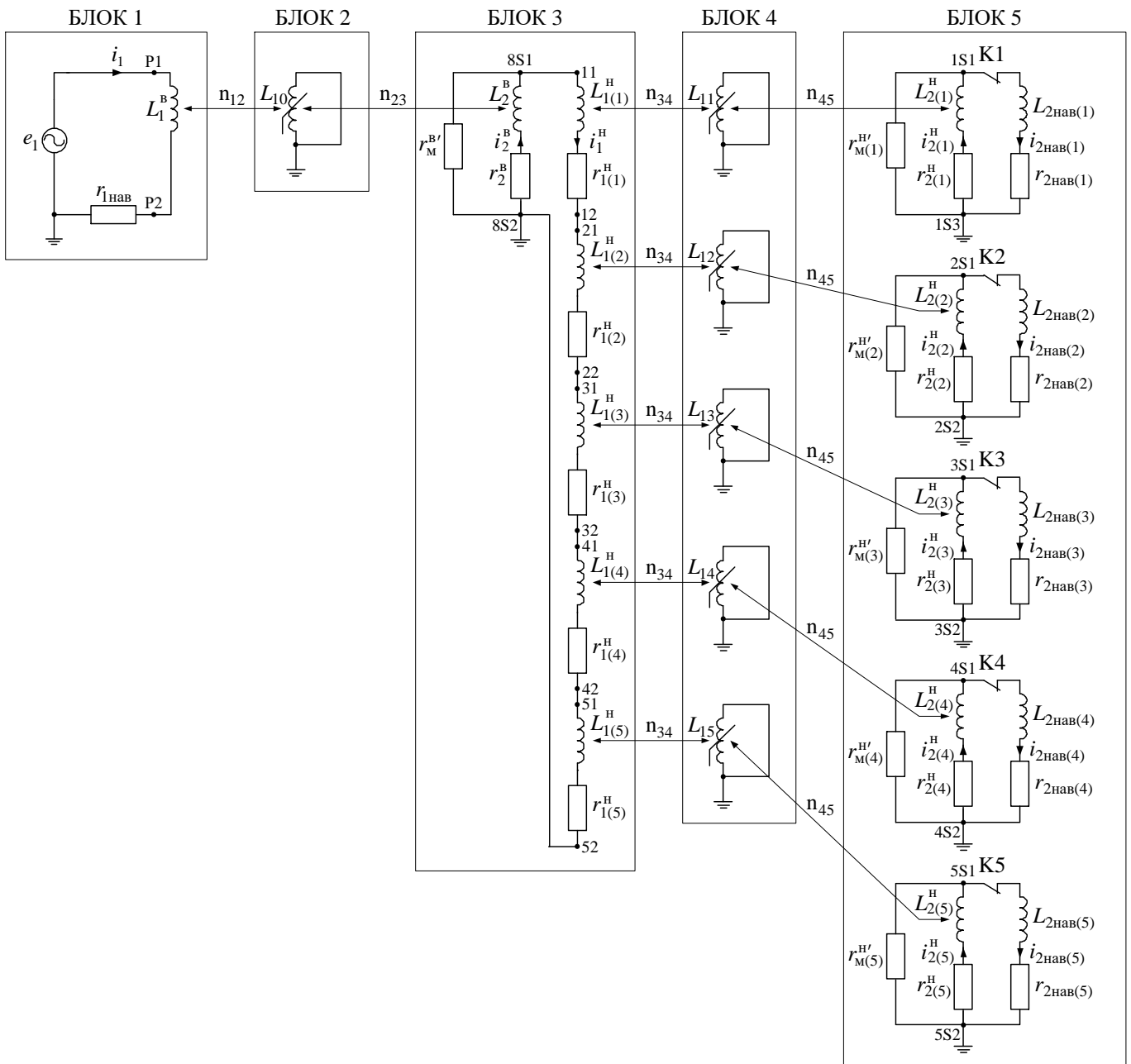


Рисунок 3.9 – Розрахункова схема каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 з врахуванням втрат активної потужності в осердях його ступенів для комп'ютерної симуляції режимів його роботи

У блоці 2 параметри нелінійної індуктивності  $L_{10}$  задані у відповідності до ВБАХ первинної обмотки верхнього ступеню. У блоці 3 задаються параметри вторинної обмотки верхнього ступеню трансформатора ( $r_2^B, L_2^B$ ) та розподілені параметри підключеної до цієї обмотки первинної обмотки нижнього ступеню каскадного ТС ( $r_{1(1)}^H, L_{1(1)}^H, \dots, r_{1(5)}^H, L_{1(5)}^H$ ). Зведений до вторинної сторони верхнього ступеню активний опір  $r_M^{B'}$  симулює втрати активної потужності у магнітопроводі верхнього ступеню каскадного ТС.

У блоці 4 параметри нелінійних індуктивностей ( $L_{11}, \dots, L_{15}$ ) задані відповідно до ВБАХ конкретних обмоток нижнього ступеню. У блоці 5 задані параметри вторинних обмоток нижнього ступеню ТС ( $r_{2(1)}^H, L_{2(1)}^H, \dots, r_{2(5)}^H, L_{2(5)}^H$ ), параметри їх вторинних навантажень ( $r_{2\text{нав}(1)}, L_{2\text{нав}(1)}, \dots, r_{2\text{нав}(5)}, L_{2\text{нав}(5)}$ ) та зведені до вторинної сторони опори  $r_{M(1)}^{H'}, \dots, r_{M(5)}^{H'}$ , які симулюють втрати активної потужності у магнітопроводах нижнього ступеню ТС. Ключі К1,  $\dots$ , К5 симулюють розмикання вторинних кіл досліджуваного ТС.

Коефіцієнти  $n_{12}$  і  $n_{34}$  рівні одиниці, а коефіцієнти  $n_{23}$  і  $n_{45}$  дорівнюють коефіцієнтам трансформації трансформаторів відповідних ступенів.

Параметри розрахункової схеми каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 наведені в додатку Д.

Параметри розрахункової схеми (рисунок 3.9) каскадного ТС типу ТОМ-765 отримані та розраховані за відомими виразами на основі відповідних даних та інформації, отриманої від виробника ТС типу ТОМ-765: фізичних параметрів осердь (вага, магнітний матеріал, геометричні розміри, число витків обмоток тощо), каталожних даних ТС тощо [93 – 96]. Параметри розрахункової схеми ТС типу ТОМ-765 відповідають (співвідносяться) для кожного ступеню відомій Т-подібній розрахунковій схемі ТС.

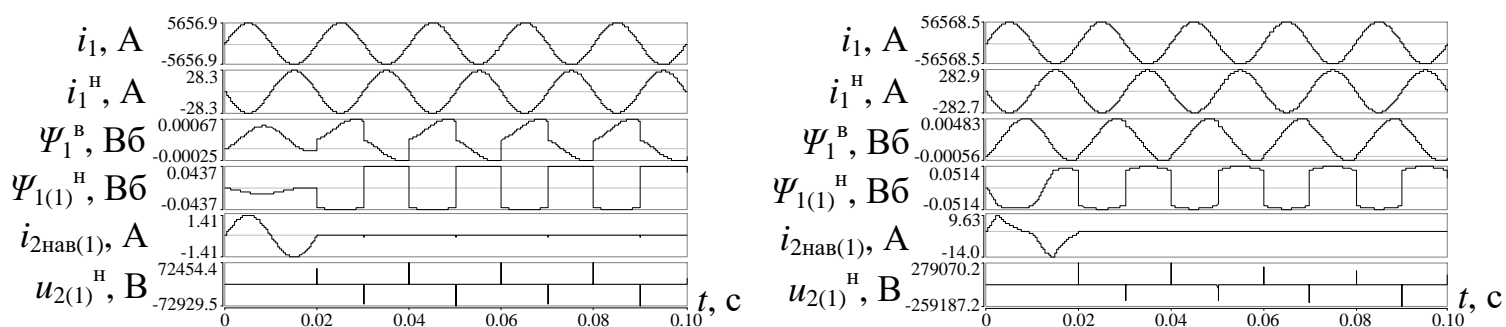
### **Усталений режим роботи ТС типу ТОМ-765 без врахування втрат активної потужності у його магнітопроводах**

Дослідимо аварійний режим розмикання вторинних кіл досліджуваного каскадного ТС типу ТОМ-765 за різних кратностей первинного струму без врахування

втратах активної потужності у магнітопроводах його ступенів (для даного режиму у розрахунковій схемі ТС (див. рисунок 3.9) не враховуються активні опори  $r'_m$  ступенів).

На рисунках 3.10, 3.11, 3.12 наведено розрахункові осцилограми усталених режимів роботи ТС типу ТОМ-765 з розімкненими його вторинними колами без врахування втрат активної потужності в осердях ступенів: відповідно за розмикання кіл вторинних вимірювальної (рисунок 3.10) та захисної (рисунок 3.11) обмоток, а також режиму розмикання кіл всіх вторинних обмоток нижнього ступеню каскадного ТС (рисунок 3.12). На рисунках зображено такі розрахункові осцилограми:  $i_1(t)$  – первинний струм каскадного ТС;  $i_1^H(t)$  – первинний струм нижнього ступеню каскадного ТС;  $\Psi_1^B(t)$ ,  $\Psi_{1(1)}^H(t)$ ,  $\Psi_{1(2)}^H(t)$  – потокозчеплення первинної обмотки верхнього ступеню та потокозчеплення первинних обмоток осердь з відповідно вторинними вимірювальною і захисною обмотками нижнього ступеню;  $i_{2\text{нав}(1)}(t)$ ,  $i_{2\text{нав}(2)}(t)$  – струми у колах навантаження вторинних вимірювальної та захисної обмоток, відповідно;  $u_{2(1)}^H(t)$ ,  $u_{2(2)}^H(t)$  – вторинні напруги на виводах вимірювальної та захисної обмоток нижнього ступеню, відповідно.

Розмикання кіл вторинного навантаження ТС здійснювалися за проходження струмів у цих колах через нуль. За таких умов комутації струмів ключами К1, ..., К5 у вторинних колах ТС (див. рисунок 3.9) слід очікувати практично усталеного режиму напруги на розімкнених виводах вторинних обмоток ТС.



а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$

б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$

Рисунок 3.10 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за обриву кола вторинної вимірювальної обмотки (розрахунок без врахування втрат активної потужності в осердях ТС)



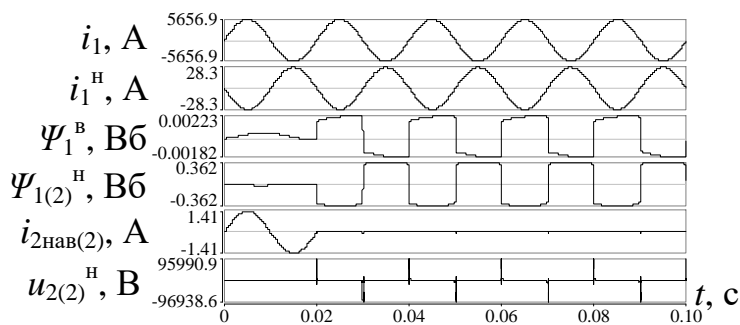
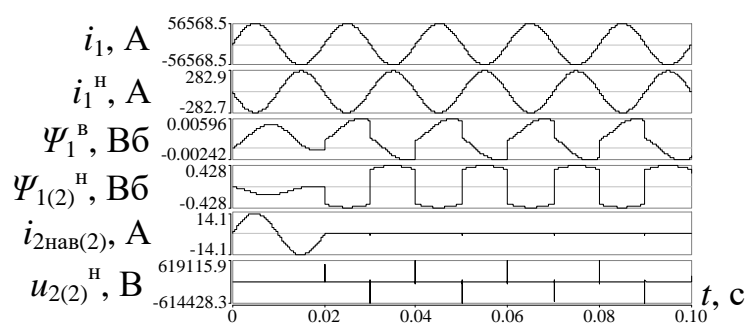
а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$ б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$ 

Рисунок 3.11 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за обриву кола вторинної захисної обмотки (розрахунок без врахування втрат активної потужності в осердях ТС)

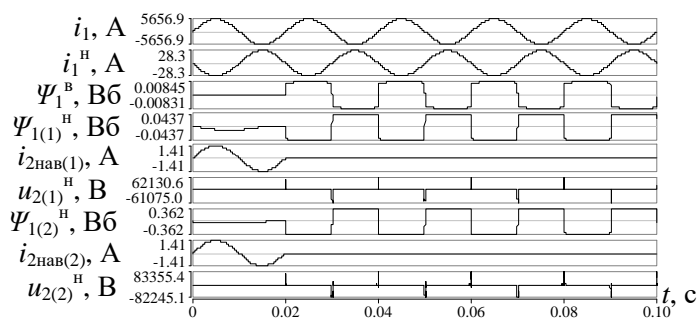
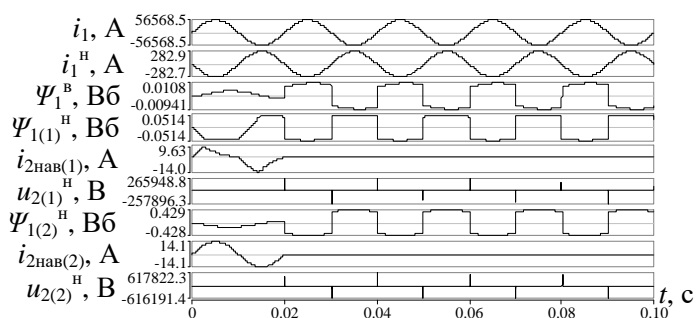
а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$ б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$ 

Рисунок 3.12 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за розмикання всіх кіл вторинних обмоток нижнього ступеню (розрахунок без врахування втрат активної потужності в осердях ТС)

Із отриманих розрахункових осцилограм видно, що за розмикання вторинних кіл досліджуваного ТС на виводах його вторинних обмоток індукуються високовольтні імпульси напруги, амплітуди яких значно перевищують доаварійні та допустимі випробувальні значення і є небезпечними для вторинного обладнання та експлуатаційного персоналу (згідно [11, 90] ефективне значення випробувальної напруги промислової частоти 50 Гц для вторинних кіл ТС рівне 1000 В). Так, за номінального первинного струму каскадного ТС амплітуда усталеної напруги на розімкнених виводах вторинної вимірювальної обмотки становить 73 кВ, а на розімкнених виво-

дах захисної обмотки – 97 кВ. За десятикратного первинного струму (відносно номінальної величини) вторинні перенапруги відповідно рівні: для вимірювальної обмотки – 279 кВ, для захисної обмотки – 619 кВ.

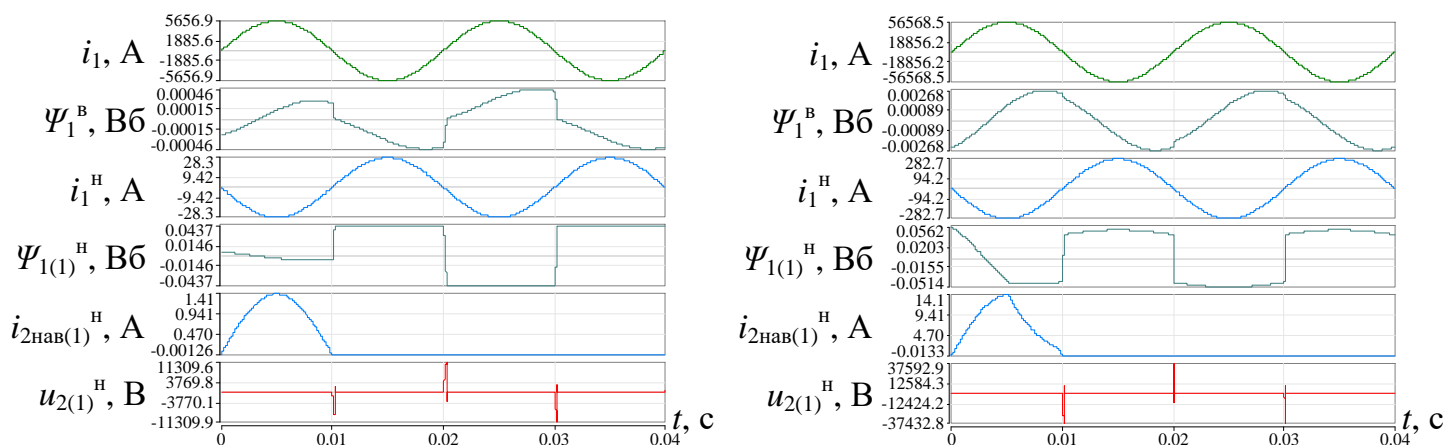
За розмикання вторинних кіл ТС різко зростають магнітні потоки (потокозчеплення первинних обмоток осердь з вторинними вимірювальною і захисною обмотками, відповідно,  $\Psi_{1(1)}^H$  та  $\Psi_{1(2)}^H$ ) у відповідних осердях нижнього ступеню. Криві потокозчеплень первинних обмоток осердь нижнього ступеню мають трапеційну форму зміни у часі. Для інтервалу насичення відповідного магнітопроводу нижнього ступеню вторинна напруга на затискачах обмотки цього осердя є невеликою, а за швидкого перемагнічування цього осердя (за швидкої зміни потокозчеплень первинних обмоток осердь нижнього ступеню в ненасиченій області ВБАХ) на виводах вторинних обмоток спостерігаємо високовольтні імпульси напруг  $u_{2(1)}^H(t)$ ,  $u_{2(2)}^H(t)$ .

Відсутність розмагнічувальних МРС вторинних обмоток за розімкнених їх кіл навантаження також призводить до зростання потокозчеплення первинної обмотки верхнього ступеню каскадного ТС. Це пояснюється тим, що за такого режиму зростає еквівалентне навантаження, підключене до вторинної обмотки верхнього ступеню ТС.

Варто відмітити, що за десятикратного первинного струму вимірювальної обмотки у нормальному доаварійному режимі (вторинне коло є замкненим) спостерігаємо насичення її осердя з аморфної сталі (див. потокозчеплення  $\Psi_{1(1)}^H(t)$ , рисунок 3.10, б) і відповідне спотворення кривої вторинного струму (струм  $i_{2\text{наб}(1)}(t)$ ).

### **Усталений режим роботи ТС типу ТОМ-765 за врахування втрат активної потужності у його магнітопроводах**

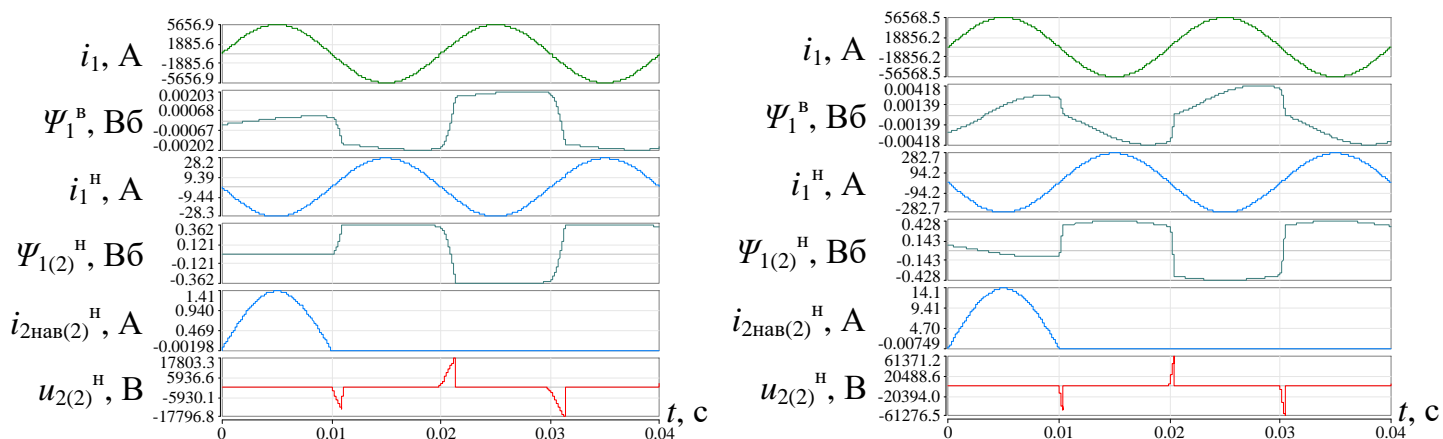
Проведемо аналіз аварійного режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за розмикання кіл його вторинних обмоток з врахуванням втрат активної потужності у магнітопроводах ступенів каскадного ТС: за обриву кіл вторинних вимірювальної (рисунок 3.13), захисної (рисунок 3.14) обмоток, а також режиму обриву кіл всіх вторинних обмоток нижнього ступеню ТС (рисунок 3.15).



а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$

б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$

Рисунок 3.13 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за обриву кола вторинної вимірювальної обмотки (врахування втрат активної потужності в осердях ТС)

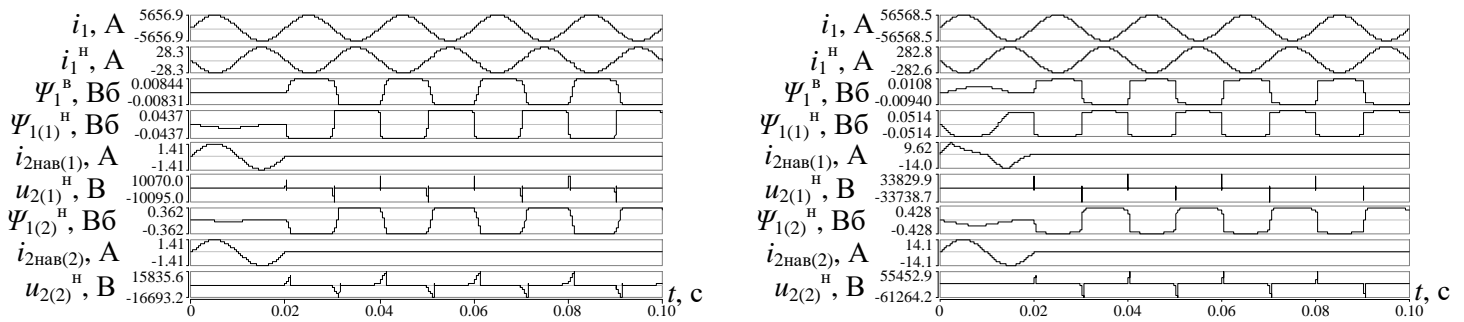


а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$

б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$

Рисунок 3.14 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за обриву кола вторинної захисної обмотки (врахування втрат активної потужності в осердях ТС)

За результатами розрахунків усталених режимів з урахуванням втрат активної потужності в осердях ТС маємо: за номінального первинного струму рівні вторинних перенапруг для вимірювальної обмотки становлять 11 кВ, а для захисної обмотки – 18 кВ; за десятикратного первинного струму – для вимірювальної обмотки – 38 кВ, а для захисної обмотки – 61 кВ.



$$\text{а) } I_1 = I_{1\text{ном}} = 4000 \text{ (A)}$$

$$\text{б) } I_1 = 10 \cdot I_{1\text{ном}} = 40000 \text{ (A)}$$

Рисунок 3.15 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за розмикання кіл всіх вторинних обмоток нижнього ступеню (врахування втрат активної потужності в осердях ТС)

Порівнюючи отримані результати з результатами розрахунку без врахування втрат активної потужності в магнітопроводах ступенів каскадного ТС, бачимо, що врахування втрат активної потужності в осердях (як і для досліджуваних вище одноступеневих ТС) значно зменшує у кілька разів рівні вторинних перенапруг. Так, для вторинної вимірювальної обмотки величина амплітуди вторинної напруги зменшилася приблизно у 6 разів за номінального первинного струму та приблизно у 7 разів за десятикратного первинного струму. Для захисної обмотки за номінального первинного струму величина амплітуди вторинної напруги зменшилася приблизно у 5 разів і за десятикратного первинного струму – приблизно у 10 разів.

Варто відмітити, що за десятикратного первинного струму ТС відсутність розмагнічувальної МРС вторинної вимірювальної обмотки за розмикання її кола навантаження практично не впливає на форму кривої потокозчеплення первинної обмотки верхнього ступеню  $\Psi_1^B(t)$  (крива практично є синусоїдною). Це пояснюється тим, що осердя вимірювальної обмотки з аморфної сталі є малопотужним і майже весь час (за час тривання періоду первинного струму ТС) є насиченим, в результаті чого спадок напруги на цій обмотці є незначним.

Очевидно, що реальні величини вторинних перенапруг ТС будуть дещо меншими, якщо під час розрахунків враховуватимуться міжвиткові ємності та ємності обмоток між собою і відносно землі. Також на отримані величини розрахункових

перенапруг впливатиме і більш точно врахування втрат активної потужності в осердях каскадного ТС (окреме врахування втрат активної потужності на гістерезис та вихрові струми тощо). Тому наведені значення отриманих розрахункових перенапруг на затискачах розімкнених вторинних обмоток ТС типу ТОМ-765 як для усталених, так і для перехідних режимів слід вважати орієнтовними – для оцінки рівнів таких перенапруг стосовно ступені небезпеки для експлуатаційного персоналу електроустановок, ізоляції обмоток ТС та розробки пристроїв захисту ТС для обмеження цих перенапруг до допустимого рівня.

### **3.2 Перехідні режими трансформаторів струму за обриву кіл їх вторинних обмоток**

Електромагнітні перехідні процеси в ТС виникають за збурень потокозчеплень обмоток, намотаних (розміщених) на відповідних осердях ТС. Збурення цих потокозчеплень можуть виникати як за збурень струмів у первинній обмотці ТС, так і за збурень параметрів кола навантаження, підключеного до вторинної обмотки, а також за одночасної появи цих збурень.

Оскільки одночасне збурення параметрів кіл, до яких увімкнені первинна і вторинна обмотки ТС, розміщені на спільному осерді, є малоімовірним, тому подібні режими не є розрахунковими.

Враховуючи вище наведене, розглянемо окремо:

1. Перехідні процеси в ТС за збурень струму у первинній обмотці ТС і розімкненого кола його вторинної обмотки:

а) вмикання поштовхом струму промислової частоти 50 Гц до первинної обмотки ТС за максимальної аперіодичної складової струму з заданою постійною часу загасання;

б) вмикання до первинної обмотки ТС струму ненавантаженого силового трансформатора за увімкнення його до трифазного джерела живлення промислової частоти 50 Гц;

2. Перехідні процеси у ТС за збурень параметрів кола навантаження, підключеного до вторинної обмотки ТС за умови протікання у первинній обмотці ТС усталеного струму промислової частоти 50 Гц. Обрив кола навантаження імітують шляхом підключення у це коло керованого активного опору (КАО), що експоненційно збільшується з заданою постійною часу до заданого значення.

Вище наведені збурення з заданою постійною часу зміни параметру  $\epsilon$ , на наш погляд, типовими, зокрема для зміни активного опору в місці погасання чи виникнення короткої електричної дуги для реальних процесів у вторинних колах ТС мереж промислової частоти за їх захисту повітряними іскровими розрядниками з напругою пробиття до 1000 В (відстань між електродами – до 0,3 мм). Для цього випадку, на наш погляд, забезпечується адекватне відтворення досліджуваних процесів з урахуванням дотримання вимог законів зміни параметрів режиму (законів комутації напруг та струмів тощо). Значення параметрів режиму (струми в обмотках ТС, постійні часу загасання чи зростання тощо) та розрахункові схеми для симуляції режиму наводяться нижче при аналізі результатів симуляції окремих режимів для основних різновидів за конструкцією типових ТС:

- а) одноступеневий вбудований ТС типу ТВ-35;
- б) шинний ТС типу ТШЛ-20;
- в) каскадний двоступеневий опорний ТС типу ТОМ-765.

### **3.2.1 Увімкнення ненавантаженого силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1 з трансформаторами струму типу ТВ-35 до трифазного джерела живлення 35 кВ промислової частоти 50 Гц**

Розрахункова схема електричної мережі для комп'ютерної симуляції заданого режиму наведена на рисунку 3.16. Технічні параметри силового трансформатора, взяті з [97], та параметри розрахункової схеми наведені в додатку Е.

Трифазний ключ К2 у заданий момент часу (розрахований для максимального кидка струму намагнічування силового трансформатора) подає живлення у коло ВН ненавантаженого силового трансформатора.

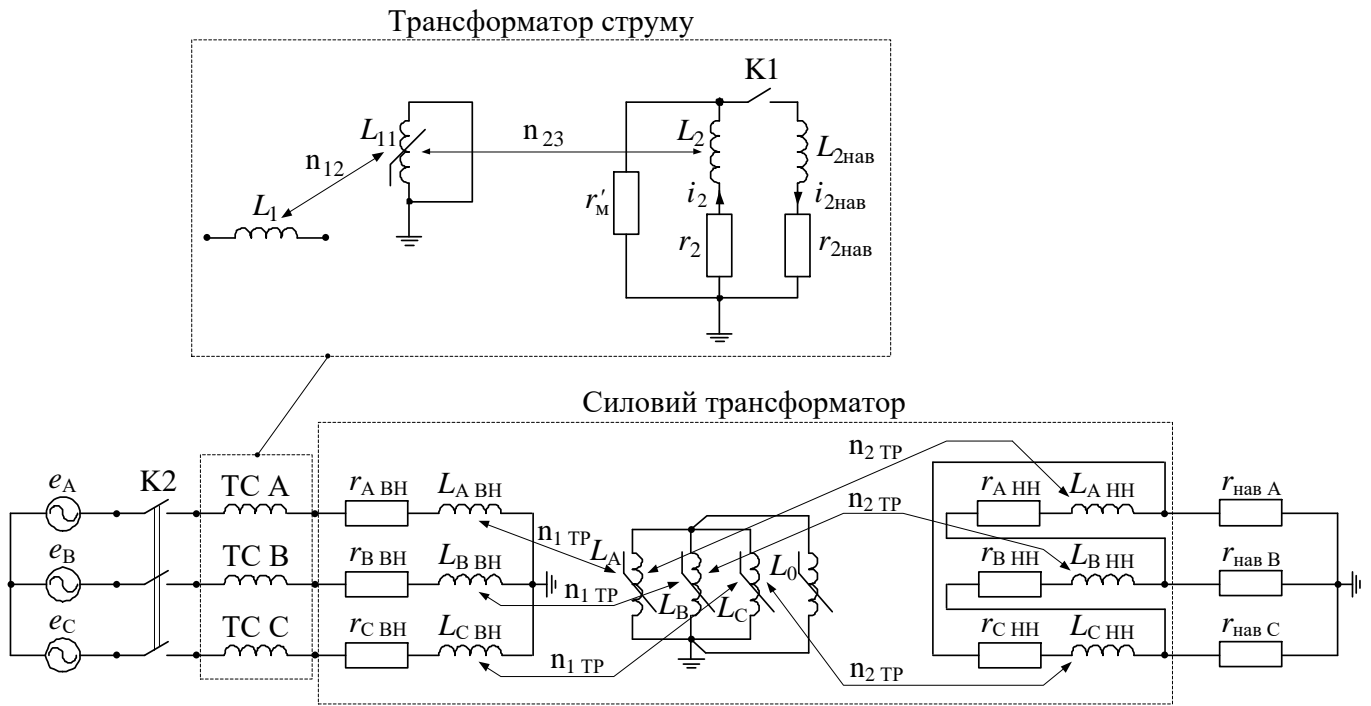


Рисунок 3.16 – Розрахункова схема електричної мережі з ненавантаженим силовим трансформатором типу ТДНС-16000/35 У1 з ТС типу ТВ-35 на стороні ВН

У фазах А, В, С увімкнені ТС типу ТВ-35 300/5, розрахункова схема яких також наведена на рисунку 3.16. Параметри розрахункової моделі ТС аналогічні, як і для досліджених вище усталених режимів його роботи за розімкненого вторинного кола (див. розділи 2, 3). Вторинна обмотка ТС розімкнена під час дослідження режиму ввімкнення ненавантаженого силового трансформатора (ключ  $K1$  вимкнений).

На рисунках 3.17 – 3.19 наведено розрахункові осцилограми параметрів режиму за максимального кидка струму намагнічування силового трансформатора ТДНС-16000/35 У1 з увімкненими у фазах А, В, С ТС типу ТВ-35, де:  $i_{1A}(t)$ ,  $i_{1B}(t)$ ,  $i_{1C}(t)$  – первинні струми ТС фаз А, В і С, відповідно;  $\Psi_1(t)$  – зведене до первинної сторони потокозчеплення вторинної обмотки ТС типу ТВ-35;  $u_2(t)$  – напруга на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТВ-35.

Як видно з рисунку 3.17, максимальний кидок струму намагнічування у фазі А силового трансформатора виникає за ввімкнення ключа  $K2$  у момент часу 0,0015 с.

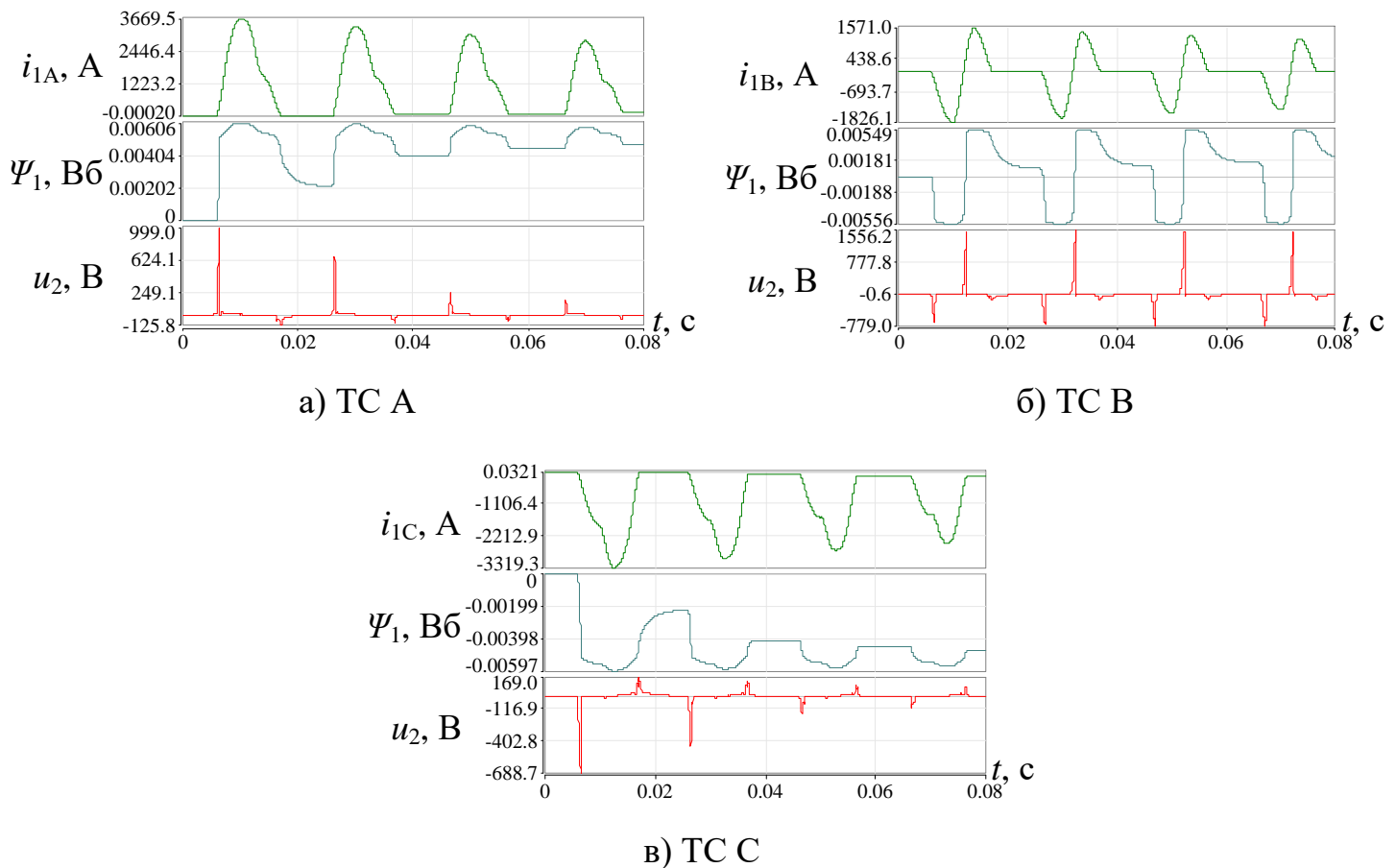


Рисунок 3.17 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму за максимального кидка струму намагнічування у фазі А силового трансформатора

Як видно з рисунку 3.17, амплітуда кидка струму намагнічування силового трансформатора у фазі А додатна і становить 3670 А. Відповідно і у потокозчепленні  $\Psi_1(t)$  обмотки ТС також спостерігається наявна додатна уніполярна складова, внаслідок чого практично відсутнє перемагнічування осердя ТС.

Напруга на затискачах вторинної обмотки ТС А відповідно до зміни потокозчеплення  $\Psi_1(t)$  становить чергування імпульсів з загасаючою амплітудою (у момент включення ключа К2 амплітуда вторинної напруги сягає величини 999 В). Внаслідок наявності додатної уніполярної складової і відповідної зміни потокозчеплення обмотки ТС А від'ємні імпульси вторинної напруги ТС А практично невеликі.

Аналогічні пікоподібні напруги виникають на затискачах розімкнутих вторинних обмоток ТС В і ТС С. Знак і значення піків цих напруг залежать від зміни відпо-



відних поточкозчеплень їх вторинних обмоток, що, в свою чергу, визначаються змінною відповідних струмів у первинних обмотках ТС В і ТС С.

Подібні розрахункові осцилограми одержані і за максимальних кидків струму намагнічування силового трансформатора у фазах В (ключ К2 вмикається у момент часу 0,00817 с) та С (ключ К2 вмикається у момент часу 0,01483 с). Максимальний кидок струму намагнічування силового трансформатора у фазі В складає 3665 А, а у фазі С – 3635 А.

За максимального кидка струму намагнічування у фазі В силового трансформатора для ТС В амплітуда вторинної напруги у момент включення ключа К2 сягає величини 1000 В, для ТС С усталена вторинна напруга рівна 1557 В; а за максимального кидка струму намагнічування у фазі С – для ТС С амплітуда вторинної напруги у момент включення ключа К2 сягає величини 996 В, а для ТС, увімкненого у фазі А, усталена вторинна напруга рівна 1558 В.

Проведені дослідження також показали, що обриви обмоток силового трансформатора, з'єднаних у «трикутник» на стороні НН, не впливають на амплітуду максимального кидка струму намагнічування, яка практично співпадає з даними розрахунку параметрів такого режиму для нормальної робочої схеми ненавантаженого силового трансформатора.

### **3.2.2 Особливості перехідних режимів трансформатора струму типу ТШЛ-20 10000/5 за розмикання кола його вторинного навантаження**

**Вмикання поштовхом струму з аперіодичною складовою у первинну обмотку ТС за розімкненого його вторинного кола**

Розрахункова схема ТС для дослідження перехідних режимів вмикання поштовхом струму з аперіодичною складовою у його первинну обмотку за розімкненого вторинного кола аналогічна схемі, наведеній на рисунку 3.1. Додатково у первинне коло ТС (блок 1) увімкнено нормально розімкнений ключ К2, яким первинну обмотку ТС підключають до джерела ЕРС  $e_1$  промислової частоти 50 Гц, та індуктивність  $L$ , параметрами якої та активного опору  $r_{1\text{нав}}$  задають постійну часу загасання

$\tau_a = L / r_{1\text{наВ}}$  аперіодичної складової у первинному струмі ТС. Ключ К1 у вторинному колі ТС (блок 3) розімкнений.

Параметри розрахункової схеми ТС типу ТШЛ-20 аналогічні наведеним вище у даному розділі під час дослідження усталених режимів роботи ТС за обриву вторинного кола.

Розрахунки проводилися за кількох значень постійних часу  $\tau_a$  загасання аперіодичної складової у первинному струмі ТС (0,001 с; 0,01 с; 0,03 с).

На рисунку 3.18 наведено такі розрахункові осцилограми параметрів досліджуваного режиму ТС типу ТШЛ-20 за постійної часу загасання аперіодичної складової у первинному струмі  $\tau_a = 0,03$  с:  $i_1(t)$  – первинний струм ТС;  $\Psi_1(t)$  – зведене до первинної сторони потокозчеплення вторинної вимірювальної обмотки ТС;  $u_2(t)$  – напруга на виводах вимірювальної обмотки ТС.

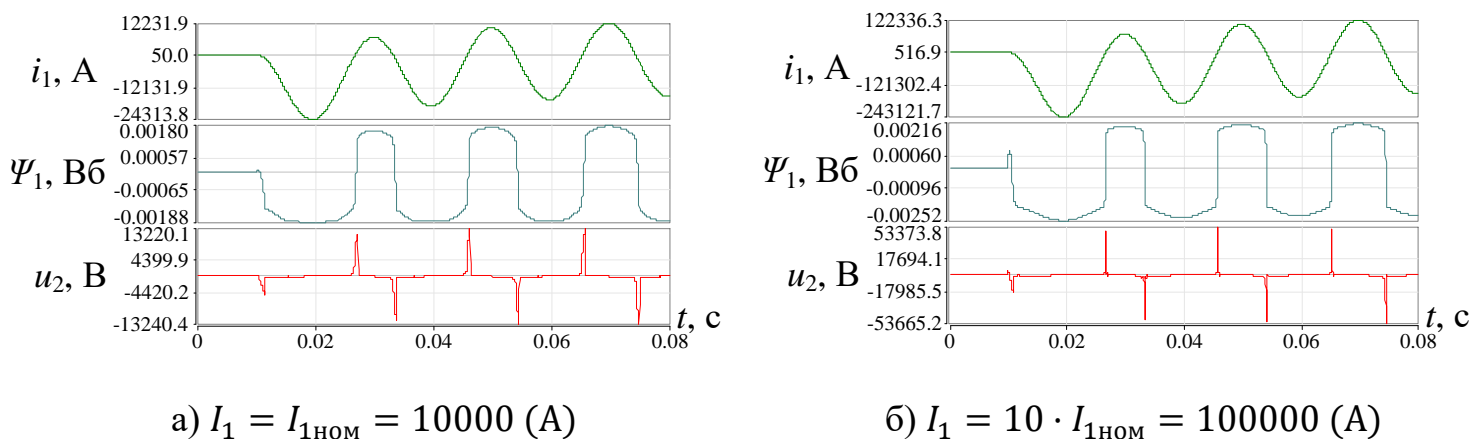


Рисунок 3.18 – Розрахункові осцилограми режиму за аперіодичної складової у первинному струмі ТС типу ТШЛ-20

Як видно з рисунку 3.18, у момент увімкнення ключа К2 (розрахований час увімкнення для постійної часу  $\tau_a = 0,03$  с складає 0,00966 с) за швидкої зміни потокозчеплення вторинної обмотки ТС виникає імпульс вторинної напруги. У заданому режимі як за номінального, так і десятикратного первинного струму ТС амплітуди цього імпульсу напруги є меншими за усталені значення після загасання аперіодичної складової. Це зумовлено намагнічуванням осердя аж до зони насичення практично лише на від'ємній ділянці ВБАХ. Тоді як за усталеного режиму осердя перемаг-

нічується симетрично за додатних і від'ємних значень потокозчеплення обмотки, зі швидким перемагніченням в ненасиченій області ВБАХ.

Амплітуди вторинної напруги за подання струму у первинну обмотку ТС типу ТШЛ-20 за різних постійних часу загасання аперіодичної складової наведено у таблиці 3.1 та у графічному вигляді на рисунку 3.19.

Таблиця 3.1 – Амплітуди вторинної напруги у момент подання струму у первинну обмотку ТС типу ТШЛ-20 за різних постійних часу загасання аперіодичної складової струму  $\tau_a$

	$I_1 = I_{1\text{ном}} = 10000 \text{ A}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1\text{ном}} = 100000 \text{ A}$
$\tau_a = 0,001 \text{ c}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,00597 c)		
$U_{2m}, \text{ B}$	18177	63564
$\tau_a = 0,01 \text{ c}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,00902 c)		
$U_{2m}, \text{ B}$	7137	29555
$\tau_a = 0,03 \text{ c}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,00966 c)		
$U_{2m}, \text{ B}$	5084	18433

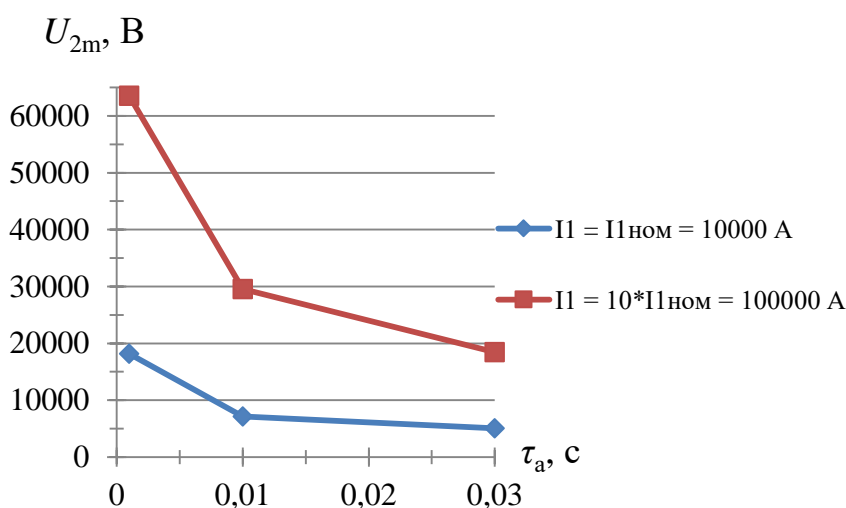


Рисунок 3.19 – Залежності амплітуди вторинної напруги у момент подання струму у первинну обмотку ТС типу ТШЛ-20 від постійних часу загасання аперіодичної складової струму  $\tau_a$

Аналогічні розрахункові осцилограми режиму було отримано і для найменш потужного з досліджуваних одноступеневих ТС – ТС типу ТВ-35, амплітуди вто-

ринної напруги якого у момент подання струму у первинну обмотку за різних постійних часу загасання аперіодичної складової наведено у таблиці 3.2. Отримані залежності  $U_{2m} = f(\tau_a)$  ТС ТВ-35 аналогічні відповідним залежностям для ТС типу ТШЛ-20, наведеним на рисунку 3.19.

Таблиця 3.2 – Амплітуди вторинної напруги у момент подання струму у первинну обмотку ТС типу ТВ-35 за різних постійних часу загасання аперіодичної складової струму  $\tau_a$

	$I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 300 \text{ А}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ А}$
$\tau_a = 0,001 \text{ с}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,01597 с)		
$U_{2m}, \text{ В}$	453	2000
$\tau_a = 0,01 \text{ с}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,01902 с)		
$U_{2m}, \text{ В}$	249	1028
$\tau_a = 0,03 \text{ с}$ (час увімкнення ключа К2 – 0,01966 с)		
$U_{2m}, \text{ В}$	222	607

### Перехідний режим обриву вторинного кола ТС типу ТШЛ-20 за амплітуди його вторинного струму

Обрив вторинного кола ТС симульовано послідовним увімкненням (дешунтуванням) у коло навантаження ТС керованого активного опору (КАО)  $r_{\text{кер}}$  (див. блок 3 розрахункової схеми ТС, рисунок 3.20).

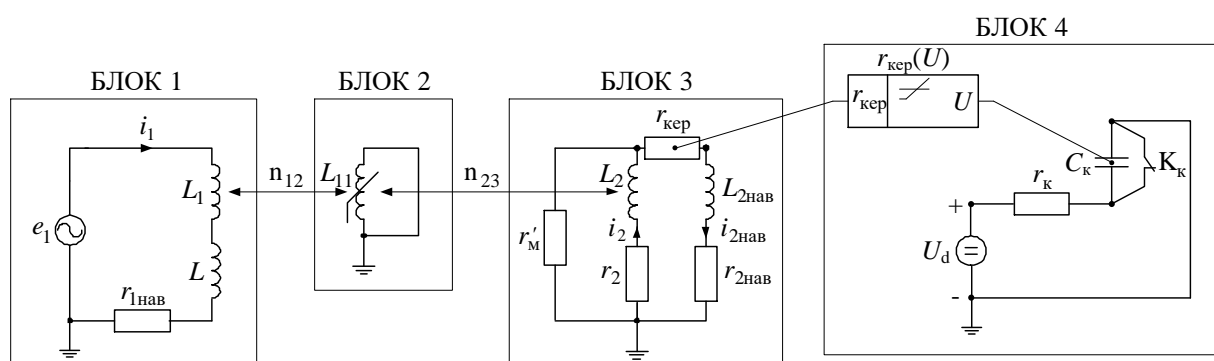


Рисунок 3.20 – Розрахункова схема одноступеневого ТС з КАО  $r_{\text{кер}}$  для симуляції розмикання його вторинного кола

Параметри розрахункової схеми досліджуваного ТС типу ТШЛ-20 аналогічні, як і під час дослідження вище у даному розділі роботи ТС за усталених режимів розмикання під навантаженням його вторинного кола.

КАО симулював зростання (по експоненті з заданою постійною часу наростання) активного опору в місці обриву. Вмикання (дешунтування) КАО здійснювалось у момент часу, коли струм у вторинній обмотці ТС сягав амплітудного значення. Під час проведення досліджень задавались відповідні максимальне (1,0 МОм; 10,0 МОм) значення опору КАО  $r_{\text{керп}}$  та значення постійної часу  $\tau_{\text{КАО}}$  його зростання (0,1 мс; 1,0 мс; 10,0 мс).

Параметри керуючого R-C кола постійної напруги (блок 4, див. рисунок 3.20) наведені в додатку Е.

Як показано нижче, для нормального режиму роботи досліджуваного ТС КАО  $r_{\text{кер}} = 0$  і тому не впливає на усталений режим ТС.

Як видно з рисунку 3.20, початковий стан керуючого ключа  $K_k$  – замкнений і відповідно керуюча напруга  $U$  – напруга на ємності  $C_k$  – рівна нулю. У момент часу 0,005 с, коли вторинний струм ТС сягає амплітудної величини, ключ  $K_k$  розмикається і напруга  $U$  по експоненті, з заданою постійною часу, зростає до напруги джерела живлення  $U_d$ . Напруга  $U$  з ємності  $C_k$  подається на вхід функції керування  $r_{\text{кер}}(U)$ , яка, у свою чергу, змінює за заданою функцією керування  $r_{\text{кер}}(U)$  величину активного опору  $r_{\text{кер}}$  у вторинному колі ТС.

Співвідношення для деяких параметрів режиму роботи блоків 3 і 4 схеми такі:

- керуюча напруга  $U = U_d \cdot (1 - \exp(-t/\tau_{\text{КАО}}))$ ;
- функція керування  $r_{\text{кер}}(U) = (U/U_d)$ ;
- керований опір КАО в колі навантаження ТС  
 $r_{\text{кер}} = r_{\text{кер}}(U) \cdot r_{\text{керп}} = (1 - \exp(-t/\tau_{\text{КАО}})) \cdot r_{\text{керп}}$ ;
- постійна часу  $\tau_{\text{КАО}} = r_k \cdot C_k$ .

На рисунку 3.21 наведено розрахункові осцилограми для таких параметрів досліджуваного режиму за розмикання вторинної вимірювальної обмотки ТС ТШЛ-20 за амплітуди вторинного струму:  $i_1(t)$  – первинний струм ТС;  $\Psi_1(t)$  – зведене до

первинної сторони потокозчеплення вторинної вимірювальної обмотки ТС;  $i_{2\text{наб}}(t)$  – струм у колі вторинного навантаження ТС;  $u_2(t)$  – вторинна напруга ТС.

Максимальне значення КАО  $r_{\text{керпм}} = 1$  МОм. Наведені осцилограми розраховані за постійної часу зростання КАО  $\tau_{\text{КАО}} = 100$  мкс, коли виникає найбільша амплітуда вторинної напруги трансформатора у момент обриву вторинного кола.

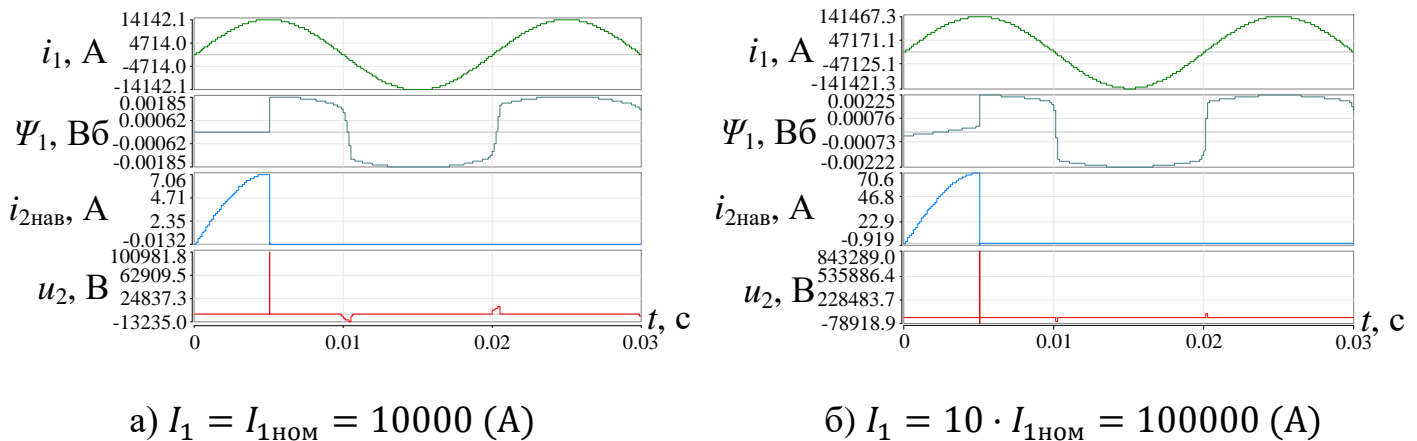


Рисунок 3.21 – Розрахункові осцилограми режиму розмикання кола вимірювальної вторинної обмотки ТС типу ТШЛ-20 за амплітуди його вторинного струму

Як видно з рисунку 3.21, у момент розмикання вторинного кола ТС ТШЛ-20 виникає небезпечний високовольтний імпульс напруги, амплітуда якого значно перевищує рівні вторинної напруги за усталеного режиму обриву даного кола. При цьому, оскільки магнітопровід ТС є досить потужним, виникають дуже великі за амплітудою, але короткотривалі вторинні перенапруги з величиною десятків і сотень (для початкового імпульсу) кіловольт.

Так, за номінального первинного струму шинного ТС типу ТШЛ-20 у момент обриву вторинного кола амплітуда напруги на виводах його вимірювальної обмотки досягає значення 101 кВ (амплітуда напруги за усталеного режиму обриву кола навантаження рівна 13235 В), а за десятикратного первинного струму – 843 кВ (порівняно з амплітудою напруги усталеного режиму – 53619 В). Очевидно, реальні значення цих перенапруг будуть менші з урахуванням ємностей обмоток ТС, детальнішим симулюванням втрат активної потужності в осерді ТС тощо). Однак, як показує

досвід експлуатації та аналіз аварій таких потужних ТС, за виникнення обривів у вторинних колах цих потужних ТС (особливо для шинних ТС в колах генераторної напруги електростанцій) мають місце значні високовольтні перенапруги, які супроводжуються горінням тривалої електричної дуги у місці обриву. Така дуга, як правило, призводить до масштабного вигорання кабелів вторинної комутації, а також – до пошкодження ізоляції аварійного ТС і є дуже небезпечна для обслуговуючого персоналу підстанцій.

У таблиці 3.3 та на рисунку 3.22 наведено значення амплітуди вторинної напруги ТС типу ТШЛ-20 у момент розмикання його вторинного кола за різних значень постійної часу  $\tau_{\text{КАО}}$  зростання КАО  $r_{\text{кер}}$ .

Таблиця 3.3 – Амплітуди вторинної напруги у момент розмикання вторинної вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20

	$I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 10000 \text{ (A)}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 100000 \text{ (A)}$
<i>Вимірювальна обмотка класу точності 3</i>		
$\tau_{\text{КАО}} = 100 \text{ мкс}$		
$U_{2\text{м імп}}, \text{В}$	100982	843289
$\tau_{\text{КАО}} = 1 \text{ мс}$		
$U_{2\text{м імп}}, \text{В}$	77977	463036
$\tau_{\text{КАО}} = 10 \text{ мс}$		
$U_{2\text{м імп}}, \text{В}$	41540	175104

Отримані результати ще раз підтверджують значну небезпеку обриву кіл вторинного навантаження ТС для обладнання та обслуговуючого персоналу, особливо ТС з досить потужними магнітопроводами, для яких перенапруги можуть сягати десятків кВ. Як зазначено вище, такі рівні вторинних напруг для ТС є недопустимими, призводять до руйнування ізоляції електрообладнання та можуть смертельно травмувати обслуговуючий персонал підстанції.

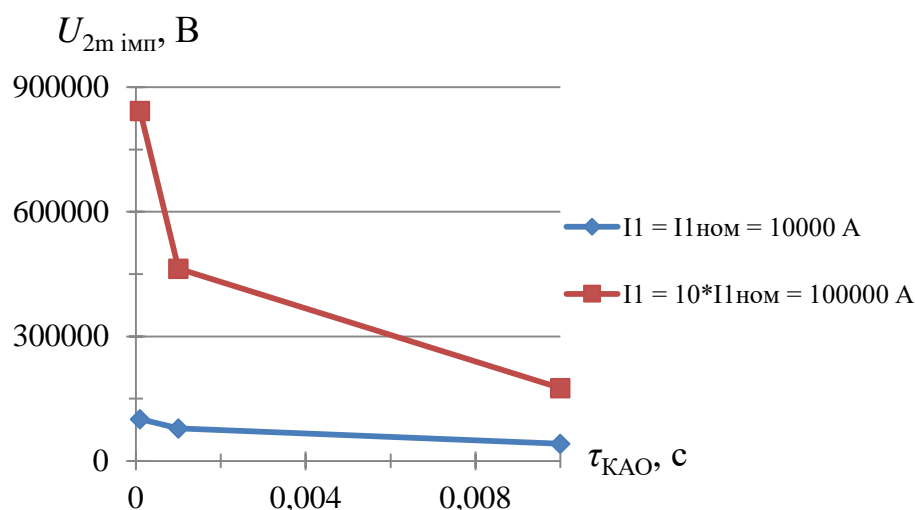


Рисунок 3.22 – Залежність амплітуди напруги на затискачах вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20 у момент розмикання кола вторинного навантаження від постійних часу  $\tau_{КАО}$

Аналогічні результати розрахунку отримані для ТС типу ТВ-35, значення амплітуди вторинної напруги якого у момент розмикання вторинного кола за різних постійних часу  $\tau_{КАО}$  зростання КАО  $r_{кер}$  для  $r_{керм} = 1 \text{ кОм}$  наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення амплітуди вторинної напруги у момент розмикання вторинної обмотки ТС типу ТВ-35

	$I_1 = I_{1ном} = 300 \text{ (А)}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1ном} = 3000 \text{ (А)}$
<i>Вимірювальна обмотка класу точності 3</i>		
$\tau_{КАО} = 100 \text{ мкс}$		
$U_{2m \text{ imp}}, \text{В}$	888	5349
$\tau_{КАО} = 1 \text{ мс}$		
$U_{2m \text{ imp}}, \text{В}$	678	2275
$\tau_{КАО} = 10 \text{ мс}$		
$U_{2m \text{ imp}}, \text{В}$	340	766

Із наведених вище результатів (див. таблицю 3.4) видно, що за номінального первинного струму ТС ТВ-35 амплітуди вторинної напруги у момент обриву кола вторинного навантаження не перевищують нормовану величину випробувальної напруги ізоляції [11, 90]. Однак за десятикратного (у порівнянні до номінальної вели-



чини) первинного струму трансформатора амплітуди початкового імпульсу вторинної напруги сягають небезпечних значень. При цьому за більш повільного зростання КАО  $r_{кер}$  і відповідно повільнішої зміни потокозчеплення вторинної обмотки у момент розмикання її виводів амплітуда початкового високовольтного піку напруги зменшується.

Також були проведені розрахунки амплітуди вторинної напруги  $U_{2m\ imp}$  ТС ТВ-35 у момент розмикання його вторинного кола за максимального значення КАО  $r_{керм} = 1$  МОм. Одержані результати розрахунку за номінального первинного струму ТС типу ТВ-35 для різних значень постійної часу  $\tau_{КАО}$  КАО практично співпадають:

а) за  $\tau_{КАО} = 100$  мкс  $U_{2m\ imp} = 1123$  В;

б) за  $\tau_{КАО} = 1$  мс  $U_{2m\ imp} = 1115$  В;

в) за  $\tau_{КАО} = 10$  мс  $U_{2m\ imp} = 1075$  В.

Це можна пояснити, на наш погляд, відносно швидким насиченням малопотужного осердя ТС типу ТВ-35 у порівнянні із значно потужнішими ТС, наприклад, типу ТШЛ-20 10000/5.

### **3.2.3 Особливості перехідних режимів каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 за розмикання його вторинних кіл**

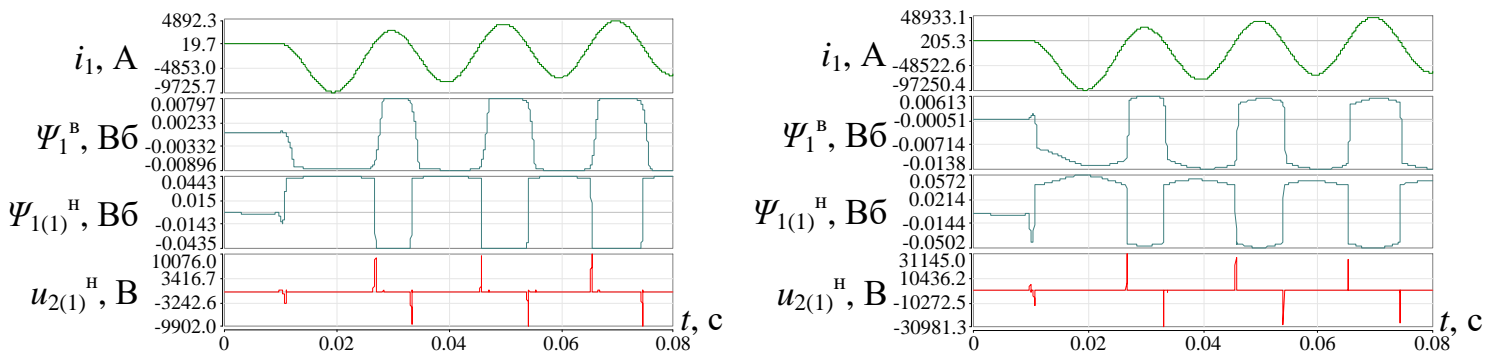
#### **Вмикання поштовхом струму з аперіодичною складовою у первинну обмотку ТС за розімкненого його вторинного кола**

Розрахункова схема ТС типу ТОМ-765 для заданого режиму аналогічна схемі ТС, наведеній на рисунку 3.9. У блок 1 розрахункової схеми додатково послідовно до джерела ЕРС  $e_1$  увімкнено індуктивність  $L$  та ключ К6, яким у заданий момент часу підводять до первинного кола ТС струм з аперіодичною складовою з заданою постійною часу її загасання  $\tau_a = 0,01$  с;  $0,03$  с;  $0,1$  с ( $\tau_a = L/r_{1наб}$ ). Параметри розрахункової схеми каскадного ТС ТОМ-765 аналогічні наведеним вище у даному розділі під час досліджень усталених режимів обриву вторинних кіл ТС.

Вторинні кола нижнього ступеню каскадного ТС є постійно розімкненими (ключі К1, ..., К5 розімкнені). Для цих режимів ТС ТОМ-765 досліджувалися рівні

напруги на затискачах його розімкнених вторинних обмоток у момент подання первинного струму з аперіодичною складовою.

На рисунках 3.23 і 3.24 наведені отримані розрахункові осцилограми параметрів досліджуваного режиму каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 для кіл з вторинними вимірювальною та захисною обмотками, відповідно. На цих осцилограмах наведені такі параметри режиму за постійної часу загасання  $\tau_a = 0,03$  с:  $i_1(t)$  – первинний струм каскадного ТС;  $\Psi_1^B(t)$ ,  $\Psi_{1(1)}^H(t)$ ,  $\Psi_{1(2)}^H(t)$  – потокозчеплення первинної обмотки верхнього ступеню, потокозчеплення первинних обмоток осердь з вторинними вимірювальною та захисною обмотками нижнього ступеню, відповідно;  $u_{2(1)}^H(t)$ ,  $u_{2(2)}^H(t)$  – напруги на виводах вторинних вимірювальної та захисної обмоток каскадного ТС, відповідно.



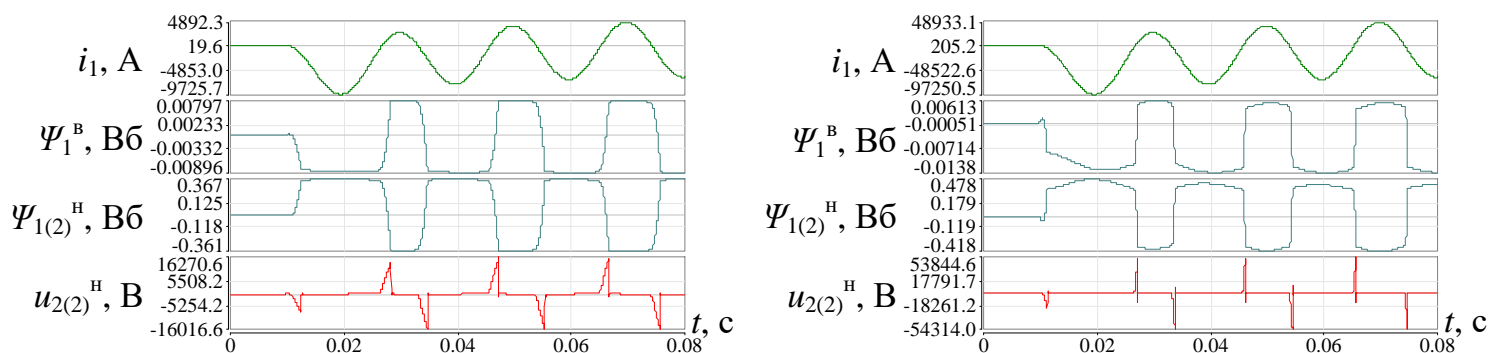
а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000$  (А)

б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000$  (А)

Рисунок 3.23 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму з аперіодичною складовою у первинному струмі ТС ТОМ-765 для кола з вторинною вимірювальною обмоткою

Як видно з отриманих осцилограм, за рахунок впливу на потокозчеплення  $\Psi_1^B(t)$  аперіодичної складової струму  $i_1(t)$  амплітуди вторинних напруг у момент подання струму у первинну обмотку ТС є меншими за їх усталені значення за розімкнених вторинних кіл нижнього ступеню. Після загасання аперіодичної складової струму  $i_1(t)$  має місце симетричне перемагнічення та насичення осердя верхнього ступеню ТС за рахунок відсутності розмагнічуючих МРС вторинних обмоток ниж-

нього ступеню. При цьому потокозчеплення  $\Psi_1^B(t)$  первинної обмотки верхнього ступеню ТС набуває трапеційної форми.



а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$

б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$

Рисунок 3.24 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму з аперіодичною складовою у первинному струмі ТС ТОМ-765 для кола з вторинною захисною обмоткою

У таблиці 3.5 наведені значення амплітуд вторинних напруг у момент ввімкнення струму у первинному колі ТС ТОМ-765 за різних постійних часу  $\tau_a$  загасання аперіодичної складової струму.

Таблиця 3.5 – Амплітуди вторинних напруг ТС ТОМ-765 у момент подання струму у його первинну обмотку для різних значень постійних часу загасання аперіодичної складової струму

	$I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$
<i>Вимірювальна вторинна обмотка</i>		
$\tau_a = 0,01 \text{ с (час увімкнення ключа К6 – 0,00902 с)}$		
$U_{2m(1)}^H, \text{ В}$	5768	18996
$\tau_a = 0,03 \text{ с (час увімкнення ключа К6 – 0,00966 с)}$		
$U_{2m(1)}^H, \text{ В}$	3608	12173
$\tau_a = 0,1 \text{ с (час увімкнення ключа К6 – 0,0099 с)}$		
$U_{2m(1)}^H, \text{ В}$	2760	4340
<i>Захисна вторинна обмотка</i>		
$\tau_a = 0,01 \text{ с (час увімкнення ключа К6 – 0,00902 с)}$		
$U_{2m(2)}^H, \text{ В}$	9872	35462
$\tau_a = 0,03 \text{ с (час увімкнення ключа К6 – 0,00966 с)}$		

Продовження таблиці 3.5

$U_{2m(2)}^H, В$	8254	21275
$\tau_a = 0,1 с$ (час увімкнення ключа К6 – 0,0099 с)		
$U_{2m(2)}^H, В$	7761	17961

### **Перехідний режим обриву вторинного кола ТС типу ТОМ-765 за амплітуди його вторинного струму**

Нижче наведені результати симуляції аварійного режиму розмикання вторинних кіл нижнього ступеню каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 шляхом увімкнення послідовно у ці кола КАО, який, аналогічно одноступеневим ТС, симулював зростання (по експоненті з заданою постійною часу наростання) активного опору в місці обриву в моменти проходження вторинних струмів через амплітудні величини.

Розрахункова схема для симуляції заданого режиму розмикання вторинної вимірювальної обмотки нижнього ступеню каскадного ТС наведена на рисунку 3.25. Під час дослідження режиму розмикання кола захисної обмотки КАО  $r_{кер}$  вмикається у її вторинне коло. Параметри розрахункових схем наведені вище у попередньому розділі – для досліджень усталених режимів обриву вторинних кіл ТС ТОМ-765. Параметри елементів блоку 6 (рисунок 3.25) – керуючої ланки постійної напруги – розраховані аналогічно, як і для наведених вище одноступеневих ТС.

Нижче наведені результати досліджень за номінального та десятикратного відносно номінальної величини первинного струму каскадного ТС типу ТОМ-765.

На рисунках 3.26 та 3.27 наведено розрахункові осцилограми параметрів досліджуваного режиму розмикання вторинних кіл ТС типу ТОМ-765 за постійної часу  $\tau_{КАО} = 100$  мкс зростання КАО до величини  $r_{керм} = 1$  МОм. Як показали розрахунки, за таких величин параметрів виникає найбільша амплітуда початкового імпульсу вторинної напруги. Як видно з отриманих осцилограм, початковий пік вторинної напруги значно перевищує рівні напруги для усталеного режиму, що зумовлено швидким наростанням поточозчеплень первинних обмоток відповідних осердь ниж-

нього ступеню аж до зони входження їх у насичений стан (потокозчеплення  $\Psi_{1(1)}^H(t), \Psi_{1(2)}^H(t)$ ).

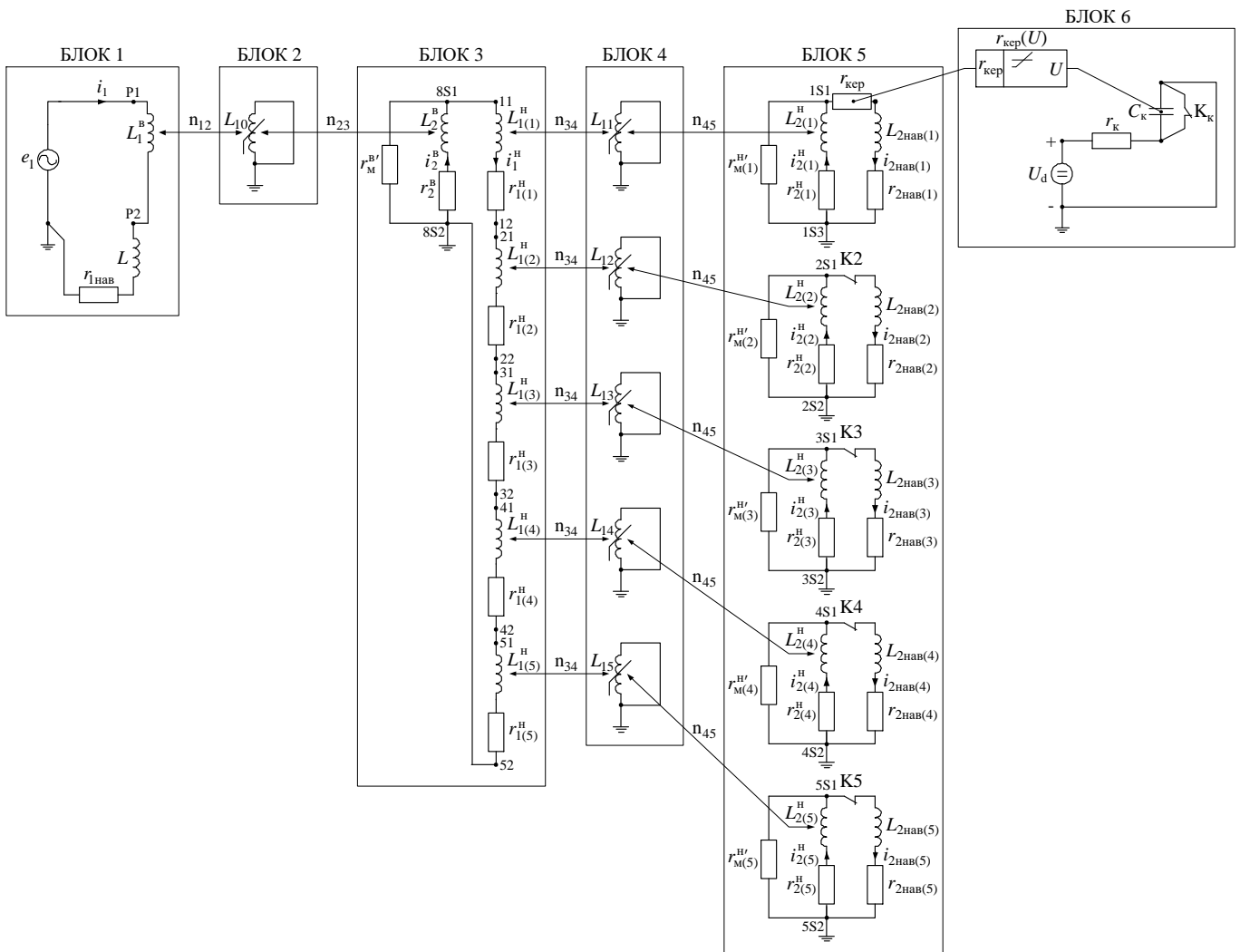
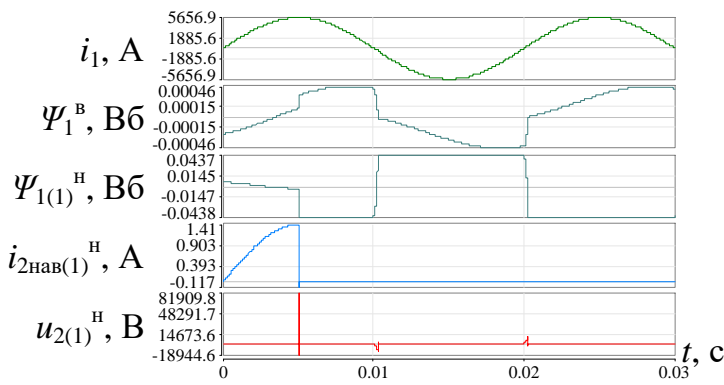
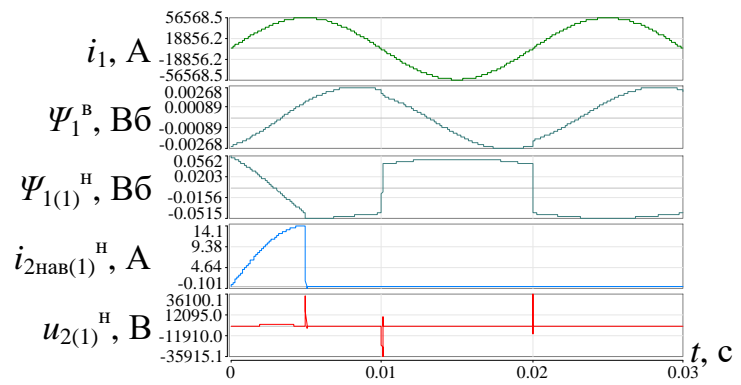


Рисунок 3.25 – Розрахункова схема для симуляції режиму розмикання кола навантаження вторинної вимірювальної обмотки каскадного ТС

Для таких перехідних режимів ТС рівні вторинних напруг у момент обриву кіл вторинного струму слід вважати орієнтовними і вимагають відповідних уточнень. Тим більше, що задані рівні максимального значення КАО  $r_{кспm}$  і мінімальні рівні постійної часу наростання цього опору теж слід вважати орієнтовними, оскільки в доступних джерелах практично відсутні дані щодо параметрів перехідних режимів ТС за розмикання кіл їх вторинних обмоток.

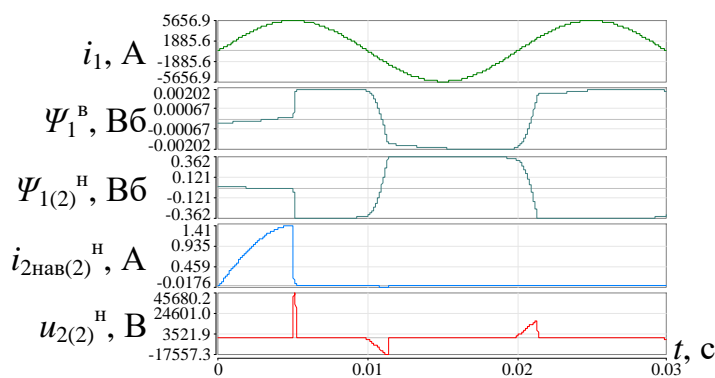


$$\text{а) } I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$$

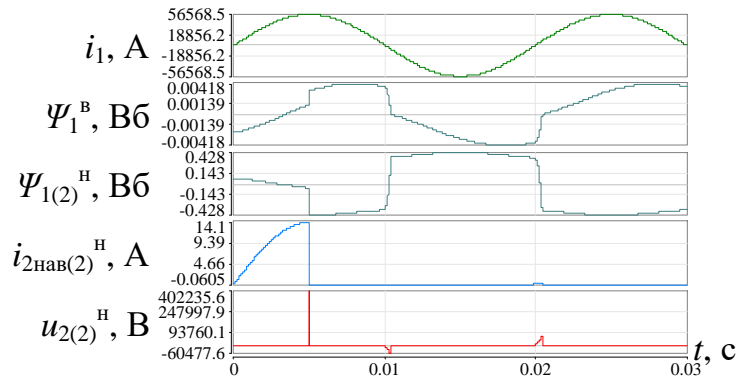


$$\text{б) } I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$$

Рисунок 3.26 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за розмикання вторинної вимірювальної обмотки нижнього ступеню у момент досягнення вторинним струмом амплітудної величини



$$\text{а) } I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$$



$$\text{б) } I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$$

Рисунок 3.27 – Розрахункові осцилограми режиму роботи ТС типу ТОМ-765 за розмикання вторинної захисної обмотки нижнього ступеню у момент досягнення вторинним струмом амплітудної величини

Для вторинної вимірювальної обмотки за десятикратного первинного струму ТС величина початкового піку вторинної напруги практично співпадає з амплітудою вторинної напруги усталеного режиму розімкненого вторинного кола. Це обумовлено швидким входженням її магнітопроводу у зону насичення і через це є незначною подальша зміна потокозчеплення  $\Psi_{1(1)}^H(t)$  у момент розмикання обмотки (див. рисунок 3.26, б).

При десятикратному первинному струмі ТС також за відсутності розмагнічувальної МРС вторинної вимірювальної обмотки внаслідок розмикання її кола навантаження форма потокозчеплення первинної обмотки верхнього ступеню  $\Psi_1^B(t)$  практично залишається синусоїдною (див. рисунок 3.26, б). Це пояснюється тим (як було зазначено вище під час досліджень усталених режимів роботи каскадного ТС з розімкненими вторинними колами), що осердя вторинної вимірювальної обмотки з аморфної сталі є малопотужним і майже весь час (за час тривання періоду первинного струму ТС) є насиченим, в результаті чого спадок напруги на цій обмотці є незначним.

У таблиці 3.6 наведено значення амплітуд вторинних напруг у момент розмикання вторинних обмоток досліджуваного ТС типу ТОМ-765 за різних величин постійних часу  $\tau_{КАО}$ .

Таблиця 3.6 – Амплітуди вторинних напруг у момент розмикання вторинних обмоток ТС типу ТОМ-765

	$I_1 = I_{1НОМ} = 4000 \text{ (A)}$	$I_1 = 10 \cdot I_{1НОМ} = 40000 \text{ (A)}$
$\tau_{КАО} = 100 \text{ мкс}$		
<i>Вимірювальна обмотка</i> $U_{2m(1) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	81910	34824
<i>Захисна обмотка</i> $U_{2m(2) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	45680	402236
$\tau_{КАО} = 1 \text{ мс}$		
<i>Вимірювальна обмотка</i> $U_{2m(1) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	37401	22564
<i>Захисна обмотка</i> $U_{2m(2) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	39812	250792
$\tau_{КАО} = 10 \text{ мс}$		
<i>Вимірювальна обмотка</i> $U_{2m(1) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	13665	10224
<i>Захисна обмотка</i> $U_{2m(2) \text{ імп}}^H, \text{ В}$	24847	107395

Із наведених вище результатів розрахунків видно, що за повільнішого наростання КАО у вторинному колі вимірювальної та захисної обмоток амплітуди початкових імпульсів їх вторинних напруг, як і слід було очікувати, відповідно зменшу-

ються. При цьому варто відмітити, що для вторинної виміррювальної обмотки за десятикратного первинного струму каскадного ТС рівні початкових імпульсів напруги на її виводах практично співпадають або є меншими за величини вторинних напруг для усталеного режиму. Це обумовлено, як і було описано вище, практично входженням вже у доаварійному режимі її осердя у зону насичення і відповідно незначною зміною її потокозчеплення у момент розмикання кола вторинного навантаження.

### 3.3 Висновки до розділу 3

1. Створено розрахункові схеми для аналізу режимів ТС за розмикання кіл їх вторинних обмоток з врахуванням втрат активної потужності в їх осердях. Показано значний вплив цих втрат на рівень перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат активної потужності.

2. За результатами комп'ютерної симуляції усталених режимів підтверджено, що найбільші рівні усталених напруг порядку десятків і більше кіловольт виникають за розмикання вторинних обмоток шинних ТС кіл генераторної напруги потужних синхронних машин. Для таких ТС обґрунтовано доцільність створення та застосування спеціального захисту для обмеження цих перенапруг до рівня 1000 В (рівень, допустимий для кіл вторинної комутації) з наступним закороченням виводів вторинної обмотки ТС.

3. Запропоновано апроксимаційні вирази для розрахункових функцій залежностей вторинних перенапруг від кратності первинних струмів для одноступеневих ТС за розімкнених кіл їх вторинних обмоток. За результатами виконаних розрахунків визначено типи ТС, для яких необхідно встановлювати, а для яких можна не встановлювати спеціальний захист від дії цих перенапруг.

4. Для моделювання перехідних процесів за обриву вторинних кіл ТС запропоновано застосування керованого активного опору, увімкненого у місці обриву. Це дало змогу дослідити вплив швидкості зміни струму у вторинному колі ТС на величини перенапруг у місці обриву.



5. Результатами досліджень перехідних процесів за обриву вторинних кіл різних типів ТС для мереж 10 – 750 кВ встановлено, що у більшості випадків величини перших піків вторинних напруг значно перевищують їх усталені амплітуди. При цьому величини перших піків напруг особливо небезпечні для ізоляції ТС, а усталені напруги, внаслідок їх тривалості – для обслуговуючого персоналу підстанцій.

## РОЗДІЛ 4

### СИСТЕМА ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ЗА ОБРИВУ ВТОРИННОГО КОЛА ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

#### 4.1 Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму

##### 4.1.1 Основні вимоги до системи захисту

На основі запропонованих нами способів захисту ТС та його вторинних кіл від перенапруг, які виникають за обриву цих кіл, [7 – 9] була розроблена нами проста і недорога СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС з застосуванням у якості ОПН пробивного запобіжника з захисним повітряним іскровим проміжком. Пробивний запобіжник виготовляють серійно в Україні [98]. Він має відповідний сертифікат для застосування в діючих електроустановках 220/380 В, що підключені до мережі з ізольованою нейтраллю. Запобіжник захищає ці електроустановки від перенапруг, що проникають з високовольтної у низьковольтну обмотку за пошкодження ізоляції силового трансформатора. Режими роботи даної СЗ для різних типів ТС розглянуті нижче.

Оскільки запропонована СЗ має працювати в діючих електроустановках, то вона повинна задовольняти вимогам, що наведені в нормативних документах стосовно цих електроустановок (Правила улаштування електроустановок [99], Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [90], керівні вказівки для окремих пристроїв релейного захисту електроустановок від аварійних режимів (КЗ тощо), захисту від грозових і комутаційних перенапруг тощо). Очевидно, що детальний розгляд остаточної відповідності запропонованої нами СЗ щодо вимог її експлуатації в діючих електроустановках буде проведено після випробувань промислового взірця системи. Нижче розглянемо три головні вимоги до запропонованої системи (аналогічно вимогам до систем РЗА електроустановок): *селективність, швидкодія, надійність*. *Селективність* СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС буде забез-

печуватись безпосереднім підключенням вхідних затискачів окремих ОПН до затискачів окремих вторинних обмоток ТС (за наявності декількох осердь у ТС), а також відповідним узгодженням параметрів спрацювання ОПН з параметрами налаштування пристроїв РЗА та параметрами кіл струму, що живляться від окремих вторинних обмоток ТС. Швидкодія СЗ буде забезпечуватись застосуванням чутливого швидкодійного електромеханічного реле, контакти якого шунтуватимуть накоротко затискачі вторинної обмотки ТС після спрацювання ОПН. Надійність буде забезпечуватись за рахунок розміщення пристрою ОПН на опорі ТС безпосередньо біля коробки затискачів вторинних обмоток ТС. За рахунок малої відстані (малої довжини контрольного кабелю (~ до 1 м) та, таким чином, обмеження доступу будь-кого до ОПН і його кабелю, яким вхідні затискачі ОПН підключені до вторинних затискачів ТС, практично виключена можливість хибного спрацювання чи відмови у штатному спрацюванні СЗ. Очевидно, що аналітичний розрахунок апаратного напрацювання на відмову СЗ буде здійснений після виготовлення промислового взірця системи, коли буде відома елементна база промислового взірця, результати його випробувань тощо.

#### **4.1.2 Призначення та основні режими роботи системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму**

СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС (далі СИСТЕМА) призначена для захисту від дії перенапруг вище 1000 В, що виникають на затискачах вторинної обмотки даного ТС за обриву кіл струму, підключених до цих затискачів.

Від дії перенапруг СИСТЕМА захищає:

- персонал служб РЗА діючих електроустановок, що працюють у вторинних колах даного ТС (наладка, ремонт тощо);
- ізоляцію вторинної обмотки даного ТС, до затискачів якої підключені кола струму, в яких можливий обрив;
- ізоляцію кіл струму (пристроїв РЗА, вимірювання, обліку електричної енергії тощо), в яких можливий обрив і які підключені до затискачів даного ТС.

В СИСТЕМІ для обмеження рівня перенапруг на затискачах вторинної обмотки ТС пропонується застосувати в якості ОПН пробивний запобіжник одноразової дії типу ПП-А/3 (промислове серійне виробництво в Україні, вартість  $\sim 300$  грн.). Технічні характеристики запобіжника наведені в [98, 100].

СИСТЕМА обмежує напругу на затискачах вторинної обмотки даного ТС до рівня напруги спрацювання (351-600 В, 50 Гц) пробивного запобіжника типу ПП-А/3. Відстань між електродами повітряного іскрового проміжку запобіжника становить  $d = (0,08+0,02)$  мм. Дані щодо часу  $t_{\text{П}}$  пробиття такого проміжку – відсутні. Однак, враховуючи незначну величину  $d$ , за нашими попередніми даними  $t_{\text{П}} \sim 1-2$  мкс. За такого часу, як показали результати комп'ютерного моделювання режимів роботи СИСТЕМИ для основних типів ТС (опорні, вбудовані, шинні, каскадні тощо) в мережах  $10 \div 750$  кВ, 50 Гц, навіть за первинних струмів ТС, рівних десятикратній величині від номінального значення, СИСТЕМА забезпечує ефективне обмеження напруги до рівня напруги пробиття даного запобіжника  $U_3 = 351-600$  В, 50 Гц, що суттєво менше за 1000 В, 50 Гц (напруга випробування ізоляції вторинних кіл ТС [11, 90]).

Запобіжник витримує після пробиття струм  $I_{\text{ЗМ}} = 200$  А, 50 Гц за максимальний час  $t_{\text{ЗМ}} = 30$  хв. [98]. За номінального вторинного струму ТС  $I_{2\text{ТСН}} = 5$  А, 50 Гц, кратність струму запобіжника  $K_{\text{ІЗ}} = I_{2\text{ТСН}} / I_{\text{ЗМ}} = 5/200 = 0,025$ . Активна потужність, що виділяється в іскровому проміжку запобіжника, рівна  $U_{\text{ІП}} \cdot I_{2\text{ТСН}}$ . Враховуючи, що для коротких іскрових проміжків ( $d \leq 1$  мм) напруга  $U_{\text{ІП}}$  практично не залежить від величини струму, тому потужність  $P_{\text{ІП}}$  буде пропорційна струму  $I_{2\text{ТСН}}$ . Тоді за номінального струму  $I_{2\text{ТСН}}$  активна потужність  $P_{\text{ІП}}$  рівна  $P_{\text{ІП}} = K_{\text{ІЗ}} \cdot P_{\text{ІПМ}} = 0,025 \cdot P_{\text{ІПМ}}$ .

Очевидно, що допустимий час  $t_{\text{ЗД}}$  протікання через запобіжник струму  $I_{\text{ЗД}}$  обернено-пропорційний до величини струму  $I_{\text{ЗД}}$ . Тоді орієнтовно маємо

$$t_{\text{ЗД}} = (1 / K_{\text{ІЗ}}) \cdot t_{\text{ЗМ}} = (1/0,025) \cdot t_{\text{ЗМ}} = 40 \cdot t_{\text{ЗМ}} = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ (хв)} = 20 \text{ (год)}.$$

Результати комп'ютерного моделювання показали, що за обриву вторинних кіл ТС для первинних струмів  $I_{1\text{ТС}} = (1 \div 10) \cdot I_{1\text{ТСН}}$  час протікання струму через запобіжник становить 1 мс кожного півперіоду промислової частоти 50 Гц. Тобто тривалість

протікання струму становить 0,1 від півперіоду промислової частоти. В даному випадку, за номінального первинного струму ТС  $I_{1\text{ТСН}}$  маємо орієнтовно допустимий час протікання струму через запобіжник  $t_{\text{здн}} = 10 \cdot t_{\text{зд}} = 10 \cdot 20 = 200$  (год).

ОПН – запобіжник типу ПП-А/3 з послідовно увімкненим малоіндуктивним бетонним резистором (опір резистора рівний 2 Ом) – підключають до затискачів вторинної обмотки ТС. Дослідний взірець резистора виготовлено в Національному університеті «Львівська політехніка». Резистор розрахований на спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 за протікання в ньому десятикратного вторинного струму  $10 \cdot I_{2\text{ТСН}} = 50$  А, 50 Гц, з наступним швидким (до 0,1 с) шунтуванням ОПН контактами електромеханічного реле СИСТЕМИ.

Тривалий режим роботи ТС з розімкненими його вторинними колами, незважаючи на застосування ОПН, є небажаним, тому що за такого режиму має місце глибоке насичення феромагнітного осердя ТС, в результаті чого різко зростають втрати активної потужності в осерді трансформатора. Це, в свою чергу, за рахунок зростання температури осердя, може призвести до пошкодження його ізоляції (як і внутрішньої між пластинами електротехнічної сталі («пожежа сталі»), так і головної – стосовно обмоток на заземленому осерді), в результаті чого ТС руйнується – виникає внутрішнє коротке замикання обмоток ТС на землю. У більшості випадків ТС вибухає і ремонту не підлягає. У цьому випадку матеріальні витрати на відновлення нормальної експлуатації приєднання, де був пошкоджений ТС (придбання та встановлення нового ТС та іншого електрообладнання, перерва електропостачання споживачів тощо) набагато порядків більші вартості пропонованої СИСТЕМИ. Тому за спрацювання ОПН необхідно негайно замикати накоротко між собою затискачі вторинної обмотки ТС, до яких підключений даний ОПН. Таке замикання в СИСТЕМІ виконують контакти електромеханічного реле, що запускається електронним пристроєм, котрий фіксує спрацювання ОПН. Водночас, інші контакти цього реле запускають аварійну сигналізацію підстанції для сповіщення чергового нащиті управління підстанції.

Параметри СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС повинні бути узгоджені з параметрами налаштування пристроїв РЗА приєднання підстанції, струм якого підведений до первинної обмотки даного ТС. Суть узгодження полягає в тому, що СИСТЕМА не повинна спрацювати за протікання струму в первинній обмотці даного ТС, коли відсутній обрив кіл навантаження (РЗА, вимірювання тощо), підключених паралельно разом з СИСТЕМОЮ до затискачів вторинної обмотки даного ТС.

Як правило, повна типова номінальна потужність навантаження, підключеного до вторинної обмотки ТС не більше  $40 \text{ В} \cdot \text{А}$ . Тоді напруга на затискачах вторинної обмотки ТС за номінального вторинного струму  $I_{2\text{тсн}5} = 5 \text{ А}$  становить  $U_{2\text{н}5} = 8 \text{ В}$ , а за номінального вторинного струму  $I_{2\text{тсн}1} = 1 \text{ А}$  –  $U_{2\text{н}1} = 40 \text{ В}$ . Очевидно, що за таких умов СИСТЕМА не спрацюватиме, оскільки мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становить  $U_{\text{змін}} = 351 \text{ В}$  [98, 100], що значно більше за  $8 \text{ В}$  ( $U_{2\text{н}5}$ ) та  $40 \text{ В}$  ( $U_{2\text{н}1}$ ). Не спрацюватиме запобіжник і за десятикратного струму  $I_{2\text{тс}50} = 50 \text{ А}$ , бо відповідна цьому струму напруга становить  $U_{2\_50} = 80 \text{ В}$  і коефіцієнт відведення СИСТЕМИ за струмом  $I_{2\text{тс}50} = 50 \text{ А}$  та  $U_{\text{змін}} = 351 \text{ В}$  становить

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2\_50} = 351/80 = 4,4.$$

На наш погляд, з урахуванням аперіодичної складової у вторинному струмі ТС  $I_{2\text{тс}50} = 50 \text{ А}$  для надійного відведення СИСТЕМИ достатньо значення

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2\_50} = 3,0.$$

Тому для усіх ТС з номінальними вторинним струмом  $5 \text{ А}$  та вторинним навантаженням до  $40 \text{ В} \cdot \text{А}$ , за умови, що максимальний первинний аварійний струм ТС не більше десятикратного від номінальної величини, можна застосовувати СИСТЕМУ з пробивним запобіжником типу ПП-А/3 з мінімальною напругою пробиття  $U_{\text{змін}} = 351 \text{ В}$ .

Перед випробуванням роботи СИСТЕМИ, а також періодичної перевірки її роботи, необхідно експериментально перевірити рівень напруги спрацювання (пробиття) запобіжника типу ПП-А/3. Рекомендації щодо експериментальної перевірки рівня напруги спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 наведені в [101].

Для ТС з номінальним вторинним струмом  $I_{2\text{тсн1}} = 1$  А та вторинним навантаженням  $40$  В·А за десятикратного первинного струму трансформатора напруга на затискачах вторинної обмотки становитиме  $U_{2(1)10} = 400$  В. В даному випадку, за коефіцієнта відведення СИСТЕМИ  $K_{\text{в}} = 3$  необхідна мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становитиме  $U_{\text{змін}} = K_{\text{в}} \cdot U_{2(1)10} = 3 \cdot 400 = 1200$  В, що більше  $1000$  В. Для СЗ від перенапруг більше  $1000$  В максимальна напруга спрацювання СИСТЕМИ не повинна бути більша від  $1000$  В. Таким чином, в даному випадку, застосування в СИСТЕМІ запобіжника типу ПП-А/3 не допустиме. Необхідно застосувати більш стабільні (за напругою спрацювання) ОПН без іскрового проміжку. На жаль, поки що в доступній літературі не знайдено таких потужних (з напругою спрацювання до  $1000$  В) ОПН без іскрового проміжку. Як тільки почнуть серійно виготовляти такі відносно дешеві ОПН, їх можна буде встановити в СИСТЕМУ замість пробивного запобіжника типу ПП-А/3 і застосувати таку СИСТЕМУ для ТС з номінальним вторинним струмом  $1$  А.

Очевидно, що в даному випадку необхідно провести узгодження такої системи з налаштуванням пристроїв РЗА (описано вище), врахувавши час  $t_{\text{ш}} = 0,1$  с (час шунтування СИСТЕМОЮ за її спрацювання затискачів вторинної обмотки ТС) під час протікання через ОПН номінального струму  $1$  А за обриву вторинних кіл ТС.

Нижче буде наведено результати попередньої оцінки можливості застосування для ТС різних типів серійних ОПН без іскрового проміжку, які застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг.

Очевидно, що наведені вище розрахункові параметри та їх узгодження будуть підтверджені результатами експериментальних досліджень, проведених на промисловому взірці СИСТЕМИ.

Нижче, на рисунку 4.1 наведено структурну схему СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС.

Як видно з рисунка 4.1, ТС ТА своїми затискачами  $L_1$  та  $L_2$  первинної обмотки увімкнений в коло приєднання електричної мережі, а до відповідних однополярних затискачів його вторинної обмотки ( $I_1, I_2$ ) паралельно, відповідно, підключені:

- обмежувач перенапруг ОПН (затискачі  $1_{\text{опн}}$  і  $2_{\text{опн}}$ ) СИСТЕМИ;
- жили 1, 2, 3 кабелю пристрою шунтування-сигналізації (ПШС) СИСТЕМИ;
- жили 1, 2 кабелю РЗА підстанції.

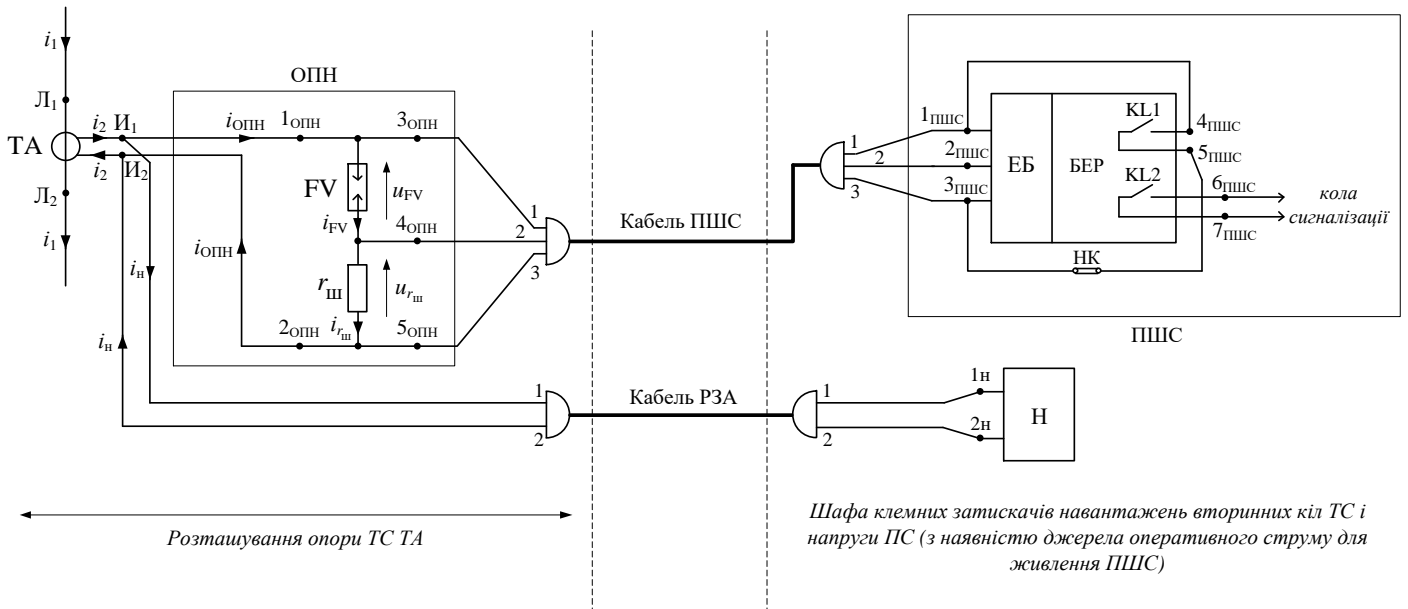


Рисунок 4.1 – Структурна схема СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС

Жилами кабелю ПШС відповідні затискачі пристрою ПШС підключені до затискачів ОПН. Кола навантаження Н (струмові кола вимірювальних приладів, пристроїв РЗА тощо) через кабель РЗА підключені до відповідних затискачів  $I_1$ ,  $I_2$  вторинної обмотки ТС ТА. Більш детальний опис наведеної схеми СЗ подано далі під час розгляду режимів її роботи.

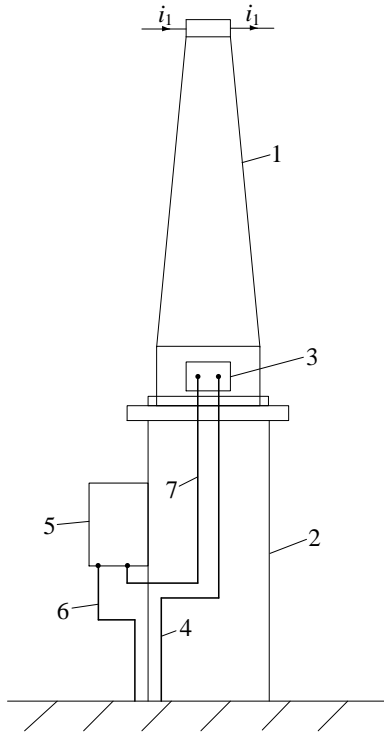
На рисунку 4.2 наведено схему розміщення ОПН СЗ на опорі ТС ТА.

Особливих пояснень, на наш погляд, схема на рисунку 4.2 не потребує. Однак наведемо окремі примітки:

а) за такого розміщення ОПН (безпосередньо біля коробки затискачів вторинних обмоток ТС) навіть за обриву контрольних кабелів РЗА і ПШС, що прокладені до шафи клемних затискачів навантажень ТС і напруги підстанції (див. рисунок 4.1), вторинна обмотка ТС ТА буде надійно захищена від перенапруг пристроєм ОПН, оскільки ймовірність обриву з'єднувального кабелю 7 (між ОПН (5) і коробкою затискачів вторинних обмоток ТС (3)) – близька до нуля;



б) коробка (5) ОПН кріпиться до опори (2) звичайним способом (гвинтами, болтами тощо) з використанням допоміжних конструкцій для кріплення. Орієнтовні розміри коробки (200 x 200 x 200) мм, підведення кабелів до коробки знизу;



1 – ТС ТА;

2 – опора;

3 – коробка (на нижньому фланці ТА) затискачів вторинних обмоток ТС;

4 – кабель РЗА;

5 – коробка ОПН;

6 – кабель ПШС;

7 – з'єднувальний кабель між коробкою ОПН (5) та коробкою затискачів вторинних обмоток ТС (3).

Рисунок 4.2 – Схема розміщення ОПН на опорі ТС ТА

в) кабель (6) заводиться, подібно до заведеного кабелю (4), в металорукаві до кабельного лотка біля ТС (1) та прокладається в лотку поряд з кабелем (4).

Режими роботи СЗ залежать від режиму роботи пробивного запобіжника типу ПП-А/3 (пробитий повітряний іскровий проміжок, чи – ні) блоку ОПН.

За відсутності обриву в колах навантаження вторинної обмотки ТС ТА (кабель РЗА, кола струму вторинного навантаження Н, див. рисунок 4.1) повітряний іскровий проміжок пробивного запобіжника типу ПП-А/3 не пробивається і струми  $i_{FV} = i_{r_{ш}} = 0$ . При цьому спад напруги  $u_{r_{ш}}$  на резисторі  $r_{ш}$  також рівний нулю. Як видно з рисунку 4.1, напруга  $u_{r_{ш}}$  поступає на вхід (затискачі 2<sub>ПШС</sub> і 3<sub>ПШС</sub>) електронного блоку (ЕБ) пристрою шунтування-сигналізації (ПШС) СИСТЕМИ. За напруги  $u_{r_{ш}} = 0$  на виході ЕБ сигнал для збудження реле КЛ в блоці електромеханічних реле (БЕР) від-

сутній. Реле KL не збуджене, його контакти KL1 і KL2 не замкнені і відповідно також не замкнені затискачі  $I_1$  і  $I_2$  вторинної обмотки ТС та вимкнена аварійна сигналізація підстанції. ТС працює в нормальному режимі.

За напруги спрацювання (пробиття) розрядника (пробивного запобіжника)  $u_{FVc}$  через розрядник FV і резистор  $r_{ш}$  протікатимуть струми – відповідно  $i_{FV} = i_{r_{ш}} \neq 0$  (струмом через затискач  $4_{опн}$  (що поступає до входу ЕБ) можна знехтувати, оскільки вхідний опір ЕБ є не менше 1 МОм). За цих умов на резисторі  $r_{ш}$  формується напруга  $u_{r_{ш}c}$  для пуску ЕБ. Пуск відбувається, коли  $u_{r_{ш}} \geq K_H \cdot u_{r_{ш}c\text{мін}}$ , де  $u_{r_{ш}c\text{мін}}$  – спад напруги на резисторі  $r_{ш}$  за мінімальної напруги  $U_{змін} = 351$  В спрацювання пробивного запобіжника типу ПП-А/3;  $K_H = 1,05 \div 1,1$  – коефіцієнт надійності (для забезпечення надійного пуску ЕБ).

За спрацювання ЕБ на його виході формується постійний сигнал живлення обмотки електромеханічного реле KL, котре своїми контактами KL1 через накладку (НК) замикає накоротко затискачі  $I_1$  і  $I_2$  вторинної обмотки ТС ТА, а контактами KL2 подає напругу для пуску аварійної сигналізації підстанції. Накладка служить для вводу/виводу в роботу/з роботи кола шунтування вторинної обмотки ТС ТА (на час ремонту, наладки тощо).

Для реалізації ЕБ і БЕР використовують відомі схеми та типові комплектуючі, тому параметри їх тут не наводяться.

## **4.2 Режими роботи трансформаторів струму з системою захисту від перенапруг з застосуванням джерела оперативного струму**

### **4.2.1 Режими роботи одноступеневих трансформаторів струму з системою захисту від перенапруг**

Як видно з рисунку 4.1, для живлення ЕБ та БЕР ПШС використовується джерело оперативного струму підстанції.

Для симуляції режимів роботи одноступеневих ТС застосовано розрахункову схему, в якій до затискачів вторинної обмотки ТС паралельно підключені вхідні за-

тискачі ОПН та кола навантаження Н (див рисунок 4.1). Схема ОПН, його технічні характеристики, наведені вище, однакові для усіх основних типів одноступеневих ТС. У розрахункових схемах досліджуваних типів ТС в схемі ОПН закладено пробивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання)  $U_{\text{з макс}} = 600 \text{ В}$ , 50 Гц, та резистор  $r_{\text{ш}} = 2 \text{ Ом}$ . Комп'ютерну симуляцію всіх режимів роботи ТС у розділі 4 реалізовано на програмному модулі «FASTMEAN» [89]. Це викликано тим, що модуль «FASTMEAN» більш швидкодійний (ОС Windows), ніж програмний комплекс «RE» (ОС DOS) [88].

На рисунку 4.3 наведена розрахункова схема для симулювання режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 з під'єднаною до виводів вторинної обмотки СЗ з пробивним запобіжником типу ПП-А/3. Параметри схеми наведено для первинного номінального струму  $I_{\text{1 ном}} = 1500 \text{ А}$  ТС.

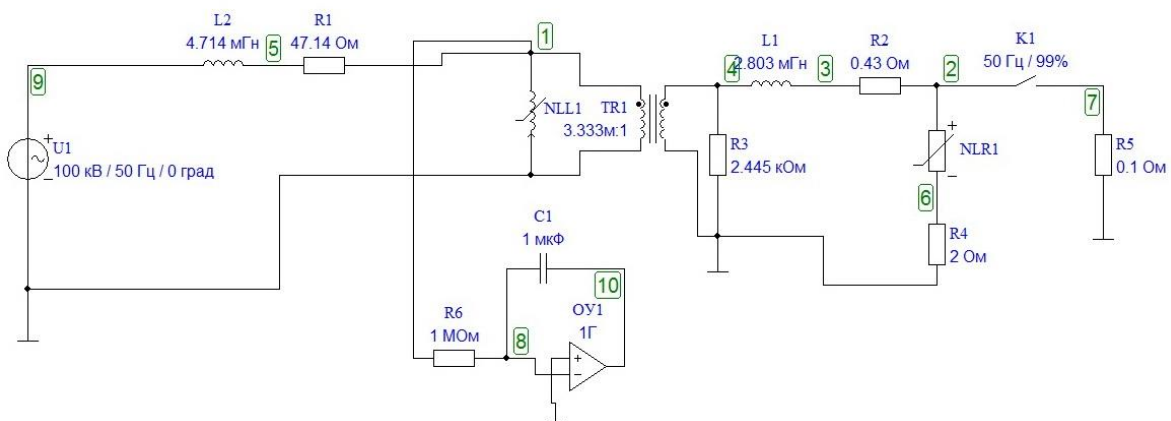


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема для симулювання режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 з під'єднаною СЗ за первинного номінального струму  $I_{\text{1 ном}} = 1500 \text{ А}$

Коротко розглянемо основні елементи розрахункової схеми та їх налаштування. Джерело первинного струму моделюють джерелом напруги  $U_1$  промислової частоти 50 Гц, до якого послідовно підключені індуктивність  $L_2$  та активний опір  $R_1$ . Цими елементами задають величину амплітуди первинного струму та фази вмикання джерела струму, яке підключено до затискачів 1, «земля» (це номери вузлів схеми) первинної обмотки ТС. Задають також постійну часу зростання струму

$\tau = L2/R1 = 100$  мкс за увімкнення поштовхом струму в коло первинної обмотки ТС. Ця постійна часу обрана однаковою для усіх режимів ТС, за яких виникають максимальні перенапруги у їх вторинних колах. ТС моделюють нелінійною індуктивністю NLL1 та ідеальним трансформатором TR1, відповідно підключених до вхідних затисків (вузли 4, «земля») кола вторинного струму ТС.

У склад кола вторинного струму ТС входять:

- коло вторинної обмотки ТС (індуктивність L1, активний опір R2);
- активний опір R3, втрати в якому відтворюють втрати активної потужності в осерді ТС;
- ОПН – послідовно увімкнуті активні опори: нелінійний NLR1 (симулює пробивний запобіжник типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання)  $U_{\text{з\text{макс}}} = 600$  В, 50 Гц) і лінійний R4 = 2 Ом;
- послідовно увімкнуті ключ K1 і активний опір R5, що симулюють контакти електромеханічного реле KL1 ПШС (див. рисунок 4.1), які замикають накоротко затискачі вторинної обмотки ТС.

Для відтворення потокозчеплення вторинної обмотки ТС, зведеного до його первинної сторони, у розрахунковій схемі застосовано схему інтегрування напруги на нелінійній індуктивності NLL1, у склад якої входять: ідеальний операційний підсилювач ОУ1, активний опір R6 і ємність C1.

Заземлення ( $\perp$ ) вторинної обмотки необхідне для коректної роботи схеми. В реальних схемах (наприклад, у колах струму ТС диференційного захисту силових трансформаторів вторинні обмотки ТС безпосередньо не заземлюють – заземлюють нейтраль ТС, сполучених за схемою «зірка-нуль»).

Усі параметри розрахункової схеми конкретного типу досліджуваного ТС також наведені у відповідних додатках до попередніх розділів даної роботи.

Нижче, у таблиці 4.1 наведено ВАХ нелінійного резистора NLR1 у розрахунковій схемі для симулювання режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 з під'єднаною СЗ. За відсутності пробиття іскрового проміжку пробивного запобіжника ( $u_1 \leq 849$  В) диференційний опір ОПН прийнято рівним 10 МОм, тоді, коли іскровий проміжок

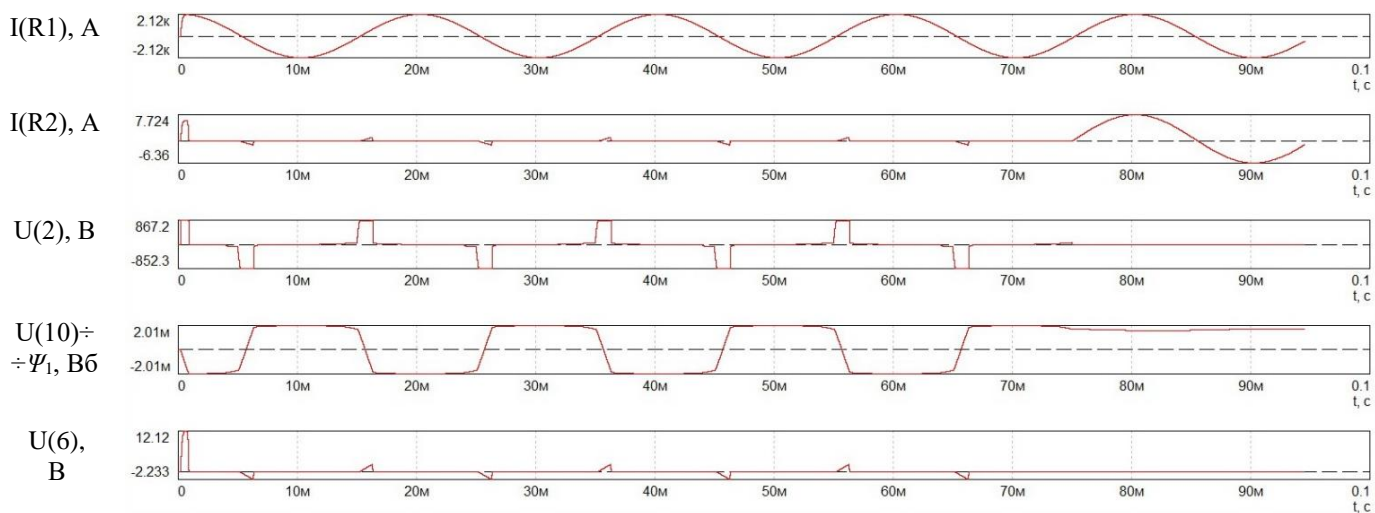
проб'ється ( $u_1 > 849$  В), цей опір для пробивного запобіжника типу ПП-А/3 прийнято рівним 1 Ом. Для усіх розрахункових схем одно- і багатоступеневих ТС застосовуємо наведену ВАХ нелінійного резистора NLR1.

Таблиця 4.1 – ВАХ нелінійного резистора NLR1

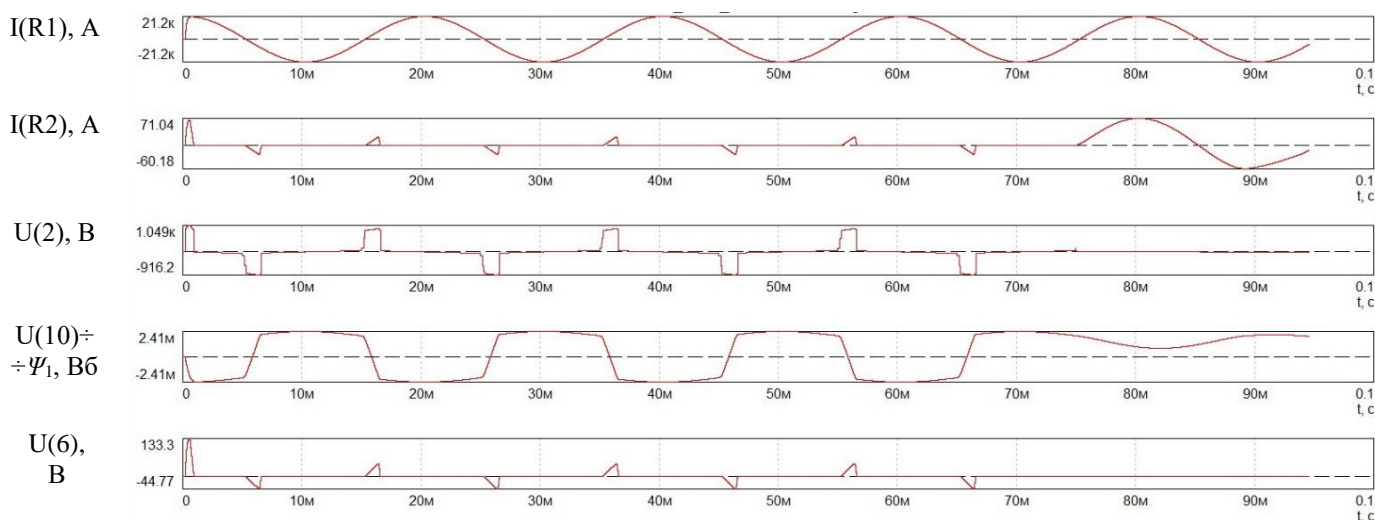
$u$ , В	-859	-849	0	849	859
$i$ , А	-10	-84,9 мк	0	84,9 мк	10

Для аналізу штатних режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 з СЗ від перенапруг моделюємо процеси, за яких повинні виникати максимальні перенапруги за розімкненого вторинного кола. Нижче на рисунку 4.4 наведені розрахункові осцилограми перехідних процесів у ТС ТЛМ-10 за увімкнення поштовхом до його первинної обмотки номінального та десятикратного струмів:  $I(R1)$  – первинний струм ТС;  $I(R2)$  – струм у вторинній обмотці ТС;  $U(2)$  – напруга на затискачах вторинної обмотки ТС;  $U(10) \div \Psi_1$  – потокозчеплення вторинної обмотки ТС, зведене до його первинної сторони;  $U(6)$  – спад напруги на опорі R4 2 Ом (див. розрахункову схему на рисунку 4.3).

Як видно з рисунку 4.4, як за номінального, так і за десятикратного струмів, які вмикають поштовхом у коло первинної обмотки ТС ТЛМ-10 за розімкнутого кола вторинного навантаження, ОПН обмежує напругу  $U(2)$  на затискачах вторинної обмотки ТС до розрахункового значення спрацювання пробивного запобіжника типу ПП-А/3 ( $U_{\text{з макс}} = 600$  В, 50 Гц), якому відповідають значення модулів напруг  $u_{N\#2} = u_{N\#4} = 849$  В ВАХ нелінійного резистора NLR1 (див. таблицю 4.1).



$$a) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 1500 \text{ A}$$



$$б) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 15000 \text{ A}$$

Рисунок 4.4 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму роботи СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника ПП-А/3

Після затухання першого піку перенапруги  $U(2)$  встановлюється усталений режим роботи ТС. Струм  $I(R2)$  у вторинній обмотці ТС виникає за пробиття іскрового проміжку в околі переходу кривої первинного струму  $I(R1)$  ТС через нуль. В цей час відбувається перемагнічення осердя ТС, коли зведене до первинної сторони потокозчеплення вторинної обмотки ТС  $U(10)$  швидко «пробігає» лінійний відрізок ВБАХ. Далі потокозчеплення вторинної обмотки практично не змінюється, оскільки осердя ТС насичене і напруга  $U(2)$  на затискачах вторинної обмотки швидко затухає. В ре-

зультаті крива потокозчеплення вторинної обмотки набуває форми трапеції, а короточасні (до 1 мс) трикутні імпульси струму у вторинній обмотці ТС тривають, поки контакти електромеханічного реле К1 (рисунок 4.3) (на рисунку 4.1 це контакти КЛ1) не замкнуться між собою затискачі вторинної обмотки ТС. Тоді струм вторинної обмотки  $I(R2)$  стає синусоїдним і пропорційним (з урахуванням коефіцієнта трансформації ТС  $K_{ТС} = 300$ ) струму  $I(R1)$  первинної обмотки ТС.

Як показали результати моделювання, у решти одноступеневих ТС такі процеси протікають подібно, про що свідчать подібні осцилограми параметрів режиму.

Для кожного типу ТС доцільно визначити для пристрою ОПН значення первинного струму, за якого почне спрацювати пробивний запобіжник типу ПП-А/3. Також необхідно реєструвати інші параметри режиму, які будуть наведені нижче, для запуску та налаштування ПШС СЗ та оцінки можливості застосування інших, більш стабільних ОПН, зокрема, без іскрового проміжку.

Нижче наведені найбільш важливі залежності параметрів режиму ТС типу ТЛМ-10 від кратностей амплітуд усталеного струму в його первинній обмотці відносно номінальної величини  $K_{I_1} = I_{1m}/I_{1номм}$ . Залежності наводяться для діапазону значень  $K_{I_1} = K_{I_{1\min}}, \dots, K_{I_{1\max}} = 10$ . Значення  $K_{I_{1\min}} = I_{1\text{ммін}}/I_{1номм}$ , де  $I_{1\text{ммін}}$  – мінімальна амплітуда струму у первинній обмотці ТС, за якої в усталеному режимі амплітуда напруги на затискачах розімкнутої вторинної обмотки ТС рівна максимальній нарузі спрацювання ОПН  $u_{\text{ОПНмакс}}$ . Для ОПН з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 маємо  $u_{\text{ОПНмакс}} = u_{\text{змакс}} = 849$  В. Значення  $I_{1\text{ммін}}$  визначають за результатами моделювання відповідного режиму на розрахунковій схемі (рисунок 4.3). На рисунку 4.5 зображено графіки функцій для таких параметрів режиму ТС типу ТЛМ-10: усереднене значення амплітуди піків усталеного струму в колі вторинної обмотки ТС  $I_{2m} = I(R2)_m = f(K_{I_1})$  (перший пік струму не враховується); усереднене значення часу тривання піків усталеного струму  $I(R2)$  у вторинній обмотці ТС  $t_{i2} = f(K_{I_1})$  (перший пік струму не враховується).

Отримані результати розрахунків для інших типів досліджуваних ТС подано у таблиці Ж.1 додатку Ж.

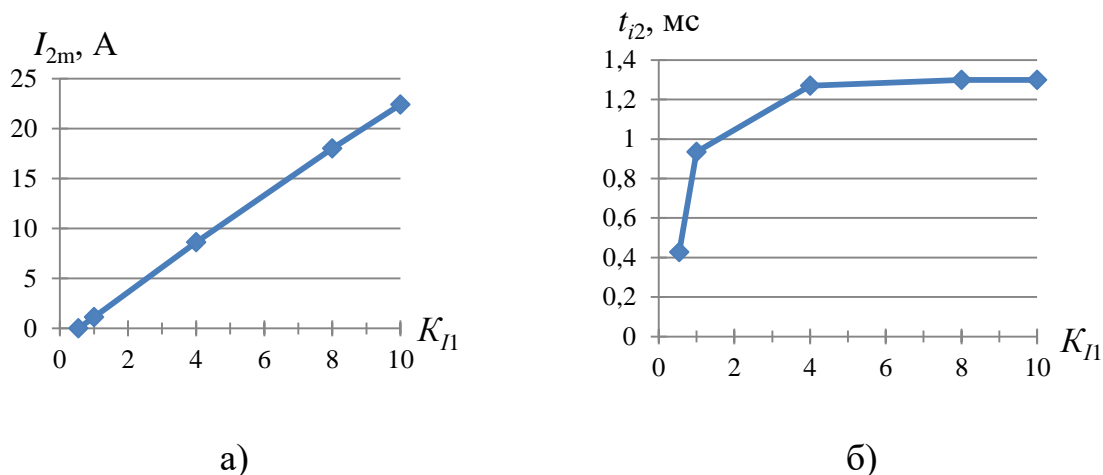


Рисунок 4.5 – Залежності амплітуди  $I_{2m}$  (а) та часу  $t_{i2}$  тривання (б) піків усталеного струму у вторинній обмотці від кратності  $K_{I1}$  первинного струму ТС типу ТЛМ-10 за спрацювання СЗ з пробивним запобіжником ПП-А/3

Як видно з рисунку 4.5, мінімальна кратність струму у первинній обмотці ТС типу ТЛМ-10, за якої спрацюватиме ОПН, становить  $K_{I1\text{мін}} = 0,54$ . Очевидно, що за  $K_{I1\text{мін}} > 1$  СЗ для ТС можна не ставити.

Нижче наведено розрахункові вирази для параметрів режиму, що можуть використовуватись для попередньої оцінки можливості застосування стабільних ОПН без іскрового проміжку (ОПН захисту від короткотривалих перенапруг – грозових, комутаційних тощо) в запропонованій СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС.

Як видно з осцилограм (рисунок 4.4), у вторинній обмотці ТС перший пік струму – це «прямокутний пік» (особливо за струмів до номінальної величини), який має форму, близьку до прямокутної, а час тривання цього струму  $t_{i2-1}$  – одиниці мілісекунд та менше. Наступні піки – це «трикутні піки» струму у вторинній обмотці ТС, які мають форму, близьку до прямокутного трикутника – з похилим переднім фронтом і практично вертикальним заднім.

За іншої форми першого піку струму умовно рахуємо його прямокутним. Тоді розрахункові втрати активної енергії від протікання цього струму будуть дещо завищеними, порівняно з даними осцилограм.



Враховуючи вище наведене, нижче пропонується простий алгоритм розрахунку втрат активної енергії  $W_{\text{ОПН}}$  (Вт·с), що виділяються в ОПН без іскрового проміжку за його спрацювання до моменту шунтування ОПН і вторинної обмотки ТС контактами KL1 електромеханічного реле ПШС СЗ (див. рисунок 4.1). За вище наведених умов час від моменту спрацювання ОПН до моменту його шунтування (час шунтування  $t_{\text{ш}}$ ) можна прийняти не більшим 0,1 с, враховуючи, що контакти KL1 і саме електромеханічне реле повинні бути досить потужними. В розрахунках приймаємо  $t_{\text{ш}} = 0,1$  с. Розрахунки проводять для двох режимів струму в первинній обмотці ТС – номінального струму  $I_{\text{НОМ}}$  і десятикратного струму  $10 \cdot I_{\text{НОМ}}$ . Після спрацювання ОПН його диференційний активний опір  $r_{\text{дс}}$  стає малим.

Отримаємо такі розрахункові вирази для втрат активної енергії в ОПН без іскрового проміжку за його спрацювання:

1. Втрати активної енергії, що виділяються в ОПН за протікання першого «прямокутного» піку струму, становитимуть  $W_1 = (I_{2-1\text{м}})^2 \cdot r_{\text{дс}} \cdot t_{i2-1}$ .

2. Втрати активної енергії, що виділяються в ОПН за протікання одного «трикутного» імпульсу вторинного струму, рівні  $W_{\text{тр1}} = \left( \int_0^T (i_{\text{тр}})^2 dt \right) \cdot r_{\text{дс}}$ , де  $i_{\text{тр}} = (t/T) \cdot I_{2\text{м}}$ , А;  $T = t_{i2}$ , с.

Після інтегрування отримаємо  $W_{\text{тр1}} = (1/3) \cdot (I_{2\text{м}})^2 \cdot r_{\text{дс}} \cdot t_{i2}$ .

3. Втрати активної енергії  $W_{\text{тр}}$  від протікання (струму промислової частоти 50 Гц у первинній обмотці ТС) усіх  $n_{01}$  «трикутних» імпульсів за час  $t_{\text{ш}} = 0,1$  с становитимуть  $W_{\text{тр}} = n_{01} \cdot W_{\text{тр1}}$ , де  $n_{01} = 9$ .

Сумарні втрати активної енергії, що виділяються в ОПН без іскрового проміжку після його спрацювання за час  $t_{\text{ш}} = 0,1$  с, становитимуть  $W_{\text{опн}\Sigma 01} = W_1 + W_{\text{тр}}$ .

Після підстановки усіх виразів, їх інтегрування та значень констант, отримаємо, Вт·с = Дж

$$W_{\text{опн}\Sigma 01} = [(I_{2-1\text{м}})^2 \cdot t_{i2-1} + 3 \cdot (I_{2\text{м}})^2 \cdot t_{i2}] \cdot r_{\text{дс}}.$$

*Попередня оцінка можливості застосування для СЗ ТС типу ТЛМ-10 серійних ОПН без іскрового проміжку*

У відомих джерелах [102] детально описані властивості варисторів, що застосовуються в ОПН для захисту електрообладнання від грозових та комутаційних перенапруг. З наведених характеристик різних типів варисторів та ОПН бачимо, що дані ОПН можуть проводити дуже великі струми (десятки кілоампер) грозових розрядів високої напруги (сотні кіловольт) за дуже короткий час тривання процесу (від одиниць мікросекунд до  $10 \div 20$  мкс). При цьому теплова енергія, яку розсіює ОПН є досить значною (до одиниць кілоджоулів). Що стосується тривалого (одиниці мілісекунд до  $10 \div 20$  мс) протікання значно менших струмів (від десятків до сотні ампер) через такі ОПН, то тут виникають проблеми та є суттєві обмеження, наприклад, щодо допустимої кількості імпульсів струму (десятки – сотні ампер) тривалістю  $1 \div 2$  мс. Ці обмеження впливають з особливостей та властивостей структури кристалів матеріалу варисторів (точкові напівпровідникові провідності тощо). Враховуючи вище наведене, в першу чергу, розглядатимемо серійні ОПН для захисту від грозових та комутаційних перенапруг обладнання електромереж 220/380 В промислової частоти, в яких максимальна напруга спрацювання є в межах  $400 \div 600$  В промислової частоти за відносно малих струмів (десятки – сотні ампер) пропускання (серія 10-20 імпульсів струму з тривалістю кожного  $1 \div 2$  мс). Як було показано вище, приблизно такі імпульси струму протікають у вторинній обмотці ТС типу ТЛМ-10 за спрацювання ОПН СЗ.

Наведені вимоги, на наш погляд, задовольняє ОПН типу **ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1** [103]. ОПН серійно виготовляють в Україні. Подібний ОПН типу **ОПН-П-0,38 УХЛ1** випускають і у Росії [104].

Для ОПН типу ОПН-П-0,38 УХЛ1 маємо [104]:

- найбільша тривало допустима робоча напруга – 0,4 кВ, 50 Гц (гарантована напруга не спрацювання ОПН);
- струмова пропускна спроможність – 20 імпульсів струму  $I_1 = 125$  А за тривалості кожного  $t_1 = 2$  мс;

- питома енергоємність  $1,6 \text{ кДж/кВ} \cdot U_{н.р.}$ ;
- залишкова напруга  $U_{зал}$  за комутаційного імпульсу струму 30/60 мкс з амплітудою  $I_{імп} = 125 \text{ А}$ , кВ, не більше – 1,3;
- повний струм провідності  $I_{н.р.} = 0,2 \dots 0,4 \text{ мА}$  за найбільшої тривало допустимої робочої напруги  $U_{н.р.} = 0,4 \text{ кВ}$ , 50 Гц [103].

За вище наведеними даними для ОПН типу ОПН-П-0,38 УХЛ1 розрахуємо параметри режиму, які відповідають спрацюванню ОПН без іскрового проміжку в СЗ ТС типу ТЛМ-10:

- максимальна теплова енергія за повний цикл спрацювання ОПН рівна  $Q_{\Sigma m} = Q_{п} \cdot U_{н.р.}$ , де  $Q_{п} = 1,6 \text{ кДж/кВ}$ ;  $U_{н.р.} = 0,4 \text{ кВ}$ .

Тоді  $Q_{\Sigma m} = 1,6 \cdot 10^3 \cdot 0,4 = 640 \text{ (Дж)}$ ;

- диференційний активний опір ОПН за його спрацювання рівний  $r_{дс} = U_{зал}/I_{імп} = 1300/125 = 10,4 \text{ (Ом)}$ ;

- втрати активної енергії за протікання в ОПН першого імпульсу струму (режим  $I_1 = 10 \cdot I_{1ном}$  для ТС типу ТЛМ-10)  $I_{2-1m} = 66,6 \text{ А}$ , за тривалості першого імпульсу  $t_{i2-1} = 0,775 \text{ мс}$ , становлять

$$W_1 = (I_{2-1m})^2 \cdot r_{дс} \cdot t_{i2-1} = 66,6^2 \cdot 10,4 \cdot 0,775 \cdot 10^{-3} = 35,8 \text{ (Вт} \cdot \text{с)} = 35,8 \text{ (Дж)}$$

- втрати активної енергії за протікання в ОПН  $n_{01} = 9$  «трикутних» імпульсів струму  $I_{2m} = 22,4 \text{ А}$ , за тривалості кожного  $t_{i2} = 1,30 \text{ мс}$ , рівні

$$W_{тр} = n_{01} \cdot W_{тр1} = n_{01} \cdot (1/3) \cdot (I_{2m})^2 \cdot r_{дс} \cdot t_{i2} = 9 \cdot (1/3) \cdot (22,4)^2 \cdot 10,4 \cdot 1,30 \cdot 10^{-3} = 20,4 \text{ (Вт} \cdot \text{с)} = 20,4 \text{ (Дж)}$$

- сумарні втрати активної енергії за цикл спрацювання ОПН –

$$W_{опн \Sigma 01-10} = W_1 + W_{тр} = 35,8 + 20,4 = 56,2 \text{ (Вт} \cdot \text{с)} = Q_{опн \Sigma 01-10} = 56,2 \text{ (Дж)}$$

- коефіцієнт надійності (за тепловою енергією) за цикл спрацювання ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 [103] –

$$K_{нw} = Q_{\Sigma m} / Q_{опн \Sigma 01-10} = 640/56,2 = 11,4.$$

Оскільки для режиму десятикратного первинного струму ТС типу ТЛМ-10 коефіцієнт надійності  $K_{нw} = 11,4$  досить великий (на наш погляд, достатньо  $K_{нw} = 3$ ),

тому режим за  $I_1 = I_{1\text{ном}}$  ТС можна не перевіряти. Тому перевірку для інших типів ТС слід починати з режиму за первинного струму ТС  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{ном}}$ .

Очевидно, остаточне рішення про можливість застосування ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 для СЗ ТС (чи інших типів ОПН без іскрового проміжку) може бути прийняте лише після детальних експериментальних досліджень промислового взірця СЗ.

Також для ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 доцільно оцінити вплив його струму провідності  $I_{\text{н.р.}} = 0,2 \dots 0,4$  мА за найбільшої тривало допустимої робочої напруги  $U_{\text{н.р.}} = 0,4$  кВ, 50 Гц, на точність вимірювання приладів комерційного обліку споживання електроенергії. Визначимо струм провідності ОПН за номінального навантаження вторинних обмоток ТС (для багатоступеневих ТС – вторинних обмоток останнього ступеню). Як було зазначено у роботі вище, за номінального навантаження 40 В·А номінальні напруги на затискачах вторинних обмоток з номінальними вторинними струмами  $I_{2\text{н5}} = 5$  А і  $I_{2\text{н1}} = 1$  А становитимуть відповідно  $U_{2\text{н5}} = 8$  В та  $U_{2\text{н1}} = 40$  В. Тому за номінальних вторинних струмів ТС відносні значення струмів провідності ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 у відсотках становитимуть, відповідно:

$$I_{\text{ОПНн5\%}} = (U_{2\text{н5}} / U_{\text{н.р.}}) \cdot I_{\text{н.р.}} \cdot 100 \% = (8/(0,4 \cdot 10^3)) \cdot (0,2 \dots 0,4) \cdot 10^{-3} \cdot 100\% = (0,4 \dots 0,8) \cdot 10^{-3} (\%);$$

$$I_{\text{ОПНн1\%}} = (U_{2\text{н1}} / U_{\text{н.р.}}) \cdot I_{\text{н.р.}} \cdot 100 \% = (40/(0,4 \cdot 10^3)) \cdot (0,2 \dots 0,4) \cdot 10^{-3} \cdot 100\% = (2,0 \dots 4,0) \cdot 10^{-3} (\%).$$

Для сучасних ТС класу точності 0,2, які, як правило, живлять кола струму приладів комерційного обліку споживання електроенергії (електролічильники) (ТС класу точності 0,1 застосовують лише в окремих випадках), відносна амплітудна похибка за струмом становить 0,2 % ( $200 \cdot 10^{-3}$  %). Тому навіть для ТС класу точності 0,1 паралельне підключення до затискачів їх вторинної обмотки ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 ніяк не впливатиме на точність вимірювання приладів комерційного обліку споживання електроенергії.

Для потужного одноступеневого шинного ТС типу ТШЛ-20 отримані розрахункові осцилограми параметрів режиму роботи СЗ з пробивним запобіжником ПП-А/3 наведені у додатку Ж.

#### **4.2.2 Режими роботи каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765 з системою захисту від перенапруг**

Для ТС типу ТОМ-765 дослідимо окремо режими роботи за розімкнених вторинних вимірювальної та захисної обмоток нижнього ступеню. До затискачів усіх вторинних обмоток нижнього ступеню ТС (одна вимірювальна і чотири захисні обмотки) паралельно підключені вхідні затискачі ОПН та кола струму навантаження Н аналогічно вторинній обмотці, розміщеній на осерді одноступеневого ТС (див. рисунок 4.1). Для ТС типу ТОМ-765 у симульованій схемі ОПН СЗ аналогічно розглянутим вище одноступеневим ТС застосовуємо пробивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання)  $U_{\text{з макс}} = 600 \text{ В}$ , 50 Гц, та резистор  $r_{\text{ш}} = 2 \text{ Ом}$ . Комп'ютерну симуляцію усіх режимів роботи ТС типу ТОМ-765 реалізовано на програмному комплексі «FASTMEAN» [89]. Симуляція режимів для каскадного ТС з під'єднаною СЗ проводилась, як і для одноступеневих ТС, за підведення струму поштовхом до первинної обмотки ТС.

Загальний вигляд розрахункової схеми ТС типу ТОМ-765 (без під'єднаних СЗ вторинних обмоток) у програмному комплексі «FASTMEAN» наведена на рисунку 4.6. Параметри схеми аналогічні описаним у додатку Д під час дослідження усталених режимів обриву кіл вторинного струму каскадного ТС типу ТОМ-765.

#### **Розрахункова схема і режими роботи ТС типу ТОМ-765 за спрацювання СЗ від перенапруг, під'єднаної до виводів вторинної вимірювальної обмотки**

На рисунку 4.7 наведено розрахункову схему ТС типу ТОМ-765 з під'єднаною СЗ від перенапруг до розімкнених виводів його вторинної вимірювальної обмотки, а на рисунку 4.8 – отримані розрахункові осцилограми параметрів режиму каскадного ТС за спрацювання СЗ.

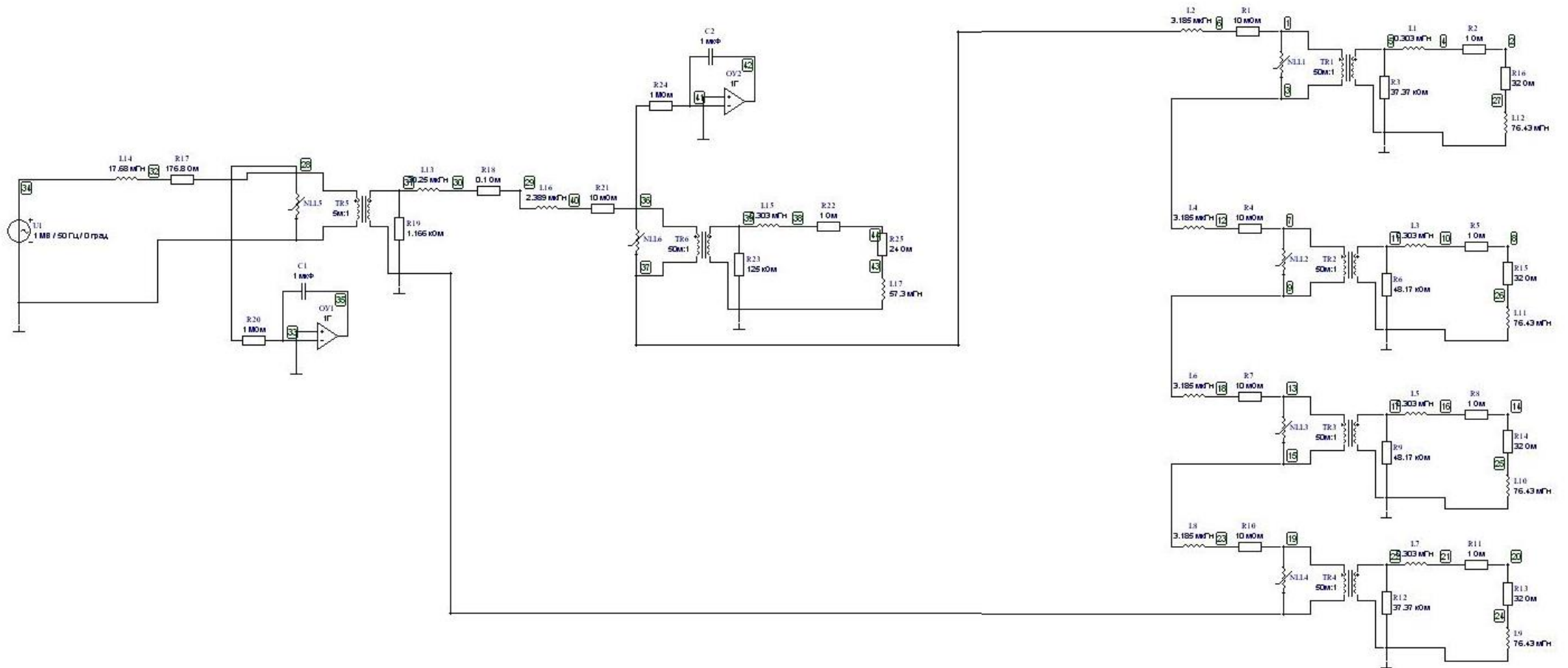


Рисунок 4.6 – Розрахункова схема ТС типу TOM-765 у програмному комплексі «FASTMEAN»

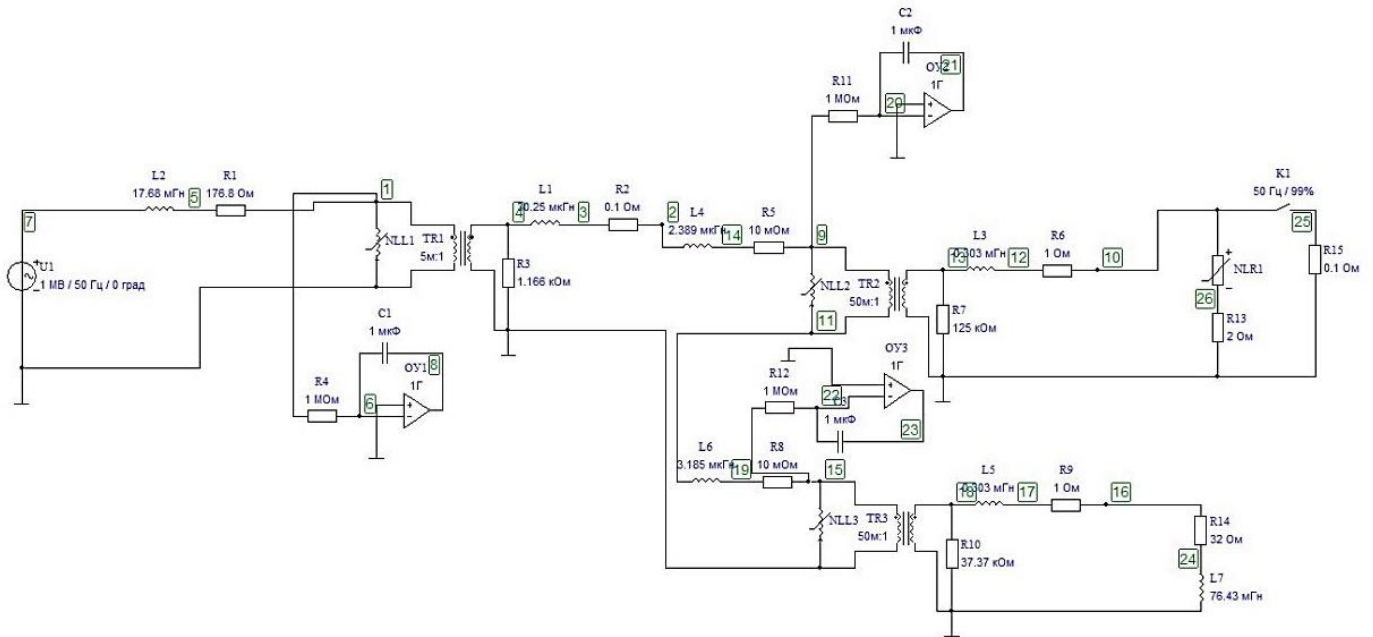
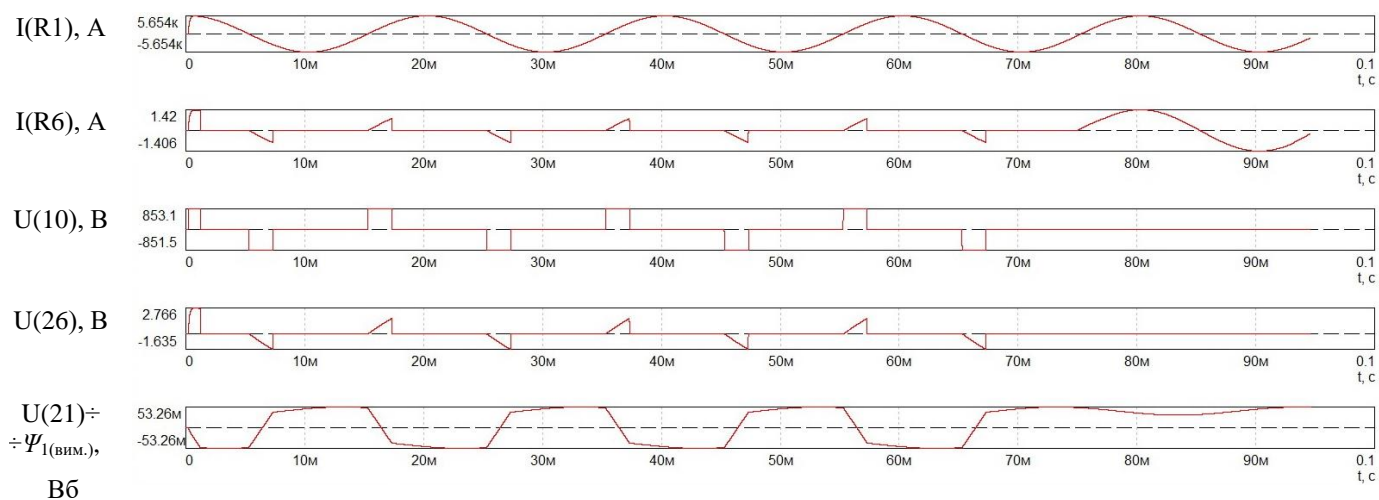


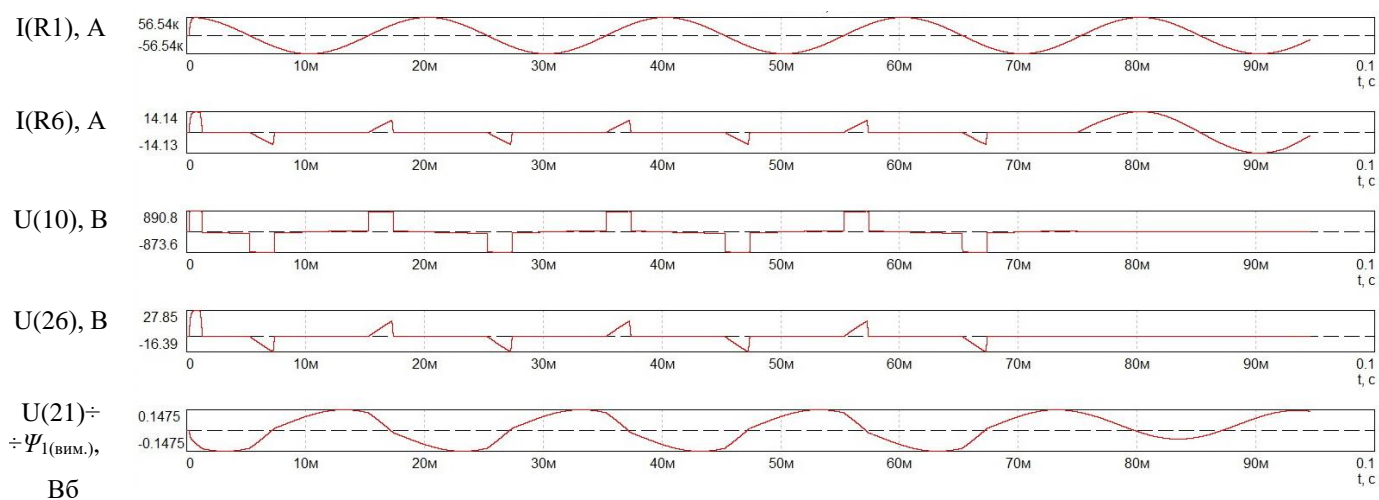
Рисунок 4.7 – Розрахункова схема ТС типу ТОМ-765 з під'єднаною СЗ до виводів вторинної вимірювальної обмотки

На рисунку 4.8 наведено такі осцилограми:  $I(R1)$  – первинний струм каскадного ТС;  $I(R6)$  – струм у колі вимірювальної обмотки нижнього ступеню;  $U(10)$  – напруга на затискачах вторинної вимірювальної обмотки ТС;  $U(26)$  – спад напруги в опорі  $R13 = 2 \text{ Ом}$ ;  $U(21) \div \Psi_{1(\text{вим.})}$  – потокозчеплення первинної обмотки осердя з вторинною вимірювальною обмоткою.

Як видно з рисунку 4.12, процеси за спрацювання СЗ протікають подібно одноступеневим ТС, лише масштаб параметрів режиму різний – відповідно до рівня струму в первинній обмотці ТС типу ТОМ-765. Судячи з тривалості та амплітуди імпульсів струму  $I(R6)$  у вторинній вимірювальній обмотці, слід виконати необхідні розрахунки для оцінки можливості застосування для СЗ вимірювальної вторинної обмотки ТС ТОМ-765 серійних ОПН без іскрового проміжку. Відповідні розрахунки наведені у додатку Ж.



$$a) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 4000 \text{ (A)}$$



$$б) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 40000 \text{ (A)}$$

Рисунок 4.8 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму роботи СЗ від перенапруг, під'єднаної до затискачів вторинної вимірювальної обмотки ТС типу ТОМ-765

### Розрахункова схема і режими роботи ТС типу ТОМ-765 за спрацювання СЗ від перенапруг, під'єднаної до виводів вторинної захисної обмотки

На рисунку 4.9 наведена розрахункова схема ТС типу ТОМ-765 з під'єднаною до виводів вторинної захисної обмотки СЗ від перенапруг, а на рисунку 4.10 – отримані розрахункові осцилограми параметрів режиму ТС типу ТОМ-765 за спрацювання СЗ: I(R1) – первинний струм каскадного ТС; I(R9) – струм у вторинній захисній обмотці ТС; U(24) – напруга на затискачах вторинної захисної обмотки; U(26) –



спад напруги на опорі  $R_{12} = 2 \text{ Ом}$ ;  $U(23) \div \Psi_{1(\text{зах.})}$  – потокозчеплення первинної обмотки осердя з вторинною захисною обмоткою нижнього ступеню.

Як слідує з рисунку 4.10, режим за розімкненої вторинної захисної обмотки суттєво відрізняється від режиму за розімкненої вимірювальної обмотки каскадного ТС. Вимірювальна обмотка розрахована на роботу в заданому класі точності 0,2S за струму в первинній обмотці ТС, який не перевищує номінальної величини  $I_{\text{ном}}$ , тоді як захисна, що призначена для живлення кіл струму РЗА – як правило, за первинних струмів аж до десятикратної величини ( $10 \cdot I_{\text{ном}}$ ) з амплітудною похибкою до 10 %. Потужність осердя з вторинною захисною обмоткою і магнітний потік, який протікає в ньому, є набагато більшими за потужність і магнітний потік осердя з вторинною вимірювальною обмоткою ТС. Тому, як бачимо з рисунку 4.10, за таких умов спрацювання СЗ за розімкненої вторинної захисної обмотки супроводжується протіканням значного струму через ОПН (практично синусоїдний струм) протягом кожного цілого періоду (0,02 с) аж до шунтування вторинної обмотки разом з підключеним до неї ОПН контактами К1 електромеханічного реле (див. рисунок 4.9) ПШС. Про це свідчать прямокутна форма напруги  $U(24)$  на затискачах вторинної захисної обмотки, а також – трикутна форма потокозчеплення  $U(23)$  первинної обмотки. Враховуючи тривале протікання за таких умов значного струму через ОПН, не доцільно проводити розрахунки щодо оцінки можливості застосування для СЗ вторинної захисної обмотки ТС типу ТОМ-765 серійних ОПН без іскрового проміжку. В даному випадку застосування існуючих серійних ОПН без іскрового проміжку, які використовують для захисту електрообладнання від дії грозових і комутаційних перенапруг, не можливе.

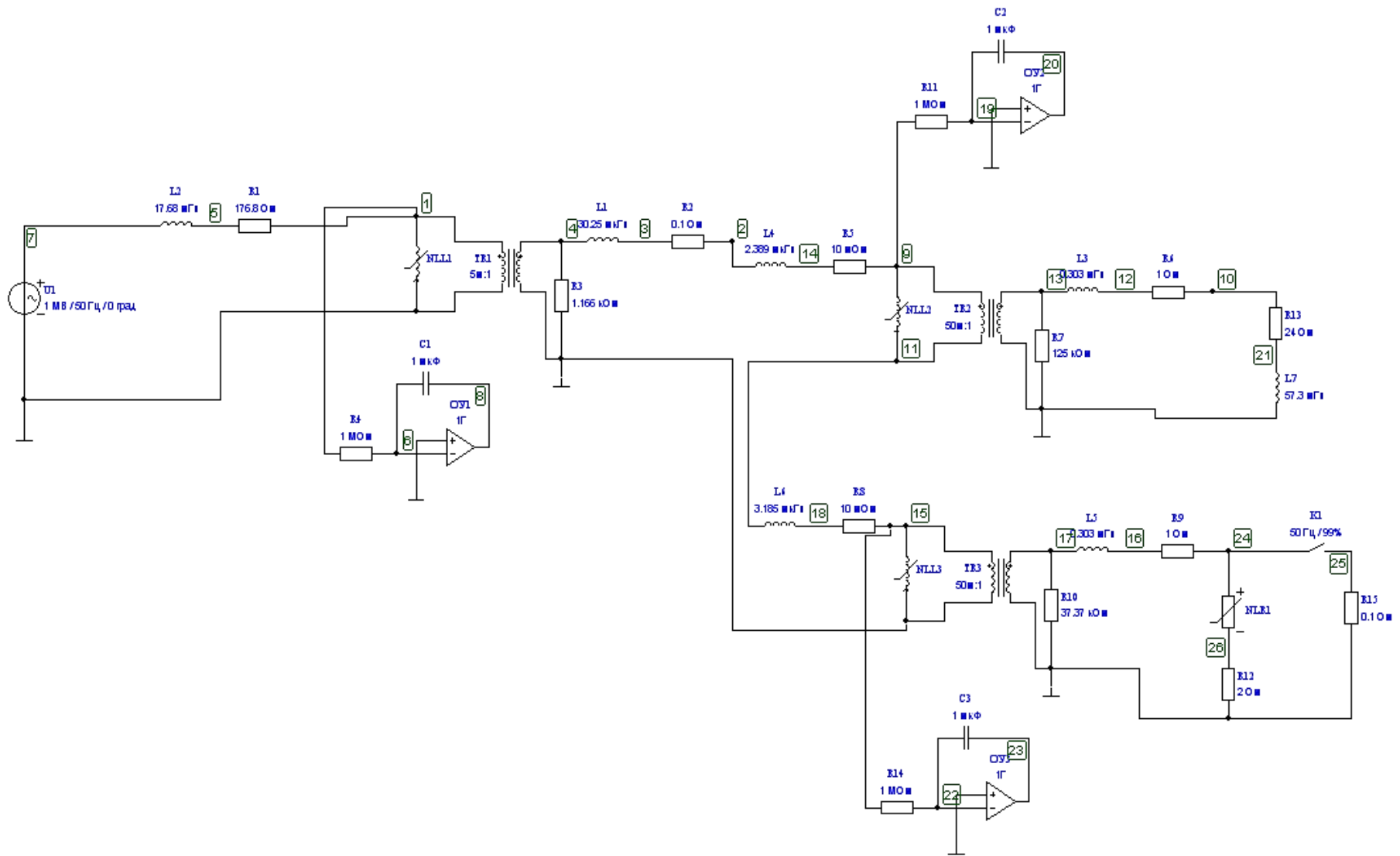
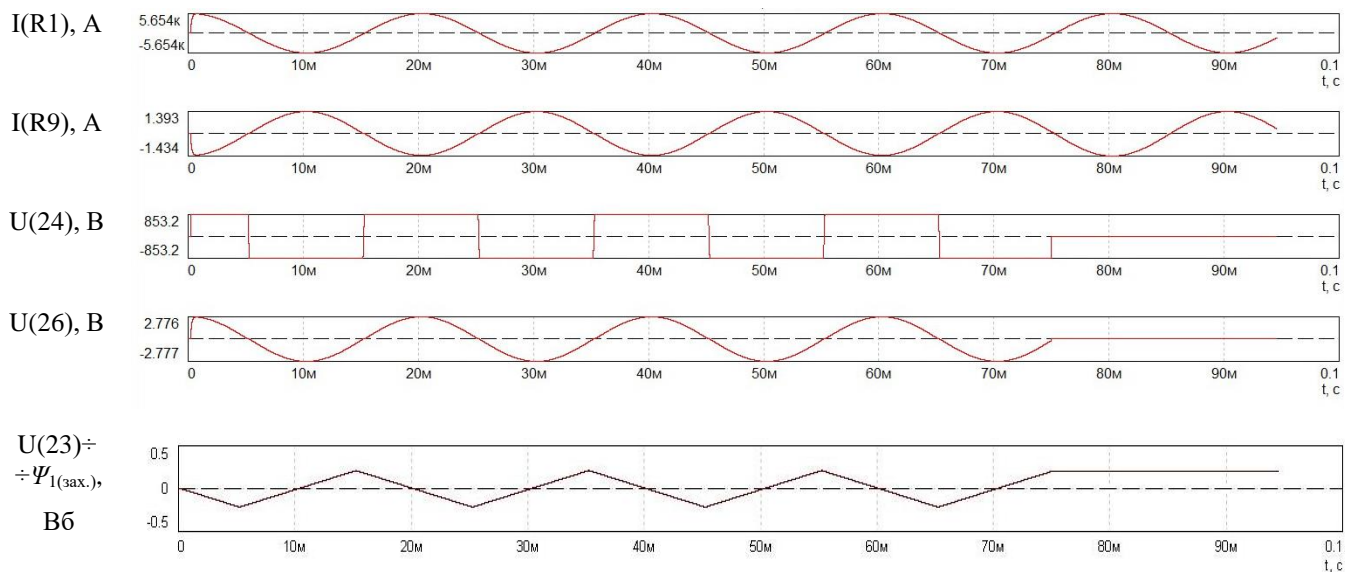
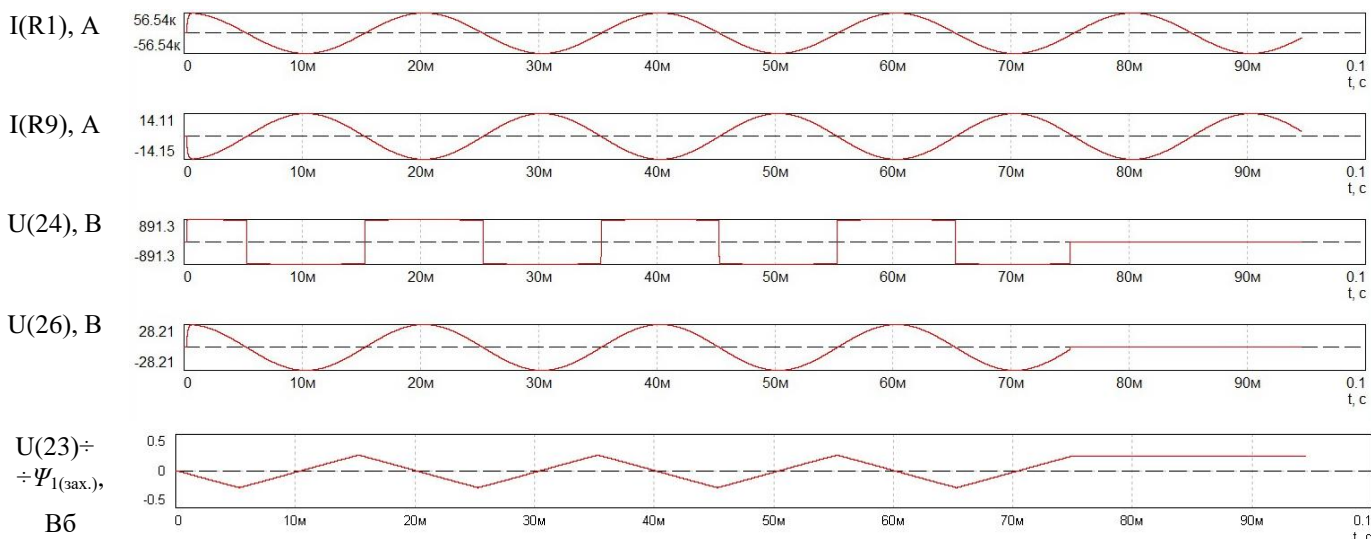


Рисунок 4.9 – Розрахункова схема ТС типу ТОМ-765 з під'єднаною до виводів вторинної захисної обмотки С3 від перенапруг



$$a) I_1 = I_{1ном} = 4000 (A)$$



$$б) I_1 = 10 \cdot I_{1ном} = 40000 (A)$$

Рисунок 4.10 – Розрахункові осцилограми параметрів режиму ТС типу ТОМ-765 за спрацювання СЗ від перенапруг, під'єднаної до затискачів його вторинної захисної обмотки

Аналіз режимів роботи ТС з СЗ від перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування вторинної обмотки ТС наведено у додатку Ж.

### 4.3 Експериментальні дослідження системи захисту трансформатора струму та його вторинних кіл від перенапруг

Для експериментальної перевірки ефективності роботи СЗ ТС за обриву вторинного кола з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості ОПН були проведені відповідні експериментальні дослідження режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 ( $U_{\text{ном}} = 10$  кВ,  $k_{\text{ном}} = 1500/5$ ) за розмикання кола його вторинного навантаження. Результати натурного експерименту було порівняно з даними, отриманими шляхом комп'ютерного моделювання таких же відповідних режимів у програмному комплексі «RE» [88].

#### 4.3.1 Дослідження рівнів напруг на розімкнених виводах вторинної обмотки трансформатора струму типу ТЛМ-10

Для оцінки ефективності запропонованої СЗ необхідно мати значення очікуваних напруг на розімкнених затискачах вторинної обмотки ТС. Для усталених режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 отримано експериментальні та розрахункові залежності амплітуд напруги  $U_{2m}$  на розімкнених виводах його вторинної обмотки від амплітуд синусоїдного первинного струму  $I_{1m}$  ТС. Експериментальні дослідження проводились за схемою, наведеною на рисунку 4.11.

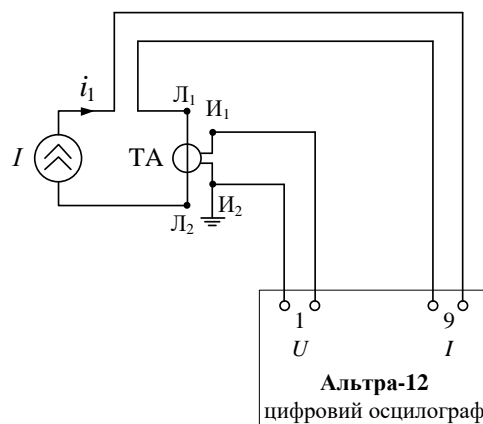


Рисунок 4.11 – Схема осцилографування параметрів режиму розімкненого кола вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

Залежність  $U_{2m} = f(I_{1m})$  також необхідна для оцінки адекватності комп'ютерного моделювання режимів роботи ТС за розімкненого його вторинного кола програмним комплексом «RE».

Регульоване джерело струму  $I$  (рисунок 4.11) через струмовий канал 9 цифрового осцилографа «Альтра-12» підключено до виводів  $L_1$ ,  $L_2$  первинної обмотки ТС типу ТЛМ-10, а виводи його вторинної обмотки – до каналу 1 вимірювання напруги осцилографа.

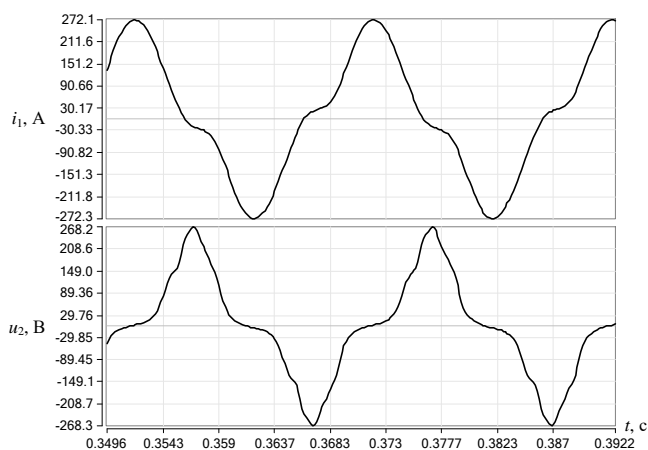
За розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 для конкретних значень усталеного первинного струму  $I_1$  цифровим осцилографом «Альтра-12» отримано натурні осцилограми його первинного струму  $i_1(t)$  та вторинної напруги  $u_2(t)$ .

Для комп'ютерної симуляції програмним комплексом «RE» заданих режимів роботи ТС типу ТЛМ-10 за розімкненого кола його вторинного навантаження використано розрахункову схему, наведену у розділі 3, рисунок 3.1 (ключ К1 схеми для даного режиму роботи ТС постійно розімкнений). Параметри розрахункової схеми ТС ТЛМ-10 аналогічні параметрам схеми для даного ТС, наведеним під час дослідження режимів його роботи у розділі 2 та додатку В роботи.

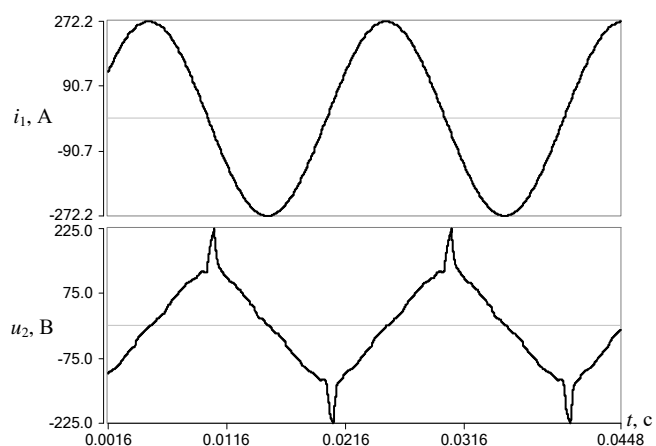
На рисунку 4.12 наведені натурні і розрахункові осцилограми напруг на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 за різних величин його первинного струму.

За результатами розрахунків були побудовані графіки залежностей амплітуд напруги  $U_{2m}$  на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 від амплітуд його первинного струму  $I_{1m}$  (рисунок 4.13, а).

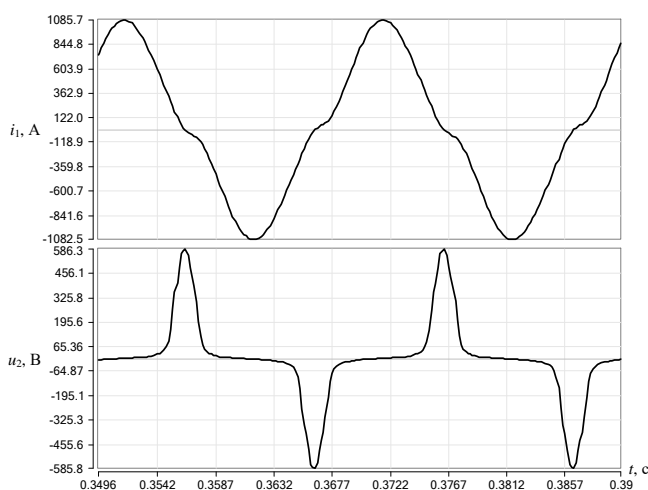
Для оцінки точності відтворення програмним комплексом «RE» режиму роботи ТС типу ТЛМ-10 за розімкненої вторинної обмотки за підведення до його первинної обмотки струму промислової частоти 50 Гц на основі отриманих результатів розраховано відносні похибки  $\delta$  величин амплітуди напруги  $U_{2m}$ , отриманих шляхом комп'ютерної симуляції заданого режиму та за результатами натурального експерименту (рисунок 4.13, б).



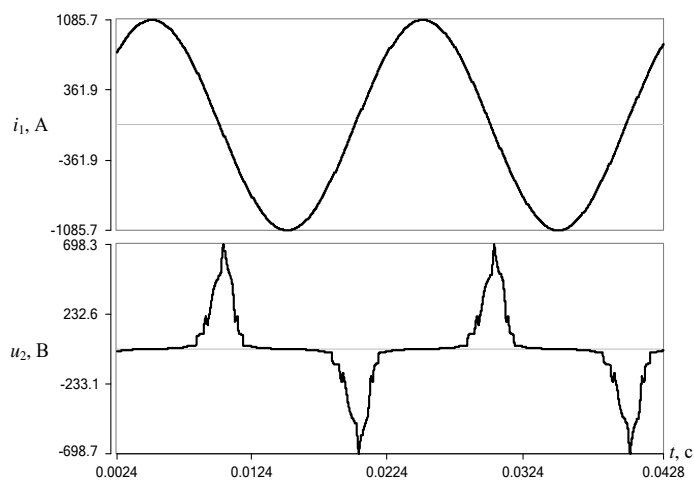
натурні осцилограми



осцилограми в «RE»

а)  $I_{1m} = 272 \text{ A}$ 

натурні осцилограми



осцилограми в «RE»

б)  $I_{1m} = 1086 \text{ A}$ 

Рисунок 4.12 – Напряга на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 за різних величин його первинного струму

Як видно з рисунку 4.13, б, значення відносної похибки напруги  $\delta$  коливаються в межах від -16 % ( $I_{1m} = 272 \text{ A}$ ) до +19 % ( $I_{1m} = 1086 \text{ A}$ ). Така похибка викликана рядом факторів, які не вдалось врахувати під час розрахунків у програмному комплексі «RE». В першу чергу, відносною неточністю задання в комплексі «RE» зведеної до первинної сторони ВБАХ вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 за умови відсутності необхідних доступних даних щодо параметрів осердя цього ТС (залежність  $B(H)$  для матеріалу магнітопроводу, його габарити, вага тощо). Розрахункові осци-

логами параметрів режиму розімкненого вторинного кола ТС типу ТЛМ-10 отримані, використовуючи уточнену за результатами натурального експерименту ВБАХ його вторинної обмотки.

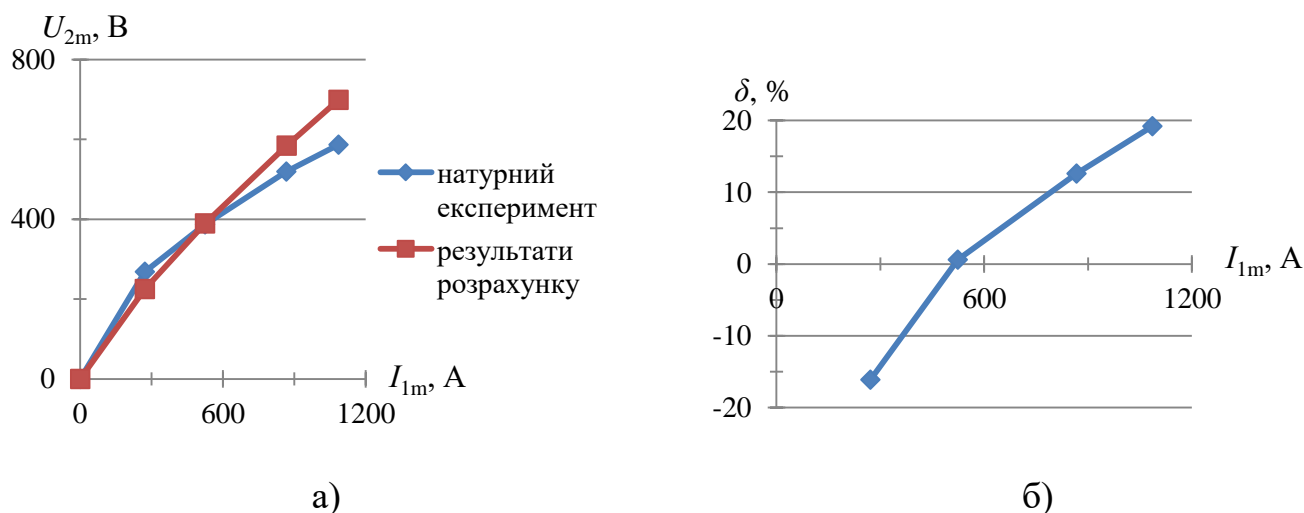


Рисунок 4.13 – Залежність амплітуд напруги на затискачах розімкненої вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 (а) та відносної похибки напруги  $\delta$  (б) від амплітуди його первинного струму

Як видно з розрахункових осцилограм (отриманих у комплексі «RE»), для точного відтворення форми та амплітуди піку напруги  $u_2$  (див. рисунок 4.12) необхідно якомога точніше відтворити ВБАХ вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10 для малих струмів намагнічування в області переходу кривої струму через нуль. Саме за таких малих струмів відбувається швидка зміна потокозчеплення вторинної обмотки ТС, що і призводить до виникнення піку напруги  $u_2$  з відповідною амплітудою  $U_{2m}$ . Також на результати розрахунків впливає задана форма струму в первинній обмотці ТС. У комплексі «RE» задавався синусоїдний струм, тоді як за натурального експерименту відносно малопотужне джерело струму  $I$  не формувало синусоїдний струм (див. рисунок 4.12). Усі вище наведені фактори впливали на результати розрахунків, отриманих у програмному комплексі «RE».

На наш погляд, навіть за похибок напруги  $\delta = (-16 \div +19) \%$  за відповідних синусоїдних струмів промислової частоти 50 Гц з амплітудою  $I_{1m} = (272 \div 1086) \text{ А}$  у первинній обмотці ТС типу ТЛМ-10 можна орієнтовно оцінити рівень перенапруг на розімкнених затискачах його вторинної обмотки. Як буде показано нижче, навіть за задання уточненої ВБАХ вторинної обмотки ТС комплексом «RE» вдалось з допустимою точністю відтворити параметри режиму роботи СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3.

#### **4.3.2 Дослідження режиму системи захисту трансформатора струму типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3**

На рисунку 4.14 наведено експериментальну схему осцилографування параметрів режиму СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості ОПН. Регульоване джерело струму  $I$  через струмовий канал 9 цифрового осцилографа «Альтра-12» підключено до затискачів  $L_1, L_2$  первинної обмотки ТС типу ТЛМ-10. За усталеного значення струму в первинній обмотці ТС автоматичним вимикачем SF (виробництво АВВ) розмикалось коло навантаження вторинної обмотки ТС (вхідне коло 7 цифрового осцилографа «Альтра-12»). На затискачах  $I_1$  та  $I_2$  вторинної обмотки ТС виникала перенапруга, яка призводила до пробиття ОПН – пробивного запобіжника типу ПП-А/3 (FV), що підключений до цих затискачів. Після пробиття ОПН вимикачем SF замикалось коло навантаження вторинної обмотки ТС. Таким чином, було експериментально відтворено алгоритм спрацювання СЗ ТС за обриву кола його вторинного навантаження з наступним замиканням накоротко виводів вторинної обмотки ТС ПШС СЗ. Послідовно з пробивним запобіжником увімкнено опір  $r_{ш}$ , на який замикається вторинна обмотка ТС після спрацювання (пробиття) ОПН.

Результати натурального експерименту було порівняно з даними, отриманими комп'ютерним моделюванням таких же режимів. Відповідно до натурального експерименту була створена розрахункова схема для комп'ютерної симуляції програмним



комплексом «RE» режимів роботи СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3, яка наведена на рисунку 4.15.

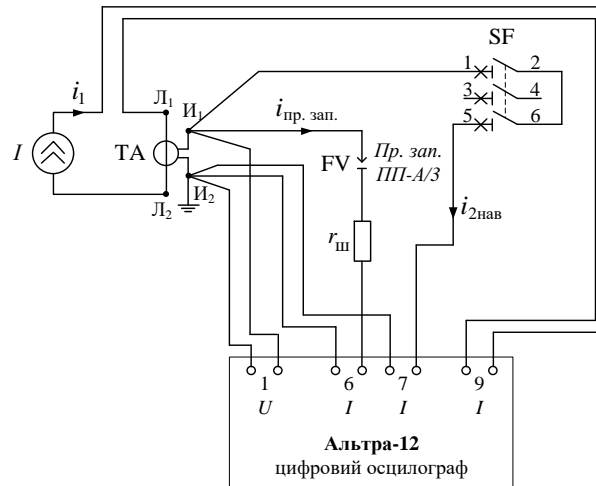


Рисунок 4.14 – Схема осцилографування параметрів режиму СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням в якості ОПН пробивного запобіжника типу ПП-А/3

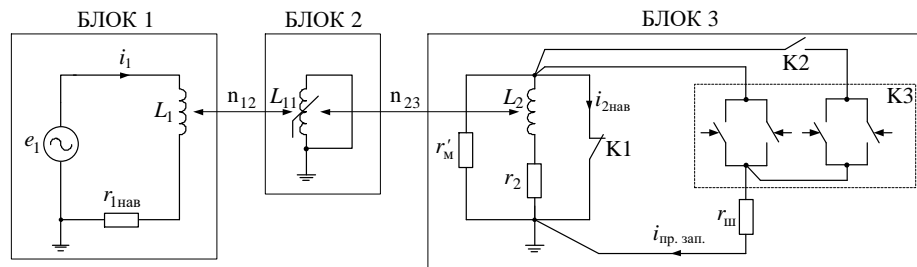


Рисунок 4.15 – Розрахункова схема для комп'ютерної симуляції режимів роботи СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3

Блоки 1 і 2 розрахункової схеми (рисунок 4.15) аналогічні блокам 1 та 2 розрахункової схеми ТС, наведеної на рисунку 3.1 (розділ 3), а у блоці 3 задано: зведений до вторинної сторони активний опір  $r'_m$ , який симулює втрати активної потужності в осерді ТС; параметри вторинної обмотки ( $r_2$ ,  $L_2$ ); ключ К1 вторинного кола (у розрахунковій схемі для комп'ютерної симуляції режиму не враховується вхідний опір каналу 7 цифрового осцилографа «Альтра-12», оскільки він не впливає на роботу захисту за розімкненого вторинного кола ТС); роботу пробивного запобіжника змо-

дельовано ключем К2 (призначений для подання у заданий момент часу напруги на другу групу ключів блоку К3) і блоком керованих напругою і струмом ключів К3; послідовно з блоком ключів К3 включено опір  $r_{ш}$  СЗ.

Параметри розрахункової схеми ТС типу ТЛМ-10 (рисунок 4.15) наведені у попередніх розділах (розділи 2, 3) та додатку В під час опису відповідних розрахункових схем ТС для дослідження режимів його роботи з розімкненим вторинним колом.

Опис роботи елементів блоку 3 розрахункової схеми у комплексі «RE», які симулюють пробивний запобіжник, наведено нижче (відповідно до параметрів режиму, отриманих шляхом натурального експерименту). У момент часу 0,03 с ключ К1 розмикає вторинне коло ТС. Пробивний запобіжник симулюють дві групи керованих напругою і струмом ключів блоку К3. Два ключі у кожній групі включені зустрічно-паралельно – для комутації кожним ключем відповідно додатної і від'ємної півхвиль струмів, що протікають через нього. Ключі блоку К3 в початковому стані розімкнені. Опір ключів рівний: в увімкненому стані 0,0001 Ом; у вимкненому стані 90 МОм.

Ключі першої групи замикаються за досягнення миттєвим значенням напруги на їх виводах 230 В (напруга увімкнення) і вимикаються під час проходження струму через нуль. За увімкнених ключів до виводів вторинної обмотки ТС під'єднується опір  $r_{ш}$ , рівний 2 Ом.

Ключ К2 замикається у момент часу 0,065 с і під'єднує другу групу ключів блоку К3 (ключі даної групи є розімкнені).

Ключі другої групи замикаються за досягнення миттєвим значенням напруги на їх виводах 28,2 В (напруга увімкнення) і вимикаються під час проходження струму через нуль. За увімкненої другої групи ключів до виводів вторинної обмотки ТС підключається опір  $r_{ш}$  (2 Ом). Ключі першої групи, які вимкнулися, коли миттєве значення струму через них було рівне нулю, далі замикатися не будуть, оскільки їх напруга увімкнення 230 В.

У момент часу 0,25 с замиканням ключа К1 симульовано замикання накоротко виводів вторинної обмотки ТС контактами реле ПШС СЗ.

На рисунку 4.16 наведені отримані за даними вище схемами натурні (рисунок 4.16, а) і розрахункові (рисунок 4.16, б) осцилограми, що відтворюють параметри режиму СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 за обриву кола навантаження, підключеного до затискачів вторинної обмотки цього ТС. На рисунку наведені такі осцилограми:  $i_1(t)$  – струм у первинній обмотці ТС;  $i_{2\text{наб}}(t)$  – струм у колі вторинного навантаження ТС;  $i_{\text{пр. зап.}}(t)$  – струм у колі пробивного запобіжника типу ПП-А/3;  $u_2(t)$  – напруга на виводах вторинної обмотки ТС.

Як видно з розрахункових осцилограм, наведених на рисунку 4.16, б, спочатку в колі навантаження вторинної обмотки ТС протікає синусоїдний струм  $i_{2\text{наб}}$ , а в колі ОПН струм відсутній ( $i_{\text{пр. зап.}} = 0$ ). Після обриву кола навантаження ключем К1 (див. рисунок 4.15) в ньому струм  $i_{2\text{наб}} = 0$ , ОПН пробивається за напруги  $u_2 = + 238$  В (перший пік напруги), потім знову пробивається за напруги  $u_2 = - 239,5$  В. В подальшому відповідно до натурної осцилограми пробиття ОПН симульовано за напруги порядку 25–35 В. В момент часу  $t = 0,25$  с відповідно до натурної осцилограми затискачі вторинної обмотки ТС замикаються накоротко пристроєм шунтування СЗ (симульовано ключем К1, рисунок 4.15).

Слід відмітити, що у програмному комплексі не моделювалась електрична дуга між електродами ОПН (пробивного запобіжника типу ПП-А/3). Тому напруга  $u_2$ , коли ОПН пробитий – це спад напруги на резисторі  $r_{\text{ш}}$  від протікання в ньому струму  $i_{\text{пр. зап.}}$ . Подібні осцилограми отримані за результатами натурних експериментів.

Як видно з осцилограм, наведених на рисунку 4.16, програмним комплексом «RE» вдалось з достатньою точністю відтворити режим роботи СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3. Натурним експериментом підтверджено ефективність роботи пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості обмежувача перенапруг за обриву кола навантаження вторинної обмотки ТС типу ТЛМ-10.

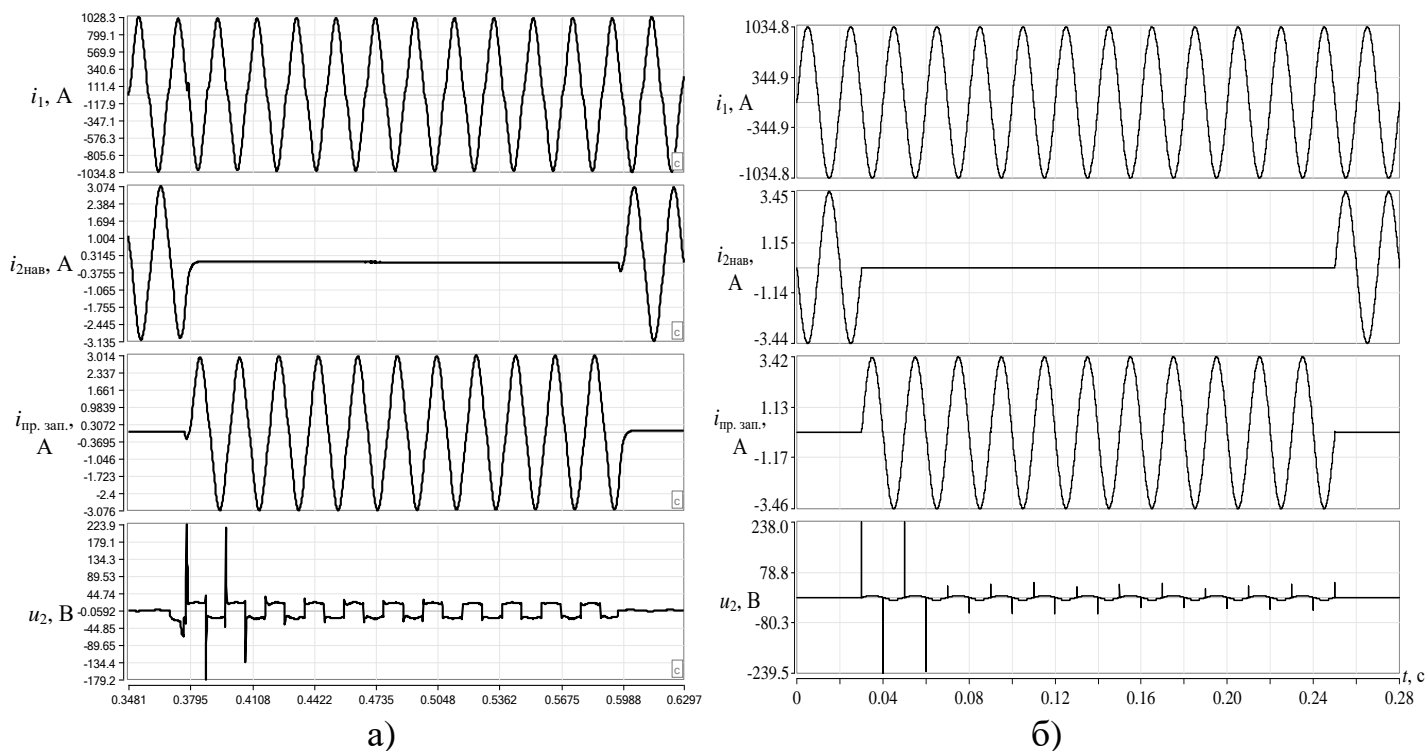


Рисунок 4.16 – Натурні (а) і розрахункові (б) осцилограми параметрів режиму СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням в якості ОПН пробивного запобіжника типу ПП-А/3

На рисунку 4.17 наведено фото обладнання під час проведення натурних експериментів СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3.



Рисунок 4.17 – Фото обладнання під час проведення натурних експериментів СЗ ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3

Варто відмітити, що проведені нами експериментальні дослідження показали, що нема потреби у встановленні СЗ на ТС з малопотужними осердями, оскільки внаслідок швидкого насичення магнітопроводу рівні напруг на розімкнених виводах їх вторинних обмоток не перевищували небезпечну для обладнання вторинних кіл величину 1000 В. Так, нами були отримані натурні осцилограми режимів розімкнених вторинних кіл для таких типів ТС: ТПЛ-10 75/5; ТНШЛ-0,66 800/5; ТЗЛМ-0,66 25/1; ТВЛМ-10 40/5. Разом з тим отримані величини вторинних перенапруг таких ТС все ж становлять небезпеку для оперативного персоналу. Тому обґрунтування встановлення СЗ необхідно розглядати для кожного конкретного типу ТС окремо. Для швидкого аналізу, з допустимою точністю, рівнів вторинних напруг ТС за обриву кіл їх вторинного навантаження можна скористатися запропонованим аналітичним методом оцінки амплітуди вторинної напруги ТС, наведеним у п. 2.3.

В подальшому планується проведення натурних експериментів з іншими типами ТС.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

1. Запропоновано СЗ від перенапруг за обриву вторинних кіл ТС та розглянуті основні вимоги до СЗ.

2. В якості ОПН СЗ запропоновано застосовувати пробивний запобіжник типу ПП-А/3 вітчизняного виробника – з напругою спрацювання до 1000 В. Наявність у запобіжнику невеликого (до 0,1 мм) повітряного іскрового проміжку забезпечує за його спрацювання (пробиття) надійне обмеження напруги на затискачах вторинних обмоток ТС за обриву кіл струму.

3. Для проведення досліджень режимів роботи основних типів ТС з СЗ від перенапруг за обриву їх вторинних кіл розроблені відповідні розрахункові схеми з застосуванням цифрового програмного комплексу «FASTMEAN». Це дало змогу дослідити як усталені, так і нестаціонарні режими роботи СЗ з ОПН з повітряним іскровим проміжком та обґрунтувати можливість технічної реалізації даної СЗ.

4. Результатами досліджень на цифровій моделі СЗ від перенапруг за обриву вторинних кіл струму досліджуваних типів ТС доведена ефективність її роботи та обмеження перенапруг до рівня спрацювання ОПН типу ПП-А/3.

5. Проведеними дослідженнями показана доцільність, після спрацювання ОПН, додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки ТС за обриву їх вторинних кіл. Для живлення електромеханічного реле рекомендовано застосовувати джерело оперативного струму підстанції.

6. Проведеними комп'ютерним моделюванням та відповідними аналітичними розрахунками доведена можливість застосування для СЗ окремих типів ТС від перенапруг за обриву їх вторинних кіл струму ОПН без іскрового проміжку, що застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг. Однак для прийняття рішення про практичне застосування таких СЗ з ОПН без іскрового проміжку необхідно провести додаткові дослідження, зокрема, натурні випробування промислового взірця тощо.

7. Проведено дослідження режимів роботи ТС з СЗ від перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування вторинної обмотки ТС. Особливістю такої СЗ, як показали дослідження, є залежність часу затримки у спрацюванні захисту від рівня струму у первинній обмотці ТС. Цей недолік, на жаль, за відсутності відповідної елементної бази, не дає змогу поки що практично реалізувати таку СЗ.

8. Проведеними натурними експериментами та комп'ютерним моделюванням у програмному комплексі «RE» режимів роботи СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості ОПН підтверджено ефективність обмеження вторинних перенапруг до значень, не більших 1000 В, 50 Гц. Також показана адекватність (з допустимою точністю) відтворення комплексом «RE» режимів роботи СЗ на прикладі ТС типу ТЛМ-10 з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача аналізу режимів роботи трансформаторів струму за аварійного розмикання їх вторинних кіл та розробки системи захисту трансформаторів струму від таких режимів, що сприятиме надійності функціонування електричних систем. В руслі даного напрямку отримано наступні результати:

1. Розглянуто конструкції, технічні характеристики трансформаторів струму з замкнутим магнітопроводом, особливості режимів роботи цих трансформаторів у сучасних мережах 6 – 750 кВ промислової частоти за розімкнутих кіл їх вторинних обмоток.

2. Проведено аналіз публікацій з результатами досліджень режимів роботи трансформаторів струму за обриву кіл вторинних обмоток цих трансформаторів, а також з описами пристроїв захисту від перенапруг, що виникають за таких режимів. Кількість цих публікацій виявилась незначною, а проведений аналіз підтверджує доцільність продовження досліджень таких режимів та розробки відповідних захистів для трансформаторів струму.

3. Запропоновано метод оцінки максимальних амплітуд перенапруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму, що дає змогу здійснювати попередній аналіз перенапруг на основі паспортних даних трансформаторів струму. Результатами аналітичних розрахунків підтверджено наявність небезпечних (більше 1000 В) перенапруг на розімкнених виводах трансформаторів струму різних типів.

4. Розроблено розрахункові схеми для аналізу режимів трансформаторів струму за розмикання їх вторинних кіл з врахуванням втрат активної потужності в осерді. Показано значний вплив цих втрат на рівень перенапруг порівняно з режимами без врахування втрат.

5. Запропоновано систему захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл трансформаторів струму, розглянуто основні вимоги до цієї системи та проведеними

експериментальними дослідженнями і комп'ютерним моделюванням режимів роботи системи захисту на прикладі ТС типу ТЛМ-10 (з застосуванням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 в якості обмежувача перенапруг) підтверджено ефективність її роботи та обмеження перенапруг до значень, не більших 1000 В.

6. Проведеними дослідженнями показана доцільність використання додаткового швидкого шунтування контактами електромеханічного реле вторинної обмотки трансформаторів струму за обриву їх вторинних кіл.

7. Встановлена адекватність відтворення програмними комплексами режимів роботи системи захисту та підготовлено технічне завдання на виготовлення промислового дослідного взірця пристрою захисту, визначено підстанцію, на якій він буде встановлений у дослідно-промислову експлуатацію.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення [Текст] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.
2. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 89–94.
3. Кенс Ю. А. Спрощений аналіз усталеного режиму роботи однокаскадного трансформатора струму за розкорочення його вторинної обмотки [Текст] / Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2015. – № 834 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 26–32.
4. Журахивский А. В. Исследование установившихся режимов работы одноступенчатого трансформатора тока при размыкании под нагрузкой его вторичной обмотки [Текст] / А. В. Журахивский, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович // Энергетика и ТЭК. – Минск, 2017. – № 1 (166). – С. 23–26.
5. Яцейко А. Я. Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму [Електронний ресурс] / А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович // Енергетика та системи керування : Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС-2013. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 32–35. – Назва з екрану.
6. Захист від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, Р. Я. Ференсович, Н. Б. Дьяченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 5 (134). – С. 74–79.
7. Пат. 71385 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201200114 ; заявл. 04.01.2012 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

8. Пат. 89566 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від пошкоджень перенапружками / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201313704 ; заявл. 25.11.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

9. Пат. 111065 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту від перенапруг трансформатора струму та його вторинних кіл / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Ференсович ; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201605446 ; заявл. 19.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

10. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения [Текст] / Сост. Ф. Д. Кузнецов ; Под ред. Б. А. Алексеева. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. – 96 с.

11. Перевірка трансформаторів струму, які використовуються в схемах релейного захисту : СОУ-Н МПЕ 40.1.35.301:2004. – Видання офіційне. – К. : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. – 80 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Інструкція).

12. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали [Текст] / В. В. Дружинин. – Изд. 2-е, перераб. – М. : Энергия, 1974. – 240 с. с ил.

13. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы [Текст] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. – 9-е изд., стер. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 440 с., ил.

14. Королев Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты [Текст] / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – М. : Энергия, 1980. – 208 с., ил.

15. Стогний Б. С. Анализ и расчет переходных режимов работы трансформаторов тока [Текст] / Б. С. Стогний. – К. : Наук. думка, 1972. – 140 с.

16. Сирота И. М. Переходные режимы работы трансформаторов тока [Текст] / И. М. Сирота. – К. : Изд. АН УССР, 1961. – 192 с.

17. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики : учеб. пособие [для вузов] [Текст] / В. Е. Казанский. – М. : Энергия, 1978. – 264 с.

18. Свірцов В. О. Особливості діагностування стану вимірювальних та силових трансформаторів в електромережах [Текст] / В. О. Свірцов, Є. В. Походило, Р. В. Курдидик // Вісник НУ «Львівська політехніка». – Л. : В-цтво НУ ЛП, 2008. – № 608 : Автоматика, вимірювання та керування. – С. 123–127.

19. РД 153-34.0-35.301-2002. ИНСТРУКЦИЯ ПО ПРОВЕРКЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СХЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ [Текст]. – Изд. 3, перераб. – М. : 2003. – 152 с.

20. Трансформаторы тока [Текст] / [В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с. : ил.

21. ТРАНСФОРМАТОРИ ВИМІРЮВАЛЬНІ. Частина 1. Трансформатори струму (ІЕС 60044-1 : 2003, ІДТ) : ДСТУ ІЕС 60044-1 : 2008. – [Чинний від 2010-01-01]. – Видання офіційне. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 39 с. – (Національний стандарт України).

22. Чунихин А. А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов [Текст] / А. А. Чунихин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 648 с. с ил.

23. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства [Текст] / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. (гл. ред. И. Н. Орлов) – 9-е изд., стер. – М. : Изд-во МЭИ, 2003. – 518 с.

24. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит [Электронный ресурс] / Ф. А. Романюк, А. А. Тишечкин, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, Н. Н. Бобко, Е. В. Глинский // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : научно-технический и производственный журнал. – 2010. – № 1. – С. 5–9. – Режим доступа : <http://rep.bntu.by/handle/data/1639> (дата звернення 20.08.15). – Назва з екрану.

25. Баглейбтер О. Трансформатор тока в сетях релейной защиты. Противодействие насыщению ТТ апериодической составляющей тока КЗ [Текст] / О. Баглейбтер // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5 (53). – С. 2–3.

26. Мокін О. Б. Уточнення характеристик процесів у вимірювальних трансформаторах струму та їх математичних моделей [Текст] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Я. В. Хом'юк, О. М. Кривоніс // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 4. – С. 48–57.

27. Раскулов Р. Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания [Электронный ресурс] / Р. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 2 (32). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/32/14.php> (дата звернення 20.08.15). – Назва з екрану.

28. Раскулов Р. Ф. Анализ условий работы измерительных трансформаторов и исследование влияний воздействующих факторов на точностные характеристики трансформаторов в энергосистемах : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы», 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение» [Текст] / Р. Ф. Раскулов. – М., 2004. – 24 с.

29. Новаш И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования [Текст] / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 5. – С. 23–38.

30. Мартынов В. А. Современные модели и методы расчета нелинейных электромеханических устройств [Текст] / В. А. Мартынов ; Иван. гос. энергет. ун-т. – Иваново, 2000. – 140 с.

31. Гуревич В. И. Устройства защиты трансформаторов тока от обрыва вторичной цепи [Текст] / В. И. Гуревич // Промышленная энергетика. – 2002. – № 11. – С. 15–16.

32. Гуревич В. И. Защита трансформаторов тока от работы в режиме с разомкнутой вторичной цепью [Текст] / В. И. Гуревич // Про электричество. – 2010. – № 3/34. – С. 28–31.

33. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока: расчеты и конструкции [Текст] / Н. И. Бачурин. – М. ; Л. : Энергия, 1964. – 376 с.

34. Кошмидер А. Перенапряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока при насыщении сердечника [Текст] / А. Кошмидер // Известия высших учебных заведений – Электромеханика. – 1972. – № 5. – С. 503–506.

35. Пат. 49392 Україна, МПК H02H 7/04 (2009). Спосіб захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, А. Я. Яцейко, М. М. Смігуровська, В. Я. Вінтонюк ; власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». – Заявл. 23.11.2009 ; опубл. 26.04.2010 р., Бюл. № 8.

36. Shkolnik A. Utility reduces risk of explosion. IEC develops protection scheme to eliminate explosions of operational current transformers / A. Shkolnik, V. Gurevich // Transmission & Distribution World : Substation Facilities, 2015. – P. 42–46.

37. Ференсович Р. Я. Дослідження режимів роботи трансформаторів струму [Текст] / Р. Я. Ференсович // Енергетика та системи керування : Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2011. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 90–91.

38. Сахно А. А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330 – 750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа [Текст] / А. А. Сахно // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2010. – № 55. – С. 97–106.

39. Андриенко П. Д. Результаты внедрения системы непрерывного контроля характеристик основной изоляции высоковольтных трансформаторов тока на ПС «Днепр – Донбасс 330» [Текст] / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – № 2. – С. 63–68.

40. Рассальский А. Н. Совершенствование системы диагностики высоковольтных трансформаторов тока на основе автоматизированного непрерывного контроля и прогноза остаточного ресурса [Текст] / А. Н. Рассальский, П. Д. Андриенко, А. А. Сахно // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2011. – № 48. – С. 50–55.

41. Сахно О. А. Система безперервного контролю та прогнозу залишкового ресурсу високовольтних трансформаторів струму : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» [Текст] / О. А. Сахно. – Львів, 2012. – 20 с.

42. Яцейко А. Я. Діагностика ізоляції високовольтних трансформаторів струму під робочою напругою : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи» [Текст] / А. Я. Яцейко. – К., 2008. – 18 с.

43. Лежнюк П. Д. Розподіл допусків на параметри регулюючих пристроїв в системі автоматичного керування режимом електроенергетичної системи [Текст] / П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра, Ю. В. Петрушенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 1. – С. 80–85.

44. Лежнюк П. Д. Практична реалізація оптимального керування потоками потужності для компенсації взаємовпливу електричних мереж за допомогою крос-трансформатора [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 4. – С 55–60.

45. Лежнюк П. Д. Дослідження впливу РДЕ та секціонування на режими роботи локальних електричних систем [Текст] / П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Наукові праці ВНТУ. – 2016. – № 2 : Енергетика та електротехніка. – С. 1–12.

46. US Patent Application Publication, US 2009/0186504 A1, H01R 29/00 (2006.01). Electrical circuit quick connection and disconnection system with automatic short circuit of current transformer secondaries / Eduardo Pedrosa Santos. – Pub. Date : Jul. 23, 2009.

47. Spark Quenching & CT Protection. Slimline, Rhomberg Catalogue, Section J. – P. 134.

48. United States Patent, 3,723,812, H02h 7/04. Auxiliary means for completing current transformer secondary winding circuit / John C. Lynch ; Assignee McGraw-Edison Company. – Pub. Date : Mar. 27, 1973.

49. US Patent Application Publication, US 2014/0022085 A1, G08B 21/18 (2006.01). Method and apparatus of sensing and indicating an open current transformer secondary / Christopher D. Wells. – Pub. Date : Jan. 23, 2014.

50. United States Patent, 4,466,039, H02H 7/04. Open circuit current transformer protection circuit / Richard J. Moran, Norbert J. Reis ; Assignee McGraw-Edison Company. – Pub. Date : Aug. 14, 1984.

51. United States Patent, 4,521,822, H02H 7/04. Current transformer protection device / Julien Simard ; Assignee Hydro-Quebec. – Pub. Date : Jun. 4, 1985.

52. PCT WO 2009/047748 A2, H02H 9/04 (2006.01). Open circuit in secondary winding protection for current transformers / Vladimir Gurevich, Anatoly Shkolnik ; Applicant Israel electric corporation. – Pub. Date : 16 Apr. 2009.

53. US Patent Application Publication, US 2014/0306716 A1, G01R 31/02 (2006.01). Methods for detecting an open current transformer / Roy Ball ; Applicant ABB Research LTD. – Pub. Date : Oct. 16, 2014.

54. US Patent Application Publication, US 2015/0333509 A1, H02H 9/04 (2006.01), H02H 7/04 (2006.01). Protective circuit for a current transformer and current transformer with a protection circuit / Martin Jankowski ; Applicant Phoenix contact GMBH & CO. KG. – Pub. Date : Nov. 19, 2015.

55. US Patent Application Publication, US 2005/0201033 A1, H02H 7/125. Apparatus for monitoring open state of the secondary terminals of a current transformer / Ki-Chan Song ; Assignee Samsung Measuring Instruments Co., Ltd. – Pub. Date : Sep. 15, 2005.

56. Open circuit protectors. Model OCP [Электронный ресурс]. – Instrument Transformers, Inc. – CS00A40779 Rev.1 02/15. – P. 28–29. – Режим доступа : <https://www.gedigitalenergy.com/products/specs/OCP.pdf> (дата звернения 25.08.15). – Назва з екрану.

57. ABB FT Current Test Plug with Open CT Protection [Электронный ресурс]. – 1VAC399802-FL Rev A, October 2008. – Режим доступа : <https://library.e.abb.com/public/ed786a8b866bf9a8c12574e30062589a/FT%20test%20plug%20flyer2.pdf> (дата звернения 25.08.15). – Назва з екрану.

58. Metrosil current transformer protection units [Электронный ресурс]. – Metrosil. Silicon carbide surge protection, June 2013. – 3 p. – Режим доступа :

[http://static.mimaterials.com/metrosil/documents/English/Metrosil\\_CTPUs.pdf](http://static.mimaterials.com/metrosil/documents/English/Metrosil_CTPUs.pdf) (дата звернення 25.08.15). – Назва з екрану.

59. СТКВ-IV current transformer protector [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.andeligroup.com/СТКВ-IV-current-transformer-protector-id68.html> (дата звернення 28.08.15). – Назва з екрану.

60. Моніторинг параметрів вторинних кіл трансформаторів струму систем керування електроенергетичних об'єктів [Текст] / Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель, Є. М. Танкевич, Г. М. Варський, І. В. Яковлева // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 57–62.

61. Гармаш В. А. Каскадный трансформатор тока с немагнитным зазором в сердечнике верхнего каскада [Текст] / В. А. Гармаш // Известия высших учебных заведений – Электромеханика. – 1972. – № 5. – С. 492–496.

62. Дроздов А. Д. Улучшение работы трансформаторов тока в переходном режиме [Текст] / А. Д. Дроздов, В. А. Гармаш // Электричество. – 1970. – № 7. – С. 87–90.

63. Переходный процесс в одноступенчатом и каскадном двухступенчатом трансформаторах тока с емкостной компенсацией [Текст] / Б. С. Стогний, В. В. Рогоза, В. А. Черненко, Е. Н. Танкевич, А. В. Степанов // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1974. – Вып. 48. – С. 43–48.

64. Исследование и разработка каскадных трансформаторов тока, предназначенных для работы в установившихся и переходных режимах [Текст] / Б. С. Стогний, В. В. Рогоза, В. А. Черненко, Е. Н. Танкевич // Электротехника. – 1975. – № 46. – С. 28–29.

65. Стогний Б. С. Емкостная компенсация погрешностей каскадных трансформаторов тока с линейными характеристиками [Текст] / Б. С. Стогний, В. А. Черненко, А. В. Степанов // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1975. – Вып. 53. – С. 55–58.

66. Стогний Б. С. Качественное исследование переходного процесса в компенсированном каскадном трансформаторе тока [Текст] / Б. С. Стогний, А. В. Степанов,



М. А. Беркович // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1976. – Вып. 60. – С. 35–40.

67. Стогний Б. С. Каскадный трансформатор тока с комбинированным магнитопроводом [Текст] / Б. С. Стогний, В. А. Черненко, Е. Н. Танкевич // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1976. – Вып. 60. – С. 40–44.

68. Стогний Б. С. Общие уравнения токов намагничивания каскадных двухступенчатых трансформаторов тока в переходном режиме [Текст] / Б. С. Стогний, Е. Н. Танкевич // Известия высших учебных заведений – Электромеханика. – 1972. – № 5. – С. 486–491.

69. Стогний Б. С. Общие уравнения токов намагничивания трехступенчатых трансформаторов тока в переходном режиме [Текст] / Б. С. Стогний, Е. Н. Танкевич // Электрические сети и системы. – Львов : Изд-во при Львовском ун-те, 1974. – Вып. 10. – С. 112–121.

70. Переходный процесс в двухступенчатом каскадном трансформаторе тока с двумя трансформаторами нижней ступени [Текст] / Б. С. Стогний, В. В. Рогоза, В. А. Черненко, Е. Н. Танкевич // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1974. – Вып. 48. – С. 36–42.

71. Танкевич Е. Н. Аналитическое исследование переходных процессов в каскадных трансформаторах тока [Текст] / Е. Н. Танкевич, Н. В. Коваль // Проблемы технической электродинамики. – К. : Наукова думка, 1975. – Вып. 53. – С. 59–67.

72. Ляшенко І. В. Оптико-електронні вимірювання струму і напруги високовольтних електричних мереж [Текст] / І. В. Ляшенко, С. Є. Танкевич, Є. М. Танкевич // Міжнародний наук.-техн. журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – 2012. – № 2. – С. 31–38.

73. Гуртовцев А. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики [Электронный ресурс] / А. Гуртовцев // Новости электротехники. – 2009. – № 5 (59). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/59/05.php> (дата звернення 07.09.15). – Назва з екрану.

74. Долгих И. Ю. Анализ способов и принципов измерения тока для создания цифровых измерительных трансформаторов [Текст] / И. Ю. Долгих, рук. В. Н. Гречухин, В. Д. Лебедев // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА : Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2012. – Т. 3. – С. 167–171.

75. Гуревич В. И. Оптоэлектронные трансформаторы: панацея или частное решение частных проблем? [Текст] / В. И. Гуревич // Вести в электроэнергетике. – 2010. – № 2. – С. 24–28.

76. Гуртовцев А. Оптические трансформаторы и преобразователи тока. Принципы работы, устройство, характеристики [Электронный ресурс] / А. Гуртовцев // Новости электротехники. – 2009. – № 6 (60). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/60/08.php> (дата звернения 07.09.15). – Назва з екрану.

77. Optoelectronic current transformer for medium voltage networks / Marinel Popescu, Alexandru Manta, Nicolae Paduraru, Andrei Marinescu // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. – 2010. – No. 34. – P. 103–108.

78. Гуревич В. Оптические трансформаторы тока: нужно быть реалистами [Текст] / В. Гуревич // Электрические сети и системы. – 2010. – № 4. – С. 73–76.

79. Троицкий Ю. Использование катушки Роговского для токовых измерений [Текст] / Ю. Троицкий, М. Ковнерев // Электронные компоненты. – 2005. – № 5'. – С. 123–127.

80. Батыгин Ю. В. Численная обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, Е. А. Чаплыгин // Автомобильный транспорт : сборник научных трудов. – Х., 2009. – Вып. 25. – С. 194–198.

81. Матюк В. Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей [Электронный ресурс] / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3–

35. – Режим доступу : <http://science.by/nauka/13/> (дата звернення 20.11.15). – Назва з екрану.

82. Матюк В. Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть II. Развитие арктангенсовой модели [Электронный ресурс] / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 3. – С. 3–24. – Режим доступу : <http://science.by/nauka/13/> (дата звернення 20.11.15). – Назва з екрану.

83. Пентегов И. В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей [Текст] / И. В. Пентегов, А. В. Красножон // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 66–70.

84. Белкина Е. Н. Анализ способов аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали [Текст] / Е. Н. Белкина, С. А. Жуков // Междунар. научн. журн. «Инновационная наука». – 2015. – № 5. – С. 22–27.

85. Мушаров А. О. Апроксимація основної кривої намагнічування магнітопроводу силового трансформатору ступеневим поліномом третього ступеня [Текст] / А. О. Мушаров // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 4 (36). – С. 103–106.

86. Трансформаторы тока [Текст] / [В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др.]. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с., ил.

87. PTC Mathcad [Электронный ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad> (дата звернення 10.01.16). – Назва з екрану.

88. Равлик О. М. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики [Текст] / О. М. Равлик, Т. М. Гречин, В. Й. Іваноньків // Вісник ДУ «Львівська політехніка». – 1997. – № 340 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 96–101.

89. Описание FASTMEAN [Электронный ресурс]. – Режим доступу : <http://fastmean.ru/rus/index.php?page=core.php> (дата звернення 15.01.16). – Назва з екрану.

90. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (дата звернення 20.01.16). – Назва з екрану.

91. Ferensovych R. The Operation of Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / R. Ferensovych // V Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 196–198. – Назва з екрану.

92. Ferensovych R. The Operation Mode of Single-Stage Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / R. Ferensovych // VI Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 175–176. – Назва з екрану.

93. КО «Запорожский Завод Высоковольтной Аппаратуры» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.zva.zp.ua/> (дата звернення 10.07.16). – Назва з екрану.

94. Трансформаторы тока маслонaполненные. Трансформаторы тока серии ТОМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.zva.zp.ua/transformatory-toka-maslonapolnennye/> (дата звернення 15.07.16). – Назва з екрану.

95. ГАБАРИТНЫЕ, УСТАНОВОЧНЫЕ И ПРИСОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ. Трансформатор тока ТОМ 765 I Г У1 [Електронний ресурс]. – С. 73–74. – Режим доступу : [http://www.zva.zp.ua/pdf/TRT/TOM/TOM\\_765\\_I\\_G\\_U1.pdf](http://www.zva.zp.ua/pdf/TRT/TOM/TOM_765_I_G_U1.pdf) (дата звернення 15.07.16). – Назва з екрану.

96. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУ 14-123-216-2009. Магнитопроводы ленточные из магнитомягких аморфных сплавов и из магнитомягкого композиционного (нанокристаллического) материала для измерительных трансформаторов тока [Текст]. – Открытое акционерное общество «Ашинский металлургический завод». – Г. Аша. – 2009. – Срок действия с 29.12.2009 г. Без ограничения. – 9 с.

97. ТДНС 10000-16000/35 У1. Трансформаторы силовые, трехфазные, двухобмоточные [Електронний ресурс]. – Режим доступу :

[http://www.ues.su/catalog/transformers/tdns\\_35-item/#tab\\_info](http://www.ues.su/catalog/transformers/tdns_35-item/#tab_info) (дата звернення 18.08.16). – Назва з екрану.

98. Пробивной предохранитель трансформатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://leg.co.ua/info/transformatory/probivnoy-predohranitel-transformatora.html> (дата звернення 19.03.17). – Назва з екрану.

99. Правила улаштування електроустановок [Текст]. – 5-те видання, перероблене та доповнене. – Х. : Видавництво «Індустрія», 2017. – 924 с.

100. Предохранители пробивные типа ПП-А/3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.kzeap.ru/katalog/k12.pdf> (дата звернення 19.03.17). – Назва з екрану.

101. ПОРЯДОК И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://forca.ru/knigi/arhivy/naladka-elektroustanovok-13.html> (дата звернення 19.03.17). – Назва з екрану.

102. Ограничители перенапряжений ОПН и вентильные разрядники в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://opn.dn.ua/konk/zeto/opnp038066.html> (дата звернення 01.04.17). – Назва з екрану.

103. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВЛ и СИП 0,4-10 кВ \ ОПН-П-0,38 УХЛ1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://10kv.com.ua/opn/opn04.html>. (дата звернення 03.04.17). – Назва з екрану.

104. Ограничители перенапряжения нелинейные серии ОПН (0,38-35 кВ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.etk-oniks.ru/Ogranichiteli-perenapryazhenij/OPN-038-35-kV.html> (дата звернення 10.04.17). – Назва з екрану.

105. Дорошев К. И. Выключатели и измерительные трансформаторы в КРУ 6 – 220 кВ [Текст] / К. И. Дорошев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 152 с. : ил. – (Б-ка электромонтера, вып. 630).

106. Вавин В. Н. Трансформаторы тока [Текст] / В. Н. Вавин. – М.–Л. : Энергия, 1966. – 104 с. с илл. – (Б-ка электромонтера, вып. 203).

107. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия : ГОСТ 21427.1-83. – [Дата введения 1984-01-01]. – Министер-

ство металлургии СССР, 1983. – Издание. с Изм. № 1 – 5, 13 с. – (Межгосударственный стандарт).

108. Носенко В. К. Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоефективних технологій (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 25 лютого 2015 року) [Електронний ресурс] / В. К. Носенко // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 4. – С. 68–79. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu\\_2015\\_4\\_12.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2015_4_12.pdf) (дата звернення 20.08.15). – Назва з екрану.

109. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТУ 14-123-233-2012. Магнитопроводы ленточные с нормированным уровнем потерь на перемагничивание. – ОАО «Ашинский металлургический завод». – Аша, 2012. – Срок действия с 15.02.2013 г. без ограничения. – 15 с.

110. Филонов М. Р. Аморфные и нанокристаллические материалы, полученные закалкой из расплавов : учебно-методический комплекс дисциплины [Текст] / М. Р. Филонов, Ю. В. Конюхов. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2010. – 184 с.

111. Шабад М. А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты [Текст] / М. А. Шабад.– М. : НТФ «Энергопрогресс», 1998. – 64 с. : ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик» ; Вып. 1).

112. Рожкова Л. Д. Электрооборудование станций и подстанций : Учебник для техникумов [Текст] / Л. Д. Рожкова, В. С. Козулин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с. : ил.

113. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА и НАПРЯЖЕНИЯ : [каталог] [Электронный ресурс]. – Режим доступу : <http://www.elec.ru/files/2014/05/14/2013-catalog.pdf> (дата звернення 21.08.15). – Назва з екрану.

114. Измерительные трансформаторы тока, 2011 – 2016 г. НОМЕНКЛАТУРНЫЙ КАТАЛОГ. – КО «Запорожский завод высоковольтной аппаратуры». – 134 с.

115. Бажанов С. А. Маслонаполненные трансформаторы тока [Текст] / С. А. Бажанов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 80 с., ил. – (Б-ка электромонтера ; Вып. 559).

116. Трансформаторы тока серии ТФЗМ. Руководство по эксплуатации. ВЛИЕ.670105.001 РЭ [Электронный ресурс]. – 25 с. – Режим доступа : [http://megaom.ucoz.ru/vv\\_oborudovanie/ТТ/ТФЗМ-110.pdf](http://megaom.ucoz.ru/vv_oborudovanie/ТТ/ТФЗМ-110.pdf) (дата звернення 15.09.15). – Назва з екрану.

117. Номенклатурный каталог 2015 г. Раздел 3. Измерительные трансформаторы класса напряжения 6 – 750 кВ. – М. : ОАО «Электрозавод», 2015. – С. 153–181.

118. Гексафторид сірки [Электронный ресурс]. Режим доступа : [http://uk.wikipedia.org/wiki/Гексафторид\\_сірки](http://uk.wikipedia.org/wiki/Гексафторид_сірки) (дата звернення 16.09.15). – Назва з екрану.

119. Элегазовые измерительные трансформаторы класса напряжения 110-500 кВ [каталог] [Электронный ресурс]. – Электроаппарат. – 14 с. – Режим доступа : <http://www.ea.spb.ru/catalog/1/> (дата звернення 17.09.15). – Назва з екрану.

120. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ТВ-10, ТВ-35. Руководство по эксплуатации 1ГГ.671 235.007 РЭ [Электронный ресурс]. – Е. : ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». – 25 с. – Режим доступа : [http://www.cztt.ru/userFiles/RE\\_2015/RE\\_TW-10-35.pdf](http://www.cztt.ru/userFiles/RE_2015/RE_TW-10-35.pdf) (дата звернення 17.09.15). – Назва з екрану.

121. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ТВ-110. Руководство по эксплуатации 1ГГ.671 237.042 РЭ [Электронный ресурс]. – Е. : ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». – 25 с. – Режим доступа : [http://www.cztt.ru/userFiles/RE\\_2015/RE\\_TW-110.pdf](http://www.cztt.ru/userFiles/RE_2015/RE_TW-110.pdf) (дата звернення 17.09.15). – Назва з екрану.

122. Трансформаторы тока серии ТВТ : каталог E00000247 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.ielectro.ru](http://www.ielectro.ru) (дата звернення 17.09.15). – Назва з екрану.

123. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ТВТ-35М. Описание и основные технические характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://smart-e.su/data/documents/03642-73\\_ТТ\\_TVDM-35.pdf](http://smart-e.su/data/documents/03642-73_ТТ_TVDM-35.pdf) (дата звернення 17.09.15). – Назва з екрану.

124. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию : в 2 т. [Текст] / Под общ. ред. А. А. Федорова. Т. 2. Электрооборудование. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 592 с. ; ил.

125. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ТШЛ-10. РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ 1ГГ.671 234.003 РЭ [Электронный ресурс]. – Е. : ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». – 17 с. – Режим доступа : [http://www.cztt.ru/userFiles/Rukovodstva/RE\\_TSHL-10.pdf](http://www.cztt.ru/userFiles/Rukovodstva/RE_TSHL-10.pdf) (дата звернения 19.09.15). – Назва з екрану.

126. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем : учебник [для вузов] [Текст] / А. М. Федосеев. – М. : Энергия, 1976. – 560 с. с ил.

127. Сирота И. М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности [Текст] / И. М. Сирота. – Киев : Наук. думка, 1983. – 268 с.

128. Беркович М. А. Основы техники релейной защиты [Текст] / М. А. Беркович, В. В. Молчанов, В. А. Семенов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 376 с., ил.

129. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : Учебник для вузов [Текст] / В. А. Андреев. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 639 с. : ил.

130. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТЗЛК-СЭЩ-0,66, ТЗЛКР-СЭЩ-0,66. ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ ОРТ.135.019 ТИ [Текст]. – Самара, 2013. – 14 с.

131. Справочник энергетика промышленных предприятий. Т. 1. Электроснабжение [Текст] / Под общей ред. А. А. Федорова, Г. В. Сербиновского и Я. М. Большама. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 840 с.

132. Вайнштейн Р. В. Трансформаторы тока нулевой последовательности для чувствительных защит от замыканий на землю [Текст] / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, С. М. Юдин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4 : Электроэнергетика. – С. 173–175.

133. Трансформатор ТЛМ-10-2 Старый тип [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://energosfera.org.ua/transformatory/izmeritelnye-transformatory-toka/litye->



[izmeritelnye-transformatory-toka-10kv/transformator-tlm-10-2-staryj-tip.html](http://izmeritelnye-transformatory-toka-10kv/transformator-tlm-10-2-staryj-tip.html) (дата звернення 02.10.15). – Назва з екрану.

134. Трансформатор ТПШЛ-10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://energosfera.org.ua/transformatory/izmeritelnye-transformatory-toka/litye-izmeritelnye-transformatory-toka-10kv/transformator-tpshl-10.html> (дата звернення 02.10.15). – Назва з екрану.

135. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы: Учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» [Текст] / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 352 с. : ил.

136. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ТШЛ-20-1. Руководство по эксплуатации 1ГГ.671 235.006 РЭ [Текст]. – ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока». – 18 с.

137. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.100-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ЗАО «АРЕВА Передача и Распределение». – Дата введения: 13.09.2011. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 284 с.

138. Microsoft Mathematics 4.0 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.microsoft.com/ru-ru/download/details.aspx?id=15702> (дата звернення 16.10.16). – Назва з екрану.

139. Реле защиты [Текст] / [В. С. Алексеев, Г. П. Варганов, Б. И. Панфилов, Р. З. Розенблюм]. – М. : Энергия, 1976. – 464 с. с ил.

**ДОДАТКИ**

## Додаток А

### А.1 Особливості конструкції та режимів роботи трансформаторів струму з замкнутим магнітним осердям

#### Особливості конструкції одноступневих опорних ТС

На рисунку А.1 зображено загальновідомі основні конструктивні елементи одноступеневого двообмоткового опорного ТС, що беруть участь у трансформації первинного струму.

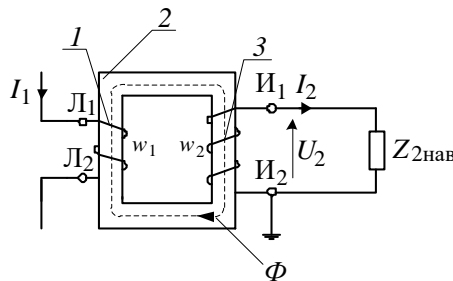


Рисунок А.1 – Основні конструктивні елементи одноступеневого опорного ТС:

1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – вторинна обмотка

За одночасного протікання струмів у первинній та вторинній обмотках ТС (за підключеного навантаження до вторинної обмотки) в осерді ТС встановлюється магнітний потік  $\Phi$  (рисунок А.1), що зчеплюється з усіма обмотками ТС та визначається сумарними ампер-витками магнітозчеплених обмоток ТС (без урахування магнітних потоків розсіювання). За таких умов магнітний потік  $\Phi$  для осердя з лінійною вебер-амперною характеристикою розраховують як частку від ділення сумарних ампер-витків на магнітний опір осердя – відповідно до 2-го закону Кірхгофа для замкнутого магнітного кола. За відсутності навантаження у вторинній обмотці ТС (вторинне коло розімкнуте) магнітний потік  $\Phi$  дуже великий навіть за номінального струму у первинній обмотці ТС, оскільки визначається тільки номінальними ампер-витками  $I_{1\text{ном}} \cdot w_{1\text{ном}}$  ( $I_2 \cdot w_2 = 0$ ). Коли ж увімкнуте номінальне навантаження вторинної

обмотки  $Z_{2\text{навном}}$ , то за протікання у обмотках ТС номінальних первинного і вторинного струмів сумарні ампер-витки становлять одиниці (або менше) відсотків від номінальних ампер-витків обмоток ТС, а значить встановлюється такий же малий відповідний їм магнітний потік  $\Phi$  в осерді ТС. Це пояснюється тим, що струм, який індукується у вторинну обмотку ТС, згідно закону електромагнітної індукції магнітозчеплених електричних кіл (закон Джоуля-Ленца) має протилежний напрямок (є розмагнічувальним) по відношенні до напрямку вимушувального джерела струму в первинній обмотці ТС (стосовно однополярних затискачів обох обмоток ТС [19, 17]). Як відомо [20, 105, 106], первинну обмотку ТС вмикають послідовно у коло струму, що потрібно виміряти. Її виконують з жорстких (стержень, шина) або гнучких провідників. Вторинних обмоток може бути декілька, до яких, залежно від їх класу точності, під'єднують вимірювальну апаратуру, пристрої РЗА тощо. Вторинні обмотки ТС намотують, як правило, одножилним мідним проводом на попередньо ізолюваний магнітопровід. Магнітопровід ТС набирають із тонких листів, ізолюваних між собою або навивають із стрічки ізолюваної електротехнічної сталі [20]. Широкого застосування набула анізотропна холоднокатана електротехнічна сталь марок 3413, 3414 і 3405 [20, 107]. Крім цього часто для виготовлення осердя ТС використовують аморфні та нанокристалічні магнітом'які сплави, які мають високу магнітну проникність, великий питомий опір ( $\rho \approx 100 - 130 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ ), покращені порівняно з електротехнічною сталлю температурні та магнітні властивості [108, 109, 110].

Як відмічено вище, магнітопроводи ТС можуть виконувати спіральними або пластинчастими. Спіральний (стрічковий) магнітопровід отримують намотуванням рулонної сталевий стрічки на овальну або циліндричну оправу, а пластинчастий магнітопровід – набирають із окремих штампованих Г-подібних або прямокутних пластин, які укладають таким чином, аби стики між пластинами попереднього шару перекривалися пластинами наступного шару.

Первинна та вторинна обмотки ТС ізолювані одна від одної на повну робочу напругу. Один з виводів вторинної обмотки заземляють з метою усунення високих потенціалів (наводяться через ємнісні зв'язки між первинною та вторинною обмот-

ками) в колах, підключених до вторинної обмотки, та захисту персоналу від електричних уражень від цих потенціалів.

На рисунку А.1 показано маркування виводів первинної та вторинної обмоток ТС, які випускали раніше у колишньому СРСР та ще виготовляють зараз в Україні, а також в країнах СНД (Співдружності незалежних держав): затискачі первинної обмотки позначають «Л1» та «Л2» (від «Линия»), а однополярні вторинної – відповідно «И1» та «И2» (від «Измерение») [17].

Як відомо, вимірювальний ТС в електромережах промислової частоти, як правило – з метою покращення техніко-економічних показників, поєднує у собі окремо давачі струму як для релейного захисту та автоматики, регулювання тощо, так і для вимірювання та обліку. Кожен із цих давачів має свій окремий магнітопровід з вторинною обмоткою, а первинна обмотка для них є спільною.

Нижче розглянуто принцип роботи ТС [17, 20, 111]. За протікання змінного струму  $I_1$  у первинній обмотці (число витків  $w_1$ ) у магнітопроводі ТС виникає змінний магнітний потік  $\Phi$  (див. рисунок А.1), який пронизує вторинну обмотку (число витків  $w_2$ ) та індукує в ній змінну електрорушійну силу (ЕРС). Якщо до вторинної обмотки ТС під'єднане навантаження, то за дії цієї ЕРС у вторинному колі протікатиме струм.

За рахунок дії сумарних ампер-витків первинної та вторинної обмоток ТС в його осерді виникає відповідний магнітний потік  $\Phi$ . Потік  $\Phi$  якраз є основною ланкою передачі енергії від первинної обмотки до вторинної обмотки у процесі трансформації струму.

Як відомо, за конструкцією первинної обмотки ТС поділяють на одновиткові та багатовиткові [20, 106]. Одновиткові ТС використовуються за первинних струмів 600 А та більше, оскільки за менших величин струму магніторушійна сила (МРС) недостатня для роботи з необхідним класом точності [112]. При чому одновиткові ТС мають два виконання: з власною первинною обмоткою та без неї. Первинна обмотка першого типу трансформаторів виконується у вигляді стрижня круглого чи прямокутного перерізу (рисунок А.2, а), закріпленого у прохідному ізоляторі, або ж U-подібною (рисунок А.2, б), на яку нанесена вся високовольтна ізоляція ТС. Для

ТС без власної первинної обмотки її роль виконує струмоведучий стрижень прохідного ізолятора або шинна конструкція розподільчого пристрою. Багатовиткові ТС можуть виготовлятися з навійною первинною обмоткою (трансформатори напругою до 3 кВ включно), яку насаджують на магнітопровід; з петлевою первинною обмоткою (рисунок А.2, в); з ланцюговою первинною обмоткою з конструктивним розподілом внутрішньої ізоляції ТС між первинною та вторинною обмотками (рисунок А.2, г); з римовидною первинною обмоткою з нанесенням на неї внутрішньої ізоляції ТС (рисунок А.2, д).

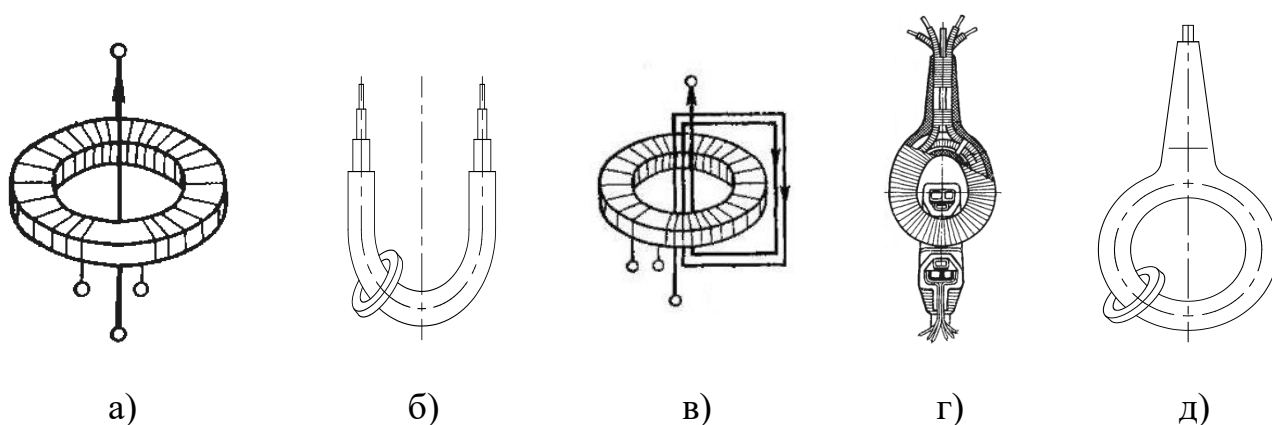


Рисунок А.2 – Конструктивне виконання ТС:

а) зі стрижневою первинною обмоткою; б) з U-подібною первинною обмоткою;  
в) з петлевою первинною обмоткою; г) з ланцюговою первинною обмоткою; д) з римовидною первинною обмоткою

В сучасних ТС для внутрішнього встановлення з номінальною напругою до 35 кВ найбільш широко застосовується лита епоксидна ізоляція завдяки ряду її переваг порівняно з іншими видами ізоляції для даних класів напруги, такими як [20]:

- можливість отримання готового виробу будь-якої форми;
- знижена пожежонебезпека за рахунок внесення спеціальних наповнювачів;
- велика електрична та механічна міцність конструкції;
- можливість встановлення трансформатора у будь-якому положенні.

Опорні ТС серії ТЛО (рисунок А.3) [113] призначені для встановлення в комплектних розподільних злагодах (КРЗ). Вони виготовляються на номінальні напруги 10, 24, 35 кВ та номінальні первинні струми до 3000 А. Корпус ТС виконаний з поліуретанової смоли, що одночасно виконує роль головної ізоляції та забезпечує захист обмоток від механічних і кліматичних впливів. Кількість вторинних обмоток може бути від одної до п'яти.



Рисунок А.3 – Зовнішній вигляд ТС типів ТЛО-10 (а), ТЛО-24 (б) і ТЛО-35 (в)

Для зовнішнього встановлення виготовляються опорні ТС в фарфоровому корпусі з паперово-оливною або газовою ізоляцією.

ТС серії ТФЗМ [114 – 116] (рисунок А.4) виготовляються на номінальні напруги 35 – 500 кВ. У фарфоровому корпусі, заповненому оливою, розміщуються обмотки «ланцюгового» типу та осердя трансформатора. Вторинних обмоток може бути від двох до п'яти. Головна ізоляція ТС – паперово-оливна.

Верхня циліндрична частина ТС – оливорозширювач, який забезпечує компенсацію температурних коливань об'єму оливи всередині корпусу. Встановлений силікагелевий вологопоглинач призначений для поглинання вологи з навколишнього повітря перед поступленням його всередину оливорозширювача.

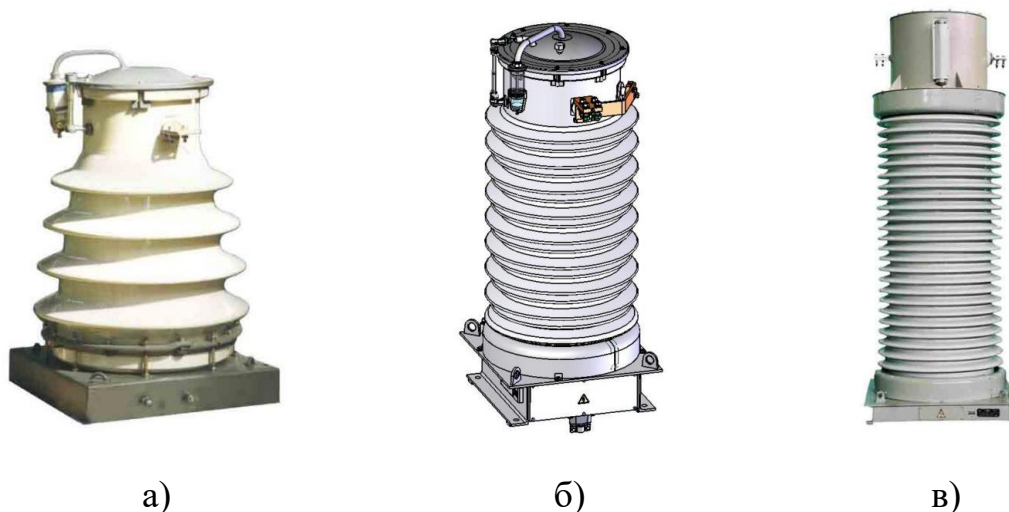


Рисунок А.4 – Зовнішній вигляд ТС типів ТФЗМ-40,5 (а), ТФЗМ-123 (б) і ТФЗМ-245 (в)

У ТС передбачена можливість зміни коефіцієнта трансформації шляхом переключення за допомогою перемичок схеми з'єднань секцій первинної обмотки.

ТС типу ТФЗМ-525 виконуються каскадними двоступеневими.

Широкого застосування набули також ТС серій ТФБ (малооливні, бакової конструкції на номінальні напруги 110, 220 кВ і первинні струми до 2000 А включно), ТОМ (з паперово-оливною ізоляцією конденсаторного типу на номінальні напруги 330 – 750 кВ), ТФРМ (оливнонаповнені з римовидними вторинними обмотками та ізоляцією конденсаторного типу на номінальні напруги 330 – 1150 кВ), ТФУМ (з U-подібною первинною обмоткою та паперово-оливною ізоляцією конденсаторного типу на номінальну напругу 330 кВ) [114, 115], ТФМ [117].

*Опорні газонаповнені ТС серії ТОГ* (рисунок А.5) виконуються одноступеневими на номінальні напруги 110 – 500 кВ та двоступеневими на номінальну напругу 750 кВ [114]. ТС виготовляються з римовидними обмотками. Головною їх внутрішньою ізоляцією є елегаз («електричний газ») – шестифториста сірка  $SF_6$ . Роль зовнішньої ізоляції виконує полімерний корпус.

Елегаз практично безбарвний, в 5 разів важчий за повітря, має високу пробивну напругу (89 кВ/см) [118]. Його електрична міцність в 2 – 4 рази вища, ніж у повітря.





Рисунок А.5 – Зовнішній вигляд трансформаторів струму типів ТОГ-123 (а), ТОГ-362 (б) і ТОГ-525 (в)

Основними перевагами елегазу перед трансформаторною оливою є його вибухо- і пожежна безпека та зниження масо-габаритних характеристик конструкції завдяки покращеним його ізолюючим властивостям.

Як і для ТС серії ТФЗМ, первинна обмотка ТС серії ТОГ виконується із кількох секцій, які з'єднують за допомогою відповідних перемичок. Зміна схеми з'єднання секцій забезпечує кілька коефіцієнтів трансформації трансформатора. Крім цього вторинні обмотки також мають відпайки для додаткової зміни коефіцієнта трансформації.

Для моніторингу тиску елегазу всередині ТС встановлюють давач тиску, в склад якого також входять манометр і сигнальний пристрій, а для захисту від надлишкового тиску елегазу передбачена захисна мембрана.

Також широко застосовуються елегазові ТС серії ТГФМ і ТГФ на номінальні напруги 110-500 кВ [119].

### **Особливості конструкції каскадних опорних ТС**

Як відомо [22, 112], зростання класу напруги електричної мережі зумовлює й підвищення складності конструктивного виконання ТС, зокрема, все більші вимоги ставляться до рівня їх ізоляції та все важче ізолювати високовольтні первинні кола від низьковольтних вторинних. Тому на напруги 500 кВ і вище виготовляють каска-

дні ТС. Вони мають кілька ступенів для поетапної трансформації первинного струму.

На напруги 500 і 750 кВ каскадні ТС виконують двоступеневими, а для електромереж напругою 1150 кВ – триступеневими (рисунок А.6) [20, 114]. Кожен ступінь такого каскадного ТС, як відмічено в [20], є один чи декілька окремих ТС. Ступінь з ТС, первинна обмотка якого увімкнена безпосередньо в коло високої напруги, струм якого потрібно виміряти, називають *верхнім*, а ступінь, до якого під'єднані кола струму пристроїв вимірювання, релейного захисту та автоматики, регулювання тощо – *нижнім*.

Всі інші ступені каскадного ТС між верхнім та нижнім, які слугують ланками поетапної трансформації струму, називають *проміжними*. У триступневих каскадних ТС проміжний ступінь ще називають *середнім*.

При цьому під первинною обмоткою каскадного трансформатора розуміють первинну обмотку ТС верхнього ступеню, а під вторинними – вторинні обмотки трансформаторів нижнього ступеню. Виконання кількох ступенів послідовної трансформації первинного струму дозволяє значно спростити ізоляцію високовольтних первинних кіл від низьковольтних вторинних.

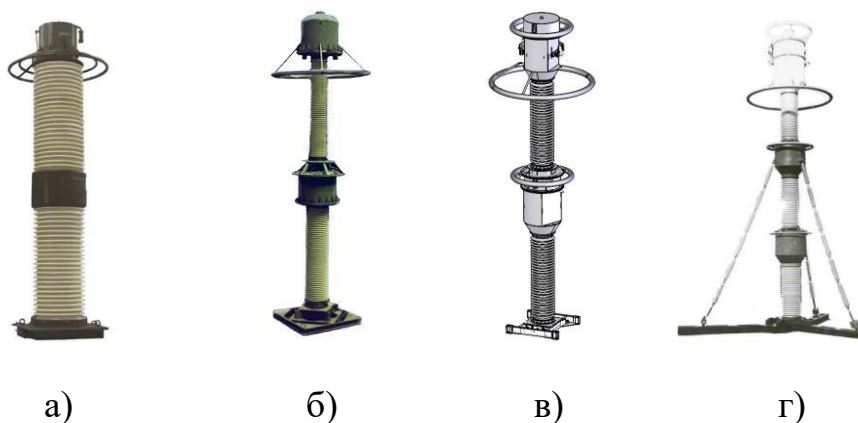


Рисунок А.6 – Зовнішній вигляд каскадних ТС типів ТФЗМ-525 (а), ТОГ-765 (б), ТОМ-765 (в) та ТФРМ-1150 (г)

## Особливості конструкції вбудованих ТС у виводи високовольтних електричних апаратів

Як відомо, вбудовані ТС (рисунок А.7) не мають власних первинної обмотки та високовольтної ізоляції [20]. Вони призначені для встановлення на високовольтні вводи всередині оливних вимикачів, силових трансформаторів, автотрансформаторів, а також в екранованих струмопроводах.

ТС серії ТВ для оливних вимикачів на номінальні напруги від 35 до 220 кВ включно виконують з тороїдальним магнітопроводом, на який намотується вторинна обмотка [20, 120, 121]. Трансформатор встановлюють на високовольтний ввід вимикача, який і виконує роль його первинної обмотки.

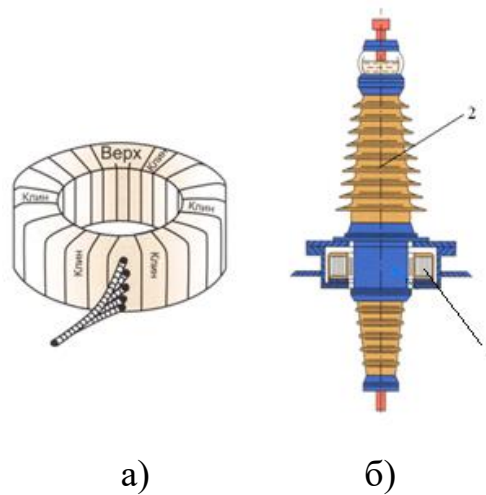


Рисунок А.7 – Вбудований ТС:

а) зовнішній вигляд; б) встановлення ТС 1 на високовольтному вводі 2

У ТС напругою 110 та 220 кВ вторинну обмотку виконують з трьох секторів, між якими розміщені спеціальні опорні підставки [20].

Вбудовані ТС для високовольтних вимикачів виготовляють з кількома коефіцієнтами трансформації, які отримують зміною кількості витків вторинної обмотки. Вбудовані ТС на вводах силових трансформаторів виготовляють з одним коефіцієнтом трансформації, що відповідає номінальному струму силового трансформатора [20].

Для встановлення на вводах силових трансформаторів та автотрансформаторів високої та надвисокої напруг застосовуються *ТС серії ТВГ* [20, 122, 123].

*ТС типу ТВГ-24* [20] (рисунок А.8) також відноситься до групи вбудованих ТС, встановлюваних на плиті турбогенератора в коробці нульових виводів, які ізолюють на номінальну напругу обмотки статора генератора та слугують первинною обмоткою трансформатора.



Рисунок А.8 – Зовнішній вигляд ТС типу ТВГ-24

### **Особливості конструкції шинних прохідних ТС**

Шинні ТС виготовляються на напругу до 24 кВ та номінальний первинний струм до 30000 А [124]. Первинна обмотка в них як конструкційний елемент відсутня. Її роль виконують одна або кілька шин розподільчої злагоди, які проходять через вікно прохідного ізолятора. Останній ізолює магнітопровід з вторинними обмотками ТС від первинного кола.

Прохідні ТС використовуються в якості вводів і встановлюються в отворах стін, стелі або в металічних конструкціях розподільчих злагод.

Розглянемо особливості конструкційного виконання шинних і прохідних ТС різних номінальних напруг [20, 22, 113, 125].

*ТС типу ТШЛ-0,66* (рисунок А.9) з литою ізоляцією на номінальну напругу 660 В призначений для встановлення в КРЗ електричних мереж, його виготовляють на номінальні первинні струми від 1500 до 5000 А.



Рисунок А.9 – Зовнішній вигляд ТС типу ТШЛ-0,66

Трансформатор містить стрічковий овальний магнітопровід, на який намотується вторинна обмотка. Вся конструкція заливається ізоляційним компаундом, що забезпечує надійний захист ТС від механічних пошкоджень та атмосферних впливів.

ТС типу ТШЛ-20 (рисунок А.10) з литою ізоляцією на номінальну напругу 20 кВ та первинні струми 6000 – 18000 А являє собою кільцеподібний епоксидний блок із залитими в ньому магнітопроводом та вторинними обмотками. В ізоляційний блок ТС залите також екрануюче силумінове кільце, електрично з'єднане з шиною за допомогою пружини.

Для встановлення в комплектних струмопроводах генераторних розподільчих злагод застосовують ТС з повітряною ізоляцією типів ТШВ-15, ТШВ-15Б, ТШВ-24 [20].

ТС серії ТПОЛ (рисунок А.11, а) є прохідними з двома вторинними обмотками, що виконані з мідного ізольованого проводу, намотаного на кільцеві магнітопроводи. Первинна обмотка трансформатора виконана у вигляді мідного стрижня, який проходить через вікна двох осердь. Вся конструкція ТС залита епоксидним компаундом, який утворює монолітний ізоляційний блок. Тому ТС в розподільчій злагоді одночасно виконує роль і прохідного ізолятора.

ТС типу ТПЛ-10 (рисунок 1.11, б) виконують на номінальні первинні струми від 5 до 400 А і містить два магнітопроводи з намотаними вторинними обмотками та одну спільну первинну обмотку у вигляді кількох витків для отримання необхідної первинної МРС. Обмотки розміщені в литому епоксидному корпусі, що забезпечує надійну їх ізоляцію та захист від механічних пошкоджень.

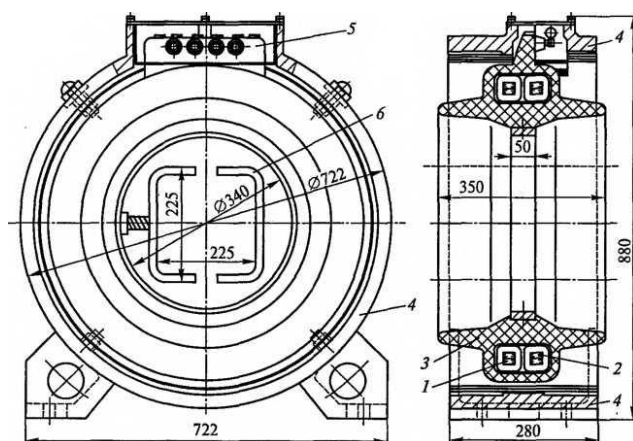


Рисунок А.10 – Шинний ТС типу ТШЛ-20:

- 1 – магнітопровід класу 0,5; 2 – магнітопровід класу Р; 3 – литий епоксидний блок;  
4 – корпус; 5 – коробка виводів вторинних обмоток; 6 – струмоведуча шина

В КРЗ застосовують також опорно-прохідні ТС типів *ТЛМ-10* і *ТПЛК-10*.

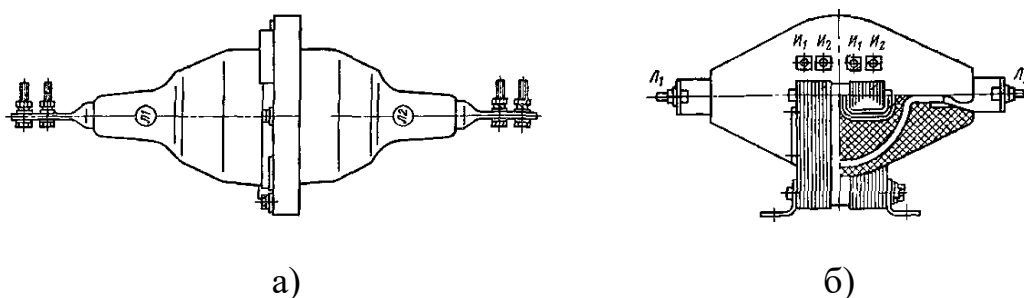


Рисунок А.11 – Прохідні ТС типів ТПОЛ-20 (а) і ТПЛ-10 (б)

### Особливості конструкції ТС нульової послідовності

Замикання однієї фази на землю в електричних мережах з ізолюваною та компенсованою нейтралю супроводжується протіканням в місці пошкодження відносно невеликого ємнісного струму, який, як правило, є меншим за робочий струм приєднання. Тому в таких мережах встановлюють струмовий захист, що реагує на виникнення замикання на землю, або замість нього передбачають пристрої контролю стану ізоляції мережі відносно землі з відповідною сигналізацією за виникнення замикання на землю [126].

В розгалужених мережах встановлюють спеціальний струмовий захист від однофазних замикань на землю. Для цього захисту у якості давачів вхідної інформації використовують ТС нульової послідовності (ТСНП), які дозволяють виконати захист з високою чутливістю. Промисловістю виготовляють такі типи ТСНП [127 – 129, 113, 126, 130]:

- нерознімні: ТЗЛМ, ТЗЛК, ТЗЛ, ТНП, ТНПШ;
- рознімні: ТЗЛКР, ТЗРЛ.

*Кабельний ТСНП* (рисунок А.12) складається з осердя круглої або прямокутної форми і намотаної на нього вторинної обмотки [128, 129, 126]. Вся конструкція трансформатора заливається ізоляційним компаундом. Роль первинної обмотки ТСНП виконує трифазний кабель, пропущений через його вікно.

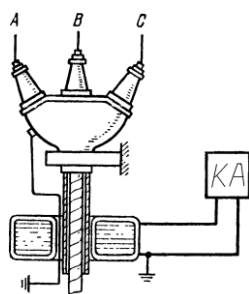


Рисунок А.12 – Кабельний ТСНП з під'єднанням до нього струмовим реле КА

За нормальних умов та за трифазного і двофазного коротких замикань в лінії сума струмів трьох жил кабелю незначна (у порівнянні з номінальним струмом приєднання) і відповідно малий результуючий магнітний потік протікає в осерді ТСНП. За таких режимів через реле протікає струм небалансу, зумовлений несиметрією розміщення струмоведучих жил кабелю відносно вікна магнітопроводу та вторинної обмотки ТС. Величина його зазвичай не перевищує 8-10 мА і тому не впливає на роботу захисту [129].

Однак за виникнення однофазного замикання на землю симетрія струмів приєднання суттєво порушується, в результаті чого в струмоведучих жилах кабелю виникає струм нульової послідовності, який створює відповідний магнітний потік в

осерді ТС. Цей магнітний потік індукує у вторинній обмотці ТС ЕРС, під дією якої у струмовому реле *КА* протікає струм (див. рисунок А.12). Якщо цей струм більший за струм спрацювання реле *КА*, реле запускає захист нульової послідовності приєднання з дією на сигнал або на вимкнення приєднання.

*ТСНП кабельного типу ТНП і шинного типу ТНПШ* застосовуються в схемах чутливого струмового захисту від замикання на землю статорних обмоток генераторів, потужних електродвигунів тощо [131, 132]. ТС типу ТНПШ для з'єднання з шинними виводами об'єкта містять вмонтовані три шини, ізольовані одна від одної та від магнітопроводу.

З метою збільшення віддаваної потужності в ТСНП типів ТНП і ТНПШ здійснюється підмагнічування осердя змінним струмом промислової частоти [131]. Також в трансформаторах типу ТНПШ передбачена блокувальна обмотка для запобігання хибному спрацюванню захисту за міжфазних коротких замикань.

*Рознімні ТС* (рисунок А.13) складені з двох залитих компаундом половин тороїда зі стрічкового магнітопроводу, які стягують болтами. Таке виконання ТС значно полегшує їх встановлення на кабельні лінії порівняно з нерознімними трансформаторами, однак наявність зазору між частинами магнітопроводу зменшує чутливість захисту [20].

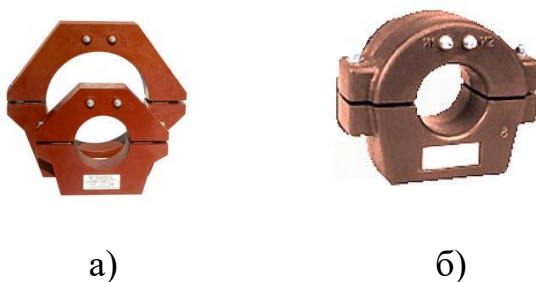


Рисунок А.13 – Зовнішній вигляд ТС типів ТЗЛКР-0,66 (а) і ТЗРЛ-0,66 (б)

Також розроблено спеціальні ТС для релейного захисту: диференційні трансформатори струму типу ДТФ-35 [117], ТС швидкого насичення [129] тощо. ТС швидкого насичення використовують для покращення характеристик диференційного струмового захисту за перехідних режимів роботи електричної мережі, зокрема, для



блокування роботи захисту від зовнішніх КЗ або включення електрообладнання, наприклад, силових трансформаторів. За таких режимів аперіодична складова струму в первинній обмотці ТС насичує його магнітопровід, що суттєво зменшує струм у вторинній обмотці ТС, в результаті чого блокується хибна робота захисту. Для зміни рівня намагнічування магнітопроводу трансформатора та регулювання його характеристик встановлюється додаткова обмотка управління, яку ще називають гальмівною.

З метою підвищення чутливості захисту, як уже зазначалося вище, ТСНП виконують з підмагнічуванням. Оскільки первинна обмотка трансформатора виконана одновитковою, створена відносно незначним первинним струмом замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю МРС і відповідна індукована вторинна ЕРС є малими за величиною.

МРС, створена додатковою підмагнічувальною обмоткою, зміщує робочу точку вебер-амперної характеристики ( $\Phi = f(i_{\text{нам}})$ ) осердя ТС в зону найбільшої крутизни, що зумовлює за того ж значення первинної МРС значне зростання індукованої вторинної ЕРС та відповідно струму через реле і, як наслідок, зростання чутливості захисту [129].

Коло підмагнічування осердя ТС отримує живлення від первинного вимірювального трансформатора напруги мережі, яку захищають. Магнітопровід ТСНП виконують з двох частин з окремими секціями вторинної та підмагнічувальної обмоток з метою уникнення трансформаторного зв'язку між ними. Секції вторинної обмотки з'єднані між собою згідно, а секції обмотки підмагнічування – зустрічно, що забезпечує компенсацію її впливу на роботу захисту.

ТСНП з підмагнічуванням широко застосовуються в захистах від замикань на землю в мережі генераторної напруги синхронних генераторів. Підмагнічування магнітопроводу може здійснюватися струмом як промислової, так і підвищеної частоти. У [127] наводяться розрахунки параметрів ТСНП за таких режимів підмагнічення та можливі способи зменшення струму небалансу від підмагнічування осердя: застосування торцевого підмагнічування, використання в схемі захисту частотних фільтрів тощо.

## А.2 Основні технічні параметри і характеристики досліджуваних трансформаторів струму

### ТС типу ТЛМ-10

ТС типу ТЛМ-10 – литий малогабаритний ТС на номінальну напругу 10 кВ [133]:

- 1) номінальна напруга мережі, кВ – 10;
- 2) найбільша робоча напруга трансформатора, кВ – 12;
- 3) номінальний первинний струм, А – 1500;
- 4) номінальний вторинний струм, А – 5;
- 5) номінальна частота змінного струму, Гц: 50, 60;
- 6) кількість вторинних обмоток – 2, що є комбінованими;
- 7) номінальні класи точності вторинних обмоток: для вимірювань – 0,5, для захисту – 10P;
- 8) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , В · А – 15;
- 9) номінальна кількість витків обмоток: первинна обмотка –  $w_1 = 1$ , вторинна обмотка –  $w_2 = 300$ ;
- 10) струм електродинамічної стійкості, кА – 100;
- 11) струм термічної стійкості, кА – 26;
- 12) час протікання струму короткого замикання, с – 3;
- 13) номінальна гранична кратність вторинної обмотки для захисту, не менше – 10;
- 14) маса, кг – 25.

Параметри магнітної системи трансформатора такі:  $S = 0,00124 \text{ м}^2$ ;  $l = 0,434 \text{ м}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 165]; величина коефіцієнта заповнення для сталі марки 3413 (Э330) товщиною 0,35 мм з електроізоляційним термостійким покриттям (група А) –  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107].

### ТС типу ТПШЛ-10

ТС типу ТПШЛ-10 – прохідний шинний ТС з литою ізоляцією на номінальну напругу 10 кВ [134]:

- 1) номінальна напруга мережі, кВ – 10;
- 2) найбільша робоча напруга трансформатора, кВ – 12;
- 3) номінальний первинний струм, А – 3000;
- 4) номінальний вторинний струм, А – 5;
- 5) номінальна частота змінного струму, Гц – 50 або 60;
- 6) кількість вторинних обмоток – 2. Із них для вимірювань – 1, для захисту – 1;
- 7) номінальні класи точності вторинних обмоток: для вимірювань – 0,5, для захисту – 10Р;
- 8) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , В · А: обмотки для вимірювань – 20, обмотки для захисту – 30;
- 9) номінальна кількість витків обмоток: первинна обмотка –  $w_1 = 1$ , вторинна обмотка –  $w_2 = 600$ ;
- 10) кратність односекундного струму термічної стійкості – 70;
- 11) номінальна гранична кратність вторинної обмотки для захисту – 30;
- 12) маса, кг – 28.

Параметри магнітної системи ТС такі:

а) для осердя з вимірювальною обмоткою:  $S = 0,00081 \text{ м}^2$ ;  $l = 0,526 \text{ м}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 164]; величина коефіцієнта заповнення для сталі марки 3413 (Э330) товщиною 0,35 мм з електроізоляційним термостійким покриттям (група А) –  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107];

б) для осердя з захисною обмоткою:  $S = 0,00135 \text{ м}^2$ ;  $l = 0,526 \text{ м}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 164];  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107].

Параметри розрахункової схеми ТС типу ТПШЛ-10 такі (див. рисунки 2.5,

3.1):

**Вимірювальна обмотка класу точності 0,5**

1) блок 1: приймаємо  $e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t)$  (В); опір  $r_{1\text{нав}}$  для номінального первинного струму трансформатора рівний

$$r_{1\text{нав}} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 3000} = 23,57023 \text{ (Ом)};$$

$$x_1 = 10^{-6} \text{ (Ом)};$$

2) блок 3:  $r_2 = 0,83$  (Ом);  $x_2 = 0,23$  (Ом) [14, Таблиця ПЗ, с. 164]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2\text{нав ном}} &= r_{2\text{нав}} + jx_{2\text{нав}} = \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( 20/5^2 \right) \cdot 0,8 + j \left( 20/5^2 \right) \cdot 0,6 = 0,64 + j0,48 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

3) коефіцієнти рівні:  $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}} = 3000/5 = 600$ .

Зведена до первинної сторони ВБАХ вимірювальної обмотки ТС розрахована за відомими формулами (2.25, 2.26) з експериментально знятої його ВАХ.

ВБАХ первинної обмотки осердя з вторинною захисною обмоткою класу точності 10Р ТС розрахована з кривої намагнічування  $B(H)$  для сталі марки 3413 (Э330), взятої з [135], за формулами:

$$\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{\text{зап}} \cdot S; \tag{A.1}$$

$$i_{\text{нам}} = \frac{H \cdot l}{w_1}, \tag{A.2}$$

де  $w_1$  – кількість витків первинної обмотки ТС;

$k_{\text{зап}}$  – коефіцієнта заповнення осердя сталлю;

$S$  – площа поперечного перерізу магнітопроводу ТС;

$l$  – середня довжина магнітної лінії осердя ТС.

Таблиця А.1 – Характеристики намагнічування магнітопроводів ТС типу ТПШЛ-10

№ з/п	Вимірювальна обмотка класу точності 0,5				Обмотка для захисту класу точності 10P			
	ВАХ		ВБАХ		Крива намагнічування сталі 3413		ВБАХ	
	$U_2, В$	$I'_{\text{нам}}, А$	$\Psi_1, Вб$	$i_{\text{нам}}, А$	$B, Тл$	$H, А/м$	$\Psi_1, Вб$	$i_{\text{нам}}, А$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	142	0,5	0,00107	424,264	1,5	181,818	0,00196	95,636
3	172	1	0,00129	848,528	1,573	300	0,00206	157,8
4	188	2	0,00141	1697,056	1,6	500	0,00210	263
5	192	3	0,00144	2545,584	1,667	740,741	0,00218	389,630
6	196	4	0,00147	3394,113	1,867	3703,704	0,00244	1948,148
7	200	5	0,00150	4242,641	2,0	15000	0,00262	7890
8			0,00180	42426,407	2,067	50000	0,00271	26300
9					2,080	80658,568	0,00272	42426,407

### Обмотка для захисту класу точності 10P

1) блок 1: приймаємо  $e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t)$  (В); для номінального первинного струму трансформатора  $r_{1\text{нав}} = 23,57023$  (Ом);  $x_1 = 10^{-6}$  (Ом);

2) блок 3:  $r_2 = 1,04$  (Ом);  $x_2 = 0,27$  (Ом) [14, Таблиця ПЗ, с. 164]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2\text{нав ном}} &= r_{2\text{нав}} + jx_{2\text{нав}} = \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( \frac{30}{5^2} \right) \cdot 0,8 + j \left( \frac{30}{5^2} \right) \cdot 0,6 = 0,96 + j0,72 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

3) коефіцієнти рівні:  $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}} = 3000/5 = 600$ .

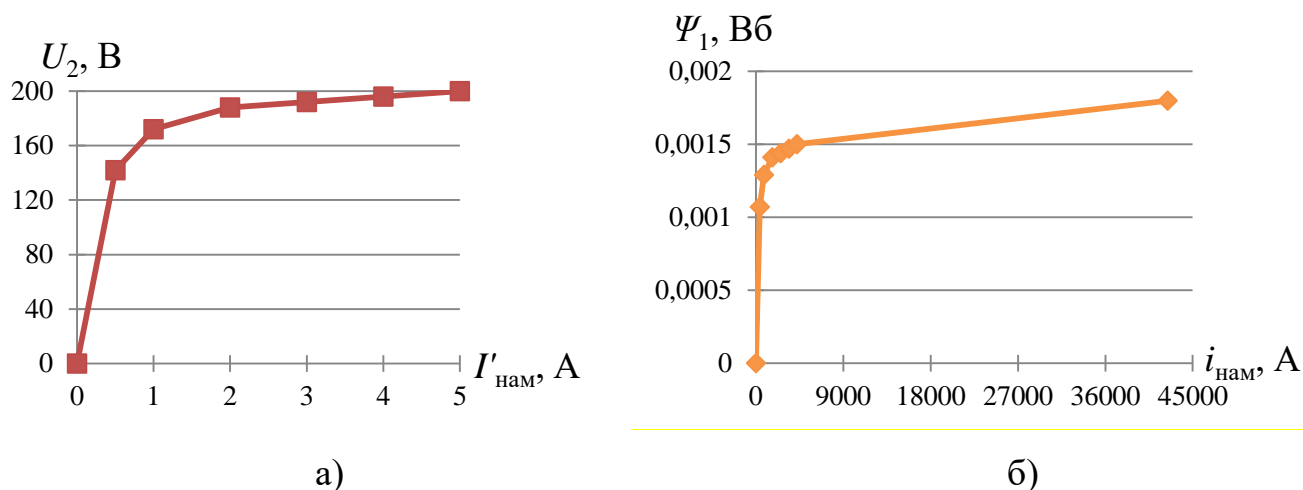


Рисунок А.14 – ВАХ (а) та зведена до первинної сторони ВБАХ вимірювальної обмотки класу точності 0,5 (б) ТС типу ТПШЛ-10

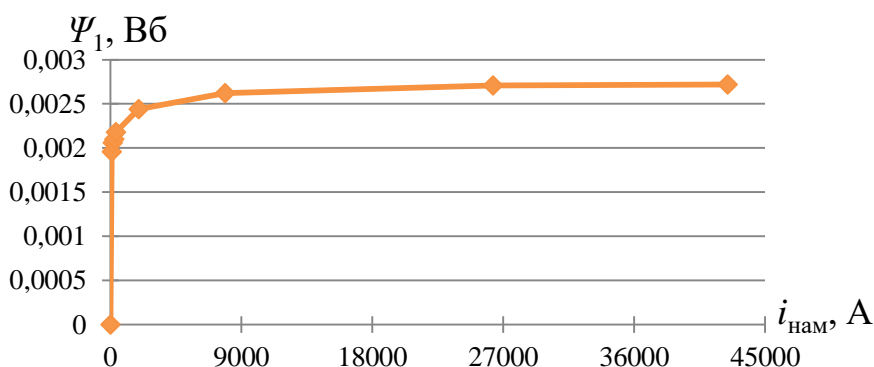


Рисунок А.15 – ВБАХ первинної обмотки осердя з вторинною обмоткою для захисту класу точності 10Р ТС типу ТПШЛ-10

### ТС типу ТВ-35

ТС типу ТВ-35 призначений для встановлення у високовольтних вводах вимикачів та силових трансформаторів. Він належить до електрообладнання на клас напруги 0,66 кВ, а в його маркуванні вказується клас напруги високовольтного вводу, для якого він був розроблений [120]. ТС складається з тороїдального магнітопроводу з рівномірно намотаною на нього вторинною обмоткою. Для забезпечення кількох коефіцієнтів трансформації вторинна обмотка містить кілька відпайок.

ТС типу ТВ-35 виконаний з класом точності 3 і може використовуватися як захисний класу точності 10Р з тією ж величиною номінальної граничної кратності вторинної обмотки.

Технічні параметри ТС типу ТВ-35 такі [120]:

- 1) номінальна напруга вводу, кВ – 35;
- 2) номінальна напруга трансформатора, кВ – 0,66;
- 3) найбільша робоча напруга, кВ – 0,72;
- 4) номінальний первинний струм, А – 300;
- 5) номінальний вторинний струм, А – 5;
- 6) номінальна частота змінного струму, Гц – 50;
- 7) кількість вторинних обмоток – 1;
- 8) номінальний клас точності вторинної обмотки – 3;
- 9) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ,  
В · А – 30;
- 10) номінальна кількість витків обмоток: первинна обмотка –  $w_1 = 1$ , вторинна обмотка –  $w_2 = 60$ ;
- 11) величина струму термічної стійкості, кА – 25;
- 12) тривалість протікання струму короткого замикання, с – 3;
- 13) номінальна гранична кратність вторинної обмотки для захисту – 7;
- 14) максимальна маса, кг – 12.

**Параметри розрахункової схеми ТС типу ТВ-35 такі (див. рисунки 2.5, 3.1):**

1) блок 1: приймаємо  $e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t)$  (В); опір  $r_{1\text{нав}}$  для номінального первинного струму трансформатора рівний

$$r_{1\text{нав}} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 300} = 235,70226 \text{ (Ом);}$$

$$x_1 = 10^{-6} \text{ (Ом);}$$

2) блок 2: у таблиці А.2 наведено розраховану за експериментально знятою ВАХ ТС зведену до первинної сторони ВБАХ його вторинної обмотки.

Таблиця А.2 – Зведена ВБАХ вторинної обмотки ТС типу ТВ-35

$\Psi_1$ , Вб	0	0,00353	0,00428	0,00473	0,00488	0,00503	0,00518	0,00622
$i_{\text{нам}}$ , А	0	42,426	84,853	169,706	254,558	339,411	424,264	4242,641

Параметри магнітної системи трансформатора такі:  $S = 0,0028 \text{ (м}^2\text{)}$ ;  
 $l = 0,59 \text{ (м)}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 176];  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107];

3) блок 3:  $r_2 = 0,15 \text{ (Ом)}$ ;  $x_2 = 0,34 \text{ (Ом)}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 176]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\underline{Z}_{2\text{нав ном}} = r_{2\text{нав}} + jx_{2\text{нав}} = \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 =$$

$$= \left( 30/5^2 \right) \cdot 0,8 + j \left( 30/5^2 \right) \cdot 0,6 = 0,96 + j0,72 \text{ (Ом)};$$

4) коефіцієнти рівні:  $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}} = 300/5 = 60$ .

### ТС типу ТВТ-110

ТС типу ТВТ-110 призначений для встановлення у вводах силових трансформаторів або автотрансформаторів [122]. Він містить кільцевий магнітопровід з електротехнічної сталі, на який намотується вторинна обмотка. Для забезпечення кількох коефіцієнтів трансформації вторинна обмотка має відпайки.

Технічні параметри ТС типу ТВТ-110 такі [122]:

- 1) номінальна напруга вводу, кВ – 110;
- 2) номінальна напруга трансформатора, кВ – 0,66;
- 3) найбільша робоча напруга, кВ – 0,72;
- 4) номінальний первинний струм, А – 600;
- 5) номінальний вторинний струм, А – 5;
- 6) номінальна частота змінного струму, Гц – 50 або 60;
- 7) кількість вторинних обмоток – 1;
- 8) номінальний клас точності вторинної обмотки – 3;
- 9) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_2 = 0,8$ ,  
 $\text{В} \cdot \text{А} – 50$ ;
- 10) номінальна кількість витків обмоток: первинна обмотка –  $w_1 = 1$ , вторинна обмотка –  $w_2 = 120$ ;
- 11) кратність струму термічної стійкості – 25;
- 12) час протікання струму термічної стійкості, с – 3;
- 13) номінальна гранична кратність вторинної обмотки для захисту – 20;



14) маса, не більше, кг – 119.

**Параметри розрахункової схеми ТС типу ТВТ-110 такі (див. рисунки 2.5,**

**3.1):**

1) блок 1: приймаємо  $e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t)$  (В); опір  $r_{1\text{наВ}}$  для номінального первинного струму трансформатора рівний

$$r_{1\text{наВ}} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{НОМ}}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 600} = 117,85113 \text{ (Ом)};$$

$$x_1 = 10^{-6} \text{ (Ом)};$$

2) блок 2: у таблиці А.3 наведено розраховану за експериментально знятою ВАХ ТС зведену до первинної сторони ВБАХ його вторинної обмотки.

Таблиця А.3 – Зведена ВБАХ вторинної обмотки ТС типу ТВТ-110

$\Psi_1$ , Вб	0	0,00370	0,00503	0,00585	0,00683	0,00796	0,00878	0,01054
$i_{\text{наВ}}$ , А	0	50,912	86,550	130,673	232,497	437,841	641,487	8485,282

Параметри магнітної системи трансформатора такі:  $S = 0,0086$  (м<sup>2</sup>);  $l = 1,62$  (м) [14, Таблиця ПЗ, с. 183];  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107];

3) блок 3:  $r_2 = 0,334$  (Ом);  $x_2 = 0,68$  (Ом) [14, Таблиця ПЗ, с. 183]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\begin{aligned} Z_{2\text{наВ ном}} &= r_{2\text{наВ}} + jx_{2\text{наВ}} = \left( \frac{S_{2\text{наВ ном}}}{I_{2\text{НОМ}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{наВ ном}}}{I_{2\text{НОМ}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( 50/5^2 \right) \cdot 0,8 + j \left( 50/5^2 \right) \cdot 0,6 = 1,6 + j1,2 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

4) коефіцієнти рівні:  $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1\text{НОМ}}/I_{2\text{НОМ}} = 600/5 = 120$ .

**ТС типу ТШЛ-20**

ТС типу ТШЛ-20 виконує функції передачі сигналу вимірювальної інформації вимірній апаратурі, пристроям РЗА, сигналізації та управління, а також функції ізоляції обладнання вторинних кіл від високовольтних первинних кіл електроустановок змінного струму [136]. Трансформатори ТШЛ-20 виконані у вигляді шинної конс-

трукції та встановлюються у пофазно екрановані струмопроводи на номінальну напругу до 20 кВ.

Основні технічні параметри та характеристики ТС типу ТШЛ-20 такі [136]:

- 1) номінальна напруга, кВ – 20;
- 2) найбільша робоча напруга, кВ – 24;
- 3) номінальна частота змінного струму, Гц – 50;
- 4) номінальний первинний струм, А – 10000;
- 5) номінальний вторинний струм, А – 5;
- 6) кількість вторинних обмоток – 2;
- 7) класи точності вторинних обмоток – вимірювальна обмотка – 0,5, захисна обмотка – 5Р або 10Р;
- 8) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi_2 = 0,8$ , В·А – вимірювальна обмотка – 30, захисна обмотка – 30;
- 9) кількість витків обмоток – первинна обмотка –  $w_1 = 1$ , вторинна обмотка –  $w_2 = 2000$ ;
- 10) номінальна гранична кратність вторинної обмотки для захисту, не менше – для класу точності 5Р – 20, для класу точності 10Р – 12;
- 11) трисекундний струм термічної стійкості, не менше, кА – 120;
- 12) номінальний коефіцієнт безпеки приладів вторинної обмотки для вимірювань, не більше – 10;
- 13) однохвилинна випробувальна напруга промислової частоти, кВ – 65;
- 14) маса, кг – 105.

**Параметри розрахункової схеми ТС типу ТШЛ-20 (див. рисунок 3.1) є такими:**

1. Блок I

Для симуляції синусоїдного номінального первинного струму досліджуваного ТС приймаємо такі значення ЕРС джерела живлення  $e_1$  та опору первинного навантаження  $r_{1\text{нав}}$ :

$$e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 100000 \cdot \sin(314t) \text{ (В)};$$

$$r_{1\text{наб}} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{2} \cdot 10000} = 7,07107 \text{ (Ом)};$$

$$x_1 = \omega \cdot L_1 = 10^{-7} \text{ (Ом)};$$

## 2. Блок 2

У таблиці А.4 наведено експериментально зняту ВАХ вимірного керна ТС типу ТШЛ-20, яка надана службою РЗА Бурштинської ТЕС, а у таблиці А.5 – розраховану за ВАХ ТС зведену до первинної сторони ВБАХ вторинної вимірювальної обмотки ТС. Оскільки надані ВАХ ТС, зняті для вторинних вимірювальної та захисної обмоток, практично однакові, то комп'ютерну симуляцію аварійного режиму роботи та аналіз рівнів вторинних перенапруг досліджуваного ТС типу ТШЛ-20 проведемо за розмикання кола його вторинної вимірювальної обмотки. Розрахунок характеристик виконано за відомими формулами, наведеними у розділі 2.

Таблиця А.4 – ВАХ ТС типу ТШЛ-20, знята з вторинної вимірювальної обмотки

$U_2, \text{В}$	0	553	576	602	622	644	745	820
$I'_{\text{нам}}, \text{А}$	0	0,2	0,3	0,5	0,7	1	3	5

Таблиця А.5 – Зведена ВБАХ вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20

$\Psi_1, \text{Вб}$	0	0,00125	0,00130	0,00136	0,00140	0,00145	0,00168
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	0	565,685	848,528	1414,214	1979,899	2828,427	8485,281

Продовження таблиці А.5

$\Psi_1, \text{Вб}$	0,00185	0,00222
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	14142,136	141421,356

Параметри магнітної системи досліджуваного трансформатора такі:  $S = 0,000685 \text{ (м}^2\text{)}$ ;  $l = 1,64 \text{ (м)}$  [14, Таблиця ПЗ, с. 169]; коефіцієнт заповнення для

електротехнічної сталі марки 3413 (Э330) товщиною 0,35 мм з електроізоляційним термостійким покриттям рівний  $k_{\text{зап}} = 0,97$  [107];

### 3. Блок 3

$r_2 = 1,5$  (Ом);  $x_2 = 0,7$  (Ом) [14, Таблица ПЗ, с. 169]. Опір вторинного навантаження рівний

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2\text{нав ном}} &= r_{2\text{нав}} + jx_{2\text{нав}} = \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( 30/5^2 \right) \cdot 0,8 + j \left( 30/5^2 \right) \cdot 0,6 = 0,96 + j0,72 \text{ (Ом)}, \end{aligned}$$

де  $S_{2\text{нав ном}}$  – номінальне вторинне навантаження вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20.

Розрахунок опору  $r'_m$ , який симулює втрати активної потужності в осерді з вимірювальною обмоткою досліджуваного ТС, наведено у додатку В;

4. Коефіцієнти між блоками розрахункової схеми трансформатора рівні:  
 $n_{12} = 1$ ;  $n_{23} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}} = 10000/5 = 2000$ .

## Додаток Б

### Б.1 Розрахунок коефіцієнтів функції апроксимації $i_{\text{нам}} = a \cdot \text{sh}(b \cdot \Psi_1)$ вебер-амперної характеристики первинної обмотки трансформатора струму типу ТЛМ-10

Розрахунок проведено у програмі «Mathcad» [87] за формулами, наведеними у п.п. 2.3.2.

$$\Psi_{11} := 0.0017\varepsilon \quad i_{\text{нам}1} := 212.132$$

$$\Psi_{12} := 0.00241 \quad i_{\text{нам}2} := 21213.204$$

$$x := 6772$$

$$f(x) := \frac{\sinh(\Psi_{12} x)}{\sinh(\Psi_{11} x)}$$

$$g(x) := \frac{i_{\text{нам}2}}{i_{\text{нам}1}} \quad g(x) = 100.00001885618389$$

$$\text{root}(f(x) - g(x), x) = 6.772309374240166 \times 10^3$$

$$b := 6.772309374240166 \times 10^3$$

$$a := \frac{i_{\text{нам}1}}{\sinh(b \cdot \Psi_{11})}$$

$$a = 3.4625868858809734 \times 10^{-3}$$

Перевірка

$$i_{\text{нам}11} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{11}) = 212.132$$

$$i_{\text{нам}22} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{12}) = 2.1213204000000014 \times 10^4$$

Розрахуємо апроксимовану ВБХ первинної обмотки ТС:

$$\Psi_{1\_1} := 0$$

$$i_{\text{нам}_1} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{1\_1}) = 0$$

$$\Psi_{1\_2} := 0.00173$$

$$i_{\text{нам}_2} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{1\_2}) = 212.132$$

$$\Psi_{1\_3} := 0.00191$$

$$i_{\text{нам}_3} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{1\_3}) = 717.824$$

$$\Psi_{1\_4} := 0.00201$$

$$i_{\text{нам}_4} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{1\_4}) = 1.412979 \times 10^3$$

$$\Psi_{1\_5} := 0.00241$$

$$i_{\text{нам}_5} := a \cdot \sinh(b \cdot \Psi_{1\_5}) = 2.1213204 \times 10^4$$

Отримані результати розрахунку зведено у таблицю Б.1

Таблиця Б.1 – Апроксимована ВБАХ первинної обмотки ТС типу ТЛМ-10

$\Psi_1, \text{Вб}$	0	0,00173	0,00191	0,00201	0,00241
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	0	212,132	717,824	1412,979	21213,204

## **Б.2 Аналітичні розрахунки амплітуд напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток трансформаторів струму**

**ТС типу ТПШЛ-10 3000/5**

***Вимірювальна вторинна обмотка***

Координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00107 \text{ (Вб)}$ ;  $i_{1s} = 424,264 \text{ (А)}$ .

Для досліджуваного ТС матимемо:

$$1) I_1 = I_{1\text{ном}} = 3000 \text{ (А)}:$$

$$\Psi_{2s} = \Psi_{1s} \cdot w_2/w_1 = 0,00107 \cdot 600/1 = 0,642 \text{ (Вб)};$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{424,264}{\sqrt{2} \cdot 3000}\right) = 0,000319 \text{ (c)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,642}{0,000319} = 2012,539 \text{ (B)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|2012,539 - 2016,901|}{2016,901} \cdot 100 \% = 0,216 \text{ (\%)};$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 30000 \text{ (A)}:$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{424,264}{\sqrt{2} \cdot 30000}\right) = 0,000031848 \text{ (c)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,642}{0,000031848} = 20158,252 \text{ (B)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|20158,252 - 20169,018|}{20169,018} \cdot 100 \% = 0,053 \text{ (\%)};$$

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 600 \cdot \sqrt{2} \cdot 3000 \cdot 0,00107}{1 \cdot 424,264} = 2015,880 \text{ (B)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|2015,880 - 2016,901|}{2016,901} \cdot 100 \% = 0,051 \text{ (\%)};$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 30000 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 600 \cdot \sqrt{2} \cdot 30000 \cdot 0,00107}{1 \cdot 424,264} = 20158,803 \text{ (B)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|20158,803 - 20169,018|}{20169,018} \cdot 100 \% = 0,051 \text{ (\%)}.$$

### ***Вторинна обмотка для захисту***

Координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00196 \text{ (Вб)}$ ;  $i_{1s} = 95,636 \text{ (А)}$ .

Матимемо:

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ (A)}:$$

$$\Psi_{2s} = \Psi_{1s} \cdot w_2/w_1 = 0,00196 \cdot 600/1 = 1,176 \text{ (Вб)};$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{95,636}{\sqrt{2} \cdot 3000}\right) = 0,000071795 \text{ (c)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{1,176}{0,000071795} = 16379,971 \text{ (B)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|16379,971 - 16433,158|}{16433,158} \cdot 100 \% = 0,324 \text{ (\%)};$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 30000 \text{ (A)}:$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{95,636}{\sqrt{2} \cdot 30000}\right) = 0,0000071789 \text{ (с)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{1,176}{0,0000071789} = 163813,398 \text{ (B)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|163813,398 - 152929,609|}{152929,609} \cdot 100 \% = 7,117 \text{ (\%)};$$

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 600 \cdot \sqrt{2} \cdot 3000 \cdot 0,00196}{1 \cdot 95,636} = 16381,430 \text{ (B)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|16381,430 - 16433,158|}{16433,158} \cdot 100 \% = 0,315 \text{ (\%)};$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 30000 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 600 \cdot \sqrt{2} \cdot 30000 \cdot 0,00196}{1 \cdot 95,636} = 163814,303 \text{ (B)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|163814,303 - 152929,609|}{152929,609} \cdot 100 \% = 7,117 \text{ (\%)}.$$

### ТС типу ТВ-35 300/5

Координати точки «коліна» ВБАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00353$  (Вб);  $i_{1s} = 42,426$  (А).

Матимемо:

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 300 \text{ (A)}:$$

$$\Psi_{2s} = \Psi_{1s} \cdot w_2/w_1 = 0,00353 \cdot 60/1 = 0,2118 \text{ (Вб)};$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{42,426}{\sqrt{2} \cdot 300}\right) = 0,000319 \text{ (с)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,2118}{0,000319} = 663,950 \text{ (B)};$$



$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100\% = \frac{|663,950 - 665,396|}{665,396} \cdot 100\% = 0,217\%;$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ (A)}:$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{42,426}{\sqrt{2} \cdot 3000}\right) = 0,000031847 \text{ (с)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,2118}{0,000031847} = 6650,548 \text{ (В)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100\% = \frac{|6650,548 - 6653,857|}{6653,857} \cdot 100\% = 0,050\%;$$

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 300 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 60 \cdot \sqrt{2} \cdot 300 \cdot 0,00353}{1 \cdot 42,426} = 665,058 \text{ (В)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100\% = \frac{|665,058 - 665,396|}{665,396} \cdot 100\% = 0,051\%;$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 3000 \text{ (A)}:$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 60 \cdot \sqrt{2} \cdot 3000 \cdot 0,00353}{1 \cdot 42,426} = 6650,584 \text{ (В)};$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100\% = \frac{|6650,584 - 6653,857|}{6653,857} \cdot 100\% = 0,049\%.$$

### ТС типу ТВТ-110 600/5

Координати точки «коліна» ВбАХ:  $\Psi_{1s} = 0,00370$  (Вб);  $i_{1s} = 50,912$  (А).

Матимемо:

$$1) I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 600 \text{ (A)}:$$

$$\Psi_{2s} = \Psi_{1s} \cdot w_2/w_1 = 0,00370 \cdot 120/1 = 0,444 \text{ (Вб)};$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{50,912}{\sqrt{2} \cdot 600}\right) = 0,00019120 \text{ (с)};$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,444}{0,00019120} = 2322,176 \text{ (В)};$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100\% = \frac{|2322,176 - 2324,763|}{2324,763} \cdot 100\% = 0,111\%;$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{HOM}} = 6000 \text{ (A):}$$

$$t_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin\left(\frac{i_{1s}}{I_{1m}}\right) = \frac{1}{314} \cdot \arcsin\left(\frac{50,912}{\sqrt{2} \cdot 6000}\right) = 0,000019109 \text{ (c);}$$

$$U_{2mI} = \frac{\Psi_{2s}}{t_s} = \frac{0,444}{0,000019109} = 23235,125 \text{ (B);}$$

$$\delta_I = \frac{|U_{2mI} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|23235,125 - 23224,498|}{23224,498} \cdot 100 \% = 0,046 \text{ (%);}$$

$$1) I_1 = I_{1\text{HOM}} = 600 \text{ (A):}$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 120 \cdot \sqrt{2} \cdot 600 \cdot 0,00370}{1 \cdot 50,912} = 2323,586 \text{ (B);}$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|2323,586 - 2324,763|}{2324,763} \cdot 100 \% = 0,051 \text{ (%);}$$

$$2) I_1 = 10 \cdot I_{1\text{HOM}} = 6000 \text{ (A):}$$

$$U_{2mII} = \frac{2\pi f \cdot w_2 \cdot I_{1m} \cdot \Psi_{1s}}{w_1 \cdot i_{1s}} = \frac{314 \cdot 120 \cdot \sqrt{2} \cdot 6000 \cdot 0,00370}{1 \cdot 50,912} = 23235,858 \text{ (B);}$$

$$\delta_{II} = \frac{|U_{2mII} - U_{2ms}|}{U_{2ms}} \cdot 100 \% = \frac{|23235,858 - 23224,498|}{23224,498} \cdot 100 \% = 0,049 \text{ (%).}$$

## Додаток В

### В.1 Розрахунок опору $r_m$ , що симулює втрати активної потужності у магнітопроводі трансформатора струму

#### ТС типу ТЛМ-10 1500/5

$S = 0,00124$  (м<sup>2</sup>);  $l = 0,434$  (м) [14, Таблиця ПЗ, с. 165];  $k_{зап} = 0,97$  [107].

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{ст} = 7650$  (кг/м<sup>3</sup>), а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{пит. ст} = 1,90$  (Вт/кг) [107].

Об'єм магнітопроводу рівний

$$V_{ст} = k_{зап} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 0,434 \cdot 0,00124 = 0,00052202 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Відповідно маса магнітопроводу буде рівна

$$m_{ст} = \rho_{ст} \cdot V_{ст} = 7650 \cdot 0,00052202 = 3,99345 \text{ (кг)}.$$

Сумарні втрати активної потужності в сталі рівні

$$P_{ст} = p_{пит. ст} \cdot m_{ст} = 1,90 \cdot 3,99345 = 7,58756 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення первинної обмотки  $\Psi_1$  буде рівне  $\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{зап} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,00124 = 0,0020448$  (Вб).

Тоді напруга  $U_1$  прийме значення

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,0020448 \cdot 314 / \sqrt{2} = 0,45401 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_m$  визначатимемо за формулою

$$r_m = \frac{U_1^2}{P_{ст}} = \frac{0,45401^2}{7,58756} = 0,027166 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_m$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_m = r_m \cdot n_{НОМ}^2 = r_m \cdot \left( \frac{I_{1НОМ}}{I_{2НОМ}} \right)^2 = 0,027166 \cdot \left( \frac{1500}{5} \right)^2 = 2444,94 \text{ (Ом)}.$$

**ТС типу ТПШЛ-10 3000/5**

**а) магнітопровід з вимірювальною обмоткою класу точності 0,5**

$$S = 0,00081 \text{ (м}^2\text{)}; l = 0,526 \text{ (м)} [14, \text{ Таблиця ПЗ, с. 164}]; k_{\text{зап}} = 0,97 [107].$$

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{\text{ст}} = 7650 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ , а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{\text{пит. ст}} = 1,90 \text{ (Вт/кг)} [107].$

$$V_{\text{ст}} = k_{\text{зап}} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 0,526 \cdot 0,00081 = 0,00041328 \text{ (м}^3\text{)}.$$

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{ст}} = 7650 \cdot 0,00041328 = 3,16159 \text{ (кг)}.$$

$$P_{\text{ст}} = p_{\text{пит. ст}} \cdot m_{\text{ст}} = 1,90 \cdot 3,16159 = 6,00702 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення первинної обмотки  $\Psi_1$  буде рівне  $\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{\text{зап}} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,00081 = 0,0013357 \text{ (Вб)}.$

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,0013357 \cdot 314 / \sqrt{2} = 0,29657 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_{\text{м}}$  рівний

$$r_{\text{м}} = \frac{U_1^2}{P_{\text{ст}}} = \frac{0,29657^2}{6,00702} = 0,014642 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_{\text{м}}$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_{\text{м}} = r_{\text{м}} \cdot n_{\text{ном}}^2 = r_{\text{м}} \cdot \left( \frac{I_{1\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}} \right)^2 = 0,014642 \cdot \left( \frac{3000}{5} \right)^2 = 5271,12 \text{ (Ом)}.$$

**б) магнітопровід з обмоткою для захисту класу точності 10Р**

$$S = 0,00135 \text{ (м}^2\text{)}; l = 0,526 \text{ (м)} [14, \text{ Таблиця ПЗ, с. 164}]; k_{\text{зап}} = 0,97 [107].$$

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{\text{ст}} = 7650 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ , а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{\text{пит. ст}} = 1,90 \text{ (Вт/кг)} [107].$

$$V_{\text{ст}} = k_{\text{зап}} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 0,526 \cdot 0,00135 = 0,00068880 \text{ (м}^3\text{)}.$$

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{ст}} = 7650 \cdot 0,00068880 = 5,26932 \text{ (кг)}.$$

$$P_{\text{ст}} = p_{\text{пит. ст}} \cdot m_{\text{ст}} = 1,90 \cdot 5,26932 = 10,01171 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення первинної обмотки  $\Psi_1$  буде рівне

$$\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{\text{зап}} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,00135 = 0,0022262 \text{ (Вб)}.$$

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,0022262 \cdot 314 / \sqrt{2} = 0,49429 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_M$  рівний

$$r_M = \frac{U_1^2}{P_{\text{ст}}} = \frac{0,49429^2}{10,01171} = 0,024404 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_M$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_M = r_M \cdot n_{\text{НОМ}}^2 = r_M \cdot \left( \frac{I_{1\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}} \right)^2 = 0,024404 \cdot \left( \frac{3000}{5} \right)^2 = 8785,44 \text{ (Ом)}.$$

### **ТС типу ТВ-35 300/5**

$$S = 0,0028 \text{ (м}^2\text{)}; l = 0,59 \text{ (м)} [14, \text{ Таблица ПЗ, с. 176}]; k_{\text{зап}} = 0,97 [107].$$

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{\text{ст}} = 7650 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ , а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{\text{пит. ст}} = 1,90 \text{ (Вт/кг)} [107].$

$$V_{\text{ст}} = k_{\text{зап}} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 0,59 \cdot 0,0028 = 0,0016024 \text{ (м}^3\text{)}.$$

$$m_{\text{ст}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{ст}} = 7650 \cdot 0,0016024 = 12,25836 \text{ (кг)}.$$

$$P_{\text{ст}} = p_{\text{пит. ст}} \cdot m_{\text{ст}} = 1,90 \cdot 12,25836 = 23,29088 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення  $\Psi_1$  буде рівне

$$\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{\text{зап}} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,0028 = 0,0046172 \text{ (Вб)}.$$

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,0046172 \cdot 314 / \sqrt{2} = 1,02516 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_M$  рівний

$$r_M = \frac{U_1^2}{P_{\text{ст}}} = \frac{1,02516^2}{23,29088} = 0,045123 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_M$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_M = r_M \cdot n_{\text{НОМ}}^2 = r_M \cdot \left( \frac{I_{1\text{НОМ}}}{I_{2\text{НОМ}}} \right)^2 = 0,045123 \cdot \left( \frac{300}{5} \right)^2 = 162,4428 \text{ (Ом)}.$$

### **ТС типу ТВТ-110 600/5**

$$S = 0,0086 \text{ (м}^2\text{)}; l = 1,62 \text{ (м)} [14, \text{ Таблица ПЗ, с. 183}]; k_{\text{зап}} = 0,97 [107].$$

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{ст} = 7650$  (кг/м<sup>3</sup>), а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{пит. ст} = 1,90$  (Вт/кг) [107].

$$V_{ст} = k_{зап} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 1,62 \cdot 0,0086 = 0,013514 \text{ (м}^3\text{)}.$$

$$m_{ст} = \rho_{ст} \cdot V_{ст} = 7650 \cdot 0,013514 = 103,3821 \text{ (кг)}.$$

$$P_{ст} = p_{пит. ст} \cdot m_{ст} = 1,90 \cdot 103,3821 = 196,42599 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення  $\Psi_1$  буде рівне

$$\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{зап} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,0086 = 0,014181 \text{ (Вб)}.$$

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,014181 \cdot 314 / \sqrt{2} = 3,14863 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_m$  рівний

$$r_m = \frac{U_1^2}{P_{ст}} = \frac{3,14863^2}{196,42599} = 0,050471 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_m$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_m = r_m \cdot n_{ном}^2 = r_m \cdot \left( \frac{I_{1ном}}{I_{2ном}} \right)^2 = 0,050471 \cdot \left( \frac{600}{5} \right)^2 = 726,7824 \text{ (Ом)}.$$

### **ТС типу ТШЛ-20 10000/5 (осердя з вимірювальною обмоткою)**

$S = 0,000685$  (м<sup>2</sup>);  $l = 1,64$  (м) [14, Таблиця ПЗ, с. 169];  $k_{зап} = 0,97$  [107].

Питома маса сталі марки 3413 (Э330) рівна  $\rho_{ст} = 7650$  (кг/м<sup>3</sup>), а питомі втрати активної потужності в сталі за індукції 1,7 Тл та частоти 50 Гц –  $p_{пит. ст} = 1,90$  (Вт/кг) [107].

$$V_{ст} = k_{зап} \cdot l \cdot S = 0,97 \cdot 1,64 \cdot 0,000685 = 0,0010897 \text{ (м}^3\text{)}.$$

$$m_{ст} = \rho_{ст} \cdot V_{ст} = 7650 \cdot 0,0010897 = 8,33621 \text{ (кг)}.$$

$$P_{ст} = p_{пит. ст} \cdot m_{ст} = 1,90 \cdot 8,33621 = 15,83880 \text{ (Вт)}.$$

За магнітної індукції 1,7 Тл потокозчеплення первинної обмотки  $\Psi_1$  буде рівне

$$\Psi_1 = w_1 \cdot B \cdot k_{зап} \cdot S = 1 \cdot 1,7 \cdot 0,97 \cdot 0,000685 = 0,0011296 \text{ (Вб)}.$$

$$U_1 = \Psi_1 \cdot \omega / \sqrt{2} = 0,0011296 \cdot 314 / \sqrt{2} = 0,25081 \text{ (В)}.$$

Опір  $r_m$  рівний

$$r_M = \frac{U_1^2}{P_{CT}} = \frac{0,25081^2}{15,83880} = 0,0039716 \text{ (Ом)}.$$

Опір  $r'_M$ , зведений до вторинної обмотки трансформатора, буде рівний

$$r'_M = r_M \cdot n_{НОМ}^2 = r_M \cdot \left(\frac{I_{1НОМ}}{I_{2НОМ}}\right)^2 = 0,0039716 \cdot \left(\frac{10000}{5}\right)^2 = 15886,4 \text{ (Ом)}.$$

**В.2 Залежності усталених вторинних напруг  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  на розімкнених виводах вторинних обмоток та похибок напруги  $\delta_{U_{2m}} = f(K_{I_1})$  від кратностей первинних струмів трансформаторів струму**

Таблиця В.1 – Залежності усталених вторинних напруг  $U_{2m}$  на розімкнених виводах вторинних обмоток та похибок напруги  $\delta_{U_{2m}}$  від кратностей первинних струмів  $K_{I_1}$  ТС

$K_{I_1}$	0,2	0,5	1	3	5	10
<b>ТС типу ТЛМ-10 1500/5</b>						
<i>(комбінована вторинна обмотка)</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{ В}$	326,098	815,243	1630,490	4891,464	8153,024	16304,872
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{ В}$	324,283	799,227	1545,371	3761,936	5364,276	8376,826
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-0,557	-1,965	-5,220	-23,092	-34,205	-48,624
<b>ТС типу ТПШЛ-10 3000/5</b>						
<i>І. Вимірювальна обмотка класу точності 0,5</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{ В}$	403,381	1008,451	2016,901	6050,710	10084,510	20169,018
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{ В}$	402,713	1005,155	1990,591	5318,967	7889,625	12889,705
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-0,166	-0,327	-1,304	-12,094	-21,765	-36,092

Продовження таблиці В.1

$K_{I_1}$	0,2	0,5	1	3	5	10
<i>2. Захисна обмотка класу точності 10P</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	3278,611	8201,723	16433,158	49168,609	81800,953	152929,609
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	2609,386	5051,821	7797,979	14819,824	19601,256	28557,033
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-20,412	-38,405	-52,547	-69,859	-76,038	-81,327
<b>ТС типу ТВ-35 300/5</b>						
<i>(вимірювальна обмотка класу точності 3)</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	133,079	332,698	665,396	1996,187	3326,976	6653,857
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	106,924	239,561	411,489	822,465	1111,793	1649,945
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-19,654	-27,994	-38,159	-58,798	-66,582	-75,203
<b>ТС типу ТВТ-110 600/5</b>						
<i>(вимірювальна обмотка класу точності 3)</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	464,953	1162,382	2324,763	6974,297	11623,838	23224,498
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	381,982	832,606	1384,846	2841,721	3899,666	5899,076
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-17,845	-28,371	-40,431	-59,254	-66,451	-74,600
<b>ТС типу ТШЛ-20 10000/5</b>						
<i>(вимірювальна обмотка класу точності 0,5)</i>						
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	3926,991	9846,653	19665,766	58904,875	98174,766	196349,375
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді						
$U_{2m}, \text{В}$	3655,675	8020,825	13294,685	26904,805	36397,730	53949,152
$\delta_{U_{2m}}, \%$	-6,909	-18,543	-32,397	-54,325	-62,926	-72,524



Далі на рисунках подано отримані розрахункові осцилограми усталених напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток від кратностей первинного струму досліджуваних типів ТС, а також їх графічні залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  і  $\delta_{U_{2m}} = f(K_{I_1})$ .

### ТС типу ТПШЛ-10 3000/5

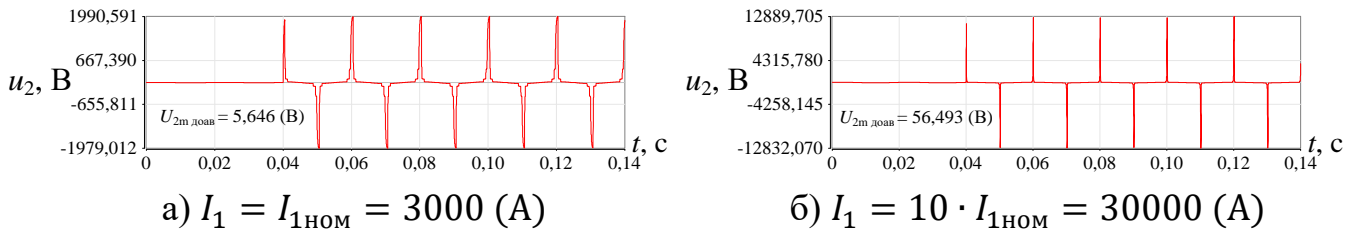


Рисунок В.1 – Розрахункові осцилограми напруги до та після розмикання вимірювальної обмотки класу точності 0,5 ТС типу ТПШЛ-10 за врахування втрат активної потужності у його осерді

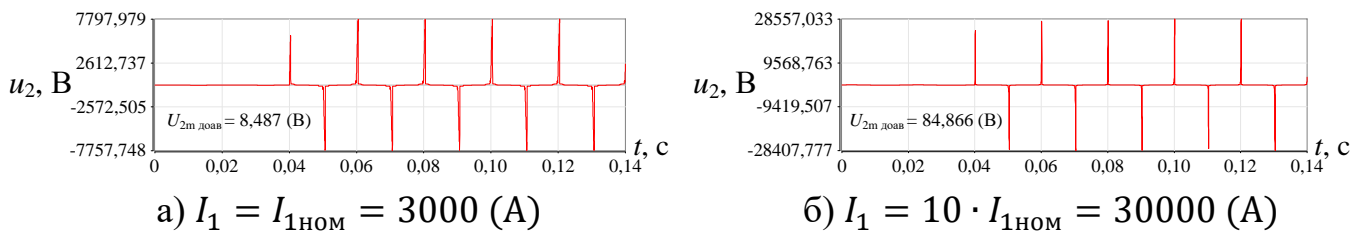


Рисунок В.2 – Розрахункові осцилограми напруги до та після розмикання обмотки для захисту класу точності 10Р ТС типу ТПШЛ-10 за врахування втрат активної потужності у його осерді

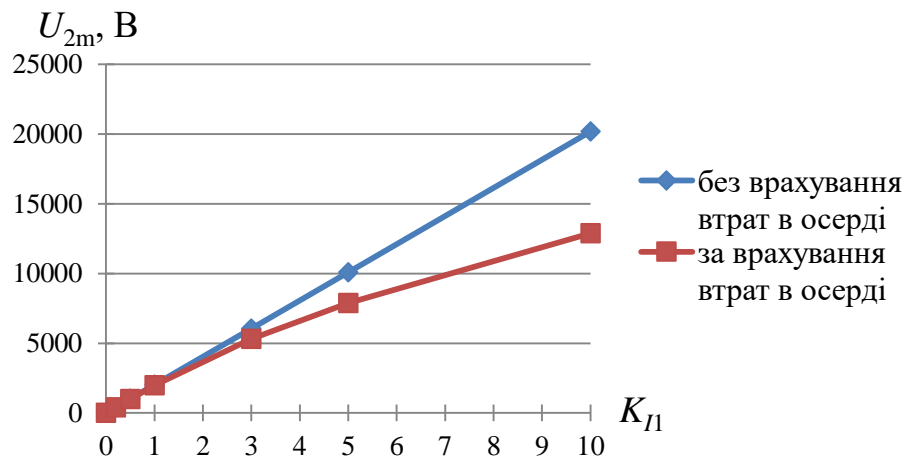


Рисунок В.3 – Залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах вимірювальної обмотки класу точності 0,5 ТС типу ТПШЛ-10 від кратності його первинного струму

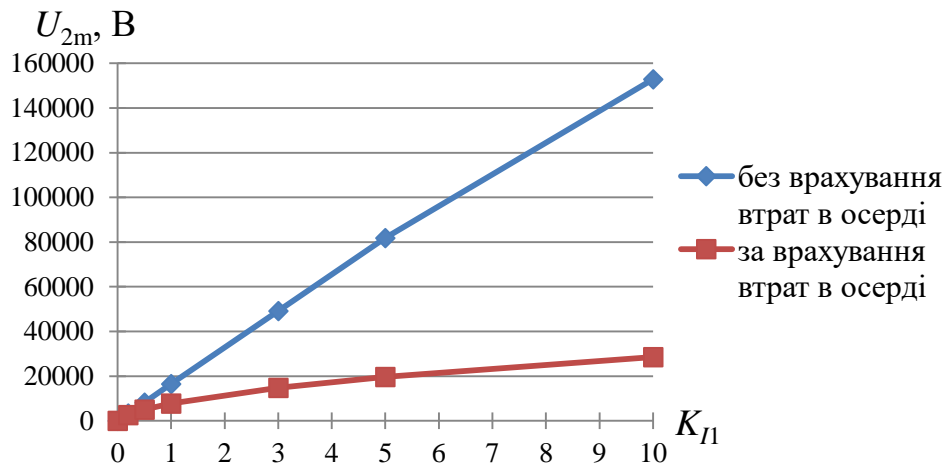


Рисунок В.4 – Залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах обмотки для захисту класу точності 10Р ТС типу ТПШЛ-10 від кратності його первинного струму

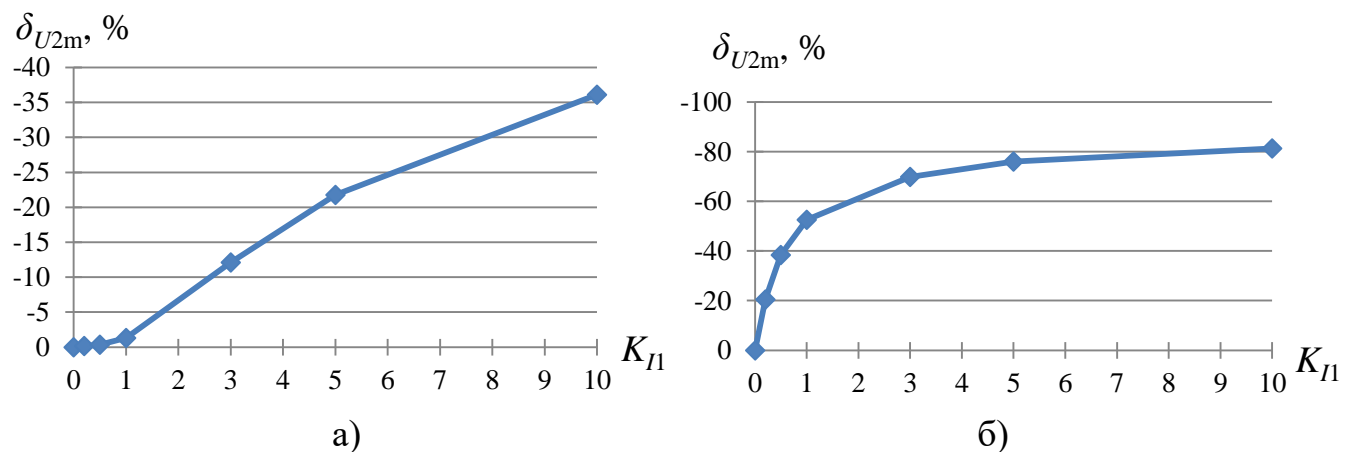


Рисунок В.5 – Залежності похибок  $\delta_{U_{2m}}$  для вторинних вимірювальної (а) та захисної (б) обмоток від кратностей первинного струму ТС типу ТПШЛ-10

### ТС типу ТВ-35 300/5

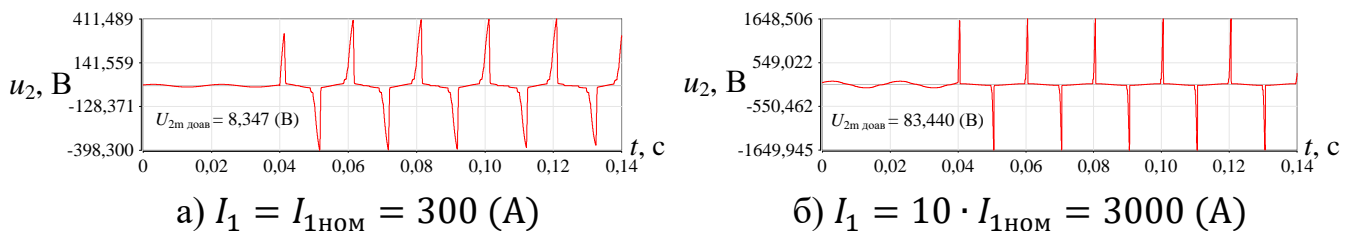


Рисунок В.6 – Розрахункові осцилограми напруги до та після розмикання вимірювальної обмотки класу точності 3 ТС типу ТВ-35 за врахування втрат активної потужності у його осерді

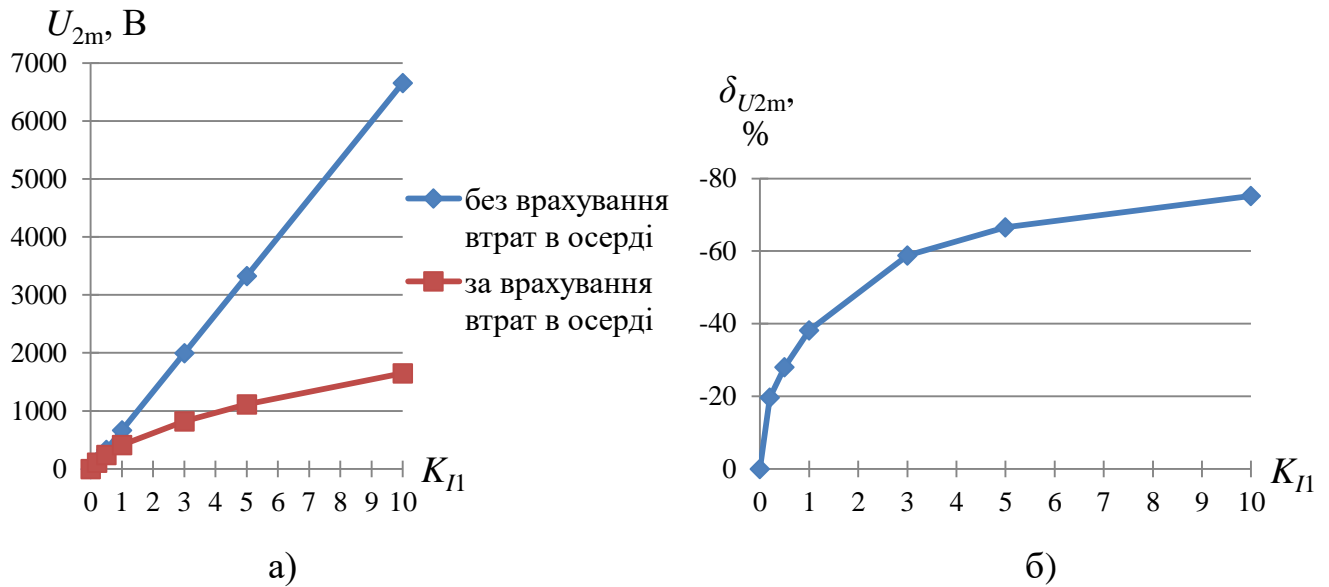


Рисунок В.7 – Залежності амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки (а) та похибки  $\delta_{U_{2m}}$  (б) від кратності первинного струму ТС типу ТВ-35

### ТС типу ТВТ-110 600/5

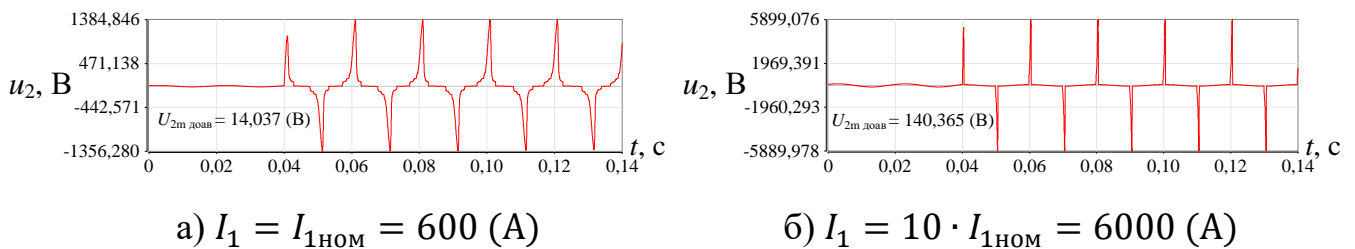


Рисунок В.8 – Розрахункові осцилограми напруги до та після розмикання вимірювальної обмотки класу точності 3 ТС типу ТВТ-110 за врахування втрат активної потужності у його осерді

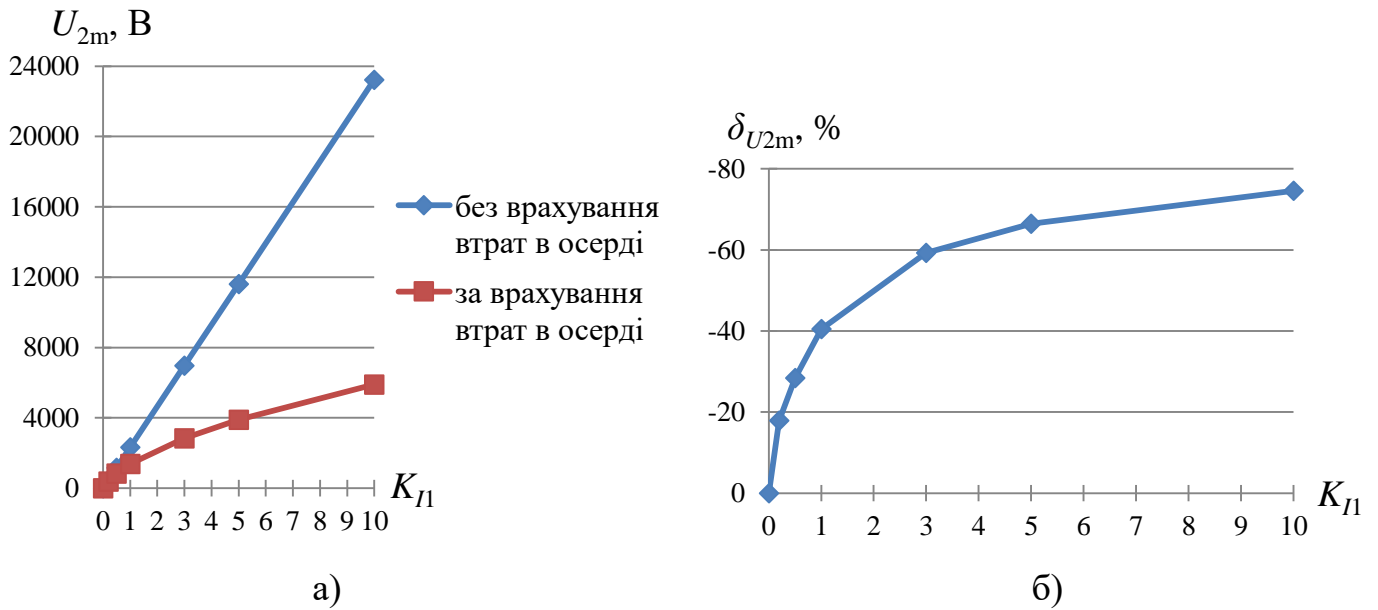


Рисунок В.9 – Залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки (а) та похибки  $\delta_{U_{2m}}$  ТС типу ТВТ-110 від кратності його первинного струму

**ТС типу ТШЛ-20 10000/5**

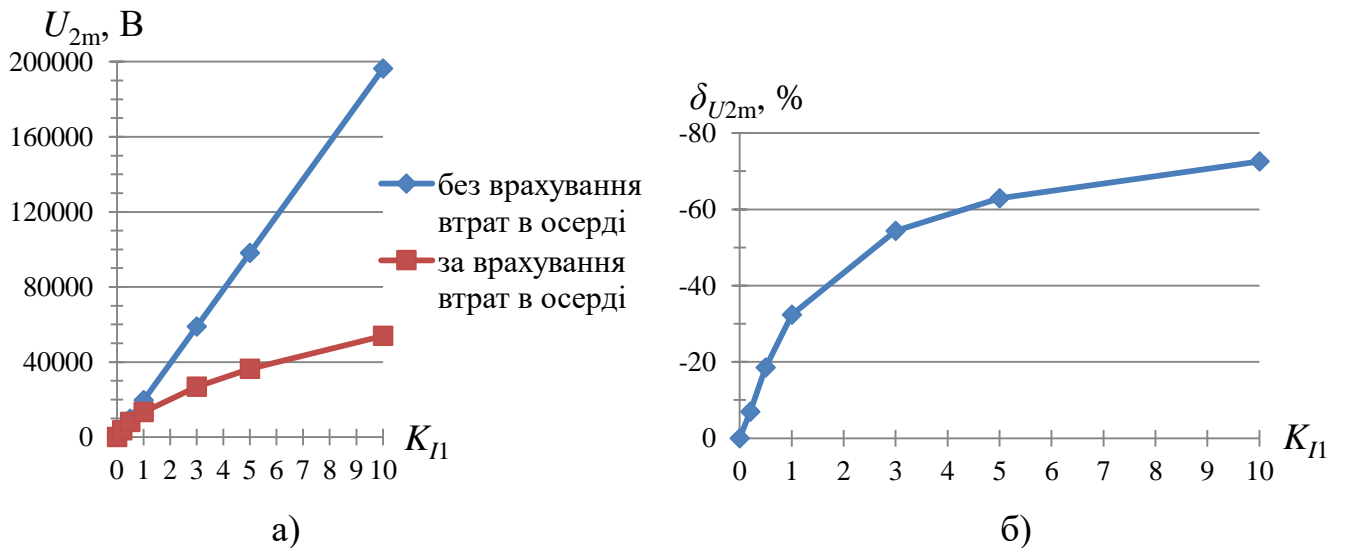


Рисунок В.10 – Залежність амплітуди напруги на розімкнених виводах вторинної вимірювальної обмотки та похибки  $\delta_{U_{2m}}$  ТС типу ТШЛ-20 від кратності його первинного струму

## Додаток Г

### Апроксимація розрахункових функцій вторинних напруг $U_{2m} = f(K_{I_1})$ для одноступеневих трансформаторів струму

У розділі 3, п.п. 3.1.1 та у додатку В наведено розрахункові осцилограми установлених напруг на розімкнених виводах вторинних обмоток досліджуваних типів одноступеневих ТС за різних величин їх первинних струмів, а також залежності максимальних амплітуд вторинних напруг у заданих режимах від кратностей їх первинних струмів  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  без/та за врахування втрат активної потужності у магнітопроводах ТС. Розрахунок виконано для кількох проміжних значень первинних струмів досліджуваних ТС. Для швидкого і точного розрахунку амплітуд напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за будь-якої величини первинного струму в заданому діапазоні значень отримані залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  опишемо відповідними функціями апроксимації.

Для розрахунків без врахування втрат активної потужності в осердях одноступеневих ТС їх залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  практично є лінійними. Тому для них у загальному вигляді можемо записати відповідну пропорцію

$$\frac{U_{2m(i)}}{K_{I_1(i)}} = \frac{U_{2m(10)}}{K_{I_1(10)}}, \quad (\text{Г.1})$$

де  $U_{2m(i)}$  та  $K_{I_1(i)}$  – відповідно амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС та кратність його первинного струму відносно номінальної величини для  $i$ -ї точки залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  (у формулах індекс  $i$  вказує на відповідну кратність первинного струму, для якої розраховується величина амплітуди вторинної напруги  $U_{2m(i)}$ ;  $K_{I_1(i)} = i$ ;  $i = 0, \dots, 10$ );

$U_{2m(10)}$  – амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки за десятикратного первинного струму ТС  $K_{I_1(10)} = 10$ .

З (Г.1) запишемо

$$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} [B], \quad (Г. 2)$$

де  $K_{U_{б.в.}} = \frac{U_{2m(10)}}{K_{I_1(10)}}$  – коефіцієнт пропорційності по напрузі для розрахунку без врахування втрат активної потужності в осердя досліджуваного ТС.

Для апроксимації залежності  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  з врахуванням втрат активної потужності в осерді ТС доцільно обрати функцію, що у відносних одиницях матиме вигляд

$$U_{2m(i)*} = a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3, \quad (Г. 3)$$

де  $U_{2m(i)*} = U_{2m(i)}/U_б$  ;

$U_б$  – базова напруга, прийнята рівною амплітуді напруги  $U_{2m(1)}$  на розімкнених виводах вторинної обмотки ТС за його номінального первинного струму;

$a$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимації.

Перевівши рівняння (Г.3) в іменовані величини, матимемо

$$U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) [B], \quad (Г. 4)$$

де  $K_{U_{з.в.}} = U_б = U_{2m(1)}$  – коефіцієнт пропорційності по напрузі для режиму розрахунку з врахуванням втрат активної потужності в осердя досліджуваного ТС.

Функція апроксимації (Г.3) обрана з урахуванням того, що в діапазоні малих струмів ( $K_{I_1} < 1$ ) напруга  $U_{2m}$  змінюється майже лінійно і практично визначається першим членом рівняння (Г.3), тоді як за більших первинних струмів ( $K_{I_1} > 1$ ) проявляється нелінійна залежність, коли починає впливати другий член цього рівняння.

Нижче наведено приклад розрахунку коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  для потужного одноступеневого шинного ТС типу ТШЛ-20 10000/5. Для розрахунків без врахування втрат активної потужності в осерді ТС функція апроксимації матиме загальний вигляд

$$U_{2m(i)} = K_{U_{6.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = \frac{U_{2m(10)}}{K_{I_1(10)}} \cdot K_{I_1(i)} = \frac{196349,375}{10} \cdot K_{I_1(i)} = 19634,9375 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В];}$$

$$K_{U_{6.в.}} = 19634,9375 \text{ (В)}.$$

Значення  $U_{2m(10)}$  взято з таблиці В.1, додаток В.

Для знаходження коефіцієнтів апроксимації  $a$  і  $b$  за дві особливі координати апроксимації обираємо номінальний та десятикратний первинні струми ТС типу ТШЛ-20. Дані для врахування втрат активної потужності у його магнітопроводі взяті з таблиці В.1, додаток В. Отримаємо:

- коефіцієнт пропорційності по напрузі рівний

$$K_{U_{3.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 13294,685 \text{ (В);}$$

- рівняння апроксимації за двох особливих координат:

$$\begin{cases} a \cdot K_{I_1(1)} - b \cdot K_{I_1(1)}^3 = \frac{U_{2m(1)}}{U_6}; \\ a \cdot K_{I_1(10)} - b \cdot K_{I_1(10)}^3 = \frac{U_{2m(10)}}{U_6}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \cdot 1 - b \cdot 1^3 = \frac{13294,685}{13294,685} = 1; \\ a \cdot 10 - b \cdot 10^3 = \frac{53949,152}{13294,685} = 4,058. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь у програмному комплексі Microsoft Mathematics 4.0 [138], отримаємо коефіцієнти апроксимації:

$$a = 1,006; b = 0,006.$$

Отримана функція апроксимації матиме вигляд

$$U_{2m(i)} = K_{U_{3.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 13294,685 \cdot (1,006 \cdot K_{I_1(i)} - 0,006 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}.$$

Здійснимо перевірку отриманих результатів розрахунку з даними комп'ютерної симуляції. При цьому похибку розрахунку визначатимемо за формулою

$$\delta_{(i)} = \frac{|U_{2m \text{ апр.}(i)} - U_{2m \text{ к.с.}(i)}|}{U_{2m \text{ к.с.}(i)}} \cdot 100 \%, \quad (\text{Г.5})$$

де  $U_{2m \text{ апр.}(i)}$  – амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки, розрахована за функцією апроксимації;

$U_{2m \text{ к.с.}(i)}$  – амплітуда напруги на розімкнених виводах вторинної обмотки, отримана шляхом комп'ютерної симуляції аварійного режиму розмикання вторинного кола ТС (дані наведені у таблиці В.1, додаток В).

Так за особливих координат – номінального та десятикратного первинних струмів ТС типу ТШЛ-20 матимемо:

$U_{2m(1)} = 13294,685 \cdot (1,006 \cdot 1 - 0,006 \cdot 1^3) = 13294,685$  (В) (похибка розрахунку рівна  $\delta_{(1)} = 0 \%$ );

$U_{2m(10)} = 13294,685 \cdot (1,006 \cdot 10 - 0,006 \cdot 10^3) = 53976,421$  (В) (похибка розрахунку рівна  $\delta_{(10)} = 0,0505 \%$ ). Це підтверджує правильність розрахунку коефіцієнтів апроксимації  $a$  і  $b$ .

Очевидно, що для проміжних значень первинних струмів ТС похибка  $\delta$  може бути дещо більшою.

Отримані функції апроксимації дають змогу досить швидко та з допустимою точністю визначити рівні вторинних перенапруг за будь-яких значень первинного струму ТС для даного діапазону струмів.

Для зручності користування в таблиці Г.1 наведено розраховані параметри функцій апроксимації для усіх досліджуваних типів одноступневих ТС.



Таблиця Г.1 – Функції апроксимації для розрахунку амплітуди напруги на розімкнутих виводах вторинної обмотки ТС

<b>ТС типу ТЛМ-10 1500/5</b> (комбінована вторинна обмотка)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 1630,4872 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 1545,371 \text{ (В)}$ ; $a = 1,00463$ ; $b = 0,00463$ ; $U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 1545,371 \cdot (1,00463 \cdot K_{I_1(i)} - 0,00463 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$
<b>ТС типу ТПШЛ-10 3000/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 0,5)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 2016,9018 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 1990,591 \text{ (В)}$ ; $a = 1,00356$ ; $b = 0,00356$ ; $U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 1990,591 \cdot (1,00356 \cdot K_{I_1(i)} - 0,00356 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$
<b>ТС типу ТПШЛ-10 3000/5</b> (захисна обмотка класу точності 10Р)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 15292,9609 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 7797,979 \text{ (В)}$ ; $a = 1,0064$ ; $b = 0,0064$ ; $U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 7797,979 \cdot (1,0064 \cdot K_{I_1(i)} - 0,0064 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$
<b>ТС типу ТВ-35 300/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 3)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 665,3857 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 411,489 \text{ (В)}$ ; $a = 1,00605$ ; $b = 0,00605$ ; $U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 411,489 \cdot (1,00605 \cdot K_{I_1(i)} - 0,00605 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$

Продовження таблиці Г.1

<b>ТС типу ТВТ-110 600/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 3)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 2322,4498 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 1384,846 \text{ (В)};$
$a = 1,0058; b = 0,0058;$
$U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 1384,846 \cdot (1,0058 \cdot K_{I_1(i)} - 0,0058 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$
<b>ТС типу ТШЛ-20 10000/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 0,5)
а) розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді
$U_{2m(i)} = K_{U_{б.в.}} \cdot K_{I_1(i)} = 19634,9375 \cdot K_{I_1(i)} \text{ [В]}$
б) розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді:
$K_{U_{з.в.}} = U_6 = U_{2m(1)} = 13294,685 \text{ (В)};$
$a = 1,006; b = 0,006;$
$U_{2m(i)} = K_{U_{з.в.}} \cdot (a \cdot K_{I_1(i)} - b \cdot K_{I_1(i)}^3) = 13294,685 \cdot (1,006 \cdot K_{I_1(i)} - 0,006 \cdot K_{I_1(i)}^3) \text{ [В]}$

За апроксимованими функціями вторинних напруг  $U_{2m} = f(K_{I_1})$  для одноступневих ТС були визначені величини первинних струмів за амплітуди вторинних напруг 1000 В на розімкнених затискачах вторинних обмоток ТС. Ця інформація необхідна для виявлення ТС, для яких необхідно встановлювати захист від перенапруг за розмикання вторинних кіл. Якщо  $K_{I_1(1кВ)} < 1$ , то захист необхідно встановлювати, тому що для ТС режим за величини первинного струму до номінального значення – тривалий і є висока ймовірність ураження експлуатаційного персоналу за обриву вторинних кіл ТС. А поява зразу двох режимів – надструмів в ТС (наприклад, за коротких замикань у мережі) та обриву вторинних кіл ТС – триває протягом короткого часу спрацювання релейних захистів електричної мережі. Тому за таких умов ймовірність ураження експлуатаційного персоналу за обриву вторинних кіл ТС зменшується на кілька порядків у порівнянні з попереднім режимом. В даному випадку захист можна не ставити.

Отримані результати розрахунків для досліджуваних типів одноступневих ТС подано у таблиці Г.2.

Таблиця Г.2 – Кратності первинних струмів ТС, за яких амплітуди вторинних напруг рівні 1 кВ

<b><i>ТС типу ТЛМ-10 1500/5</i></b>
1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,61331 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,61331 \cdot 1500 = 919,965 \text{ А}).$
2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,64535 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,64535 \cdot 1500 = 968,025 \text{ А}).$
<b><i>ТС типу ТПШЛ-10 3000/5</i></b>
<i>вимірювальна обмотка класу точності 0,5</i>
1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,49581 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,49581 \cdot 3000 = 1487,43 \text{ А}).$
2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,50102 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,50102 \cdot 3000 = 1503,06 \text{ А}).$
<i>захисна обмотка класу точності 10Р</i>
1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,06539 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,06539 \cdot 3000 = 196,17 \text{ А}).$
2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,12744 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,12744 \cdot 3000 = 382,32 \text{ А}).$
<b><i>ТС типу ТВ-35 300/5</i></b>
1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 1,50289 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 1,50289 \cdot 300 = 450,867 \text{ А}).$
2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 2,51077 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 2,51077 \cdot 300 = 753,231 \text{ А}).$
<b><i>ТС типу ТВТ-110 600/5</i></b>
1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,43058 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,43058 \cdot 600 = 258,348 \text{ А}).$
2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді $K_{I_1(1кВ)} = 0,72009 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,72009 \cdot 600 = 432,054 \text{ А}).$

Продовження таблиці Г.2

<i>ТС типу ТШЛ-20 10000/5</i>
<p>1) Розрахунок без врахування втрат активної потужності в осерді</p> $K_{I_1(1кВ)} = 0,05093 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,05093 \cdot 10000 = 509,3 \text{ А}).$
<p>2) Розрахунок за врахування втрат активної потужності в осерді</p> $K_{I_1(1кВ)} = 0,07477 \quad (I_1 = K_{I_1(1кВ)} \cdot I_{1ном} = 0,07477 \cdot 10000 = 747,7 \text{ А}).$

Як видно з результатів розрахунків, наведених в таблиці Г.2, лише для ТС типу ТВ-35 300/5 амплітуда усталеної напруги на затискачах розімкненої вторинної обмотки не більша 1000 В за номінального первинного струму ТС. Для даного ТС можна не встановлювати захист від перенапруг за розмикання його вторинного кола.

## Додаток Д

### Технічні параметри та характеристики каскадного двоступеневого трансформатора струму типу ТОМ-765

ТС типу ТОМ-765 є опорним двоступеневим ТС, виготовленим на номінальну напругу 750 кВ електричних мереж [94]. Зовнішньою ізоляцією трансформатора є фарфорова покривка, а головною внутрішньою ізоляцією – паперово-оливна конденсаторного типу ізоляція, яка нанесена на вторинну обмотку римовидної форми. Конструкція ТС виконана герметичною і він містить п'ять вторинних обмоток.

Основні технічні параметри та характеристики ТС типу ТОМ-765 такі [93, 95]:

- 1) номінальна напруга, кВ – 750;
- 2) найбільша напруга обладнання, кВ – 787;
- 3) номінальний первинний струм, А – 4000;
- 4) номінальний вторинний струм, А – 1;
- 5) кількість вторинних обмоток – 5, з них для вимірювань – 1, для захисту – 4;
- 6) номінальне вторинне навантаження з коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi_2 = 0,8$ , В·А: для вимірювальної обмотки – 30, для захисної обмотки – 40;
- 7) класи точності: вимірювальної обмотки – 0,2S, захисної обмотки – 10P;
- 8) кількість витків обмоток: первинна обмотка верхнього ступеню – 1, вторинна обмотка верхнього ступеню – 200, первинна обмотка нижнього ступеню – 100, вторинна обмотка нижнього ступеню – 2000;
- 9) номінальний струм електродинамічної стійкості, кА – 120;
- 10) номінальний струм термічної стійкості, кА – 47;
- 11) час протікання струму термічної стійкості, с – 1;
- 12) коефіцієнт граничної кратності вторинних обмоток для захисту – 12;
- 13) маса, кг – 7300.

Технічні параметри та характеристики осердь досліджуваного ТС типу ТОМ-765 отримані від КТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» [93].

У таблиці Д.1 наведено розміри магнітопроводів верхнього та нижнього ступенів досліджуваного ТС та розраховані площа поперечного перерізу магнітопроводу  $S$ , м<sup>2</sup>, та середня довжина магнітної силової лінії  $l$ , м.

Осердя нижнього ступеню каскадного ТС, на яке намотана вимірювальна обмотка класу точності 0,2S, виконане з аморфної сталі марки 5БДСР, яка характеризується високою магнітною індукцією насичення і високою початковою магнітною проникливістю [дані надані 93, 96]. Магнітопроводи з захисними обмотками виконані з електротехнічної сталі «Чешская» [дані надані 93]. Коефіцієнти заповнення магнітопроводів сталлю  $k_{\text{зап}}$  відповідно рівні: для осердя з аморфної сталі – 0,7; для осердя з електротехнічної сталі «Чешская» – 0,96 [93].

Магнітопровід верхнього ступеню ТС ТОМ-765 містить дві частини: одну з електротехнічної сталі «Чешская» для забезпечення роботи пристроїв РЗА, під'єднаних до захисних обмоток нижнього ступеню, та іншу з аморфної сталі марки 5БДСР для забезпечення відповідного класу точності трансформації первинного струму для вимірювальної обмотки нижнього ступеню. Всі осердя верхнього ступеню встановлюються у підставку. На останню з ізоляцією намотується провід та наноситься головна ізоляція [93].

Таблиця Д.1 – Конструктивні особливості осердь ТС типу ТОМ-765

Позначення вторинної обмотки		Нижній ступінь			Верхній ступінь	
		0,2S 1S1-1S3	10P 2S1-2S2; 5S1-5S2	10P 3S1-3S2; 4S1-4S2	електротехн. ст.	аморфн. ст.
Розміри осердя	$D$ , мм	650	730	730	746	730
	$d$ , мм	570	570	530	586	560
	$H$ , мм	15	25	25	2x40	20
$S$ , м <sup>2</sup>		0,0006	0,002	0,0025	0,0064	0,0017
$l$ , м		1,9154	2,041	1,9782	2,09124	2,0253

У таблицях Д.2, Д.3 наведено криві намагнічування  $B_m = f(H)$  для аморфної сталі марки 5БДСР та електротехнічної сталі «Чешская», відповідно [дані надані 93].

Таблиця Д.2 – Крива намагнічування  $B_m = f(H)$  для аморфної сталі марки 5БДСР

$B_m$ , Тл	0	0,029	0,09	0,3	0,52	0,62	0,65	0,72	0,8	0,9	1,02
$H$ , А/м	0	0,3064	0,6174	1,1186	1,4836	1,7455	1,8457	2,205	2,9273	4,2	7,05

Таблиця Д.3 – Крива намагнічування  $B_m = f(H)$  для електротехнічної сталі «Чешская»

$B_m$ , Тл	0	0,1	0,31	1,12	1,3	1,52	1,63	1,64	1,74
$H$ , А/м	0	4,469274	8,690288	20,61678	23,46387	28,63136	32,47256	45	67

Продовження таблиці Д.3

$B_m$ , Тл	1,78	1,8	1,86
$H$ , А/м	90	150	450

У таблиці Д.4 наведено розраховані за кривими намагнічування  $B_m = f(H)$  ВБАХ  $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$  обмоток ТС. Останнє значення потокозчеплення  $\Psi_1$  ВБАХ розраховуємо для амплітудної десятикратної величини первинного струму відповідного ступеню відносно його номінального значення і приймаємо на 20 % більшим за попереднє значення потокозчеплення  $\Psi_1$ , розраховане за останніми табличними даними кривої намагнічування  $B_m = f(H)$ .

Результуючі значення потокозчеплення  $\Psi_1$  ВБАХ первинної обмотки верхнього ступеню ТС типу ТОМ-765 визначаємо як суму потокозчеплень ВБАХ первинних обмоток осердь з аморфної та електротехнічної сталей для однакових значень струму намагнічування  $i_{\text{нам}}$ . Одержана результуюча ВБАХ  $\Psi_1 = f(i_{\text{нам}})$  первинної обмотки верхнього ступеню досліджуваного ТС наведена у таблиці Д.5.

Таблиця Д.4 – ВБАХ обмоток ТС типу ТОМ-765

<i>Первинна обмотка осердя з вторинною вимірювальною обмоткою класу точності 0,2S</i> 1S1-1S3								
$\Psi_1$ , Вб	0	0,00122	0,00378	0,0126	0,0218	0,0260	0,0273	0,03024
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,00587	0,0118	0,0214	0,0284	0,0334	0,0354	0,0422
<i>Первинні обмотки осердь з вторинними захисними обмотками класу точності 10P</i> 2S1-2S2; 5S1-5S2								
$\Psi_1$ , Вб	0	0,0192	0,0595	0,215	0,250	0,292	0,313	0,315
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,0912	0,177	0,421	0,479	0,584	0,663	0,918
<i>Первинні обмотки осердь з вторинними захисними обмотками класу точності 10P</i> 3S1-3S2; 4S1-4S2								
$\Psi_1$ , Вб	0	0,024	0,0744	0,269	0,312	0,365	0,391	0,394
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,0884	0,172	0,408	0,464	0,566	0,642	0,890
<i>Верхній ступінь</i>								
<i>Первинна обмотка осердя з аморфної сталі</i>								
$\Psi_1$ , Вб	0	0,0000345	0,000107	0,000357	0,000619	0,000738	0,000774	
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,621	1,250	2,266	3,005	3,535	3,738	
<i>Первинна обмотка осердя з електротехнічної сталі</i>								
$\Psi_1$ , Вб	0	0,000614	0,00190	0,00688	0,00799	0,00934	0,0100	0,0101
$i_{\text{нам}}$ , А	0	9,346	18,173	43,115	49,069	59,875	67,908	94,106

Продовження таблиці Д.4

<i>Первинна обмотка осердя з вторинною вимірювальною обмоткою класу точності 0,2S</i> 1S1-1S3					
$\Psi_1$ , Вб	0,0336	0,0378	0,0428	0,0514	
$i_{\text{нам}}$ , А	0,0561	0,0804	0,135	282,843	
<i>Первинні обмотки осердь з вторинними захисними обмотками класу точності 10P</i> 2S1-2S2; 5S1-5S2					
$\Psi_1$ , Вб	0,334	0,342	0,346	0,357	0,428
$i_{\text{нам}}$ , А	1,367	1,837	3,062	9,185	282,843
<i>Первинні обмотки осердь з вторинними захисними обмотками класу точності 10P</i> 3S1-3S2; 4S1-4S2					
$\Psi_1$ , Вб	0,418	0,427	0,432	0,446	0,535
$i_{\text{нам}}$ , А	1,325	1,780	2,967	8,902	282,843
<i>Верхній ступінь</i>					
<i>Первинна обмотка осердя з аморфної сталі</i>					
$\Psi_1$ , Вб	0,000857	0,000952	0,00107	0,00121	0,00145
$i_{\text{нам}}$ , А	4,466	5,929	8,506	14,278	56568,542



Продовження таблиці Д.4

<i>Первинна обмотка осердя з електротехнічної сталі</i>					
$\Psi_1, \text{Вб}$	0,0107	0,0109	0,0111	0,0114	0,0137
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	140,113	188,212	313,686	941,058	56568,542

Таблиця Д.5 – ВБАХ первинної обмотки верхнього ступеню ТС типу ТОМ-765

$\Psi_1, \text{Вб}$	0	0,00097	0,0017	0,00311	0,0092	0,0106	0,0112	0,0113	0,0119
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	0	3,535	9,346	18,173	49,069	59,875	67,908	94,106	140,113

Продовження таблиці Д.5

$\Psi_1, \text{Вб}$	0,0121	0,0123	0,0126	0,0152
$i_{\text{нам}}, \text{А}$	188,212	313,686	941,058	56568,542

Параметри розрахункової схеми (див. рисунок 3.9) каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 такі:

1. Блок 1

Параметри індуктивного опору розсіювання  $x_1^B$  первинної обмотки каскадного ТС приймаємо рівним 1 % від сумарного номінального навантаження всіх вторинних обмоток нижнього ступеню, зведеного до первинної сторони верхнього ступеню каскадного трансформатора:

- активний опір вторинної вимірювальної обмотки класу точності 0,2S рівний

$$Z_{2\text{нав}(1)} = \frac{S_{2\text{нав ном}(1)}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{30}{1^2} = 30 \text{ (Ом)},$$

де  $S_{2\text{нав ном}(1)}$  – номінальне вторинне навантаження вимірювальної обмотки каскадного ТС з коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi_2 = 0,8$ , В·А;

$I_{2\text{ном}}$  – номінальний вторинний струм каскадного ТС, А;

- активні опори вторинних захисних обмоток класу точності 10P рівні

$$Z_{2\text{нав}(2)} = Z_{2\text{нав}(3)} = Z_{2\text{нав}(4)} = Z_{2\text{нав}(5)} = \frac{S_{2\text{нав ном}(2)}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{40}{1^2} = 40 \text{ (Ом)};$$

- сумарний опір навантаження нижнього ступеню рівний

$$Z_{\Sigma 2_{\text{наВ}}} = \sum_{i=1}^5 Z_{2_{\text{наВ}}(i)} = 30 + 4 \cdot 40 = 190 \text{ (Ом)};$$

- індуктивний опір розсіювання  $x_1^B$  рівний

$$x_1^B = \frac{1\%}{100} \cdot Z''_{\Sigma 2_{\text{наВ}}} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{Z_{\Sigma 2_{\text{наВ}}}}{\left(\frac{I_{1_{\text{НОМ}}}}{I_{2_{\text{НОМ}}}}\right)^2} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{190 \cdot 1^2}{4000^2} = 118,75 \cdot 10^{-9} \text{ (Ом)}.$$

Для забезпечення синусоїдного номінального первинного струму каскадного ТС приймаємо такі значення ЕРС джерела живлення і розрахованого опору навантаження, відповідно:

$$e_1 = E_{1m} \cdot \sin(\omega t) = 1000000 \cdot \sin(314t) \text{ (В)};$$

$$Z_{1_{\text{наВ}}} = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2} \cdot I_{1_{\text{НОМ}}}} = \frac{1000000}{\sqrt{2} \cdot 4000} = 176,7767 \text{ (Ом)};$$

$$r_{1_{\text{наВ}}} = \sqrt{Z_{1_{\text{наВ}}}^2 - x_1^B{}^2} = \sqrt{176,77670^2 - 0,00000011875^2} = 176,7767 \text{ (Ом)}.$$

## 2. Блоки 2 і 4

Розраховані ВБАХ  $\Psi_1 = f(i_{\text{наМ}})$  первинних обмоток верхнього та нижнього ступенів досліджуваного ТС наведено вище (див. таблиці Д.4, Д.5).

## 3. Блок 3

Параметри розподілених індуктивних опорів розсіювання  $x_{1(1)}^H, \dots, x_{1(5)}^H$ , які сумарно характеризують індуктивний опір первинної обмотки нижнього ступеню каскадного ТС, приймаємо рівними 1 % від номінального навантаження відповідної вторинної обмотки нижнього ступеню, зведеного до первинної сторони нижнього ступеню каскадного ТС:

$$x_{1(1)}^H = \frac{1\%}{100} \cdot Z'_{2_{\text{наВ}}(1)} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{Z_{2_{\text{наВ}}(1)}}{\left(\frac{I_{1_{\text{НОМ}}}}{I_{2_{\text{НОМ}}}}\right)^2} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{30 \cdot 1^2}{20^2} = 0,00075 \text{ (Ом)};$$

$$x_{1(2)}^H = x_{1(3)}^H = x_{1(4)}^H = x_{1(5)}^H = \frac{1\%}{100} \cdot Z'_{2_{\text{наВ}}(2)} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{Z_{2_{\text{наВ}}(2)}}{\left(\frac{I_{1_{\text{НОМ}}}}{I_{2_{\text{НОМ}}}}\right)^2} = \frac{1\%}{100} \cdot \frac{40 \cdot 1^2}{20^2} =$$

$$= 0,001 \text{ (Ом)};$$

$$x_{1\Sigma}^H = \sum_{i=1}^5 x_{1(i)}^H = 0,00075 + 4 \cdot 0,001 = 0,00475 \text{ (Ом)}.$$

Приймаємо активний опір одного витка обмотки рівним  $r_{\text{в обм}} = 0,0005 \text{ Ом}$  [137, Таблиця А5, с. 242–243].

Сумарний активний опір первинної обмотки нижнього ступеню рівний

$$r_{1\Sigma}^H = w_1^H \cdot r_{\text{в обм}} = 100 \cdot 0,0005 = 0,05 \text{ (Ом)},$$

де  $w_1^H$  – кількість витків первинної обмотки нижнього ступеню каскадного ТС.

Тоді:

$$r_{1(1)}^H = r_{1(2)}^H = r_{1(3)}^H = r_{1(4)}^H = r_{1(5)}^H = \frac{r_{1\Sigma}^H}{5} = \frac{0,05}{5} = 0,01 \text{ (Ом)};$$

$$r_2^B = w_2^B \cdot r_{\text{в обм}} = 200 \cdot 0,0005 = 0,1 \text{ (Ом)},$$

де  $w_2^B$  – кількість витків вторинної обмотки верхнього ступеню каскадного ТС.

Індуктивний опір розсіювання на один виток обмотки рівний

$$x_{\text{в обм}} = \frac{x_{1\Sigma}^H}{w_1^H} = \frac{0,00475}{100} = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки верхнього ступеню рівний

$$x_2^B = x_{\text{в обм}} \cdot w_2^B = 4,75 \cdot 10^{-5} \cdot 200 = 0,0095 \text{ (Ом)}.$$

Розрахунок активних опорів ( $r_M^{B'}$ ,  $r_{M(1)}^{H'}$  ...  $r_{M(5)}^{H'}$ ), що симулюють втрати активної потужності в осердях верхнього і нижнього ступенів досліджуваного каскадного ТС ТОМ-765 проведено з використанням характеристик кута втрат  $\gamma = f(B_m)$  для аморфної сталі марки 5БДСР та електротехнічної сталі «Чешская», які надані КТ «Запорізький завод високовольтної апаратури» [93]. Відповідно, опори рівні:

а) осердя верхнього ступеню:  $r_M^{B'} = 1165,731 \text{ Ом}$ ;

б) осердя нижнього ступеню:

$$r_{M(1)}^{H'} = 124991,085 \text{ Ом}; r_{M(2)}^{H'} = r_{M(5)}^{H'} = 37370,884 \text{ Ом}; r_{M(3)}^{H'} = r_{M(4)}^{H'} = 48169,167 \text{ Ом}.$$

#### 4. Блок 5

Активні опори та індуктивні опори розсіювання вторинних обмоток нижнього ступеню каскадного ТС рівні:

$$r_{2(1)}^H = r_{2(2)}^H = r_{2(3)}^H = r_{2(4)}^H = r_{2(5)}^H = r_{\text{в обм}} \cdot w_2^H = 0,0005 \cdot 2000 = 1 \text{ (Ом)};$$

$$x_{2(1)}^H = x_{2(2)}^H = x_{2(3)}^H = x_{2(4)}^H = x_{2(5)}^H = x_{\text{в обм}} \cdot w_2^H = 4,75 \cdot 10^{-5} \cdot 2000 = 0,095 \text{ (Ом)},$$

де  $w_2^H$  – кількість витків вторинної обмотки нижнього ступеню каскадного ТС.

Опори вторинних навантажень трансформаторів нижнього ступеню рівні:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2\text{нав ном}(1)} &= r_{2\text{нав}(1)} + jx_{2\text{нав}(1)} = \left( \frac{S_{2\text{нав ном}(1)}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}(1)}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \\ &= \left( \frac{30}{12} \right) \cdot 0,8 + j \left( \frac{30}{12} \right) \cdot 0,6 = 24 + j18 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{2\text{нав ном}(2)} &= \underline{Z}_{2\text{нав ном}(3)} = \underline{Z}_{2\text{нав ном}(4)} = \underline{Z}_{2\text{нав ном}(5)} = r_{2\text{нав}(2)} + jx_{2\text{нав}(2)} = \\ &= \left( \frac{S_{2\text{нав ном}(2)}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \cos \varphi_2 + j \left( \frac{S_{2\text{нав ном}(2)}}{I_{2\text{ном}}^2} \right) \cdot \sin \varphi_2 = \left( \frac{40}{12} \right) \cdot 0,8 + j \left( \frac{40}{12} \right) \cdot 0,6 = \\ &= 32 + j24 \text{ (Ом)}. \end{aligned}$$

5. Коефіцієнти між блоками розрахункової схеми (див. рисунок 3.9) рівні:

$$n_{12} = 1; n_{23} = \frac{I_{1\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}^B} = \frac{4000}{20} = 200; n_{34} = 1; n_{45} = \frac{I_{1\text{ном}}^H}{I_{2\text{ном}}} = \frac{20}{1} = 20.$$

### Електрична схема та конструктивні особливості ТС типу ТОМ-765

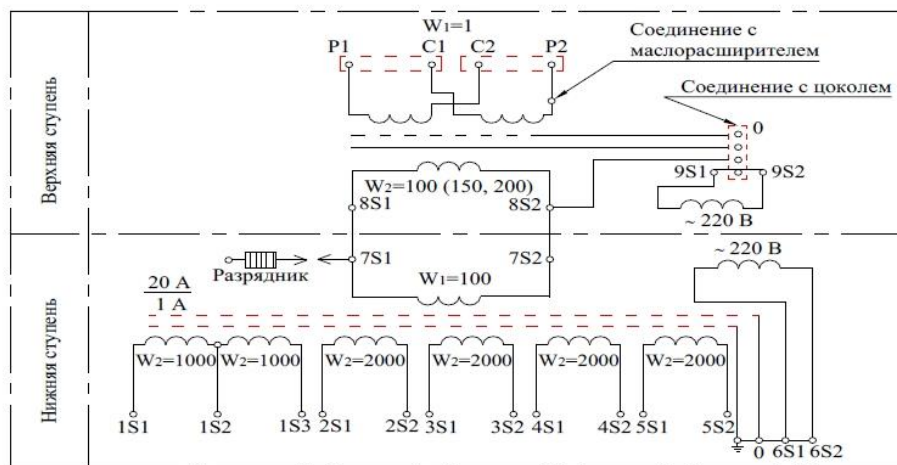


Рисунок Д.1 – Електрична схема каскадного двоступеневого ТС типу ТОМ-765 (дані надані [93])

## Додаток Е

### Е.1 Технічні параметри та характеристики силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1

Силовий трансформатор типу ТДНС-16000/35 У1 є трифазним двообмотковим трансформатором з примусовою циркуляцією повітря і природною циркуляцією оливи, містить пристрій регулювання напруги під навантаженням (РПН) [97]. Група з'єднань обмоток трансформатора – «зірка-нуль»/ «трикутник-11».

Таблиця Е.1 – Технічні параметри силового трансформатора типу ТДНС-16000/35 У1

$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	$U_{\text{ВН}}$ , кВ	$U_{\text{НН}}$ , кВ	$\Delta P_{\text{НХ}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{КЗ}}$ , кВт	$u_{\text{КЗ}}$ , %	$i_{\text{НХ}}$ , %
16000	36,75	10,5	13	85	10	0,3

Трифазне ДЖ синусоїдної напруги 35 кВ має такі параметри (див. рисунок 3.16, розділ 3, п.п. 3.2.1):

$$e_A = E_{mA} \cdot \sin(\omega t + \varphi_A) = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_A) = \frac{\sqrt{2} \cdot 36,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\omega t + 0^\circ) = 30006 \cdot \sin(\omega t + 0^\circ) \text{ (В)};$$

$$e_B = E_{mB} \cdot \sin(\omega t + \varphi_B) = 30006 \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ (В)};$$

$$e_C = E_{mC} \cdot \sin(\omega t + \varphi_C) = 30006 \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \text{ (В)}.$$

Номінальні фазні струми сторони ВН та НН силового трансформатора ТДНС-16000/35 У1 відповідно рівні:

$$I_{\phi \text{ ном ВН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ВН}}} = \frac{16000}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 251,4 \text{ (А)};$$

$$I_{\phi \text{ ном НН}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{3 \cdot U_{\text{НН}}} = \frac{16000}{3 \cdot 10,5} = 507,9 \text{ (А)}.$$

Активні опори обмоток силового трансформатора будуть рівними:

$$r_{A\text{ ВН}} = r_{B\text{ ВН}} = r_{C\text{ ВН}} = \frac{\Delta P_{\phi\text{ кз ВН}}}{I_{\phi\text{ ном ВН}}^2} = \frac{14,2 \cdot 10^3}{251,4^2} = 0,225 \text{ (Ом)};$$

$$r_{A\text{ НН}} = r_{B\text{ НН}} = r_{C\text{ НН}} = \frac{\Delta P_{\phi\text{ кз НН}}}{I_{\phi\text{ ном НН}}^2} = \frac{14,2 \cdot 10^3}{507,9^2} = 0,055 \text{ (Ом)},$$

де втрати активної потужності короткого замикання в обмотці ВН і НН силового трансформатора рівні

$$\Delta P_{\phi\text{ кз ВН}} = \Delta P_{\phi\text{ кз НН}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{n_{\text{обм}}} = \frac{85}{6} = 14,2 \text{ (кВт)},$$

де  $n_{\text{обм}} = 6$  – сумарна кількість обмоток ВН і НН силового трансформатора.

А індуктивні опори обмоток:

$$x_{A\text{ ВН}} = x_{B\text{ ВН}} = x_{C\text{ ВН}} = \frac{0,5 \cdot u_{\text{кз}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\phi\text{ ном ВН}}} = \frac{0,5 \cdot 10}{100} \cdot \frac{36,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 251,4} = 4,22 \text{ (Ом)};$$

$$x_{A\text{ НН}} = x_{B\text{ НН}} = x_{C\text{ НН}} = \frac{0,5 \cdot u_{\text{кз}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{НН}}}{I_{\phi\text{ ном НН}}} = \frac{0,5 \cdot 10}{100} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^3}{507,9} = 1,03 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт  $n_{1\text{ ТР}}$  рівний одиниці, а коефіцієнт  $n_{2\text{ ТР}}$  – оберненому коефіцієнту трансформації силового трансформатора

$$n_{2\text{ ТР}} = \frac{U_{\phi\text{ НН}}}{U_{\phi\text{ ВН}}} = \frac{U_{\text{НН}}}{\frac{U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5}{36,75} = 0,495.$$

Робоча точка ВБАХ обмоток ВН силового трансформатора має такі координати:

$$\psi_{1\text{ роб}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\phi\text{ ВН}}}{\omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{ВН}}}{\sqrt{3} \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot 36,75 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 314} = 95,56 \text{ (Вб)};$$

$$i_{\text{нам роб}} = \sqrt{2} \cdot I_{\phi\text{ ном ВН}} \cdot \frac{i_{\text{нх}}}{100} = \sqrt{2} \cdot 251,4 \cdot \frac{0,3}{100} = 1,07 \text{ (А)}.$$

У таблиці Е.2 наведено ВБАХ обмоток ВН тристрижневого магнітопроводу силового трансформатора ТДНС-16000/35 У1, відповідно до яких задаються параметри нелінійних індуктивностей  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$  та  $L_0$  (магнітний шунт, по якому замикаються магнітні потоки нульової послідовності).

У ВБАХ обмотки ВН, розміщеної на середньому стрижні магнітопроводу силового трансформатора, враховано вплив двох сусідніх стрижнів.

Таблиця Е.2 – ВБАХ обмоток ВН силового трансформатора ТДНС-16000/35 У1

ВБАХ обмоток ВН фаз А і С (відповідно до яких задаються параметри нелінійних індуктивностей $L_A$ , $L_C$ )											
$\Psi_1$ , Вб	0	28,67	57,34	95,56	105,12	109,89	112,28	114,67	119,45	121,36	124,23
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,067	0,27	1,07	1,61	3,21	50	250	1000	10000	100000
ВБАХ обмотки ВН фази В (відповідно до якої задаються параметри нелінійної індуктивності $L_B$ )											
$\Psi_1$ , Вб	0	28,67	57,34	95,56	105,12	109,89	112,28	114,67	119,45	121,36	124,23
$i_{\text{нам}}$ , А	0	0,0335	0,135	0,535	0,805	1,605	50	250	1000	10000	100000
ВБАХ магнітного шунта (відповідно до якої задаються параметри нелінійної індуктивності $L_0$ )											
$\Psi_1$ , Вб	0	9,56									
$i_{\text{нам}}$ , А	0	355,5									

До сторони НН силового трансформатора під'єднано трифазне активне навантаження, з'єднане у схему «зірка-нуль». Опори  $r_{\text{нав А}}$ ,  $r_{\text{нав В}}$ ,  $r_{\text{нав С}}$  рівні 100 МОм.

## Е.2 Параметри керуючого R-С кола постійної напруги

Параметри керуючого R-С кола постійної напруги (блок 4, див. рисунок 3.20, розділ 3, п.п. 3.2.2) приймають такі значення:

- джерело постійної напруги –  $U = 100$  (В);
- активним опором  $r_k$  і ємністю  $C_k$  задаються постійні часу наростання КАО  $\tau_{\text{кер}}$  у вторинному колі ТС.

Для заданих у п.п. 3.2.2 постійних часу наростання КАО параметри керуючого кола відповідно будуть рівними:

$$C_k = 1 \text{ (мкФ)};$$

$$x_{C_k} = \frac{1}{\omega \cdot C_k} = \frac{1}{314 \cdot 10^{-6}} = 3185 \text{ (Ом)};$$

$$\tau = r_k \cdot C_k, \text{ звідки } r_k = \frac{\tau}{C_k};$$

- для  $\tau = 100$  (мкс) = 0,1 (мс) матимемо

$$r_k = \frac{0,0001}{10^{-6}} = 100 \text{ (Ом)};$$

- для  $\tau = 1$  (мс) матимемо

$$r_k = \frac{0,001}{10^{-6}} = 1000 \text{ (Ом)};$$

- для  $\tau = 10$  (мс) матимемо

$$r_k = \frac{0,01}{10^{-6}} = 10000 \text{ (Ом)}.$$



## Додаток Ж

### Ж.1 Режими роботи трансформатора струму типу ТШЛ-20 з системою захисту від перенапруг

Для аналізу штатних режимів роботи ТС з СЗ від вторинних перенапруг моделюємо процеси, за яких повинні виникати максимальні перенапруги за розімкненого вторинного кола ТС. Нижче наведені осцилограми перехідних процесів у ТС типу ТШЛ-20 за увімкнення поштовхом до його первинної обмотки номінального та десятикратного відносно номінальної величини струмів.

На рисунку Ж.1 наведена розрахункова схема для симулювання режимів роботи СЗ ТС типу ТШЛ-20 за первинного номінального струму  $I_{1\text{ном}} = 10000$  А.

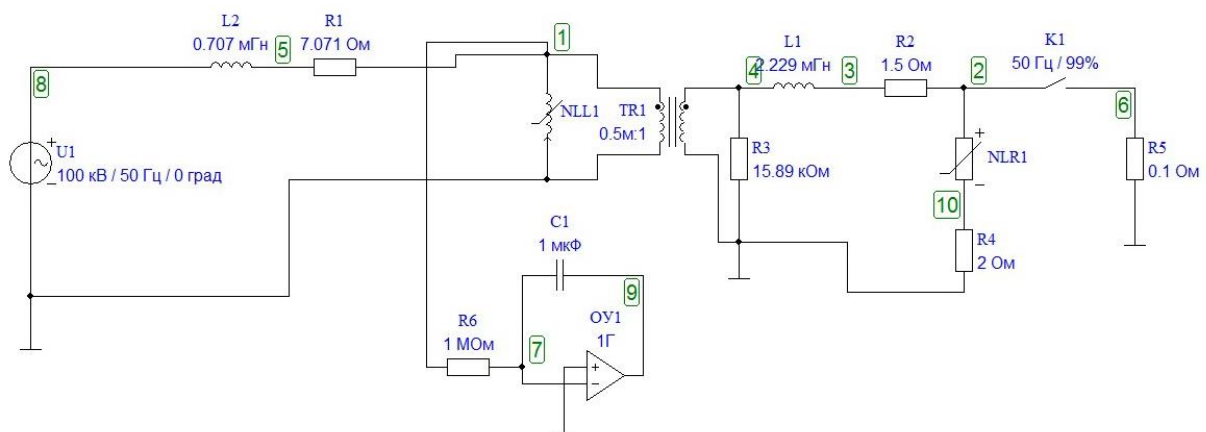
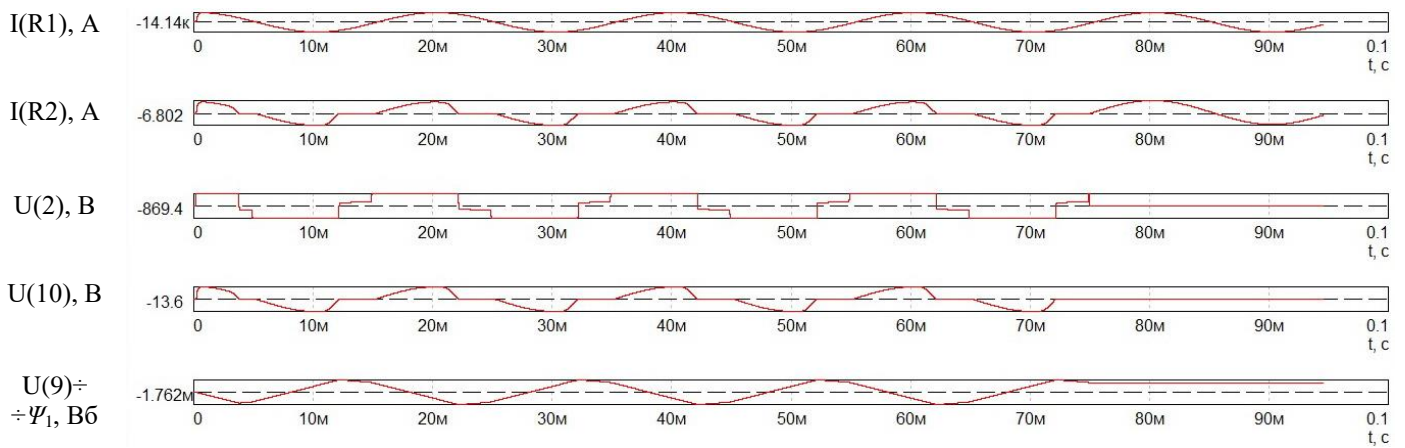
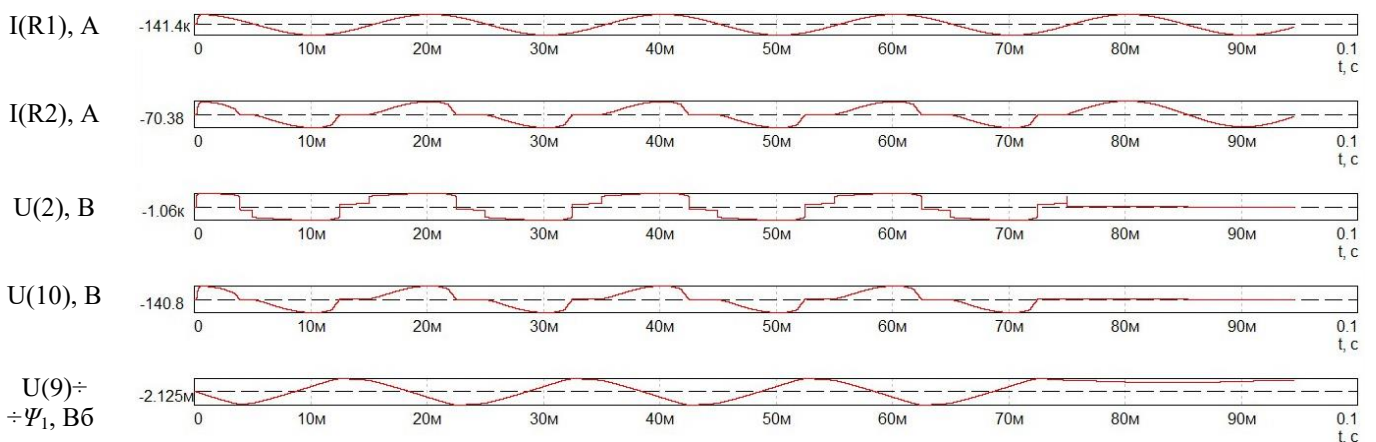


Рисунок Ж.1 – Розрахункова схема для симулювання режимів роботи СЗ ТС типу ТШЛ-20 за первинного номінального струму

На рисунку Ж.2 наведені розрахункові осцилограми режимів роботи СЗ ТС ТШЛ-20 за увімкнення поштовхом до його первинної обмотки номінального і десятикратного струмів:  $I(R1)$  – первинний струм ТС;  $I(R2)$  – струм у вторинній обмотці ТС;  $U(2)$  – напруга на затискачах вторинної обмотки ТС;  $U(10)$  – спад напруги на резисторі  $R4 = 2$  Ом;  $U(9) \div \Psi_1$  – зведене до первинної сторони потітокзчеплення вторинної вимірювальної обмотки ТС.



а)  $I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 10000 \text{ (A)}$



б)  $I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 100000 \text{ (A)}$

Рисунок Ж.2 – Розрахункові осцилограми режимів роботи СЗ ТС типу ТШЛ-20 за увімкнення поштовхом до його первинної обмотки номінального і десятикратного струмів

Як бачимо з рисунку Ж.2, за діапазону первинних струмів від номінальної до десятикратної величини ТС через ОПН за час тривання періоду первинного струму тривало протікає струм (протягом сумарного часу  $\sim 0,01 \text{ с}$ ). Це відбувається тому, що за рахунок великих ампер-витків первинного струму та «потужного» осердя ТС ТШЛ-20 відбувається симетричне перемагнічення його осердя практично за увесь період струму з малими зонами насичення осердя. Це, в свою чергу, призводить до тривалого спрацювання ОПН протягом періоду первинного струму у порівнянні з досліджуваним у розділі 4 малопотужним ТС типу ТЛМ-10. Тому за таких режимів

роботи СЗ ТС типу ТШЛ-20 слід очікувати значного навантаження ОПН без іскрового проміжку.

Розрахункові параметри режиму спрацювання СЗ ТС типу ТШЛ-20, а також оцінка можливості застосування для СЗ ТС ТШЛ-20 серійних ОПН без іскрового проміжку наведено у п. Ж.3 даного додатку.

## **Ж.2 Режими роботи трансформаторів струму з системою захисту від перенапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування вторинної обмотки трансформатора струму**

Нижче розглянемо один із запропонованих варіантів схеми ПШС (див. рисунок 4.1, розділ 4) для забезпечення надійного замикання контактами електромеханічного реле затискачів вторинної обмотки ТС з підключеним до неї ОПН без застосування джерела оперативного струму. На рисунку Ж.3 наведено схему ПШС з застосуванням в якості шунтуючого електромеханічного реле сигналізації (блінкер) типу РУ-21/0,01. Основні технічні характеристики даного реле РУ-21/0,01 наведені в [139].

Особливість сигнальних реле серії РУ полягає в тому, що після спрацювання реле його контакти залишаються постійно замкненими, замикаючи накоротко вторинну обмотку ТС з підключеним до неї ОПН, незважаючи на відсутність струму в обмотці реле. Лише персонал підстанції, повернувши важіль на кришці реле, повертає його механічну систему у вихідний стан. Тоді контакти реле розмикаються і залишаються постійно розімкнутими, а реле – готове до наступного спрацювання.

Принцип роботи ПШС видно з рисунку Ж.3. У склад ПШС входить ізолюючий трансформатор (елементи: R3, L1, R2, NLL1, TR1, L2, R1), затискачі первинної обмотки якого (вивід резистора R3 – «земля») підключають до затискачів резистора  $r_{ш}$  (див. рисунок 4.1, розділ 4), а вторинної обмотки – до схеми «випрямляч – електромеханічне реле» (RECT1, R4, R5, C1, VCK1).

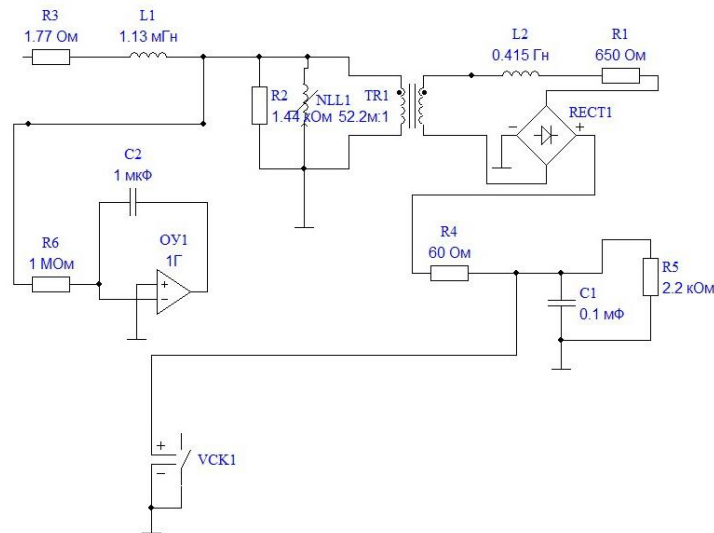


Рисунок Ж.3 – Розрахункова схема ПШС з реле шунтування-сигналізації типу РУ-21/0,01

Ізолюючий трансформатор потужністю 2 В·А, 12/230 В, необхідний для підвищення рівня напруги, що знімають з резистора  $r_{ш}$  (див. рисунок 4.1, розділ 4), по якому протікає струм вторинної обмотки ТС – струм ОПН за його спрацювання.

Детальніше роботу схеми (рисунок Ж.3) буде розглянуто нижче при аналізі розрахункових осцилограм режимів роботи одноступеневих ТС з під'єднаною СЗ від наднапруг без застосування джерела оперативного струму для шунтування його вторинної обмотки на прикладі потужного ТС типу ТШЛ-20. Розрахункова схема ТС з СЗ без застосування джерела оперативного струму для шунтування його вторинної обмотки наведена на рисунку Ж.4.

Як видно з рисунку Ж.4, спад напруги на резисторі R4 служить інформаційним сигналом для пуску та джерелом живлення ПШС СЗ і підводиться до входних затисків ПШС (затискачі: «первинна обмотка ізолюючого трансформатора» – «земля»). Випрямлена напруга вторинної обмотки ізолюючого трансформатора поступає на R-С фільтр, до виходу якого підключена обмотка (імітується резистором  $R_{10} = 2,2 \text{ кОм}$ ) електромеханічного реле РУ-21/0,01. За струму  $I > 10 \text{ мА}$  в обмотці цього реле (напруга  $U > 22 \text{ В}$ ) реле VCK1 спрацьовує і своїми контактами замикає накоротко вторинну обмотку ТС (вузол 2 на землю).

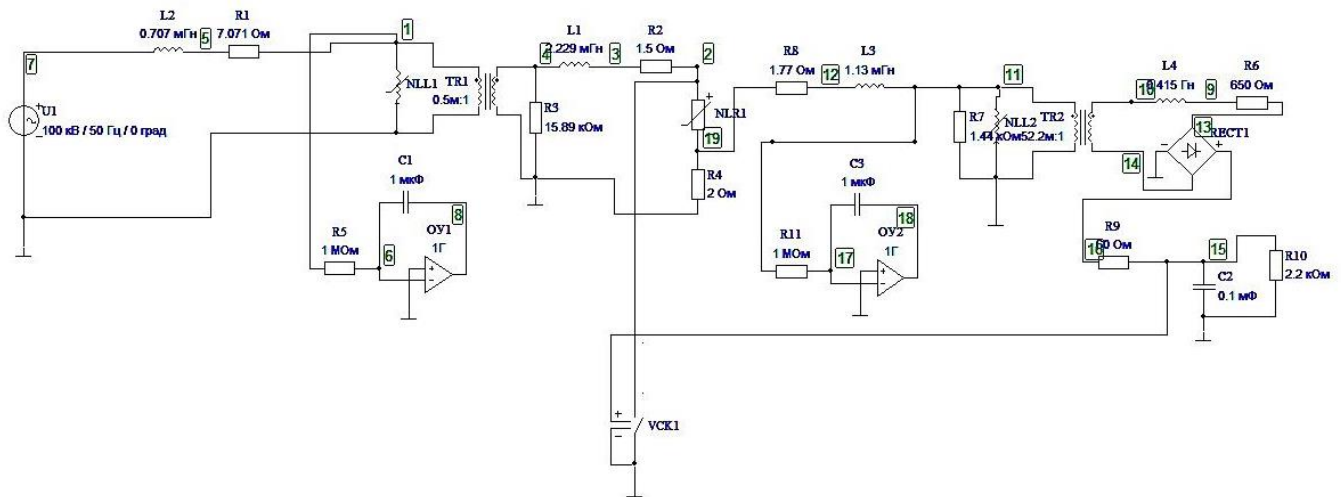
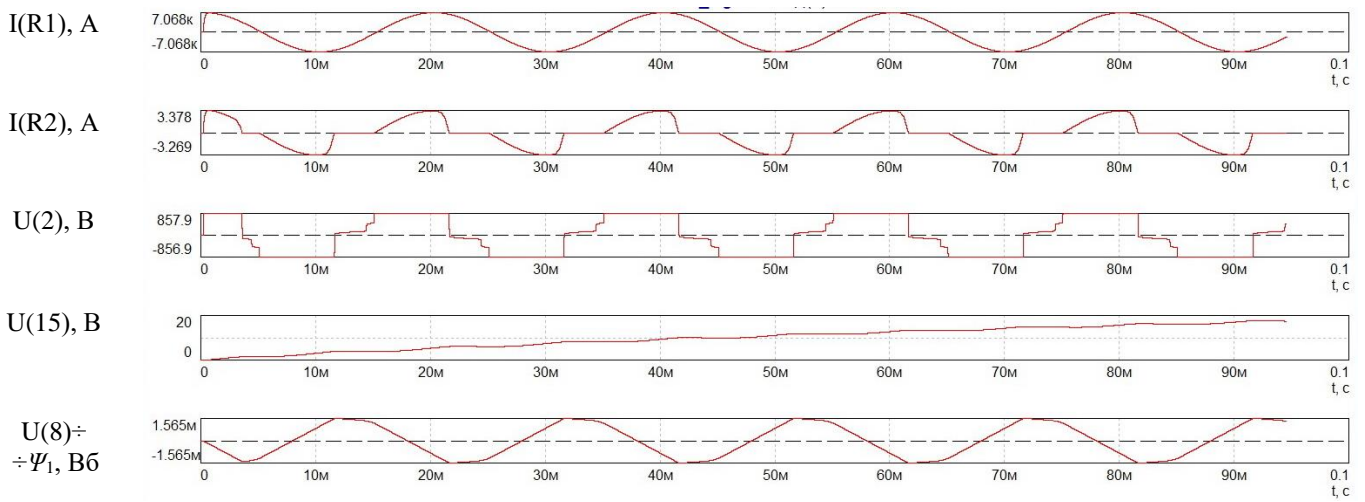


Рисунок Ж.4 – Розрахункова схема ТС типу ТШЛ-20 з під'єднаною СЗ від перенапруг та шунтуванням вторинної обмотки ТС електромеханічним сигнальним реле типу РУ-21/0,01

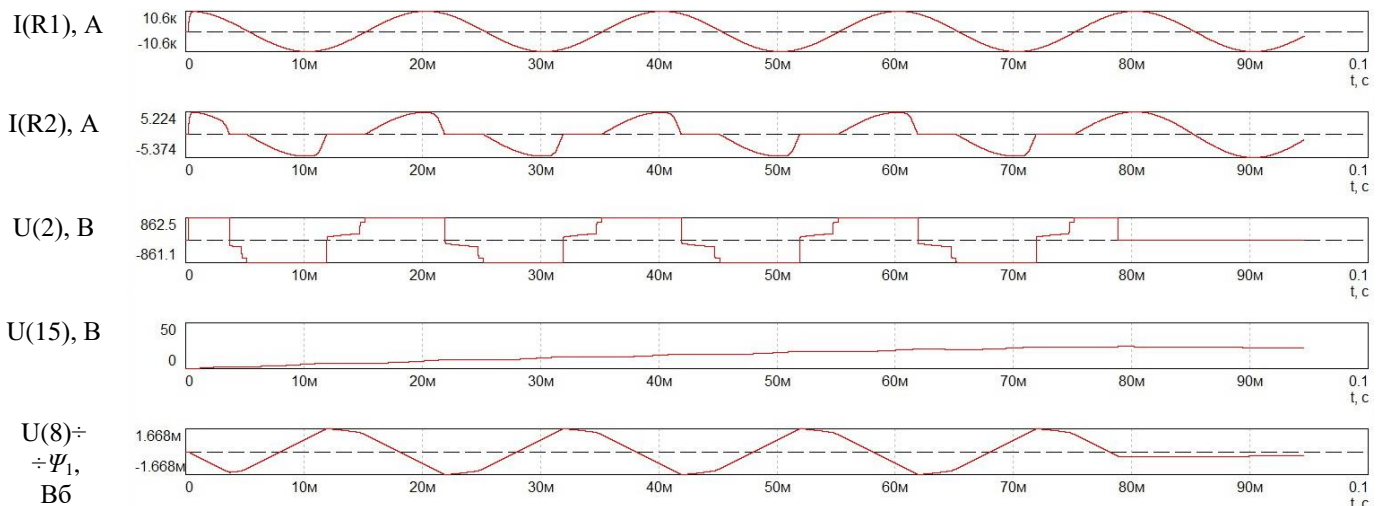
На рисунку Ж.5 наведені розрахункові осцилограми параметрів режимів спрацювання під'єднаної до затискачів вторинної вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20 СЗ від перенапруг з шунтуванням вторинної обмотки ТС електромеханічним сигнальним реле типу РУ-21/0,01:  $I(R1)$  – первинний струм ТС;  $I(R2)$  – струм у вторинній обмотці ТС;  $U(2)$  – напруга на затискачах вторинної вимірювальної обмотки ТС;  $U(15)$  – напруга на конденсаторі С2 (напруга на обмотці електромеханічного реле РУ-21/0,01;  $U(8) \div \Psi_1$  – потокозчеплення вторинної обмотки ТС, зведене до його первинної сторони.

Як бачимо з наведених на рисунку Ж.5 осцилограм, час затримки спрацювання СЗ від перенапруг без застосування джерела оперативного струму, як і слід було очікувати, є обернено-пропорційний кратності (по відношенню до номінальної величини) струму у первинній обмотці ТС типу ТШЛ-20. За первинного струму ТС  $I_1 = 0,5 \cdot I_{\text{ном}} = 5000$  А (рисунок Ж.5, а) за час  $t = 0,1$  с сигнальне реле не спрацьовує, оскільки величина напруги на ємності С2 за даний час  $t = 0,1$  с ( $U_{C2} < 20$  В) не встигла досягнути значення напруги спрацювання ( $U_{\text{спр. р.}} = 22$  В) сигнального реле типу РУ-21/0,01. За більших струмів у первинній обмотці ТС типу ТШЛ-20 (див. осцилограми на рисунках Ж.5, б, в, г) сигнальне реле вже спрацьовує за час  $t = 0,1$  с, при

чому час затримки спрацювання зменшується зі збільшенням рівня первинного струму ТС. Така залежність часу затримки спрацювання СЗ, на наш погляд, не дає змогу, поки що, за відсутності відповідної елементної бази, прийняти позитивне рішення про широке застосування таких СЗ без зовнішнього джерела живлення для захисту від перенапруг за обриву вторинних кіл ТС. Тому режими без оперативного струму для ТС з менш потужними осерддями, ніж осердя ТС типу ТШЛ-20 (досліджувані типи одноступеневих і каскадного ТС), не розглядаються.

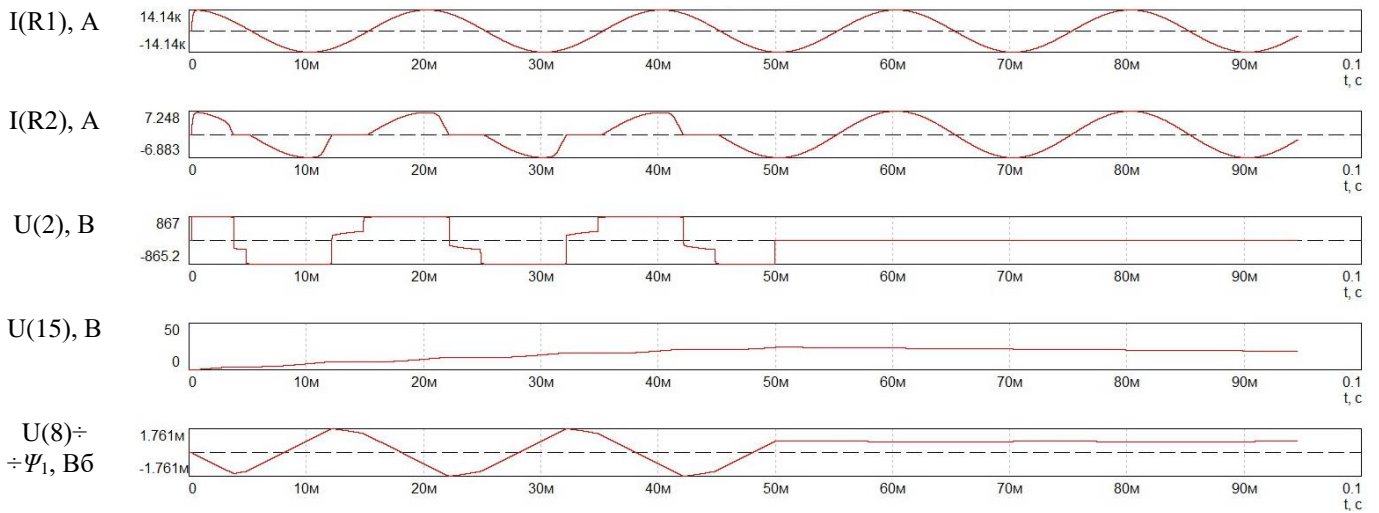


$$a) I_1 = 0,5 \cdot I_{\text{НОМ}} = 5000 \text{ (A)}$$

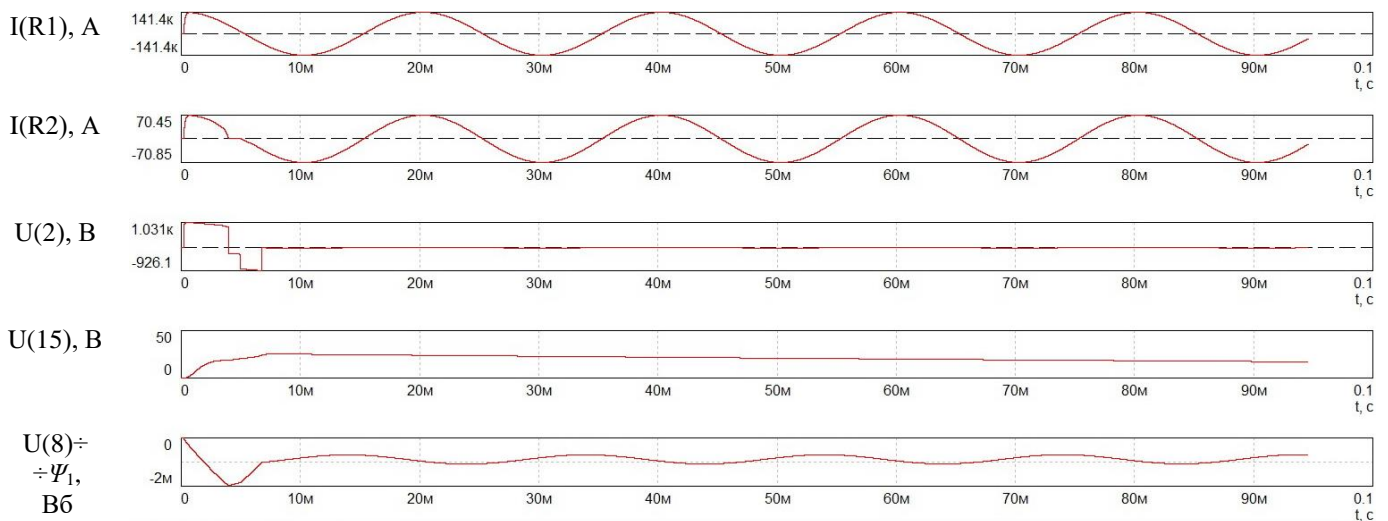


$$б) I_1 = 0,75 \cdot I_{\text{НОМ}} = 7500 \text{ (A)}$$

Рисунок Ж.5 – Розрахункові осцилограми параметрів режимів спрацювання під'єднаної до затискачів вторинної вимірювальної обмотки ТС типу ТШЛ-20 СЗ від перенапруг з шунтуванням вторинної обмотки ТС електромеханічним сигнальним реле типу РУ-21/0,01



$$\text{в) } I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 10000 \text{ (A)}$$



$$\text{г) } I_1 = 10 \cdot I_{1\text{НОМ}} = 100000 \text{ (A)}$$

Рисунок Ж.5 (продовження)

### Ж.3 Розрахункові параметри режимів спрацювання систем захисту трансформаторів струму від перенапруг та оцінка можливості застосування в системах захисту серійних ОПН без іскрового проміжку

У таблиці Ж.1 наведено параметри режимів спрацювання СЗ досліджуваних типів ТС та результати оцінки можливості застосування в СЗ даних ТС серійного ОПН типу ОПН-П-0,38 УХЛ1. Розрахунки виконано аналогічно за виразами, наведеними у розділі 4 для ТС типу ТЛМ-10.

Таблиця Ж.1 – Параметри режимів спрацювання СЗ від перенапруг різних типів ТС

<b>ТС типу ТЛМ-10 1500/5</b> (комбінована вторинна обмотка)							
$K_{I_1}$	$K_{I_1 \text{мін}}$ 0,54	1	4	8	10		
$I_{2m}, A$	$6,69 \cdot 10^{-3}$	1,12	8,63	18,0	22,4		
$t_{i2}, \text{мс}$	0,427	0,934	1,27	1,3	1,3		
$I_{2-1m}, A$	-	6,07	-	-	66,6		
$t_{i2-1}, \text{мс}$	-	0,659	-	-	0,775		
Для $K_{I_1} = 10$ маємо: $W_1 = 35,8$ Дж; $W_{\text{тр}} = 20,4$ Дж; $Q_{\text{опн}} \Sigma_{01-10} = 56,2$ Дж; $K_{\text{нв}} = 11,4 > 3$ .							
<b>ТС типу ТВ-35 300/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 3)							
$K_{I_1}$	$K_{I_1 \text{мін}}$ 3,2	6	8	10			
$I_{2m}, A$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	2,97	5,21	7,46			
$t_{i2}, \text{мс}$	0,0371	0,429	0,503	0,552			
$I_{2-1m}, A$	-	-	-	54,7			
$t_{i2-1}, \text{мс}$	-	-	-	0,386			
Для $K_{I_1} = 10$ маємо: $W_1 = 12,0$ Дж; $W_{\text{тр}} = 0,958$ Дж; $Q_{\text{опн}} \Sigma_{01-10} = 13,0$ Дж; $K_{\text{нв}} = 49,2 > 3$ .							
<b>ТС типу ТВТ-110 600/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 3)							
$K_{I_1}$	$K_{I_1 \text{мін}}$ 0,53	0,5	1	4	8	10	
$I_{2m}, A$	$0,276 \cdot 10^{-3}$	0,569	1,05	11,5	27,0	35,3	
$t_{i2}, \text{мс}$	0,107	0,997	1,32	2,15	2,4	2,43	
$I_{2-1m}, A$	-	-	-	-	-	66,9	
$t_{i2-1}, \text{мс}$	-	-	-	-	-	1,23	
Для $K_{I_1} = 10$ маємо: $W_1 = 57,3$ Дж; $W_{\text{тр}} = 94,5$ Дж; $Q_{\text{опн}} \Sigma_{01-10} = 151,8$ Дж; $K_{\text{нв}} = 4,22 > 3$ .							
<b>ТС типу ТОМ-765 4000/1</b> (вимірювальна обмотка класу точності 0,2S)							
$K_{I_1}$	$K_{I_1 \text{мін}}$ 0,013	0,4	0,8	1	4	8	10
$I_{2m}, A$	$0,131 \cdot 10^{-3}$	0,316	0,647	0,814	3,3	6,54	8,17
$t_{i2}, \text{мс}$	0,0742	2,0	2,01	2,06	2,05	2,11	2,1
$I_{2-1m}, A$	-	-	-	-	-	-	13,9
$t_{i2-1}, \text{мс}$	-	-	-	-	-	-	1,14
Для $K_{I_1} = 10$ маємо: $W_1 = 2,29$ Дж; $W_{\text{тр}} = 4,37$ Дж; $Q_{\text{опн}} \Sigma_{01-10} = 6,66$ Дж; $K_{\text{нв}} = 96,1 > 3$ .							



## Продовження таблиці Ж.1

<b>ТС типу ТШЛ-20 10000/5</b> (вимірювальна обмотка класу точності 0,5)							
$K_{I_1}$	$K_{I_1 \text{мін}}$ 0,044	0,4	0,8	1	4	8	10
$I_{2m}, \text{A}$	$0,199 \cdot 10^{-3}$	2,56	5,39	6,8	28,0	56,3	70,4
$t_{i2}, \text{мс}$	0,408	6,46	6,81	7,26	8,17	7,72	7,55
$I_{2-1m}, \text{A}$	-	-	-	6,86	-	-	69,5
$t_{i2-1}, \text{мс}$	-	-	-	3,6	-	-	3,67
Для $K_{I_1} = 10$ маємо: $W_1 = 184,4 \text{ Дж}; W_{\text{тр}} = 1167,5 \text{ Дж}; Q_{\text{опн}\Sigma 01-10} = 1351,9 \text{ Дж}; K_{\text{нв}} = 0,473 < 3.$							
Для $K_{I_1} = 1$ маємо: $W_1 = 1,76 \text{ Дж}; W_{\text{тр}} = 10,5 \text{ Дж}; Q_{\text{опн}\Sigma 01-10} = 12,3 \text{ Дж}; K_{\text{нв}} = 52,0 > 3.$							

Примітка: максимальна теплова енергія за повний цикл спрацювання ОПН типу ОПН-П-0,38 УХЛ1 рівна  $Q_{\Sigma m} = 640 \text{ Дж}$ , а диференційний активний опір ОПН за його спрацювання –  $r_{\text{дс}} = 10,4 \text{ Ом}$  (розрахунок параметрів ОПН наведено у розділі 4 під час оцінки режиму роботи СЗ з ТС типу ТЛМ-10).

Як бачимо з отриманих результатів розрахунків, лише для ТС типу ТВ-35 напруга на розімкнених виводах його вторинної обмотки досягає напруги спрацювання ОПН (пробивного запобіжника типу ПП-А/3) за величини первинного струму вище номінального значення ( $K_{I_1 \text{мін}} = 3,2$ ). Тому для даного ТС ТВ-35 СЗ можна не ставити.

Для всіх досліджуваних типів ТС, крім ТС типу ТШЛ-20, за десятикратного первинного струму коефіцієнти надійності (за тепловою енергією) за цикл спрацювання ОПН типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 є більшими за мінімально достатню, на наш погляд, величину  $K_{\text{нв}} = 3$ , тому для цих ТС режими за номінальних первинних струмів не перевіряються і можна зробити висновок про можливість застосування в СЗ даних типів ТС ОПН без іскрового проміжку типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1.

Для ТС типу ТШЛ-20 за десятикратного первинного струму коефіцієнт надійності  $K_{\text{нв}}$  є значно меншим за достатню величину  $K_{\text{нв}} = 3$ , сумарні втрати активної енергії за цикл спрацювання ОПН практично в 2 рази перевищують максимальну теплову енергію, яку може розсіяти ОПН за повний цикл спрацювання. Для номінального струму ТС розрахунковий коефіцієнт надійності  $K_{\text{нв}}$  є досить великим

( $K_{нв} = 52,0 > 3$ ). Попри це, на наш погляд, для ТС типу ТШЛ-20 використання в СЗ ОПН без іскрового проміжку типу ОПН-П-0,38/2,5 УХЛ1 не можливе.

## Додаток И

### Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

#### *В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

##### *Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав:*

1. Журахивский А. В. Исследование установившихся режимов работы одноступенчатого трансформатора тока при размыкании под нагрузкой его вторичной обмотки [Текст] / А. В. Журахивский, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович** // Энергетика и ТЭК. – Минск, 2017. – № 1 (166). – С. 23–26.

##### *Публікації у наукових фахових виданнях України:*

2. Аналіз режимів роботи вторинних кіл трансформаторів струму за їх розкорочення [Текст] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2012. – № 736 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 43–49.

3. Журахівський А. В. Аналіз режиму роботи трансформатора струму з розімкненим вторинним колом методами аналітичних розрахунків [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович** // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6 (123). – С. 89–94.

4. Кенс Ю. А. Спрощений аналіз усталеного режиму роботи однокаскадного трансформатора струму за розкорочення його вторинної обмотки [Текст] / Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович**, Н. Б. Дьяченко // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2015. – № 834: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 26–32.

5. Захист від наднапруг розімкненого вторинного кола трансформатора струму [Текст] / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, **Р. Я. Ференсович**, Н. Б. Дьяченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 5 (134). – С. 74–79.

##### *Матеріали міжнародних конференцій:*

6. **Ференсович Р. Я.** Дослідження режимів роботи трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // Енергетика та системи керування : Матеріали III Між-

народної конференції молодих вчених ЕРЕС-2011. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 90–91.

7. Яцейко А. Я. Аналіз аварійних режимів роботи вимірювальних трансформаторів струму [Електронний ресурс] / А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович** // Енергетика та системи керування : Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ЕРЕС-2013. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 32–35. – Назва з екрану.

8. **Ferensovych R.** The Operation of Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / **R. Ferensovych** // V Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 196–198. – Назва з екрану.

9. **Ferensovych R.** The Operation Mode of Single-Stage Current Transformer with Open Secondary Circuit [Електронний ресурс] / **R. Ferensovych** // VI Міжнародний молодіжний науковий форум “Litteris et Artibus” / Матеріали. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 175–176. – Назва з екрану.

*Тези:*

10. **Ференсович Р. Я.** Аналіз перехідних процесів каскадних трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 70-та студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 125–127.

11. **Ференсович Р. Я.** Аварійні процеси у вимірювальних трансформаторах струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 71-ша студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 123–124.

12. **Ференсович Р. Я.** Режими роботи та захист трансформаторів струму за розкорочення їх вторинних кіл [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // 72-а студентська науково-технічна конференція : Збірник тез доповідей. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. – С. 126–128.

13. **Ференсович Р. Я.** Режими роботи та аварійні процеси вимірювальних трансформаторів струму [Текст] / **Р. Я. Ференсович** // Збірник тез докладів Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Енергетика». – Маріуполь : ПДТУ. – 2013. – С. 20.

14. **Ференсович Р. Я.** Аварійні розмикання вторинних обмоток трансформаторів струму [Електронний ресурс] / **Р. Я. Ференсович**, О. І. Жила // Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика»: збірник тез / ПДТУ. – Маріуполь, 2014. – С. 20. – Режим доступу : <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/6221> (дата звернення 12.11.14). – Назва з екрану.

*Патенти:*

15. Пат. 71385 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від перенапруг / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович**; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201200114; заявл. 04.01.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

16. Пат. 89566 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту трансформатора струму від пошкоджень перенапругами / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович**; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201313704; заявл. 25.11.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

17. Пат. 111065 Україна, МПК H02H 7/04(2006.01). Пристрій захисту від перенапруг трансформатора струму та його вторинних кіл / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, **Р. Я. Ференсович**; власник НУ «Львівська політехніка». – № u201605446; заявл. 19.05.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

Основні результати дисертації доповідалися на III, IV Міжнародних конференціях молодих вчених ERECS-2011, 2013, V і VI Міжнародних молодіжних наукових форумах “Litteris et Artibus”: конференції ERECS-2015, 2016 (м. Львів, 2011 р., 2013 р., 2015 р., 2016 р.); 70-й, 71-й, 72-й студентських науково-технічних конференціях (м. Львів, 2012 р., 2013 р., 2014 р.); Всеукраїнських конкурсах студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» (м. Маріуполь, 2013 р., 2014 р.); науково-практичній конференції «Діагностування електричного обладнання електростанцій,

підстанцій, повітряних ліній та трансформаторних олиив. Обмін досвідом та перспективи удосконалення» (с. Славсько, 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2015)» (м. Вінниця, 2015 р.); науково-практичній конференції «Діагностика технічного стану електричного обладнання електростанцій, підстанцій, повітряних ліній та трансформаторних олиив. Нормативна база, проблеми та перспективи покращення» (с. Славсько, 2017 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2017» (м. Вінниця, 2017 р.); семінарах НАН України (м. Львів, 2014 р., 2017 р.).

## Додаток К

### Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
«Львівська політехніка»  
проф. Н. І. Чухрай  
2017 р.

### А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи «Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл» аспіранта кафедри електроенергетики та систем управління Ференсовича Романа Ярославовича, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, при виконанні госпдоговору № 738 від 29.09.2017 р.

Ми, що нижче підписались, начальник НДЧ, к.т.н., доц. Жук Л. В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г. В.; заст. начальника планово-фінансового відділу Чулой Т. М. та в. о. завідувача кафедри електроенергетики та систем управління Маліновський А. А. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри електроенергетики та систем управління Ференсовича Р. Я. використано під час виконання госпдоговору № 738 від 29.09.2017 р. «Дослідження причин пошкодження електромагнітних трансформаторів напруги типу НКФ-110 кВ та розробка рекомендацій з підвищення їх надійності та безпеки експлуатації».

Ференсовичем Р. Я. проведено критичний огляд існуючої технічної літератури стосовно предмету досліджень, встановлено можливі причини пошкодження вимірних трансформаторів в електричних мережах, сформовано математичні моделі та проведено комп'ютерне моделювання з використанням інструментарію програмних комплексів «RE» та «FASTMEAN» для дослідження нормальних та аварійних режимів роботи вимірних трансформаторів електричних мереж напругою 110 кВ, сформульовані висновки та рекомендації за госпдоговором щодо доцільності поступової заміни в електричних мережах оливонаповнених вимірних трансформаторів на пожежостійкі трансформатори з елегазовою ізоляцією, а для мереж 500-750 кВ – на оптико-електронні вимірні трансформатори з метою забезпечення безпечної експлуатації електрообладнання оперативним персоналом, встановлення відповідних захисних екранів, стінок для захисту персоналу від можливих наслідків пошкодження (вибухи, пожежа) електрообладнання підстанцій електричних мереж.

Начальник НДЧ  
к.т.н., доцент

Л. В. Жук

Члени комісії:  
Зав. відділу НОСНД  
к.т.н.

Г. В. Лазько

Заст. Начальника ПФВ

Т. М. Чулой

В. о. завідувача кафедри ЕСУ  
д.т.н., професор

А. А. Маліновський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Головний інженер  
Львівських МЕМ  
ПрАТ «Львівобленерго»  
І.Б. Гроностацький  
« 26 » 10 2017 р.

## А К Т

використання результатів дисертаційної роботи Ференсовича Романа Ярославовича  
«Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл»

Комісія в складі начальника служби РЗіА Львівських МЕМ п. Кубіка В.А., провідного інженера цієї служби Бартіша О. та професора кафедри ЕСУ НУ «Львівська політехніка» Журахівського А.В. прийняли участь у випробуваннях пристрою захисту трансформатора струму від пошкоджень під час розриву вторинних кіл його в плані виконання дисертаційної роботи «Режими роботи та захист трансформаторів струму за обривів вторинних кіл» аспірантом кафедри ЕСУ НУ «Львівська політехніка» Р.Я. Ференсовичем.

Випробовування проводились з трансформатором типу ТЛМ-10 (1500/5 А, 10 кВ) у лабораторії релейного захисту Львівських міських мереж. Дослідженнями встановлено:

а) під час розриву вторинних кіл трансформаторів струму перенапруги перевищують 1000 В, тим самим становлять небезпеку як для обслуговуючого персоналу, так й для вторинних кіл трансформаторів струму (за номінального первинного струму ТС);

б) експериментальний пристрій захисту, створений асп. Р.Я. Ференсовичем з використанням пробивного запобіжника типу ПП-А/3 успішно обмежує перенапруги до величин нижче 1000 В (згідно вимог нормативних документів).

Комісія вважає доцільним виготовлення дослідного взірця такого пристрою промисловим способом та встановлення його на одній з підстанцій ЛІМЕМ для накопичення досвіду експлуатації.

Начальник СРЗіА

В. Кубік

Провідний інженер

О. Бартіш

Професор кафедри ЕСУ

А. Журахівський