НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кундіус Катерина Дмитрівна

УДК 621.3.078:621.3.013

ДИСЕРТАЦІЯ
СИСТЕМИ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВБУДОВАНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____К.Д. Кундіус

Наукові керівники:
Розов Володимир Юрійович,
доктор технічних наук, професор,
член- кореспондент НАН України;
Клепіков Володимир Борисович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2023

АНОТАЦІЯ

Кундіус К.Д. Системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій.– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2023.

Об'єктом дослідження є зовнішнє магнітне поле міських трансформаторних підстанцій.

Предметом досліджень є системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій.

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача синтезу систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих у житлові будинки міських трансформаторних підстанцій потужністю 100 – 1260 кВА для зменшення індукції їх магнітного поля до безпечного для населення рівня в прилеглих житлових приміщеннях.

Дослідження виконано на основі фундаментальних положень теоретичної електротехніки, методах математичного та фізичного моделювання джерел магнітного поля, аналітичних та чисельних методів аналізу та сучасних інформаційних технологіях.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено дані про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У першому розділі проведено аналіз результатів виконаних в Європі досліджень магнітного поля вбудованих підстанцій 10/0,4 кВ потужністю 600 – 1000 кВА, де максимальний рівень індукції магнітного поля фіксується у житлових приміщеннях над підстанціями і лежить в діапазоні 4–13 мкТл. Це істотно перевищує безпечний для населення рівень згідно із рекомендаціям

Всесвітньої організації охорони здоров'я (0,2–0,3 мкТл), а також допустимий рівень магнітного поля промислової частоти, прийнятий в Україні (0,5 мкТл), що потребує його зменшення більш ніж на порядок.

Проведено аналіз методів моделювання і розрахунку магнітного поля, а також розроблених для повітряних ліній електропередачі методів мультидипольного моделювання, які мають хорошу фізичну інтерпретацію, бажану для спрощення синтезу систем активного екранування. Проаналізовані такі прийнятні для підстанцій методи зменшення їх магнітного поля, як активне екранування. Обґрунтована актуальність досліджень зовнішнього магнітного поля розповсюджених в Україні міських підстанцій 100–1260 кВА, які вбудовуються у житлові будинки, а також розвитку оптимізаційних методів синтезу систем активного екранування магнітного поля підстанцій. Обрано напрями досліджень, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено результати експериментальних досліджень розподілу індукції магнітного поля частотою 50 Гц для 110 типових міських трансформаторних підстанцій 10(6)/0,4 кВ потужності 100–1260 кВА м. Харкова, які можуть вбудовуватися у житлові будинки. Показано, що індукція магнітного поля може перевищувати нормативний рівень за умови наближення до підстанцій на відстань від 6 м (100 кВА) до 10 м (1260 кВА) і досягає від 2 до 8 мкТл, і це потребує її зменшення від 4 до 16 разів. Досліджено вклад в загальне магнітне поле підстанції окремих джерел їх магнітного поля, та показано, що основним джерелом зовнішнього магнітного є їх розподільчий пристрій – низьковольтний струмопровід, вклад якого на відстані 2 м складає більше 90%, що дозволяє в подальших розрахунках не враховувати інші джерела магнітного поля (трансформатор, кабелі, високовольтний струмопровід).

Удосконалено та експериментально обґрунтовано мультидипольну математичну модель зовнішнього магнітного поля трифазних струмопроводів підстанцій шляхом її побудови на основі двофазної моделі трифазного електричного кола, яка в порівнянні із відомою мультидипольною моделлю

дозволяє без збільшення похибки, вдвічі наблизити розрахункову область і здійснювати розрахунок у всіх прилеглих житлових приміщеннях, які розташовані на відстані від одного метра до підстанції. Виконано розрахунок індукції магнітного поля в житлових приміщеннях будинків з вбудованими підстанціями та здійснено експериментальну перевірку результату. Визначена необхідна ефективність екранування магнітного поля у прилеглих житлових приміщеннях, яка повинна складати 4–16 одиниць.

У третьому розділі обґрунтовано виконання систем активного екранування магнітного поля вбудованих підстанцій в розімкненій структурі управління та розроблено методику їх синтезу. Вона ґрунтується на удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі магнітного поля трифазних струмопроводів, законі Біо-Савара, та методі оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги, що дозволяє синтезувати системи із необхідною ефективністю. Виконано синтез систем із однією та двома плоскими чотирикутними компенсаційними обмотками при різних (1–2 м) відстанях до житлових приміщень для 6 типів вбудованих підстанцій різної потужності. За результатами синтезу запропоновані структури та параметри систем екранування, які доступні для фізичної реалізації і мають ефективність 6–16 одиниць. При цьому теоретична ефективність екранування магнітного поля складає біля 8 од. при використанні однієї компенсаційної обмотки і біля 16 од. при використанні двох компенсаційних обмоток. В останньому випадку питома потужність системи екранування зростає із 0,7 Вт/м^2 житлової площі до 4,7 Вт/м^2, що обумовлює відповідне збільшення собівартості систем та вартості їх експлуатації.

У четвертому розділі приведено опис створеної лабораторної установки із повномасштабним фізичним макетом низьковольтного струмопроводу підстанції 100 кВА та повномасштабним фізичним макетом синтезованої для нього системи активного екранування, на яких здійснено експериментальні

дослідження їх магнітного поля за розробленою здобувачем методикою вимірювань.

Виконано експериментальну перевірку запропонованої удосконаленої двофазної мультидипольної математичної моделі магнітного поля трифазного струмопроводу, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 7% та коректність запропонованої математичної моделі. Також виконано експериментальну перевірку теоретичних положень запропонованої методики синтезу систем активного екранування, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 10% та коректність запропонованої методики синтезу.

Розроблені практичні рекомендації з побудови систем активного екранування, що передбачають формування сигналів управління системи на основі мікроконтролера, періодичне настроювання системи під контролем магнітного поля, а також виконання підсилювача потужності системи на основі підсилювачів звукової частоти класу АВ.

В дисертації отримані наступні наукові результати:

1. Запропонована та експериментально обґрунтована удосконалена мультидипольна математична модель зовнішнього магнітного поля трифазного струмопроводу, яка ґрунтується на двофазній дипольній моделі трифазного електричного кола. Запропонована модель в порівнянні із відомою трифазною мультидипольною моделлю дозволяє без збільшення похибки вдвічі наблизити розрахункову область, та забезпечує розрахунок магнітного поля від вбудованої трансформаторної підстанції для всіх наближених до неї житлових приміщень будинку, які розташовані на відстані від одного метра.

2. Вперше розроблена та експериментально обґрунтована методика синтезу систем активного екранування магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА. Методика ґрунтується на удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі магнітного поля струмопроводу, законі Біо-Савара для визначення магнітного

поля системи екранування, а також методі оптимізації елементів системи мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги і дозволяє синтезувати системи із теоретичною ефективністю 6–16 одиниць, які зменшують магнітне поле в наближених житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

3. Вперше запропоновано здійснювати синтез систем активного екранування потенційного магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій із визначенням магнітного поля не у всьому об’ємі житлового приміщення, а на контрольній площині D, яка максимально наближена до підстанції, і розташовується у приміщенні паралельно підлозі (стіни), і це дозволяє істотно зменшити обсяг обчислень при гарантованому зменшенні потенційного магнітного поля у всьому об’ємі приміщення за площиною D.

4. Набули подальшого розвитку методи розрахунку зовнішнього магнітного поля активних конструктивних елементів трансформаторної підстанції. Методи реалізовані на основі удосконаленої мультидипольної моделі магнітного поля струмопроводів, циліндричних просторових гармонік магнітного поля кабелів, та ймовірнісно-статистичного методу прогнозування магнітного поля трансформатора, що дозволило виявити та експериментально обґрунтувати основне джерело магнітного поля підстанції – її низьковольтний струмопровід, вклад якого в загальний рівень магнітного поля на відстані 2 м складає більше 90%, що дозволяє в інженерних розрахунках не враховувати інші джерела магнітного поля.

Достовірність теоретичних результатів, отриманих у дисертації, підтверджено експериментальною перевіркою удосконаленої математичної моделі магнітного поля підстанції ТП 100 кВА та синтезованої для неї системи активного екранування на лабораторній установці із повномасштабними фізичними макетами струмопроводу підстанції 100 кВА та синтезованої системи активного екранування, результати якого показали співпадіння отриманих в дисертації теоретичних положень та експерименту із похибкою менше 10%.

Результати досліджень використано при виконанні наукових досліджень за наступними плановими темами: 1. «Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків» (шифр «БІОМАГ 2», № ДР 0116U005462, 2017 – 2021 рр.), де здобувач була відповідальним виконавцем; 2. «Розвиток методів та засобів нормалізації магнітного поля промислової частоти у приміщеннях житлових будинків, що створюється вбудованими трансформаторними підстанціями та побутовим електрообладнанням» (шифр «ЕКОМ», № ДР 0122U001772, 2022 – 2026 рр.), де здобувач є виконавцем окремих розділів.

Результати дисертаційних досліджень передані до впровадження ТОВ «КиївПромЕлектроПроект» для розробки нормативних документів з проектування міських трансформаторних підстанцій із екологічно безпечним для населення рівнем електромагнітного поля промислової частоти.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, розподільчий пристрій, струмопровід, магнітне поле, вимірювання, математична модель, система активного екранування, напівпровідниковий перетворювач.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Ерисов А.В., Пелевин Д.Е., *Пелевина (Кундиус) Е.Д.* Метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи на основе цилиндрических пространственных гармоник. *Електротехніка і електромеханіка*, 2016. № 2. С. 24-27.

2. Розов В.Ю. Пелевин Д.Е., *Пелевина (Кундиус) Е.Д.* Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017. №5. С. 60-66.

3. Розов В.Ю., *Кундиус Е.Д.*, Пелевин Д.Е. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020. №3. С. 24-30.

4. *Кундіус. К.Д.* Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2022. №11-12. С. 50-62.

5. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., *Кундіус К.Д.* Моделювання магнітного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу. *Електротехніка і електромеханіка*, 2023. № 5. С. 87-93.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., *Кундіус К.Д.* Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення»*, м. Київ, 12–13 листопада 2020 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2020 р. Вип. 20. С. 24-26.

7. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., *Кундіус К.Д.* Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанція. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзєєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України»*, м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2021 р. Вип. 21 С. 329-331.

8. Pelevin D., *Kundius K.*, Sokol O., Grinchenko V. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop. *Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021*, Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Science*s*, 2021. pp. 81-82.

ABSTRACT

Kundius K.D. Active shielding system of external magnetic field for built-in transformer substation.– Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electrical Engineering, Power Engineering and Electromechanics" (14 – Electrical engineering). – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

The dissertation was performed at the State Institution “Institute Technical Problems Magnetism of the National Academy of Ukraine”, Kharkiv, and the Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, and the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv.

The dissertation will be defended at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2023.

The object of the study is the external magnetic field urban transformer substation.

The subject of the study is the active shielding system of external magnetic fields for built-in transformer substations.

In the dissertation the scientific and practical task of the synthesis of an active shielding system of external magnetic field for built-in urban transformer substation power 100–1260 kVA in residential buildings is solved, to reduce they magnetic flux density to a level safe for the population in nearby residential premises.

The research was performed based on the fundamental principles of the theoretical electrical engineering, on methods of mathematical and physical modeling of magnetic field sources, on analytical and numerical methods of analysis, and modern information technologies.

The introduction substantiates the relevance of dissertation topics, research tasks were defined, showing the connection between work and scientific programs, plans, themes, and the data on scientific novelty, practical significance, approbation of results and publication are presented.

The first chapter analyzes the results of studies of magnetic field of built-in substations 10/0.4 kV with a power of 600–1000 kVA performed in Europe. In the European standards the maximum level of magnetic flux density is fixed in the range 4–13 μT for residential premises above substations. This significantly exceeds the safe level for the population by the recommendations of the World Health Organization (0,2–0,3 μT), as well as the industrial frequency magnetic field permissible level adopted in Ukraine (0,5 μT). It requires the reduction by more than an order of magnitude.

Analysis of modeling and calculation methods of the magnetic field, as well as the methods of the multi-dipole modeling that are developed for overhead power lines that have a good physical interpretation necessary to simplify the synthesis of the active shielding systems. The methods of reducing those magnetic fields acceptable for substations, such as active shielding, were analyzed. The relevance of external magnetic field research for urban substations 100–1260 kVA that are distributed in Ukraine, which are built into residential buildings, as well as the development of optimization methods for the synthesis of active shielding systems the substations magnetic field was substantiated. The areas of research are selected and the main tasks of the dissertation are stated.

The second section presents the results of experimental research of the distribution of magnetic flux density with the frequency of 50 Hz for 110 typical urban transformer substations 10(6)/0.4 kV with the power of 100–1260 kVA, which can be built into residential buildings in Kharkiv. It is shown that the magnetic flux density can exceed the normative level when the substations are approached at a distance from 6 m (100 kVA) to 10 m (1260 kVA). It can reach from 2 to 8 μT, which requires the magnetic flux density reduction from 4 to 16 times. The individual sources contribution of its magnetic field to the general magnetic field of the substation was studied. It is shown that the main source of external magnetic field is their switchgear – a low-voltage current conductor, whose contribution to the general magnetic field at the distance of 2 m is more than 90%. It allows do not consider other sources of the magnetic field in further calculations (transformer, cables, high-

voltage current conductor).

The multi-dipole mathematical model of the external magnetic field of a three-phase current conductor has been improved and experimentally proved by its construction on a two-phase model of a three-phase electric circuit. The comparison its with the known multi-dipole model shows that this technique allowing to double bringing closer the calculation zone and carry out the calculations in all adjacent residential premises located at a distance of one meter from the substation without increasing the error. The calculation of the magnetic flux density in residential premises of buildings with built-in substations was accomplished and experimental verification of the result was implemented. The necessary shielding factor of magnetic field in adjacent residential premises is determined, which should be 4–16 units.

In the third chapter, the implementation of active shielding systems of the magnetic field of built-in substations in an open loop control structure is substantiated and the method of its synthesis is developed. The method is based on an improved two-phase multi-dipole mathematical model of the magnetic field of three-phase current lines, on the Biot-Savart law, and on the optimization method of multiswarm particles from the Pareto set of optimal solutions considering binary preference relations, which allows synthesizing systems with the necessary efficiency. Synthesis of systems with one and two flat quadrangular active loops at different (1–2 m) distances from the residential premises for 6 types of built-in substations of different power was performed. According to the results of the synthesis, the structures and parameters of the shielding systems are proposed, which are available for physical implementation and have the shielding factor of 6–16 units. At the same time, the theoretical shielding factor of the magnetic field is about 8 units when one active loop is used and about 16 units when two active loops are used. In the latter case, the surface power density of the shielding system increases from 0.7 W/m^2 of living space to 4.7 W/m^2, which causes a corresponding increase in the cost price of the systems and their operation cost.

The fourth chapter is devoted to the description of the created laboratory

installation consists of substation 100 kVA low-voltage current conductor full-scale physical model and to the active shielding system full-scale physical model synthesized for it, on which the experimental studies of their magnetic field was performed, according as developed by the author's measurements method.

The experimental verification of the proposed improved multi-dipole mathematical model of the external magnetic field of the three-phase current conductor was performed, with confirmed coincidence of the calculation and the experiment among the error less than 7% and the correctness of the proposed mathematical model. The experimental verification of theoretical propositions of the proposed method of synthesis of active shielding systems was performed, with confirmed coincidence of the calculation and the experiment among the error less than 10% and the correctness of the proposed synthesis methods.

Practical recommendations for constructing of active shielding systems have been developed. They involve the formation of system control signals based on a microcontroller, periodic adjustment of the system under the control of the magnetic field, as well as implementation of the system power amplifier based on audio frequency amplifiers of class AB.

The scientific results obtained in the dissertation:

1. The improved multi-dipole mathematical model of the external magnetic field of the three-phase current conductor is proposed and experimentally proved, which based on a two-phase dipole model of a three-phase electric circuit. The proposed model in comparison with the well-known three-phase multi-dipole model, allowing to double bring closer the calculation zone, without increasing the error, the provides calculation of the magnetic field of the built-in transformer substation for all spaces of the building close to it, which are located at a distance of 1 meter.

2. For the first time the method of synthesis of active magnetic field shielding systems of built-in transformer substations power 100-1260 kVA was developed and experimentally substantiated. It is based on the improved two-phase multi-dipole mathematical model of the magnetic field of the current conductor, on the Biot-Savart law for determining the magnetic field of the shielding system, as well as on the

system elements optimization method of the multiswarm of particles from the Pareto set of optimal solutions considering binary preference relations, which allowing made it possible to synthesize systems with a shielding factor of 6–16 units, which reduce the magnetic field in nearby residential premises to the level of sanitary standards.

3. For the first time, it was proposed to carry out the synthesis of systems of active shielding of the potential magnetic field of built-in transformer substations with the determination of the magnetic field not in the entire volume of the residential premise, but on the control plane D, which is as close as possible to the substation, and located in the living room parallel to the floor (wall), allowing you to significantly reduce the amount of the calculations with a guaranteed reduction of the potential magnetic field in the entire volume of the living room along the plane D.

4. The methods of calculating the external magnetic field of active structural elements of a transformer substation was further developed. The methods are implemented on the multi-dipole model of the magnetic field of current conductors, on cylindrical spatial harmonics of the magnetic field of cables, and on the probabilistic-statistical method of predicting the transformer magnetic field, which allowed revealing and experimentally substantiating the low-voltage current conductor as the main source of the substation's magnetic field, whose contribution to the total magnetic field at the distance of 2 m is more than 90%, this allows in engineering calculations to ignore other sources of the magnetic field.

The reliability of the theoretical results obtained in the dissertation was confirmed by experimental verification of the improved mathematical model of the magnetic field 100 kVA substations and by constructing the active shielding system on laboratory installation with full-scale physical models of current conductor substations 100 kVA and synthesized active shielding system, the results of which showed the coincidence of the theoretical provisions obtained in the dissertation and the experiment with an error of less than 10%.

The research results were used in the following planned topics: 1. «Rozvytok naukovykh zasad normalizatsii heomahnitnoho polia v prymishchenniakh suchasnykh zhytlovykh budynkiv [Development of scientific principles of normalization of the

geomagnetic field in the premises of modern residential buildings]» (code «BIOMAH 2», № DR 0116U005462, 2017 – 2021), where the researcher was the responsible executor Researcher; 2. « Rozvytok metodiv ta zasobiv normalizatsii mahnitnoho polia promyslovoi chastoty u prymishchenniakh zhytlovykh budynkiv, shcho stvoriuietsia vbudovanymy transformatornymy pidstantsiiamy ta pobutovym elektroobladnanniam [Development of methods and means of normalization of the magnetic field of industrial frequency in the premises of residential buildings, which is created by built-in transformer substations and household electrical equipment]» (code «EKOM», № DR 0122U001772, 2022 – 2026), where the researcher is the executor of certain sections.

The results of dissertation research are submitted for implementation of TOV «KievPromElectroProject» for the development of normative documents from the design of urban transformer substations from an environmentally safe level of the power frequency electromagnetic fields for the population.

Keywords: transformer substation, switchgear, current conductor, magnetic field, measurement, mathematical model, active shielding system, semiconductor converter.

List of the applicant's publications

1. Yerisov A.V., Pelevin D.Ye., *Pielievina (Kundius) K.D*. Calculation method of electric power lines magnetic field strength based on cylindrical spatial harmonics. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 2 pp. 24-27. (eng)

2. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., *Pielievina (Kundius) K.D*. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. Электротехника *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017. no. 5. pp. 60-66. (eng).

3. Rozov V.Y., *Kundius K.D.*, Pelevin D.Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. no. 3. pp. 24-30. (eng).

4. *Kundius K.D*. Analiz efektyvnosti aktyvnoho ekranuvannia zovnishnoho

mahnitnoho polia vbudovanykh transformatornykh pidstantsii potuzhnistiu do 1260 kVA. [Analysis of the efficiency of active shielding of the external magnetic field of built-in transformer substations with a power up to 1260 kVA]. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt.* [Energy, Electronics and Electromechanics], 2022. no. 11-12. pp. 50-62.

5. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., *Kundius K.D*. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023. no. 5 pp. 87-93. (eng).

Proceeding and materials of conferences (Approbation):

6. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., *Kundius K.D.* Vplyv na zhytlove seredovyshche elektromahnitnoho polia miskykh transformatornykh pidstantsii [Impact on the residential environment of the electromagnetic field of urban transformer substations]. *Zbirka tez dopovidei Naukovo-praktychnoi konferentsii «Fizychni faktory dovkillia ta yikh vplyv na formuvannia zdorovia naselennia»* [A collection of abstracts of reports of the Scientific and Practical Conference "Physical factors of the environment and their influence on the formation of population health"], Kyiv, 12-13 november 2020. Kyiv, State institution "O.M. Marzieiev institute for public health" NAMSU, 2020. vol. 20. pp. 24-26.

7. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., *Kundius K.D.* Metody normalizatsii mahnitnoho polia v zhytlovykh budynkakh z vbudovanymy transformatornymy pidstantsiia [Methods of normalizing the magnetic field in residential buildings with built-in transformer substations]. *Zbirka tez dopovidei Naukovo-praktychnoi konferentsii (17 Marzieievski chytannia) «Aktualni pytannia hromadskoho zdorovia ta ekolohichnoi bezpeky Ukrainy»* [A collection of theses of reports of the Scientific and Practical Conference (17 Marzieievski readings) "Actual issues of public health and environmental security of Ukraine"], Kyiv, 21-22 october 2021. Kyiv, State institution "O.M. Marzieiev institute for public health" NAMSU, 2021. vol. 21. pp. 329-331.

8. Pelevin D., *Kundius K.*, Sokol O., Grinchenko V. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop. *Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021*, Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Science*s*, 2021. P p. 81-82.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 5
ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІСЬКИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 13
1.1 Міська трансформаторна підстанція як джерело магнітного поля промислової частоти в житловій зоні 13
1.2 Фактичний рівень індукції зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій, його відповідність діючим у світі та в Україні санітарно-гігієнічним нормативам для населення та необхідна ефективність його зменшення 19
1.3 Методи розрахунку зовнішнього магнітного поля трансформаторних підстанцій та їх конструктивних елементів 24
1.4 Методи зменшення зовнішнього магнітного поля трансформаторних підстанцій 31
1.5 Системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій 36
1.6 Постановка задач досліджень 43
1.7 Висновки по розділу 1 44
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІСЬКИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ 10(6)/0,4 КВ ПОТУЖНІСТЮ 100-1260 КВА 46
2.1 Експериментальні дослідження зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій та аналіз його джерел 47
2.2 Зовнішнє магнітне поле вхідних і вихідних трифазних кабелів міських трансформаторних підстанцій 53
2.3 Зовнішнє магнітне поле трансформаторів трансформаторних підстанцій ... 56
2.4 Зовнішнє магнітне поле струмопроводів трансформаторних підстанцій 58

2.5 Аналіз вкладу окремих джерел магнітного поля в сумарне зовнішнє магнітне поле трансформаторних підстанцій 68
2.6 Визначення необхідної ефективності екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій 71
2.7 Висновки по розділу 2 71
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ, ВБУДОВАНИХ У ЖИТЛОВІ БУДИНКИ..... 74
3.1 Структура та склад системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій 74
3.2 Методика синтезу системи активного екранування магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій 78
3.3 Синтез систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій .....
3.4 Аналіз результатів синтезу систем активного екранування вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100-1260 кВА..... 96
3.5 Висновки по розділу 3 98
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА УДОСКОНАЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТРУМОПРОВОДУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВБУДОВАНОЇ ТП 100 кВА..... 100
4.1 Лабораторна установка для експериментальних досліджень магнітного поля струмопроводу та системи активного екранування трансформаторних підстанцій..... 100
4.2 Програма та методика експериментальних досліджень макетів струмопроводу та синтезованої системи активного екранування 104
4.3 Результати експериментальних досліджень індукції ЗМП фізичного макету ТП 100 кВА 107
4.4 Результати експериментальних досліджень фізичного макету САЕ ЗМП ТП 100 кВА..... 108

4.5 Практичні рекомендації із побудови систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій 112
4.6 Висновки по розділу 4 114
ВИСНОВКИ 115
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 119
ДОДАТОК А 133
ДОДАТОК Б 134
ДОДАТОК В 135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МП – магнітне поле;

ЗМП – зовнішнє магнітне поле;

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров’я;

ТП – трансформаторна підстанція;

ЕМП – електромагнітне поле;

САЕ – система активного екранування;

КО – компенсаційна обмотка;

ММ – магнітний момент;

ВМП – внутрішнє магнітне поле;

ПУ – пристрій управління;

ПН – підсилювач напруги;

$ДС_{КО}$ – датчик струму компенсаційних обмоток;

$ДС_{ТП}$ – датчик струму трансформаторної підстанції;

РС – регулятор струму;

ДЖ – джерело живлення;

БК – блок системи керування струмом компенсаційної обмотки.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Проблема зменшення техногенного впливу електромагнітного поля (ЕМП) об’єктів електроенергетики на людину та навколишнє середовище є однією з найбільш значущих проблем людства. Її актуальність підтверджується великою кількістю наукових досліджень та практичних розробок за вказаною темою в розвинених країнах світу [1-18], які спрямовані на зменшення індукції магнітного поля (МП) промислової частоти в житлових будинках [19, 20], до рівня 0.2-0,3 мкТл, що рекомендований Всесвітньою організацією охорони здоров’я (ВООЗ) в зв’язку з канцерогенними властивостями цього магнітного поля (МП) при його довготривалому впливі.

Як правило, основними джерелами МП в цих дослідженнях виступають високовольтні повітряні та кабельні лінії електропередачі (ЛЕП), що проходять по великих житлових територіях поблизу житлових будинків [15-18, 21, 22]. Однак останнім часом в світі все більше уваги приділяється захисту населення від МП міських трансформаторних підстанцій (ТП), що вбудовані у житлові будинки і широко розповсюджені в різних країнах світу, в тому числі в Україні. Такі ТП розташовані на відстані 1–3 метри від житлових приміщень [3-8, 11-14, 23] і створюють в них МП, індукція якого може досягати 10 мкТл [1, 2, 9, 23-27], що більш ніж на порядок перевищує гранично припустимий рівень індукції МП 0,5 мкТл, який прийнятий в Україні [28].

Вирішення проблеми зменшення МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП до безпечного рівня традиційними методами – за допомогою пасивних електромагнітних (магнітостатичних) екранів, є проблематичним для низькочастотного МП промисловій частоти 50(60) Гц, тому що для досягнення їх ефективності в 5–15 одиниць вони стають мало технологічними і занадто металоємними [2, 8].

Більш технологічними і менш металоємними є методи активного екранування МП, які розроблені для ЛЕП [15-18, 29, 30]. Однак відомі методи та засоби активного екранування є недостатньо розвиненими для вбудованих

ТП [7, 10-14, 15]. Це в основному пов’язано з мало вивченими специфічними особливостями ТП як джерел МП. Тому створення ефективних і технологічних систем активного екранування (САЕ) для вбудованих ТП потребує більш детального вивчення ТП як джерел зовнішнього магнітного поля (ЗМП) для створення на цій основі ефективних методів синтезу САЕ.

Отже на сьогодні в наукових і прикладних дослідженнях, спрямованих на зменшення до безпечного рівня індукції МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП, розробці перспективних САЕ МП ТП приділяється недостатньо уваги. Це обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи, яка присвячена створенню САЕ ЗМП вбудованих у житлові будинки міських ТП для зменшення індукції їх МП до безпечного рівня.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХПІ». Здобувач брала участь у наступних науково-дослідних роботах:

1. «Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків» (шифр «БІОМАГ 2», № ДР 0116U005462, 2017 – 2021 рр.), участь здобувача – відповідальний виконавець.

2. «Розвиток методів та засобів нормалізації магнітного поля промислової частоти у приміщеннях житлових будинків, що створюється вбудованими трансформаторними підстанціями та побутовим електрообладнанням» (шифр «ЕКОМ», № ДР 0122U001772, 2022 – 2026 рр.), участь здобувача – виконавець окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є синтез систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих у житлові будинки міських трансформаторних підстанцій потужністю 100 – 1260 кВА для зменшення індукції їх магнітного поля до безпечного для населення рівня в прилеглих житлових приміщеннях.

Для досягнення цієї мети будуть розв’язані наступні завдання:

- теоретичні та експериментальні дослідження ЗМП розповсюджених в Україні міських ТП 10(6) кВ–0,4 кВ потужністю 100–1260 кВА; виявлення основних джерел МП ТП та визначення їх впливу на загальний рівень ЗМП вбудованих ТП; визначення необхідної ефективності екранування ЗМП ТП;

- удосконалення мультидипольної математичної моделі ЗМП струмопроводу для забезпечення можливості її використання на малих (1-2 метра) відстанях до житлових приміщень, характерних для вбудованих ТП;

- розроблення методики синтезу систем активного екранування ЗМП ТП, вбудованих у житлові будинки;

- синтез систем активного екранування ЗМП вбудованих ТП потужністю 100-1260 кВА, що забезпечують зменшення МП в житлових приміщеннях до безпечного рівня;

- експериментальна перевірка коректності удосконаленої математичної моделі ЗМП струмопроводу і розробленої методики синтезу систем активного екранування;

- розробка практичних рекомендацій з побудови систем активного екранування ЗМП вбудованих ТП.

Об'єкт дослідження – зовнішнє магнітне поле міських трансформаторних підстанцій.

Предмет дослідження – системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій.

Методи дослідження.

Дослідження, що виконані в дисертації, базуються на фундаментальних положеннях теоретичної електротехніки та методах математичного моделювання МП, методах фізичного моделювання для експериментальної перевірки розроблених теоретичних положень, аналітичних та чисельних методах аналізу та сучасних інформаційних технологіях.

Наукова новизна отриманих результатів:

В дисертації отримані наступні наукові результати:

1. Запропонована та експериментально обґрунтована удосконалена мультидипольна математична модель зовнішнього магнітного поля трифазного струмопроводу, яка ґрунтується на двофазній дипольній моделі трифазного електричного кола. Запропонована модель в порівнянні із відомою трифазною мультидипольною моделлю дозволяє без збільшення похибки вдвічі наблизити розрахункову область, та забезпечує розрахунок магнітного поля від вбудованої трансформаторної підстанції для всіх наближених до неї житлових приміщень будинку, які розташовані на відстані від одного метра.

2. Вперше розроблена та експериментально обґрунтована методика синтезу систем активного екранування магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА. Методика ґрунтується на удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі магнітного поля струмопроводу, законі Біо-Савара для визначення магнітного поля системи екранування, а також методі оптимізації елементів системи мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги і дозволяє синтезувати системи із теоретичною ефективністю 6–16 одиниць, які зменшують магнітне поле в наближених житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

3. Вперше запропоновано здійснювати синтез систем активного екранування потенційного магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій із визначенням магнітного поля не у всьому об’ємі житлового приміщення, а на контрольній площині D, яка максимально наближена до підстанції, і розташовується у приміщенні паралельно підлозі (стіни), і це дозволяє істотно зменшити обсяг обчислень при гарантованому зменшенні потенційного магнітного поля у всьому об’ємі приміщення за площиною D.

4. Набули подальшого розвитку методи розрахунку зовнішнього магнітного поля активних конструктивних елементів трансформаторної підстанції. Методи реалізовані на основі удосконаленої мультидипольної моделі магнітного поля струмопроводів, циліндричних просторових гармонік магнітного поля кабелів, та ймовірнісно-статистичного методу прогнозування

магнітного поля трансформатора, що дозволило виявити та експериментально обґрунтувати основне джерело магнітного поля підстанції – її низьковольтний струмопровід, вклад якого в загальний рівень магнітного поля на відстані 2 м складає більше 90%, що дозволяє в інженерних розрахунках не враховувати інші джерела магнітного поля.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- визначені основні джерела та фактичні рівні зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій в прилеглих житлових приміщеннях, що необхідно для створення систем активного екранування МП ТП;

- створено методику синтезу систем активного екранування МП ТП для зменшення МП в житлових приміщеннях і розроблено системи активного екранування, використання яких дозволяє зменшити рівень МП у житлових приміщеннях до безпечного рівня, та ефективно вирішити задачу захисту здоров'я населення житлових будинків з вбудованими трансформаторними підстанціями від негативної дії магнітного поля промислової частоти.

- розроблено практичні рекомендації з побудови систем активного екранування зовнішнього МП вбудованих ТП.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в Державній установі «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (м.Харків), передані до впровадження ТОВ «КиївПромЕлектроПроект» (м.Київ) для розробки нормативних документів з проектування міських трансформаторних підстанцій із екологічно безпечним для населення рівнем електромагнітного поля промислової частоти.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення і результати, що представлені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. У наукових роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належить: [31] – розрахункове співвідношення індукції МП трифазного струмопроводу на основі циліндричних просторових гармонік; [32] – результати комплексних експериментальних досліджень розподілу індукції зовнішнього МП поблизу ТП

та висновок про необхідність його зменшення, мультидипольна математична модель зовнішнього МП вбудованих ТП, обґрунтування перспективності розвитку методів активного екранування зовнішнього МП ТП; [33] – запропоновано методику синтезу систем активного екранування МП вбудованих ТП та виконано синтез системи активного екранування МП ТП з двома плоскими компенсаційними обмотками; [34] – визначено залежність індукції зовнішнього магнітного поля міських ТП різної потужності від відстані; [35] – запропонована система активного екранування МП трансформаторних підстанцій КТП (100/10/0,4); [36] – отримані результати експериментальних досліджень систем активного екранування магнітного поля трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ, 100 кВА, які підтверджують теоретичні дослідження; [37] – запропоновано удосконалену двофазну мультидипольну математичну модель зовнішнього МП основного джерела магнітного поля ТП – його трифазного струмопроводу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: науково-практичних конференціях «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення» (м. Київ, 2020 р.), «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України», (Київ, 2021р.); семінарі з інженерної оптимізації (WEO 2021), Інституту фундаментальних технологічних досліджень Польської академії наук, (Польща, Варшава, 2021р); 4-х міжнародних симпозіумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA), НТУ ХПІ, (Харків, 2017 – 2021 рр.); і 8-ми семінарах «Магнітне поле технічних об'єктів. Проблеми моделювання та вимірювання» Наукової Ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України, ДУ «ІТМП НАН України», (Харків, 2018 – 2023 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 8 наукових працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України (з них 4 статті включено до наукометричної бази даних Web of Science, та 1 з них – до наукометричної бази Scopus (Q3)) та 3 тез доповідей.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатку та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 136 сторінки, серед них: 57 ілюстрації по тексту, 17 таблиць по тексту, 3 додатка на 4-х сторінках, список використаних джерел із 107 найменування на 14-ти сторінках.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІСЬКИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У розділі на основі аналізу закордоних та вітчизняних публікацій проаналізовано конструкцію типової міської ТП та визначені її основні елементи, які створюють в оточуючому просторі МП промислової частоти. Проведено аналіз рівня індукції зовнішнього МП ТП, його відповідність діючим у світі та в Україні санітарно-гігієнічним нормативам для населення і діючим у світі біологічним стандартам для житлових будинків, та виявлена необхідність його зменшення із визначенням необхідної ефективності. Розглянуті відомі методи моделювання і розрахунку зовнішнього МП ТП та її конструктивних елементів, а також оприлюднені результати вимірювання МП ТП. Проаналізовані відомі методи зменшення до безпечного рівня зовнішнього МП ТП, в тому числі найбільш технологічні методи активного екранування МП ТП.

На основі проведеного аналізу обґрунтована необхідність подальшого розвитку методів моделювання та розрахунку МП ТП з їх експериментальною перевіркою на діючих в Україні ТП з урахуванням їх конструктивних особливостей, подальшого розвитку методів синтезу САЕ МП з експериментальною перевіркою їх ефективності, а також розробки рекомендацій з практичного застосування синтезованих САЕ. Виконана постановка задач дисертаційних досліджень.

1.1 Міська трансформаторна підстанція як джерело магнітного поля промислової частоти в житловій зоні

Міські ТП призначені для трансформування трифазної електричної енергії високої напруги (10(6) кВ) в низьку напругу (0,4 кВ) в мережі змінного

струму і розподілу електроенергії. Вони представляють собою окремо побудовану споруду, що розташовується на прибудинкової території (рис. 1.1 *а*) для електроживлення групи будинків, або вбудовуються в окремий житловий будинок (рис. 1.1 *б*) для його електроживлення. Як правило, потужність окремо побудованих міських ТП, що розташовуються не ближче 10 м від будинків [39], складає від 100 до 2000 кВА, а вбудованих ТП – від 100 до 1260 кВА. При цьому ТП можуть виконуватися з одним або двома трансформаторами, потужність яких обмежена рівнем 630 кВА для вбудованих ТП.

а) *б*)

Рисунок 1.1 – Окремо побудована (*а*) та вбудована в житловий будинок (*б*) типова міська трансформаторна підстанція

Загальний вигляд міської ТП з одним трансформатором представлений на рис. 1.2.

а) *б*)

Рисунок 1.2 – Типова конструкція комплектної міської ТП (*а*) і її розподільчого пристрою (*б*)

Типова ТП (рис. 1.3) має високовольтну частину 10 (6) кВ, що складається із трифазного високовольтного кабелю живлення і високовольтного струмопроводу, трифазного масляного понижуючого трансформатора 10(6)/0,4 кВ, а також розподільчого пристрою, що складається із трифазного низьковольтного струмопроводу 0,4 кВ з комутаційною та захисною апаратурою, та вихідних кабелів. Струмопроводи (ошинівки), виконані із жорстких електропровідних шин.

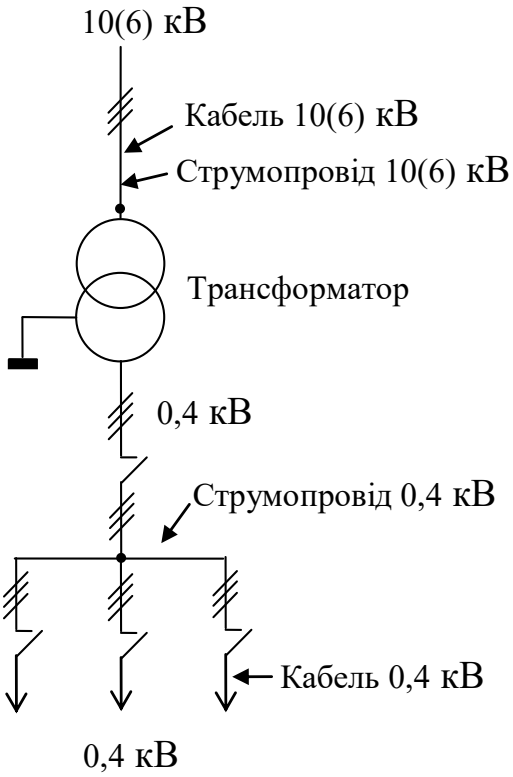


Рисунок 1.3 – Спрощена електрична схема міської трансформаторної підстанції ТП 10(6)/0,4 кВ

Визначимо основні джерела ЗМП ТП (рис. 1.2, 1.3). Під терміном ЗМП ТП розуміємо тривимірне магнітне поле ззовні приміщення ТП. При цьому припускаємо, що ТП знаходиться в просторі, вільному від джерел і вихрів, містить магнітоактивні (намагнічені та струмопровідні) конструктивні елементи, функціонує в сталих режимах, що дозволяє розглядати змінні ЗМП ТП в квазістаціонарному наближенні [40-42].

В загальному випадку математична модель ЗМП ТП, що є

низькочастотним, будується на системі рівнянь Максвелла в квазістаціонарному наближенні [41-42]:

$$rot\,\vec{H} = \vec{\delta},\ rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},\ \ div\vec{B} = 0,\ \ div\vec{D} = \rho, \tag{1.1}$$

де $\vec{H},\ \vec{B}$ – вектори напруженості і індукції магнітного поля відповідно;

$\vec{\delta}$ – щільність струму;

$\vec{E},\ \vec{D}$ – вектори напруженості і зміщення електричного поля відповідно;

ρ – щільність заряду.

Система рівнянь (1.1) є теоретичною основою для методів моделювання та розрахунку ЗМП ТП. При моделюванні ЗМП ТП вважають [41], що зовнішнє середовище не містить джерел МП, а його відносна магнітна проникність μ=1. Тоді ЗМП ТП описується, виходячи з рівняння (1.1), як:

$$\text{rot}\,\vec{H} = 0, \qquad \text{div}\,\vec{H} = 0. \tag{1.2}$$

Оскільки у зовнішній області МП ТП потенційне, воно має скалярний магнітний потенціал U, який визначається рівнянням Лапласа [42]

$$\Delta U = 0\,. \tag{1.3}$$

Тоді вектор напруженості МП визначається як [42]

$$\vec{H} = -\nabla U. \tag{1.4}$$

При цьому напруженість ЗМП ТП в довільній точці P зовнішнього простору може бути визначена [40, 41] на основі рівнянь Пуассона через параметри «магнітоактивності» джерел, локалізованих в об'ємі V: густини струму $\vec{\delta}$ струмопровідних елементів ТП і намагніченості $\vec{J}$ феромагнітних

елементів ТП

$$\vec{H}(P) = rot\frac{1}{4\pi}\int_V \frac{\vec{\delta}(x')}{r}dV \; - \nabla\frac{1}{4\pi}\int_V \left(\vec{J}(x')\cdot\nabla\left(\frac{1}{r}\right)\right)dV. \qquad (1.5)$$

В просторовій області, віддаленій від геометричного центру ТП на три його габаритних розміри, ТП з обмеженою похибкою менше 10% може розглядатися як точкове джерело магнітного поля [41] і характеризуватися дипольним магнітним моментом (ММ), який може бути відповідно до (1.5) виражений як

$$\vec{M}(t) = \int_V \vec{J}(x',t)\,dV + \frac{1}{2}\int_V \left[\vec{R},\vec{\delta}(x',t)\right]dV, \qquad (1.6)$$

де R – відстань від початку координат до елемента об'єму dV.

Тоді напруженість дипольної складової МП може бути визначена із співвідношення (1.5) [40, 41], що описує дипольну модель МП:

$$\vec{H}_d = -\nabla\frac{\left(\vec{M}_i,\vec{R}_o\right)}{4\pi\cdot R_o^3}, \qquad \vec{M}_i \in \left(\dot{\vec{M}}_\delta;\vec{M}_j\right),$$

$$\vec{M}_j = \int_V \vec{J}(x')dV = JV\vec{n},$$

$$\dot{\vec{M}}_\delta = \frac{\dot{I}}{2}\oint_L \vec{R}\,d\vec{S} = \dot{I}\,\vec{S} = \dot{I}\,S\,\vec{n}, \qquad (1.7)$$

де $\dot{\vec{M}}_\delta$ – ММ елементарних контурів зі струмом ТП;

$\vec{M}_j$ – ММ елементарних намагнічених мас з об’ємом V та намагніченістю J;

$\vec{n}$ – одиничний вектор, нормальний до площі $\vec{S}$, що утворює правогвинтову систему з напрямком струму I у контурі L.

На основі (1.7) можна виявити основні джерела ЗМП ТП (рис. 1.3). Так до них відносяться [4, 11-14] всі струмопровідні елементи (високовольтний та низьковольтні кабелі, високовольтні та низьковольтні струмопроводи і контури зі струмом трансформатора) (рис. 1.4) та намагнічені елементи (магнітопровід) трансформатора.

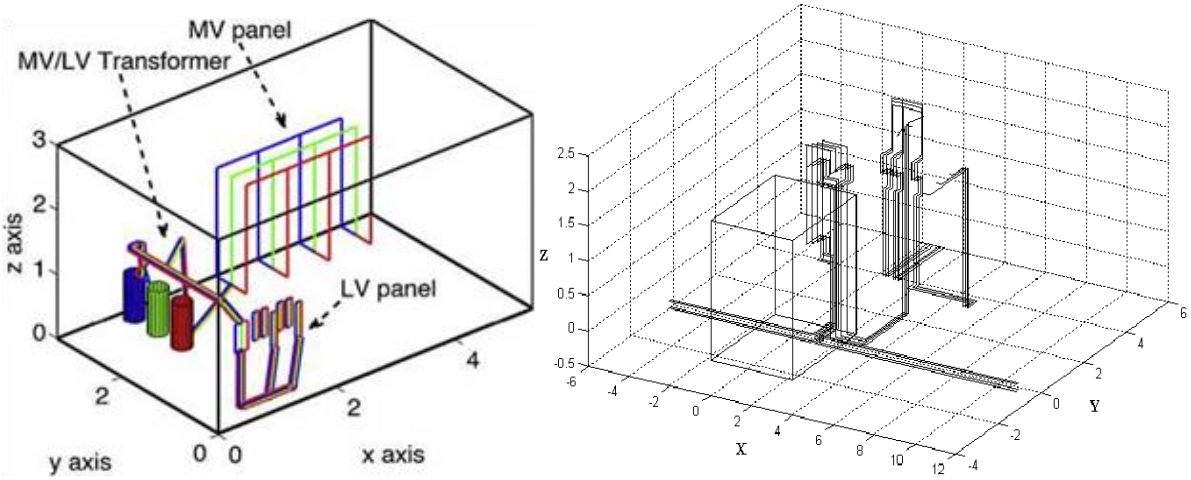


Рисунок 1.4 – Основні джерела ЗМП ТП, що визначені в [4, 11-14]

В опублікованих роботах окремі джерела МП ТП досліджені в [4, 5, 11, 12, 26, 43], де розглянуті низьковольтні та високовольтні струмопроводи та трансформатори як джерела МП, однак не розглянуті високовольтні кабелі. Крім того, трансформатор розглядається як повітряний, без урахування намагніченого магнітопроводу, що не є коректним.

Розрахунок МП струмопроводу ТП в більшості робіт виконується на основі закону Біо-Савара [4-6, 9, 18] або чисельними методами [5, 43], які є досить трудомісткими. При цьому зовсім не розглядаються методи розрахунку на основі мультидипольної моделі [21], розвиток яких можливий і для ТП, і які мають суттєву перевагу над іншими методами в разі синтезу систем активного екранування на їх основі.

Таким чином, потребують свого розвитку дослідження МП ТП з урахуванням особливостей конструктивного виконання ТП в Україні, та таких його окремих джерел, як трансформатор, високовольтні та низьковольтні кабелі, струмопроводи, а також розвитку методів розрахунку їх МП.

1.2 Фактичний рівень індукції зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій, його відповідність діючим у світі та в Україні санітарно-гігієнічним нормативам для населення та необхідна ефективність його зменшення

Питанню визначення МП ТП та аналізу його основних джерел присвячені чисельні дослідження в світі [1-3, 23-25, 27, 41, 43-49].

Результати досліджень рівня індукції МП, що створюється вбудованими ТП в житлових приміщеннях в країнах Європи [2, 3, 5, 24, 58, 49] узагальнені за максимальним значенням, та наведені на рис. 1.5. Так, рівень індукції МП ТП 10/0,4 кВ потужністю від 600 кВА до 1000 кВА фіксується у житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими ТП, і знаходиться в діапазоні 4–13 мкТл [2, 3, 5, 24, 25, 48, 49], та становить небезпеку для здоров'я населення у будинках із вбудованими ТП і потребує зменшення. Рівень індукції МП ТП у прилеглих житлових приміщеннях, розташованих збоку від вбудованих ТП, як правило, є значно меншим 0,65 мкТл [3] та 0,51 мкТл [48] і тому в подальшому може не розглядатися.

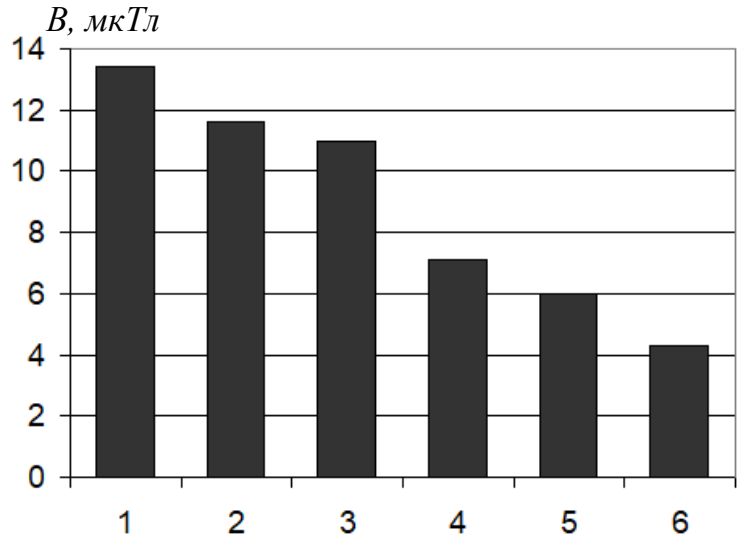


Рисунок 1.5 – Експериментально визначене МП в житлових приміщеннях будинків розташованих над вбудованими ТП потужністю до 1000 кВА в Європі (1–Фінляндія [24], 2–Сербія [2], 3–Угорщина [3], 4–Іспанія [48], 5–Швеція [5], 6–Швейцарія [49])

Загалом проблема зменшення впливу техногенного ЕМП є пріоритетною для людства, що підтверджується Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ), яка в числі не багатьох всесвітніх проектів (поряд зі змінами клімату, іонізуючою радіацією та хімічною безпекою), відкрила і з 1996 року до теперішнього часу реалізує постійно діючий Міжнародний проект з ЕМП [19] спрямований на вивчення впливу ЕМП на людину, в якому беруть участь практично всі розвинені країни світу. Членами проекту є переважна більшість європейських країн [50], виключаючи Україну.

Значне місце в дослідженнях ВООЗ займає ЕМП промислової частоти (електромережеве ЕМП), що створюється електроенергетичними об'єктами (ЛЕП та ТП). За висновками ВООЗ, низькочастотне МП при його довготривалій дії є більш небезпечним для здоров'я населення, ніж електричне поле [51]. Основою для обґрунтування цих висновків стало виявлення наприкінці 20-го сторіччя канцерогенних властивостей МП електромереж при його слабкій, але довготривалій дії на людину [52, 53] та розробка експертами ВООЗ рекомендацій щодо максимально можливого зменшення індукції МП промислової частоти в житлових будинках для зменшення вірогідності виникнення ракових захворювань у людей.

Інтенсивні дослідження ЕМП промислової частоти під егідою ВООЗ призвели у 2000–2010 рр. до докорінної зміни підходу в світі з визначення характеру впливу ЕМП промислової частоти на організм людини та використання методів захисту від його дії. Так раніше, починаючи із кінця 18-го сторіччя і до кінця 19-го сторіччя враховувався тільки сильний і миттєвий вплив на організм, який виникав під дією електричного поля з напруженістю в десятки кВ/м, що індукував в тілі людини струми, які викликали термічні ефекти, або судомне скорочення м'язів та призводили до паралічу дихання і серця. При цьому у всьому світі санітарно-гігієнічному нормуванню підлягало тільки електричне поле, рівень якого однозначно визначав ширину санітарно-захисних зон ЛЕП. Тоді як МП ЛЕП і ТП вважалося безпечним і не нормувалося. За таким принципом будувалися практично всі діючі зараз в

Україні високовольтні повітряні ЛЕП та ТП, в тому числі вбудовані ТП.

Виявлення канцерогенних властивостей та смертельної небезпеки слабкого, з індукцією в долі мкТл МП промислової частоти при його довготривалому впливі на людей, призвело до поступового введення з кінця 20-го сторіччя до теперішнього часу жорстких національних санітарних норм з індукції магнітного поля [54], постійного посилення національних санітарних норм з гранично допустимого рівня індукції МП 50–60 Гц до рекомендованого ВООЗ рівня 0,2–0,3 мкТл [20], виконання інтенсивних розробок із впровадження методів нормалізації МП у енергетичні галузі провідних країн світу.

Питання забезпечення комфортного проживання населення за магнітним полем в житлових будинках Європи, США, Канади, Австралії також регламентовані стандартом SBM–2015 «Керівництво з оцінки будівельної біології для спальних приміщень» (Standard of building biology testing methods) [55] (SBM–2015), в якому рекомендується безпечний для проживання рівень індукції МП промислової частоти 50(60) Гц, наведений у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Міжнародний стандарт SBM−2015

Рекомендації з оцінки впливу МП змінного струму (50(60) Гц) для спальних приміщень.	Рівень індукції магнітного поля (B), мкТл	Характер негативного впливу на здоров'я людини
	< 0,2	Не впливає (No Anomaly)
	0,02 – 0,1	Не значний вплив (Slight Anomaly)
	0,1 – 0,5	Великий вплив (Severe Anomaly)
	>0,5	Надзвичайно великий вплив (Extreme Anomaly)

Рекомендації щодо рівня МП в житлових приміщеннях, що зазначені в SBM–2015, визначають застереження, щодо біологічних ризиків, які з’являються в спальних районах. Згідно з табл. 1.1, серйозні аномалії (Severe Anomaly) МП відповідають рівню індукції 0,5 мкТл та мають великий

негативний влив на здоров'я людини і повинні бути обмежені хоча б на цьому рівні. Стандарт SBM–2015 широко використовується в світі для коректування вартості будинків за рівнем комфорту проживання.

В Україні вирішення проблеми санітарно-гігієнічного нормування МП промислової частоти для населення виконується в Інституті гігієни та медичної екології НАМН України (зараз Інститут громадського здоров'я НАМН України). Там під керівництвом одного із провідних вчених-гігієністів колишнього СРСР д.т.н., проф. Думанського Ю.Д., були науково обґрунтовані гранично допустимі для населення при довготривалому впливі рівні індукції МП промислової частоти величиною 0,5 мкТл [56], що прийняті у 2010 році Міненерго України для житлових приміщень [28]. Вони відповідають сучасному світовому рівню, а також рекомендаціям ВООЗ і наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Гранично допустимі рівні магнітного поля промислової частоти для населення, що діють в енергетичній галузі України

Найменування територій	Допустимий рівень індукції магнітного поля
- усередині житлових приміщень, - на відстані 50 см від стін та побутових приладів; - на території житлової забудови; - у населеній місцевості.	0,5 мкТл 3 мкТл 10 мкТл * 20 мкТл *

Діючі у світі сучасні нормативи та вимоги з допустимого рівня МП промислової частоти (50–60 Гц) для населення можна розділити на нормативи, що регламентують тільки короткотривалий вплив [57] та довготривалий вплив [20].

Прикладом широко прийнятого в Європі короткотривалого впливу на населення є рекомендації міжнародної комісії із захисту від неіонізуючих випромінювань ICNIRP (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), що для населення складають 100 мкТл [57, 58]. Але в Україні, як і в

ВООЗ, а також окремих країнах Європи, все більш прийнятою стає більш зважена концепція регламентування довготривалого впливу МП для населення.

Вимоги сучасних світових стандартів з допустимого рівня довготривалого впливу МП промислової частоти (50–60 Гц) для населення, а також національні стандарти деяких країн Європи [20, 28, 55, 59] зведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Сучасні світові стандарти з допустимого рівня довготривалого впливу МП промислової частоти (50–60 Гц) для населення

Країни/ міжнародні організації	Допустимий рівень індукції магнітного поля	Примітка
Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO)	0,2–0,3 мкТл	Рекомендації ВООЗ (довготривалий вплив)
Міжнародний стандарт SBM–2015 із забезпечення комфортного проживання населення, (Standard of building biology testing methods) Європа, США, Канада	0,5 мкТл	Умови комфортного проживання у житлових приміщеннях (довготривалий вплив)
Італія	3 мкТл	Національні стандарти
Швейцарія	1 мкТл	Національні стандарти (довготривалий вплив)
Україна	0,5 мкТл	Нормативні документи Міненерго України. (довготривалий вплив)

З табл. 1.3 витікає, що рівень індукції МП частотою 50 Гц у житлових приміщеннях повинен бути обмежений, принаймні, до рівня 0,5 мкТл, що потребує ефективності зменшення їх МП більш ніж на порядок – з 11,6 мкТл [2] до 0,5 мкТл.

1.3 Методи розрахунку зовнішнього магнітного поля трансформаторних підстанцій та їх конструктивних елементів

Для розрахунку індукції ЗМП ТП, розташованих в житлових будинках, а також рішення задачі зменшення ЗМП ТП на їх основі, у розвинених країнах світу широко використовують різноманітні методи. Найбільш поширеним є розрахунок на основі закону Біо-Савара [4-6, 9, 18]. Так, в роботі [4] викладена методика розрахунку ЗМП ТП, яка дозволяє виконати розрахунок МП всередині житлового приміщення та представляє ТП як сукупність трифазних струмопроводів, при цьому вплив інших елементів не враховується. При такому підході приймають, що струм зосереджений у центрі провідника та кожен сегмент провідника є прямою лінією.

Загальну методику методу розрахунку МП трифазних струмопроводів на основі закону Біо-Савара також представлено у [6, 9]. Суть методики полягає в тому, що струмопроводи замінюються ламаною лінією, яка складається з прямолінійних відрізків. По кожному нескінченно тонкому сегменту провідника довжиною dl протікає струм $i(t)$. Відповідно до закону Біо-Савара струм, що протікає по сегменту, генерує МП з індукцією:

$$d\,B(t) = \frac{\mu_0\, i(t)}{4\pi R^3}(d\,l \times R),$$

або

$$B(t) = \frac{\mu_0\, i(t)}{4\pi} \int_{-L}^{L} \frac{(dl \times R)}{R^3}, \qquad (1.8)$$

де передбачається, що інтегрування проводиться по прямолінійному відрізку $[-L,+L]$, уздовж якого спрямований одиничний вектор l.

Повне МП обчислюється як сума векторів індукції $\vec{B}_S$ від всіх сегментів

$$\vec{B}(t) = \sum_{s-1}^{N} \vec{B}_s(t), \tag{1.9}$$

де N – число сегментів, апроксимуючих провідник.

Всі відомі методи розрахунку, що засновані на застосуванні закону Біо-Савара, загалом дозволяють визначити рівень МП ТП, але не пристосовані до реалізації фізичної інтерпретації джерел МП ТП, яка доцільна для проведення синтезу засобів зменшення МП, в тому числі екранування. Подібними є і асимптотичні методи моделювання МП струмопроводів складної конфігурації, розроблені в [60], що також можуть бути успішно застосовані для розрахунку МП струмопроводів ТП, але вони відрізняються складністю практичної реалізації.

В [40, 61, 62] запропонований ймовірнісно-статистичний метод розрахунку ЗМП електрообладнання. Так, коректне визначення ЗМП електрообладнання, і особливо такого його виду, як електричні машини і трансформатори [61], які мають магнітопроводи, є досить складною задачею, тому що їх ЗМП визначається не стільки структурою їх активного ядра, скільки відхиленнями їх конструкцій від площинної та осьової симетрії, в тому числі технологічними [61, 62], що носять випадковий характер і визначають їх ЗМП (магнітне поле розсіяння). Тому для визначення рівня ЗМП електрообладнання використовують дипольну модель на основі його дипольних ММ з використанням стохастичного підходу, заснованого на ймовірнісно-статистичних методах обробки результатів вимірів його ММ і застосуванні методів фізичного моделювання [41, 62].

В результаті такого підходу, на основі експериментальних досліджень біля 1000 одиниць різноманітних типів електрообладнання, в [62] запропоновані розрахункові співвідношення, які дають можливість визначити математичне очікування максимальних значень ММ для різних типів електрообладнання за їхніми паспортними даними. Ці розрахункові співвідношення зведені до у табл. 1.4, і можуть бути успішно використані і для такого джерела МП, як трансформатори ТП.

Таблиця 1.4 – Розрахункові співвідношення для визначення максимальних ММ струмів електрообладнання

Тип ектро-обладнання	Математичне очікування ММ	Тип електро-обладнання	Математичне очікування ММ
Асинхр. електро-двигуни (2p=2)	$M_{\delta f} = 0{,}7 \cdot P_{АД}$	Керовані випрямлячі	$M_{\delta fl} = 0{,}218 \cdot I_d$
Асинхр. електро-двигуни (2p>2)	$M_{\delta f} = 0{,}26 \cdot P_{АД} \cdot \sin(\pi/p)$	Керовані випрямлячі	$M_{\delta П} = 0{,}18 \cdot I_d$
Синхронні машини	$M_{\delta f} = 0{,}9 \cdot P_{СМ}$	Трансфор-матори	$M_{\delta f} = 0{,}11 \cdot Q$
Синхронні машини	$M_{\delta П} = 0{,}7 \cdot P_{СМ}$	Кабелі трифазні	$M_{\delta f} = 0{,}107 \cdot I_k \cdot D_k \cdot L_k$
Машини постійного струму	$M_{\delta П} = 0{,}3 \cdot P_{МПТ} \cdot \sin(\pi/p)$	Розподільчі пристрої	$M_{\delta f} = 0{,}33\left(\sum_{i=1}^{N} I_{\phi}^2\right)^{0{,}5}$

Моделювання на основі просторових гармонік. Наступна група методів, що використовується для розрахунку МП струмопроводів, базується на застосовуванні мультипольної моделі [41] і просторових гармонік МП на її основі.

Мультипольні моделі будуються на основі загального рішення рівняння Лапласа (1.3), що представляє розкладання функції скалярного магнітного потенціалу в степеневий ряд. У сферичній системі координат загальне рішення рівняння Лапласа [41]

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} U_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^{n} \left(h_n^m \sin m\varphi + g_n^m \cos m\varphi \right) P_n^m(\cos\theta), \qquad (1.10)$$

де h_n^m, g_n^m – коефіцієнти, що не залежать від координат точки спостереження та визначають рівень відповідних просторових гармонік поля;

r, φ, θ – координати точки спостереження у сферичній системі;

$P_n^m(\cos\theta)$ – приєднані поліноми Лежандра m-того порядку.

Але такі моделі не пристосовані для розрахунку ЗМП ТП, який потрібно виконуватися поблизу поверхні ТП. Тому в умовах, коли відстань від джерела

МП до житлових приміщень в 3 рази перевищує протяжність їх струмопроводів, може бути використана дипольна модель [40], коли обмежуються тільки першим членом ряду (1.10)

$$\dot{\vec{H}}_d(P) = -\nabla \frac{\left(\vec{M}_i, \vec{R}_o\right)}{4\pi \cdot R_o^3}. \qquad (1.11)$$

Однак дипольна модель (1.11) може використовуватися [41] тільки при віддаленні точки спостереження P на відстань в 3 геометричні розміри джерела МП. Для ТП, що мають протяжні трифазні струмопроводи довжиною до 6 м [4, 6, 8, 18], ця відстань складає 18 м. Тому використання дипольної моделі (1.11) для моделювання ЗМП ТП у прилеглих приміщеннях, коли відстань до точки спостереження P складає 1–2 м, є неможливим.

Істотно зменшити відстань R до точки спостереження у порівнянні із дипольною моделлю (1.11) дозволяє мультидипольна модель (1.12) [21, 63]. При мультидипольному моделюванні струмопроводи ТП представляють у вигляді сукупності елементарних мікроконтурів менших розмірів, що характеризуються своїми дипольними ММ (магнітними диполями). Тоді струмопровід ТП характеризується сукупністю N елементарних електричних кіл обмеженої протяжності (рис. 1.6), а МП визначається як суперпозиція дипольного МП цих кіл [21, 41] відповідно до співвідношення

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\sum_{i=1}^{N}\left(\nabla \frac{\left(\dot{\vec{m}}_i, \vec{R}_i\right)}{4\pi R_i^3}\right), \; \dot{\vec{m}}_i = \dot{I}_i \cdot \vec{S}_i, \qquad (1.12)$$

де N – кількість мікроконтурів в кожному контурі струмопроводу;

$\vec{R}_i$ – радіус-вектор, спрямований з геометричного центру i-го контуру у точку спостереження P;

$\dot{\vec{m}}_i$ – дипольний ММ i-го контуру;

$\dot{I}_i$ – струм *i*-го контуру;

$\vec{S}_i$ – вектор площі *i*-го контуру.

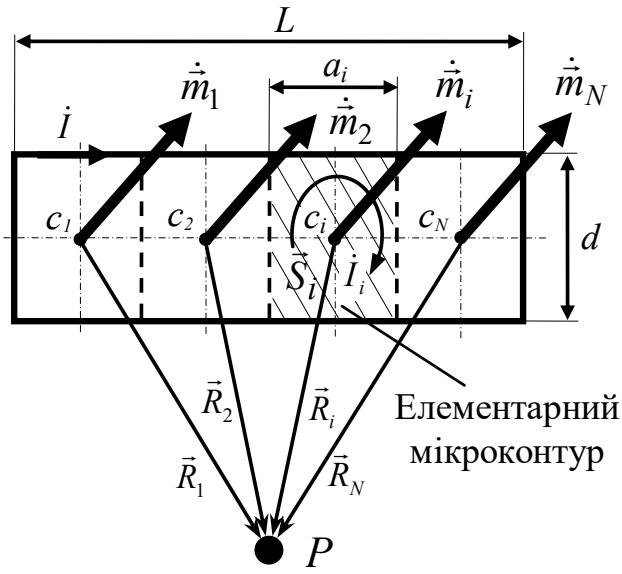


Рисунок 1.6 – Мультидипольне уявлення елементарного однофазного струмопроводу як джерела МП

Для елементарного трифазного кола мультидипольна модель будується [64] відповідно до (рис. 1.7) на основі ММ $\dot{\vec{m}}_{AB}, \dot{\vec{m}}_{BC}, \dot{\vec{m}}_{CA}$ і відповідних контурів зі струмом $\dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_{BC}$, $\dot{I}_{CA}$.

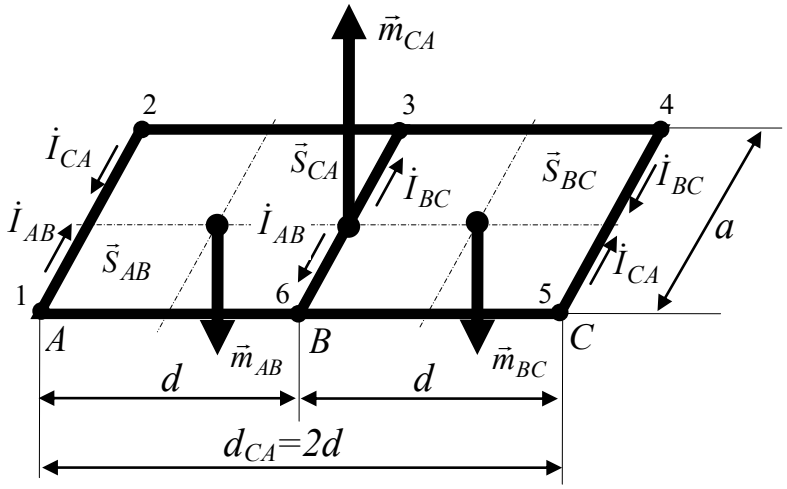


Рисунок 1.7 – Відоме дипольне уявлення елементарного трифазного електричного кола як джерела МП

При цьому МП елементарного трифазного кола (рис. 1.7) може бути представлене як:

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\nabla\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{AB}, \vec{R}_{AB}\right)}{4\pi R_{AB}^3} - \nabla\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{BC}, \vec{R}_{BC}\right)}{4\pi R_{BC}^3} - \nabla\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{CA}, \vec{R}_{CA}\right)}{4\pi R_{CA}^3}, \qquad (1.13)$$

$$\dot{\vec{m}}_{AB} = \dot{I}_{AB}\cdot\vec{S}_{AB},\ \dot{\vec{m}}_{BC} = \dot{I}_{BC}\cdot\vec{S}_{BC},\ \dot{\vec{m}}_{CA} = \dot{I}_{CA}\cdot\vec{S}_{CA},$$

де позначення відповідають (1.12).

Запропонована для ЛЕП [21] мультидипольна модель МП будується відповідно до (1.12, 1.13) на основі системи дипольних джерел МП, які характеризуються ММ $\vec{m}_i$, розташованими у геометричних центрах незалежних прямокутних мікроконтурів $d_i \times a$ з міжфазним струмом $\dot{I}_{AB}$, $\dot{I}_{BC}$, $\dot{I}_{CA}$ і площами $\vec{S}_{AB}$, $\vec{S}_{BC}$, $\vec{S}_{CA}$, на які з кроком a умовно розбиваються всі контури міжфазного (лінійного) струму струмопроводу:

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\sum_{l=1}^{G}\sum_{\alpha=1}^{3}\sum_{c}\sum_{i=1}^{N}\nabla\left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{l\alpha ci}, \vec{R}_{l\alpha ci}\right)}{4\pi R_{l\alpha ci}^3}\right];$$

$$\dot{\vec{m}}_{l\alpha ci} = \dot{I}_{l\alpha}\cdot\vec{S}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha}\cdot e^{-j\varphi_\alpha}\cdot a_i\cdot d_{l\alpha ci}\cdot\vec{n}_{l\alpha ci}, \qquad (1.14)$$

де $\vec{n}_{l\alpha ci}$ – одиничний вектор, нормальний до $S_{l\alpha ci}$;

c – ліва (л) або права (п) частина досліджуваного струмопроводу щодо точки P;

α – кількість фаз струмопроводу;

G – кількість розщеплених проводів кожної з фаз;

$d_{l\alpha ci}$ – поточна відстань між проводами різних фаз;

a_i – розмір мікроконтуру, на які умовно розбиваються всі контури струму;

інші позначення відповідають (1.12).

Похибка застосування мультидипольної моделі (1.12) так, як і дипольної (1.11), залежить від розмірів (рис. 1.7) мікроконтурів [21], та відстані R до

області застосування. Тому для гарантованого обмеження похибки мультидипольної моделі (1.14) на рівні 10% необхідно виконання умов [40]:

$$R \geq 3d_{макс} \text{ при } a_i \geq 2d;\ d_{макс} = 2d, \qquad (1.15)$$

де d – мінімальна міжфазна відстань між проводами; $d_{макс}$ – максимальна міжфазна відстань між проводами фаз при їх розташуванні на площині;

Мультидипольна модель (1.12) в порівнянні з дипольною моделлю (1.11) дозволяє зменшити відстань до області застосування за рахунок моделювання джерела МП сукупністю елементарних джерел із меншими розмірами. Однак використання цієї моделі, що розроблена для моделювання МП ЛЕП [21], для моделювання ЗМП ТП, є обмеженим. Так, відповідно до (1.14) така модель при типових величинах $d_{макс}$= 0,3 м для струмопроводів ТП дозволяє виконувати розрахунок ЗМП ТП тільки на відстанях R≥1,8 м, так як міжфазна відстань між крайніми фазами, що визначає площу $S_{СА}$, складає 2d (рис. 1.7). Але мінімальне значення R для вбудованих ТП є значно меншим (біля 1 м), що обмежує застосування цієї моделі для ТП.

Таким чином, відома мультидипольна модель (1.12) потребує удосконалення для розширення області її застосування і на вбудовані ТП при характерних мінімальних відстанях (від 1 м) від струмопроводів ТП до житлових приміщень.

Чисельні методи розрахунку. Для розрахунку ЗМП ТП широко використовуються чисельні методи [5, 8, 44, 48, 65-69]. Так, в роботі [5] використано метод скінчених елементів для оцінки рівня МП струмопроводів для ТП 10/0,4 кВ (2х800 кВА). В роботі [44] метод скінчених елементів застосовують для моделювання підземної ТП, а саме струмопроводів низької напруги.

Зазвичай чисельні методи застосовують для рішення задачі зменшення МП ТП за допомогою методу пасивного екранування [65, 66, 68, 69]. Так, в роботах [8, 68] використовують метод скінчених елементів для аналізу

ефективності екранування струмопровідного екрану для ТП 10/0,4 кВ (2х800 кВА). Розрахунки проведені у програмах «ACE» від ABB та OPERA від Vector Fields. Основним джерелом індукції МП ТП визначені струмопроводи 0,4 кВ, а їх МП розраховується на основі закону Біо-Савара.

В роботі [65] метод скінчених елементів використовують при дослідженні багатошарових пасивних екранів з феромагнітного та електропровідного матеріалу для ТП 630 кВА, а МП ТП моделюється круглою котушкою.

В [8] використовують метод інтегральних рівнянь при моделюванні МП ТП 20/0,4 кВ (2х630 кВА), для розрахунку пасивного екрану, що розміщуються над силовими трансформаторами.

В [48, 67] використано метод скінчених елементів для розрахунку МП ТП 110/10 кВ з метою визначення їх впливу на робочий персонал.

Для реалізації чисельних методів розрахунку МП ТП необхідна локалізація області їх застосування, а також використання спеціальних програмних пакетів комп'ютерного моделювання, таких як Comsol, ANSYS, FEMM, [70-72] та інші, що обмежує їх практичне використання.

Таким чином, чисельні методи громіздкі в представлені даних, потребують більш складної постановки задачі у порівнянні з аналітичними методами [69] і не дозволяють безперервно досліджувати фізику процесу - індукцію МП ТП в функції реального часу, що необхідно при реалізації САЕ ТП.

1.4 Методи зменшення зовнішнього магнітного поля трансформаторних підстанцій

Для вирішення проблеми захисту населення від негативного впливу МП електроустановок розроблені багаточисельні методи зменшення їх зовнішнього МП [7, 40, 41, 73, 74]. Основні з них, що можуть бути використані для зменшення ЗМП ТП, наведені на рис. 1.8.

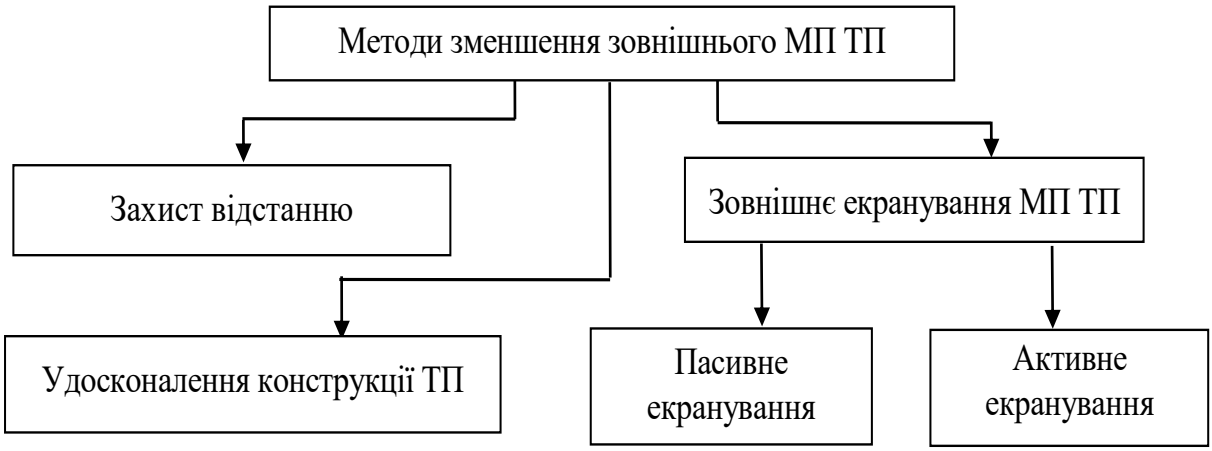


Рисунок 1.8 – Основні методи зменшення зовнішнього МП ТП

Ефективність зменшення МП визначається коефіцієнтом *SF* [2], як відношення індукції МП ТП у житлових приміщеннях до $\left|\vec{B}_{вих}\right|$ і після $\left|\vec{B}_{змен}\right|$ використання методу зменшення МП

$$SF = \frac{\left|\vec{B}_{вих}\right|}{\left|\vec{B}_{змен}\right|}. \tag{1.16}$$

Методи зменшення МП відповідно до рис. 1.8:

1) Захист відстанню. Низькочастотне МП потенційне і відповідно до (1.5) інтенсивно спадає при віддаленні від його джерела [75]. Це явище широко використовується для захисту від МП шляхом збільшення відстані від джерела МП до зони захисту (рис. 1.8). Однак використання такого методу можливо лише за наявності вільного простору, що істотно обмежує його застосування. Цей метод ефективно використовується при проектуванні окремо побудованих ТП.

2) Методи удосконалення конструкції передбачають зміну конструкції ТП, де зменшують МП за рахунок зміни просторового розташування стумопроводів ТП [1, 4, 6-8, 73, 74]. Це мінімізація міжфазної відстані трифазних струмопроводів ТП, симетрування конструкції електрообладнання ТП, екранування окремих елементів ТП. Однак ці методи можуть бути

використані тільки при проектуванні нових ТП.

Використання відомих методів удосконалення конструкцій ТП показали наступну ефективність *SF*: для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування *SF* досягає 2 одиниць [8]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок змішування фазних проводів низької напруги коефіцієнт екранування *SF* досягає 8 одиниць [7]; для ТП 20/0,4 кВ за рахунок зміни положення струмопроводів низької та високої напруги досягає 2 одиниць [4]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зменшення міжфазної відстані та положення проводів фази і нульового проводу коефіцієнт екранування *SF* досягає 6 одиниць [6]; для ТП 11/0,4 кВ за рахунок зміни конфігурації трифазних струмопроводів коефіцієнт екранування *SF* досягає 1,3 одиниці [1].

Таким чином ефективність екранування відомих методів удосконалення конструкції ТП складає 1,3–8 одиниць. Використання цих методів для діючих вбудованих ТП ускладнено тим, що зміна конструкції має технічні складнощі і юридичні обмеження, а промисловий випуск ТП в спеціальному конструктивному виконанні вимагає значних інвестицій.

3) Екранування МП ТП. Зовнішнє екранування (рис. 1.8), як правило, не потребує зміни конструкції ТП, може бути використано для вже діючих ТП і розділяється на пасивне та активне.

Метод пасивного екранування реалізується за допомогою електромагнітних екранів із електропровідних або феромагнітних елементів та їх комбінацій, що розміщуються між ТП і житловим приміщенням і є найбільш розповсюдженим у світі методом зменшення МП електрообладнання [2, 8, 26, 74]. При пасивному екрануванні фізичний ефект зменшення МП досягається або завдяки індукуванню МП в стінках електропровідного екрану струмів, що збуджують компенсуюче МП, або при використанні магнітостатичних екранів, в яких за рахунок наведення у феромагнітній оболонці екрану індукованої намагніченості, створюється компенсуюче МП [40, 74]. Особливістю методу пасивного екранування є відсутність необхідності в зовнішньому підводі енергії.

Пасивне екранування в даний час є найбільш поширеним на практиці методом зменшення МП ТП [2, 8, 26], При цьому ефективність методу пасивного екранування при обмеженій металоємності сягає 3,3–5 одиниць [2, 8, 26], що дозволяє зменшити МП ТП з рівня 1,65–2,5 мкТл до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл.

Практичне застосування методу пасивного екранування для діючих ТП показало наступну ефективність. Для ТП 10/0,4 кВА [2] при використанні пасивного екрану з феромагнітних листів коефіцієнт екранування *SF* досягає 3,6 одиниці, а для листів із провідних матеріалів досягає 4,5 одиниці. Для ТП 20/0,4 кВА [8] при використанні пасивного екрану із провідних матеріалів *SF* складає 3,3 одиниці. Для ТП 110/35 кВА [26] ефективність екранування для листів із провідних матеріалів *SF* досягає 5 одиниць.

Таким чином, метод пасивного екранування є універсальним, однак на низькій промисловій частоті 50 Гц, його реалізація при необхідності забезпечення високої ефективності екранування характеризується низькою технологічністю та високою металоємністю.

Метод активного екранування. Суть методу активного екранування полягає у формуванні у зоні захисту компенсуючого МП відповідної просторово-часової структури, суперпозиція якого з МП ТП зменшує МП у житловому приміщені до мінімального рівня [26, 76]. Особливістю методу активного екранування є необхідність зовнішнього підводу енергії.

Метод активного екранування, який реалізується за допомогою САЕ, широко використовується для зменшення МП ТП [17, 77-82]. Для формування компенсуючого МП в САЕ використовують активний контур, виконаний із контурних обмоток, розміщених певним чином відносно ТП та житлового приміщення. В залежності від конструктивного виконання, контурні обмотки розміщуються: у приміщенні ТП [10-12], у житловому приміщенні [13, 14], можуть мати просте [10, 18] та складне [13, 14] виконання.

По структурі і принципу регулювання струму у активному контурі, САЕ мають в своєму складі системи керування струмом [7, 10-14] і виконуються:

одноканальними [13, 14, 18], багатоканальними [11, 12]. Вони можуть мати замкнену [30, 83-84], розімкнену [85-87] та комбіновану [88] структуру регулювання.

Світова тенденція розвитку методів активного екранування спрямована на оптимізацію конструкції засобів активного екранування за енергоспоживанням і вартістю за умови забезпечення необхідної ефективності екранування.

Як свідчать опубліковані за кордоном публікації [11, 12, 18], САЕ, що використовуються для екранування ЗМП вбудованих ТП, мають наступну ефективність екранування *SF*: для ТП 630 кВА [11] *SF* = 3–16; для ТП 20/0,4 кВ у [12] *SF* = 3–8; для ТП 20/0,4 кВ у [18] *SF* = 6–12 одиниць.

Узагальнені результати аналізу ефективності основних методів зменшення МП ТП наведені у табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльні характеристики основних методів зменшення МП ТП

Методи зменшення МП ТП	*SF*	Технологічність	Металоємність
Удосконалення конструкції ТП	1,3–8	Юридичні та технологічні обмеження	
Пасивне екранування плоскими електропровідними (феромагнітними) листами товщиною 2–4 мм	3,3–5	Невисока	Висока
Активне екранування	3–16	Висока	Низька

Так, зменшення МП ТП методами удосконалення конструкції ТП (табл. 1.5) дозволяє зменшити МП ТП з рівня 0,65–4 мкТл до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл. Однак зміна конструкції діючих ТП технічно складна і має юридичні обмеження, а промисловий випуск ТП у спеціальному конструктивному виконанні вимагає значного часу та значних інвестицій. Тому кращими для практичної реалізації є методи екранування МП ТП.

Найбільш перспективним методом зменшення МП ТП є активне

екранування МП. Як показано (табл. 1.5), його ефективність сягає 3–16 одиниць, що дозволяє зменшити МП у житлових приміщеннях з рівня 1,5–8 мкТл до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл.

1.5 Системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

На основі аналізу відомих методів та засобів активного екранування МП ТП [7, 10-14], на рис. 1.9 представлена типова схема САЕ МП ТП.

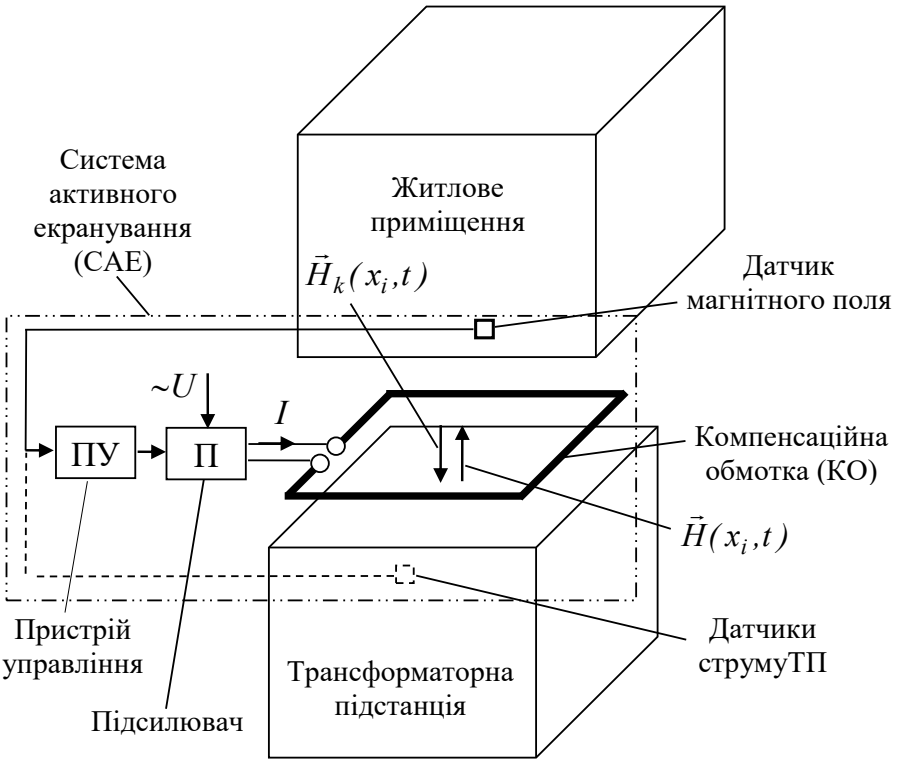


Рисунок 1.9 – Типова структурна схема САЕ МП в житловому приміщенні будинку із вбудованою ТП

САЕ має компенсаційну обмотку (КО) (активний контур), що формує компенсуюче МП у житловому приміщені, датчики (магнітного поля або струму), що вимірюють індукцію МП у житловому приміщенні (або струм ТП), та формують керуючій вплив на пристрій управління (ПУ). ПУ через підсилювач (П) потужності, в якості якого використовується або

напівпровідниковий перетворювач з ШИМ, або лінійний підсилювач звукової частоти, що керує струмом у КО.

Необхідно відмітити, що практична реалізація САЕ ТП в опублікованих закордонних роботах не розкривається.

В Україні розробці методів і засобів активного екранування МП ТП до останнього часу не приділялось належної уваги. Так, не визначена гранична ефективність методів активного екранування у порівнянні із відомими методами пасивного екранування та методами удосконалення конструкції ТП в залежності від потужності ТП, і це не дозволяє раціонально використовувати методи активного екранування для зменшення МП в житлових приміщеннях до рівня санітарних норм. На даний час відсутні методи синтезу САЕ ТП та їх елементів, не визначені шляхи створення недорогих бюджетних САЕ з ефективністю, достатньою для зменшення МП вбудованих ТП у прилеглих житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

Структура САЕ. В загальному випадку САЕ (рис 1.10) представляє собою стандартну систему автоматичного регулювання. В ній [40] в якості регульованої величини виступає ЗМП ТП, що характеризується сигналом управління $\vec{s}_{ТП}(x_i,t)$, а в якості керуючого впливу – МП КО $\vec{H}_k(x_i,t)$.

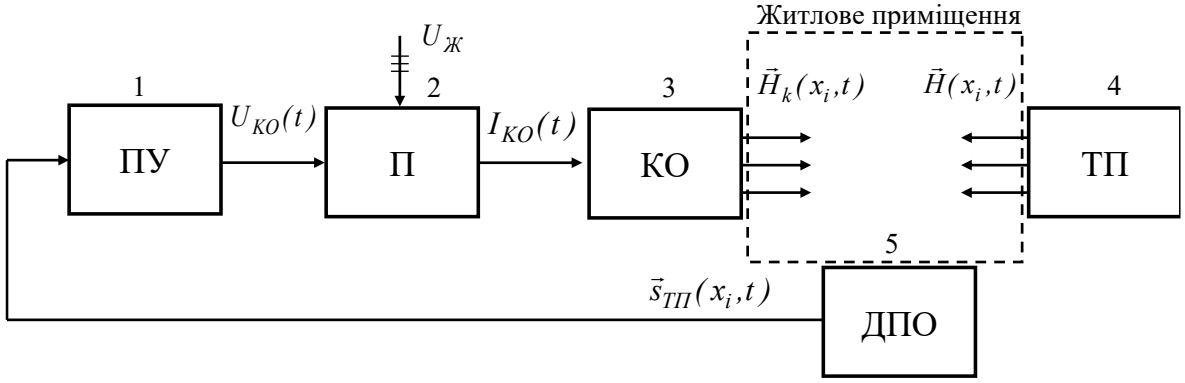


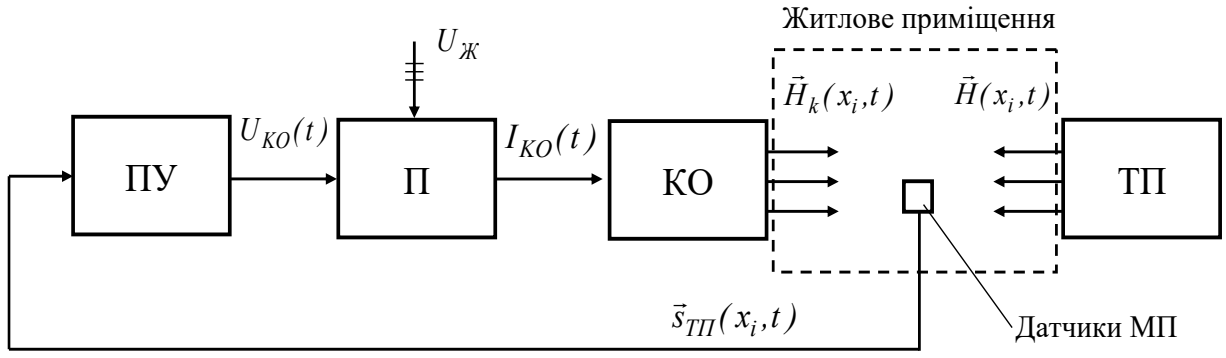
Рисунок 1.10 – Загальна структурна схема САЕ ТП

При цьому структура САЕ визначається обраним принципом автоматичного керування (по відхиленню, або по збуренню) виходячи з виду вихідної інформації $\vec{s}_{ТП}(x_i,t)$ про напруженість $\vec{H}(x_i,t)$ ЗМП ТП, що

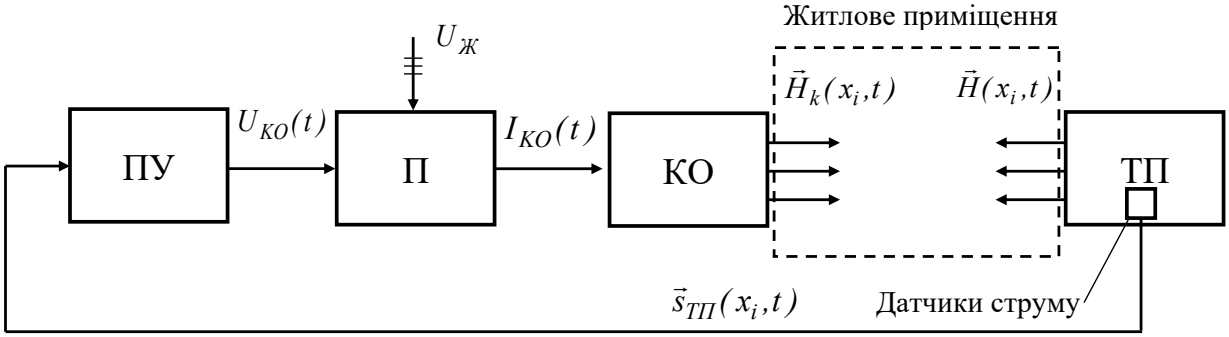
використовується для вироблення керуючого впливу. Така інформація може бути отримана у вигляді: 1) розподілу векторів напруженості МП в житловому приміщенні (рис 1.9); 2) розподілу векторів густини струму в об'ємі ТП. В другому випадку САЕ реалізує принцип регулювання по збуренню.

Відповідно до викладеного, можлива побудова двох типів САЕ (рис. 1.11), які принципово відрізняються структурами побудови й алгоритмами формування компенсуючого МП $\vec{H}_k(x_i,t)$: замкнених САК, що стежать за ЗМП ТП; розімкнених САК, що стежать за параметрами джерел ЗМП ТП, які називаються параметричними [40].

Теоретично замкнена САЕ (рис. 1.11*а*) здійснює компенсацію всіх складових ЗМП ТП незалежно від причин їх виникнення, що робить її використання дуже привабливим. Але вона більш складна в реалізації і характеризується низькою завадозахищеністю від сторонніх джерел (наприклад розташованого у житловому приміщенні побутового електрообладнання).



а)



б)

Рисунок 1.11 – Структурна схема замкненої (*а*) та розімкненої (*б*) САЕ ТП

Основними параметрами регулювання розімкненої САЕ (рис. 1.11*б*) є контурні струми $I_l(t)$, які протікають по електричних колах ТП, що передбачає необхідність фізичного доступу до елементів ТП для їх вимірювання відповідними датчиками. Крім того, розімкнена САЕ потребує попереднього налаштування коефіцієнтів передачі елементів САЕ і їх високої стабільності за час експлуатації, та використання високостабільних електронних елементів.

Метод синтезу САЕ. Для синтезу САЕ ТП (рис. 1.9) доцільно використати розроблений для САЕ ЛЕП метод [29, 30, 88], де задача синтезу САЕ зводиться до визначення вектору просторового положення та геометричних розмірів КО і векторів параметрів пристрою управління X, при яких індукція МП у m точках P_i простору екранування приймає мінімальне значення [29, 30]

$$X^* = \arg \min_{X \in \boldsymbol{X}} \max_{P_i \in \boldsymbol{P}} B(X, P_i), \tag{1.17}$$

тут X вектор шуканих параметрів САЕ

$$X = \left\{A_c, B_c, C_c, D_c, \vec{A}, \vec{\varphi}, \vec{X}, \vec{Y}\right\}, \tag{1.18}$$

де A_c, B_c, C_c, D_c – шукані матриці стану, управління, входу та виходу замкнених каналів управління;

$\vec{A}$ і $\vec{\varphi}$ – вектори шуканих амплітуд і фаз струмів розімкнутих каналів управління;

$\vec{X} = \{x_i\}, \vec{Y} = \{y_i\}$ – вектори шуканих геометричних параметрів координат просторового положення КО.

Результуюче магнітне поле, що генерується КО $\vec{B}_0(P_i, t)$ та струмопроводами $\vec{B}_0(P_i, t)$ у точці P_i визначається у наступному вигляді [29, 30]

$$\vec{B}(X,P_i,t)=\vec{B}_0(P_i,t)+\vec{B}_y(X,P_i,t). \quad (1.19)$$

В загальному вигляді задача синтезу САЕ МП промислової частоти, створюваного трифазними струмопроводами всередині заданої області простору, формулюється у вигляді задачі багатокритеріальної оптимізації векторного критерію [29, 30]

$$\vec{B}(X)=[B(X,P_1),B(X,P_2)...B(X,P_m)]^T, \quad (1.20)$$

компонентами якого є модулі вектора індукції $B(X,P_i)$ в m точках P_i розглянутого простору. При цьому, природно, враховуються обмеження на вектор керування і змінні стану у вигляді векторної нерівності та рівності [29]

$$G(X)\le G_{\max},\ H(X)=0. \quad (1.21)$$

При цьому компонентами векторного критерію та обмежень є нелінійні функції вектора шуканих параметрів регуляторів $\vec{X}$ і їх обчислення виконується на підставі закону Біо–Савара–Лапласа.

Метод вирішення сформульованої задачі. Для коректного вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації крім векторного критерію оптимізації і обмежень необхідно ще мати інформацію про бінарні відносини переваги локальних рішень один щодо одного. Основою такого формального підходу є побудова областей Парето-оптимальних рішень. Такий підхід дозволяє істотно звузити область можливих оптимальних рішень вихідної задачі багатокритеріальної оптимізації і, отже, зменшити трудомісткість особи, що приймає рішення щодо вибору єдиного варіанту оптимального рішення [29].

Задача знаходження локального мінімуму в одній точці розглянутого простору, як правило, є багатоекстремальною, що містить локальні мінімуми і

максимуми, тому, для її вирішення доцільно використовувати алгоритми стохастичної мультиагентної оптимізації [29].

Алгоритм знаходження множини Парето-оптимальних рішень багатокритеріальних задач нелінійного програмування на основі стохастичної мультиагентної оптимізації. На сьогоднішній день розроблено велику кількість алгоритмів оптимізації роєм часток – PSO алгоритмів на основі ідеї колективного інтелекту рою часток, такі як gbest PSO і lbest PSO алгоритми [29, 89]. Застосування стохастичних мультиагентних методів оптимізації для розв'язання багатокритеріальних задач на сьогоднішній день викликає певні труднощі і цей напрямок продовжує інтенсивно розвиватися [29].

Для вирішення вихідної багатокритеріальної задачі нелінійного програмування з обмеженнями розроблено [29] алгоритм стохастичної мультиагентної оптимізації на основі множини роїв часток, кількість яких дорівнює кількості компонент векторного критерію оптимізації. В стандартному алгоритмі оптимізації роєм часток зміна швидкостей часток здійснюється за лінійними законами. Для підвищення швидкості знаходження глобального рішення останнім часом набули поширення спеціальні нелінійні алгоритми стохастичної мультиагентної оптимізації, в яких рух i-тої частинки j-того рою описується наступними виразами [29]

$$\begin{gathered} v_{ij}(t+1) = w_j v_{ij}(t) + c_{1j} r_{1j}(t) H(p_{1j} - \varepsilon_{1j}(t))[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \dots \\ \dots + c_{2j} r_{2j}(t) H(p_{2j} - \varepsilon_{2j}(t))[y_j^*(t) - x_{ij}(t)] \end{gathered},$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1), \qquad (1.22)$$

де $x_{ij}(t)$, $v_{ij}(t)$ – положення і швидкість *i*-тої частинки *j*-того рою;

c_1 і c_2 – позитивні константи, які визначають ваги когнітивної та соціальної компонент швидкості руху частинки;

$r_{1j}(t)$ і $r_{2j}(t)$ – випадкові числа з діапазону [0, 1], які визначають стохастичну складову компонент швидкості руху частинки;

$y_{ij}(t)$ і y_j^* – найкращі локальне – lbest і глобальне – gbest положення *i*-тої частинки, знайдені відповідно тільки однією *i*-тою частинкою і всіма частинками *j*-того рою;

w_j – коефіцієнт інерції поліпшує якість процесу оптимізації.

В якості функції перемикання *H* руху частинки відповідно до локального $y_{ij}(t)$ і глобального y_j^* оптимуму використовується функція Хевісайда [90]. Параметри переключення когнітивної p_{1j} і соціальної p_{2j} компонент швидкості руху частинки відповідно до локального і глобального оптимуму; випадкові числа $\varepsilon_{1j}(t)$ і $\varepsilon_{2j}(t)$, визначають параметри переключення руху частки відповідно до локального і глобального оптимуму [29].

Якщо $p_{1j} < \varepsilon_{1j}(t)$ і $p_{2j} < \varepsilon_{2j}(t)$, то швидкість руху *i*-тої частинки *j*-того рою на кроці *t* не змінюється і частка рухається в тому ж напрямку що й на попередньому кроці оптимізації [29].

За допомогою окремих *j*-тих роїв вирішуються задачі оптимізації скалярних критеріїв $B(X,P_i)$, які є компонентами векторного критерію оптимізації. Для знаходження глобального рішення вихідної багатокритеріальної задачі в ході пошуків оптимальних рішень локальних критеріїв окремі рої обмінюються інформацією між собою. При цьому для обчислення швидкості руху частинок одного рою використовується інформація про глобальний оптимум, який отримано частинками іншого рою, що дозволяє виділити всі потенційні Парето-оптимальні рішення. З цією метою на кожному кроці *t* руху *i*-тої частинки *j*-того рою використовуються функції переваг локальних рішень, отриманих усіма роями. Рішення $X_j^*(t)$, отримане в ході оптимізації цільової функції $B(X(t),P_j)$ за допомогою *j*-того рою, є кращим по відношенню до рішення $X_k^*(t)$, отриманому в ході оптимізації цільової функції $B(X(t),P_k)$ за допомогою *k*-того рою, тобто $X_j^*(t) \succ X_k^*(t)$, якщо виконується умова [29, 77]

$$\max_{i=1,m} B\left(P_i, X_j^*(t)\right) < \max_{i=1,m} B\left(P_i, X_k^*(t)\right). \qquad (1.23)$$

При цьому в якості глобального оптимального рішення $X_k^*(t)$ k-того рою використовується глобальне рішення $X_j^*(t)$, отримане j-тим роєм, яке є кращим по відношенню до глобального рішення $X_k^*(t)$ k-того рою на підставі відносини переваги [29].

Фактично при такому підході реалізується основна ідея методу послідовного звуження області компромісів – з початкової множини можливих рішень на підставі інформації про відносну важливість локальних рішень послідовно видаляються всі Парето-оптимальні рішення, які не можуть бути обраними згідно з наявною інформацією про ставлення переваги. Видалення здійснюється до тих пір, поки не буде отримано глобально оптимальне рішення. В результаті застосування такого підходу на кожному кроці звуження не буде видалено жодне потенційно оптимальне рішення [29].

Реалізація синтезу САЕ ЗМП ТП на основі представленого вище методу оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги відповідно до (1.22) може бути виконана на основі прикладних комп'ютерних програм [91, 92]. Цей метод успішно використовується для синтезу САЕ МП ЛЕП [30, 77].

Також можуть бути використані інші методи оптимізації [93, 94]. Однак використання відомих методів оптимізації, розроблених для синтезу САЕ ЛЕП, для синтезу САЕ МП ТП, потребує їх удосконалення з урахуванням особливостей вбудованих ТП як джерел МП.

1.6 Постановка задач досліджень

Проведений аналіз показав, що найбільш перспективним методом зменшення МП вбудованих ТП є активне екранування. Але створення сучасних САЕ ТП потребує дослідження розподілу ЗМП типових в Україні міських ТП та вбудованих ТП та їх основі, подальшого розвитку математичних моделей та методів розрахунку тривимірного МП над вбудованими ТП та синтезу САЕ МП ТП з експериментальною перевіркою ефективності, розробки рекомендації з їх

практичної реалізації.

Виходячи з проведеного аналізу, здобувач ставить в цій роботі такі завдання:

- провести теоретичні та експериментальні дослідження ЗМП розповсюджених в Україні міських ТП 10(6) кВ–0,4 кВ потужністю 100–1260 кВА; виявити основні джерела МП ТП та визначити їх вплив на загальний рівень ЗМП вбудованих ТП; визначити необхідну ефективність екранування ЗМП ТП;

- здійснити удосконалення мультидипольної математичної моделі ЗМП струмопроводу для забезпечення можливості її використання на малих (1-2 метра) відстанях до житлових приміщень, характерних для вбудованих ТП;

- розробити методику синтезу систем активного екранування ЗМП ТП, вбудованих у житлові будинки;

- синтезувати системи активного екранування ЗМП вбудованих ТП потужністю 100-1260 кВА, що забезпечують зменшення МП в житлових приміщеннях до безпечного рівня;

- провести експериментальну перевірку коректності удосконаленої математичної моделі ЗМП струмопроводу і розробленої методики синтезу систем активного екранування;

- розробити практичні рекомендації з побудови систем активного екранування ЗМП вбудованих ТП.

1.7 Висновки по розділу 1

1. На основі аналізу відомих в світі результатів досліджень зовнішнього магнітного поля промислової частоти міських трансформаторних підстанцій, що вбудовуються у житлові будинки, та аналізу відомих методів та засобів його нормування, моделювання та зменшення до безпечного рівня, обгрунтована актуальність досліджень зовнішнього магнітного поля вбудованих у житлові будинки міських підстанцій потужністю 100–1260 кВА, та синтезу систем

активного екранування їх зовнішнього магнітного поля для вирішення завдання зменшення індукції магнітного поля в прилеглих житлових приміщеннях до безпечного рівня. Обрано напрями досліджень, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ МІСЬКИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ 10(6)/0,4 КВ ПОТУЖНІСТЮ 100-1260 КВА

У цьому розділі викладено результати експериментальних досліджень розподілу індукції ЗМП для 110 діючих міських ТП м. Харкова, в тому числі 6 вбудованих ТП та 104 окремо побудованих ТП, та проведено аналіз ТП як джерела магнітного поля; запропонована математична модель МП трифазних вхідних та вихідних кабелів ТП на основі просторових циліндричних гармонік МП та виконано розрахунок індукції МП від кабелів ТП; запропоновані розрахункові співвідношення та виконано розрахунок МП трансформаторів ТП на основі ймовірнісно-статистичного методу визначення їх ММ; виконано розвиток мультидипольної математичної моделі МП для струмопроводів ТП та здійснено розрахунок МП високовольтного та низьковольтного струмопроводів на її основі; визначені основні джерела ЗМП ТП; виконано розрахунок індукції МП в житлових приміщеннях будинків з вбудованими ТП та здійснено експериментальну перевірку результату; визначена необхідна ефективність екранування ЗМП вбудованих ТП у прилеглих житлових приміщеннях.

При аналізі МП ТП приймаємо наступні припущення:

1. ТП знаходиться в просторі, вільному від джерел і вихорів і функціонує в сталих режимах.

2. МП ТП є потенційним.

3. Вплив електропровідних та феромагнітних конструктивних елементів будинку та ТП в зоні екранування не враховується.

4. Житлові приміщення можуть мати побутове електрообладнання.

5. Всі струмопроводи ТП трифазні і їх прямолінійні елементи розташовані або в горизонтальній, або у вертикальній площині із максимальною міжфазною відстанню 0,3 м.

6. Струми струмопроводів представляються у вигляді струмових ниток.

7. Напруга мережі живлення ТП симетрична і синусоїдальна.

2.1 Експериментальні дослідження зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій та аналіз його джерел

Як показано в розділі 1 дисертації, на даний час недостатньо відомостей про розподіл індукції ЗМП діючих міських ТП в Україні, які необхідні для визначення реальних рівнів МП в зонах проживання населення, проведення оцінки індукції МП на відповідність санітарно-гігієнічним нормам (табл. 1.3) і визначення достатньої ефективності екранування ЗМП ТП, необхідної для подальшого синтезу САЕ.

Для вирішення цієї задачі здобувачем виконано експериментальні дослідження розподілу діючих значень індукції ЗМП ТП [32, 34, 37, 75]. Виміри індукції МП частоти 50 Гц здійснювались наступними магнітовимірювальними приладами ДУ ІТПМ НАН України:

- магнітометром Magnetoscop 1.069, фірми Foerster, з діапазоном вимірювання індукції 0–600 мкТл і смугою пропускання 180 Гц;

- магнітометром EMF-828, з діапазоном вимірювання індукції 0-2000 мкТл і смугою пропускання 30–300 Гц.

Дослідження виконані на 110 діючих міських ТП з них 36 – 10/0,4 кВ та 74 – 6/0,4 кВ м. Харкова номінальною потужністю (Q_{nom}) від 100 кВА до 1260 кВА. При цьому досліджено 104 ТП (рис. 1.1), розташованих в окремих будівлях біля житлових будинків, та 6 ТП, вбудованих у житлові будинки (рис. 2.1) [32, 75]. Параметри об’єктів дослідження приведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри та кількість досліджуваних ТП

Номінальна потужність ТП, рівні напруги обмоток трансформаторів	Кількість досліджених ТП
100–430 кВА, 10(6)/0,4 кВ	39
500–650 кВА, 10(6)/0,4 кВ	34
700–800 кВА, 10(6)/0,4 кВ	10
1260 кВА, 10(6)/0,4 кВ	27

а) *б)* *в)*

г) *д)* *е*)

Рисунок 2.1 – Вбудовані у житлові будинки трансформаторні підстанції
а) – вул. Миру 20, *б*) – пр. Науки 15, *в*) – вул. Чичибабіна 1,
г) – вул. Данилевського 19, *д*) – вул. Данилевського 38, *е*) – вул. Чичибабіна 2

Методика експериментальних досліджень ЗМП ТП.

У основу експерименту покладені прямі виміри діючого значення індукції МП частотою 50 Гц в заданій кількості точок за допомогою векторних магнітометрів [95, 96].

Діюче значення індукції МП в *i*-й точці вимірювання визначається по даним вимірів МП в трьох ортогональних положеннях датчика магнітометру по формулі [96]

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^{\ 2} + B_{yi}^{\ 2} + B_{zi}^{\ 2}}\,, \tag{2.1}$$

де B_{xi}, B_{yi}, B_{zi}, – виміряне діюче значення компонент індукції МП в *i*-й точці вимірювань по осях датчиків магнітометра X, Y, Z.

Як показано в [97, 98], стіни ТП, а також стіни будинків (в тому числі залізобетонні) практично не екранують МП на частоті 50 Гц, і тому у подальшому не враховуються.

Програма проведення вимірів зовнішнього магнітного поля 50 Гц зовні трансформаторних підстанцій у житловій зоні.

Програма складається з етапів:

1. Складання схеми розташування зони вимірів і ТП у житловій зоні.

2. Вибір системи координат *X*, *Y*, *Z* для зони вимірів, до якої будуть прив'язані результати вимірів. Початок координатної сітки поєдується з поверхнею корпусу ТП. При цьому вертикальна вісь *Z* спрямована «знизу – вгору», а вісь *X* слід зорієнтувати паралельно стіні будівлі з ТП.

3. Вибір сітки вимірів. Для визначення рівня спадання МП при віддаленні від ТП точки вимірювання розташувати на лініях, перпендикулярних стінам будівлі, починаючі з 0,1 м, 0,5 м, 1 м потім з кроком 1 м на висоті 1 м (рис. 2.2).

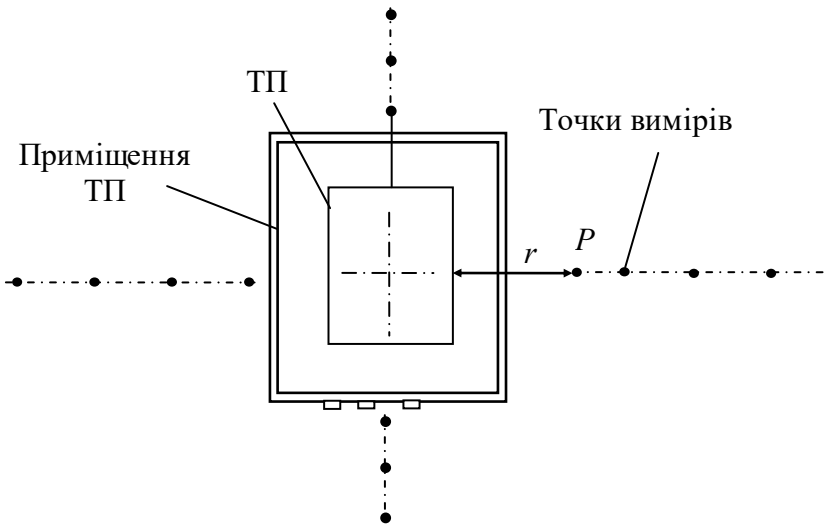


Рисунок 2.2 – Сітка вимірів магнітного поля міської ТП

4. При вимірюванні індукції МП у прилеглих житлових приміщеннях, точки вимірювання розташовувати у вузлах просторової сітки, паралельній стінам приміщень. Базова сітка вимірювань має крок 0,5 м і розташування у горизонтальній площині, на висоті 0,5 м від підлоги приміщення.

5. За допомогою координатного пристрою встановити датчик

магнітометра в точку вимірів і зорієнтувати його осі в одному з напрямків *X, Y, Z*. Провести виміри індукції просторових компонент B_x, B_y, B_z МП та фіксувати виміряні значення МП та фактичні струми у струмопроводах ТП.

6. Повторюючи процедуру по п.4 та п.5, виміряти діюче значення компонент B_x, B_y, B_z індукції МП у всіх точках сітки вимірів.

7. Уточнити крок сітки вимірів в області високих градієнтів МП, зменшивши його для мінімізації похибки вимірів.

8. Повторюючи процедуру по п. 4 – п. 6 виміряти діюче значення компонент B_x, B_y, B_z індукції МП у вузлах сітки, визначених згідно п. 7.

9. За результатами вимірів у вузлах сітки по формулі (2.1) розрахувати діюче значення індукції МП, та привести його до номінальної потужності ТП.

Результати експериментальних досліджень ЗМП ТП. Узагальнені результати експериментальних досліджень 110 діючих ТП різної потужності, які приведені до номінальної потужності цих ТП, представлені на рис. 2.3, де показано залежність максимальних значень індукції МП міських ТП при віддалені на відстань r від струмопроводу ТП [32, 34, 75].

На зовнішній стіні приміщення ТП (r = 2 м) максимальній рівень індукції МП досягає для ТП: з потужністю 1260 кВА – 8 мкТл; з потужністю 800 кВА – 4,8 мкТл; з потужністю 630 кВА – 3,2 мкТл; з потужністю 100 кВА – 2 мкТл.

Таким чином, проведені здобувачем експериментальні дослідження підтверджують, що окремо побудовані міські ТП можуть створювати індукцію МП, що вже на відстані 6–10 м не перевищує гранично-припустимий рівень (0,5 мкТл) у житлових приміщеннях.

Досліджено розподіл МП у шести будинках із вбудованими ТП (рис. 2.1). В процесі досліджень виявлено, що максимальний рівень індукції ЗМП ТП формується в приміщеннях розташованих над ТП, що підтверджується і результатами закордонних досліджень [2, 3, 5, 24, 25, 49, 50]. Тому подальші вимірювання виконувались в житлових приміщеннях, розташованих над ТП .

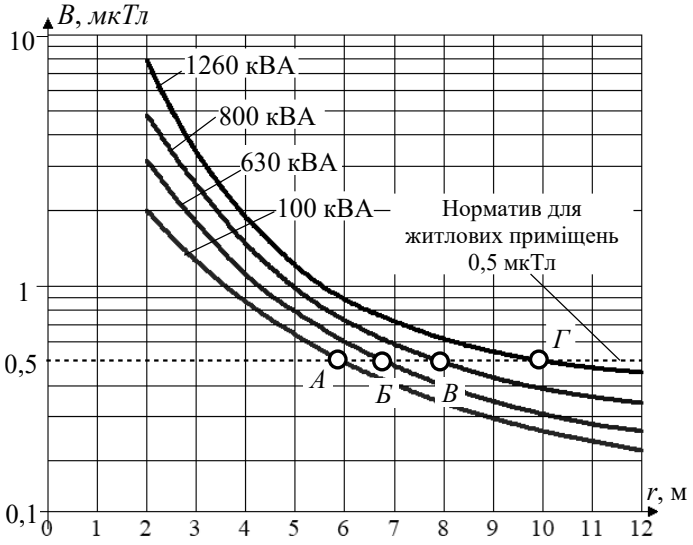


Рисунок 2.3 – Експериментально визначена залежність індукції зовнішнього МП окремо побудованих ТП різної потужності при віддаленні від ТП на відстань *r*

Узагальнені результати експериментальних досліджень приведені на рис. 2.4, де показані максимальні рівні індукції діючого значення МП 50 Гц [37].

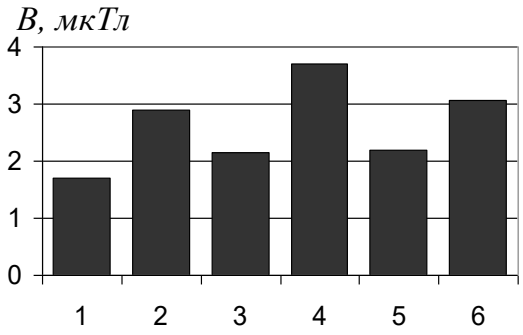


Рисунок 2.4 – Експериментально визначений максимальний рівень індукції магнітного поля 50 Гц у житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими ТП, приведений до їх номінальної потужності (1–360 кВА, 2–440 кВА, 3–630 кВА, 4–715 кВА, 5–565 кВА, 6–640 кВА)

На рис. 2.5 представлено детальний розподіл індукції МП, визначений за результатами вимірювань у житловому приміщенні, розташованому на другому поверсі будинку (рис. 2.1 *г*) над двотрансформаторною ТП потужністю 715 кВА

[32]. Відстань від струмопроводу ТП до підлоги житлового приміщення 2-го поверху становить 1,85 м. Фактичне навантаження ТП під час вимірювань становило 0,45$Q_{\text{ном}}$.

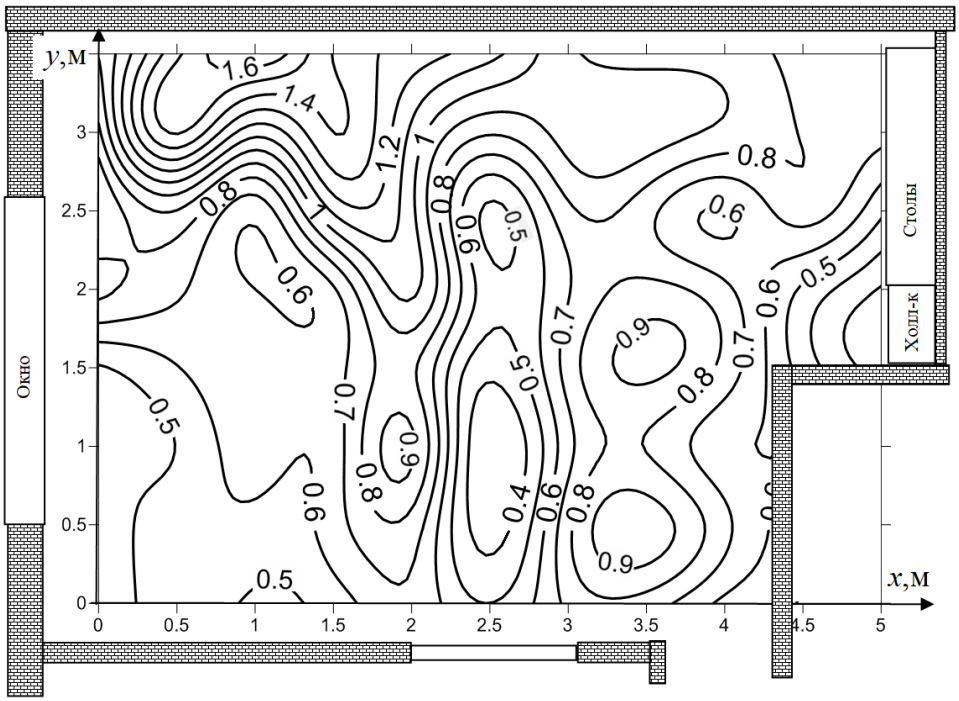


Рисунок 2.5 – Експериментально визначений розподіл діючого значення індукції МП (мкТл) на висоті 0,5 м від підлоги житлового приміщення, (рис. 2.1 *г*), розташованого над вбудованою ТП потужністю $Q_{\text{ном}}$ =715 кВА при фактичному навантаженні 0,45$Q_{\text{ном}}$

Аналіз результатів вимірів (рис. 2.5) показує, що максимальний рівень індукції МП у житловому приміщенні над вбудованою ТП становить 1,6 мкТл при неповному навантаженні ТП (0,45 $Q_{\text{ном}}$), що більш ніж у 3 рази перевищує гранично допустимий рівень 0,5 мкТл. А при номінальному навантажені значення індукції МП буде досягати 3,6 мкТл.

Проведений здобувачем у розділі 1 аналіз досліджень МП ТП, виконаних за кордоном (рис. 1.4) показує, що основними джерелами ЗМП ТП є струмопроводи, трансформатори, високовольтні та низьковольтні кабелі. Але теоретичні та експериментальні дослідження ЗМП діючих в Україні ТП та їх

основних джерел, а також визначення їх вкладу у загальний рівень ЗМП ТП у прилеглих житлових приміщеннях потребують свого розвитку.

Нижче приведені отримані здобувачем результати теоретичних досліджень таких джерел МП ТП, як вхідні і вихідні трифазні кабелі ТП, трансформатори ТП, низьковольтні та високовольтні струмопроводи ТП та визначений їх вклад у сумарне ЗМП ТП.

2.2 Зовнішнє магнітне поле вхідних і вихідних трифазних кабелів міських трансформаторних підстанцій

Як показує аналіз, проведений у розділі 1 дисертації, вхідні високовольтні і вихідні низьковольтні трифазні кабелі є одним із джерел ЗМП ТП. Для розрахунку МП трифазних кабелів використовують мультипольні моделі [21] засновані на використанні сферичних просторових гармонік. При цьому розрахункові співвідношення є досить складними, а кінцеві результати розрахунку представляються, як правило, у чисельному форматі, що ускладнює практично необхідне встановлення причинно-наслідкових зв'язків між конструктивними параметрами струмопроводів і розподілом індукції їх МП. Здобувач вирішує цю задачу за рахунок залучення методів просторового гармонічного аналізу на основі циліндричних просторових гармонік [31], що дозволяє спростити моделювання за рахунок наближення координатної поверхні до поверхні кабелю. В результаті цих досліджень [31] отримано наступне розрахункове співвідношення для визначення індукції МП на відстані r від трифазного кабелю в функції міжфазної відстані трифазного кабелю d_{AB}, d_{BC} і d_{CA} і його струмового навантаження I

$$B_l(P) \approx \mu_0 I \frac{d_{rms}}{2\sqrt{2}\pi \cdot r^2}, \qquad (2.2)$$

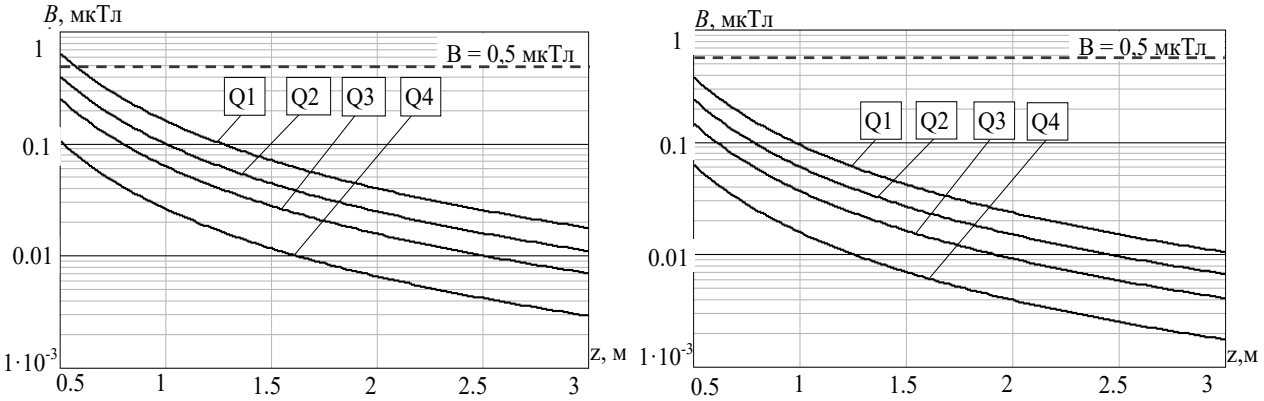
де d_{rms} – середньоквадратична відстань між фазними проводами кабелю,

$$d_{rms} = \sqrt{(d_{AB})^2 + (d_{BC})^2 + (d_{CA})^2} \ .$$

На рис. 2.6 приведено результати розрахунку індукції МП вхідних низьковольтних трифазних кабелів для ТП 10(6)/0,4кВА та визначено її відповідність нормативному рівню в житлових приміщеннях. Розрахунок МП виконано по отриманому співвідношенню (2.2) для трифазного кабелю типу АСБл 3х35 (d_{rms} = 0,026 м) для трансформаторів різної номінальної потужності Q_{nom}, відповідно до табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні данні для розрахунку індукції МП вхідних низьковольтних трифазних кабелів для ТП 10(6)/0,4 кВА

Потужність ТП, Q_{nom}, кВА		ТП 6/0,4 кВА Струм I, А	ТП 10/0,4 кВА Струм I, А
Q1	630	61	36
Q2	400	38	23
Q3	250	24	14
Q4	250	10	6



а *б*

Рисунок 2.6 – Індукція МП вхідного трифазного кабелю (АСБл 3х35) при віддаленні від осі на відстань *z* для трансформаторів потужністю Q_{nom} відповідно табл.2.2. (*а*) 6/0,4 кВ *б*) 10/0,4 кВ

На рис. 2.7 приведено результати розрахунку індукції МП вихідних трифазних кабелів та оцінено їх відповідність нормативному рівню в житлових

приміщеннях. Розрахунок МП проведено для трифазних кабелів типу АВБбШв з різним поперечним перерізом *s* алюмінієвої жили відповідно табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Вихідні данні для розрахунку індукції МП вихідних трифазних кабелів АВБбШв з різним поперечним перерізом s алюмінієвої жили

Струм I, А		s, мм^2	d_{rms}, м
1	200	120	0,034
2	170	95	0,031
3	140	70	0,028
4	110	50	0,025

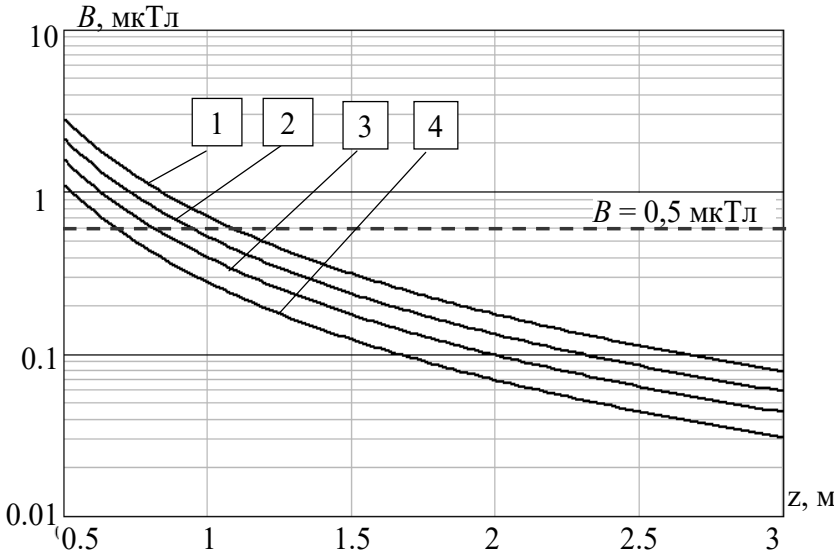


Рисунок 2.7 – Індукція МП вихідних трифазних кабелів АВБбШв при віддаленні від осі на відстань *z* відповідно табл. 2.3.

Аналіз результатів виконаного розрахунку індукції МП кабелів (рис. 2.6, 2.7) свідчить про наступне:

- рівень індукції МП вхідних високовольтних кабелів для ТП 10/0,4 кВ з трансформаторами 100–630 кВА при z = 0,5 м не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл;

- рівень індукції МП вхідних високовольтних кабелів для ТП 6/0,4 кВ з трансформаторами 100-–400 кВА при z = 0,5 м не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, а для 630кВА спадає до 0,5 мкТл при z = 0,56 м;

- рівень індукції МП вихідних трифазних кабелів при номінальному струмі спадає до 0,5 мкТл при z = 0,7–1,1 м.

Отримані розрахункові рівні індукції МП кабелів (рис. 2.6, 2.7) добре узгоджуються із верифікованою методикою розрахунку МП кабелів, викладеною в [99]. Таким чином, вхідні високовольтні та вихідні низьковольтні трифазні кабелі ТП практично не впливають на результуючий рівень індукції МП ТП.

2.3 Зовнішнє магнітне поле трансформаторів трансформаторних підстанцій

Оцінку ЗМП трансформатора виконано за допомогою розробленого у [40, 62] ймовірнісно-статистичного методу прогнозування ЗМП електрообладнання, де максимальне значення ЗМП трансформатора (рис. 2.8) визначається із використанням дипольної моделі відповідно до табл. 1.4 і співвідношення (1.7).

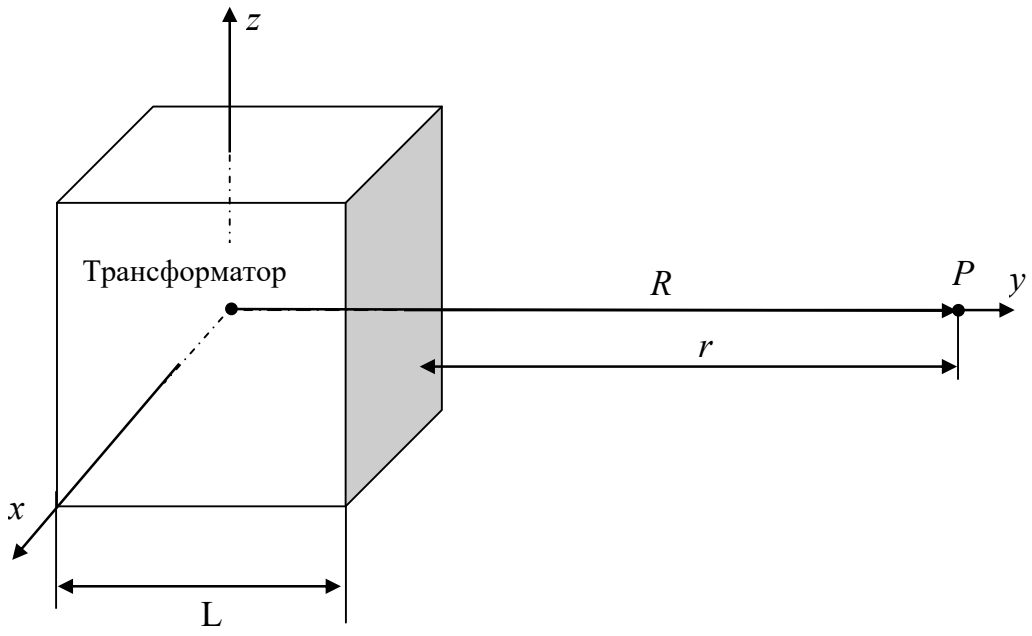


Рисунок 2.8 – До визначення ЗМП трансформатора ТП

$$B(R)_{мах} = \mu_0 \frac{M}{2\pi R^3},\ M_{махТР} = 0{,}11 Q_{ТР},\ R \geq 2L, \qquad (2.3)$$

де Q – повна паспортна потужність трансформатора (кВА);

R – відстань від геометричного центру трансформатора до точки спостереження;

L – максимальний геометричний розмір трансформатора;

M – максимальний ММ трансформатора;

μ_0 – магнітна стала.

Відповідно до (2.3) виконаємо розрахунок МП трансформаторів ТП напругою 10/0,4 кВ різної потужності при $M = 0{,}11Q$ (табл. 1.4) [62] для Q: 630 кВА – L=1,6 м; 400 кВА – L=1,46 м; 250 кВА – L=1,26 м; 160 кВА – L=1,17 м; 100 кВА – L=1,1 м. Результати розрахунку представлені на рис 2.13.

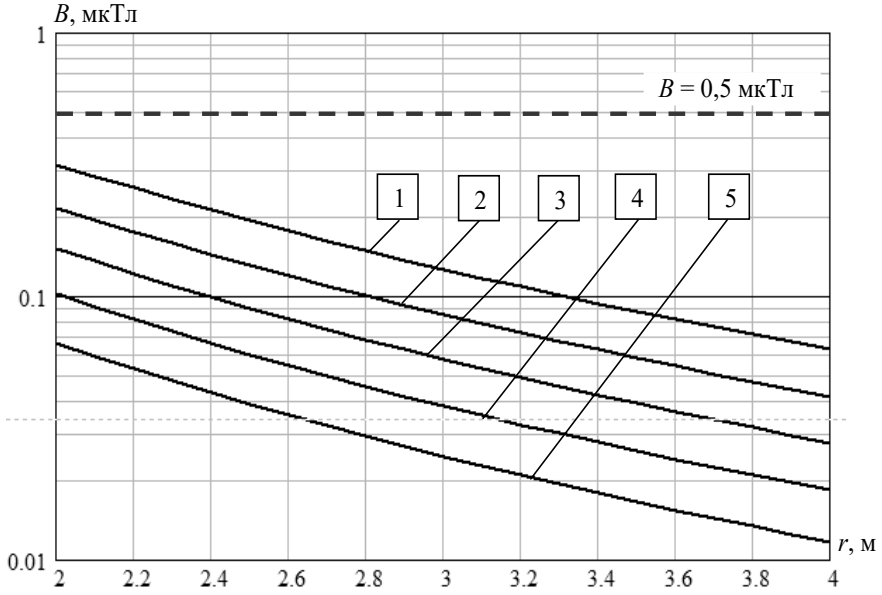


Рисунок 2.9 – Максимальна індукція ЗМП трансформаторів при віддаленні від корпусу на відстань r при потужності Q: 1 – 630 кВА, 2 – 400 кВА, 3 – 250 кВА, 4 – 160 кВА, 5 – 100 кВА.

Аналіз приведених на рис 2.9 результатів розрахунку показує, що рівень індукції МП трансформаторів при їх габаритному розмірі L =2 м (що відповідає

відстані до сусідніх з ТП житлових приміщень) не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл і складає для трансформаторів: 100 кВА – 0,066 мкТл, 160 кВА – 0,102 мкТл, 250 кВА – 0,151 мкТл, 400 кВА – 0,216 мкТл, 630 кВА – 0,316 мкТл.

Таким чином, трансформатори ТП не здійснюють істотного впливу на ЗМП ТП потужністю 100–1260 кВА, що підтверджується результатами розрахунку (рис. 2.9).

2.4 Зовнішнє магнітне поле струмопроводів трансформаторних підстанцій

Математична модель ЗМП струмопроводів вбудованої ТП. ЗМП ТП нормується у зовнішній області простору - у точках, віддалених на відстань *R* від корпусу ТП. Ця відстань становить від 1 до 3 м і перевищує відстань *d* між осями фазних струмопроводів ТП (0,05–0,5 м) [28], яка для вбудованих ТП досягає 0,3 м. Це в цілому створює умови для застосування мультидипольної математичної моделі [32, 33, 37, 38, 75] при розрахунку ЗМП ТП [41, 100, 101].

Для побудови мультидипольної моделі струмопроводу ТП приймаємо наступні припущення:

- струми струмопроводів представляються у вигляді струмових ниток;
- МП ТП є потенційним;
- всі прямолінійні частини струмопроводів ТП є плоскими і розташовані або в горизонтальній, або у вертикальній площині;
- система напруг мережі живлення ТП симетрична і синусоїдальна.

Згідно прийнятих припущень, на рис. 2.10 представлена розрахункова модель для визначення зовнішнього МП струмопроводів типового проекту ТП (рис. 2.20) із двома трансформаторами.

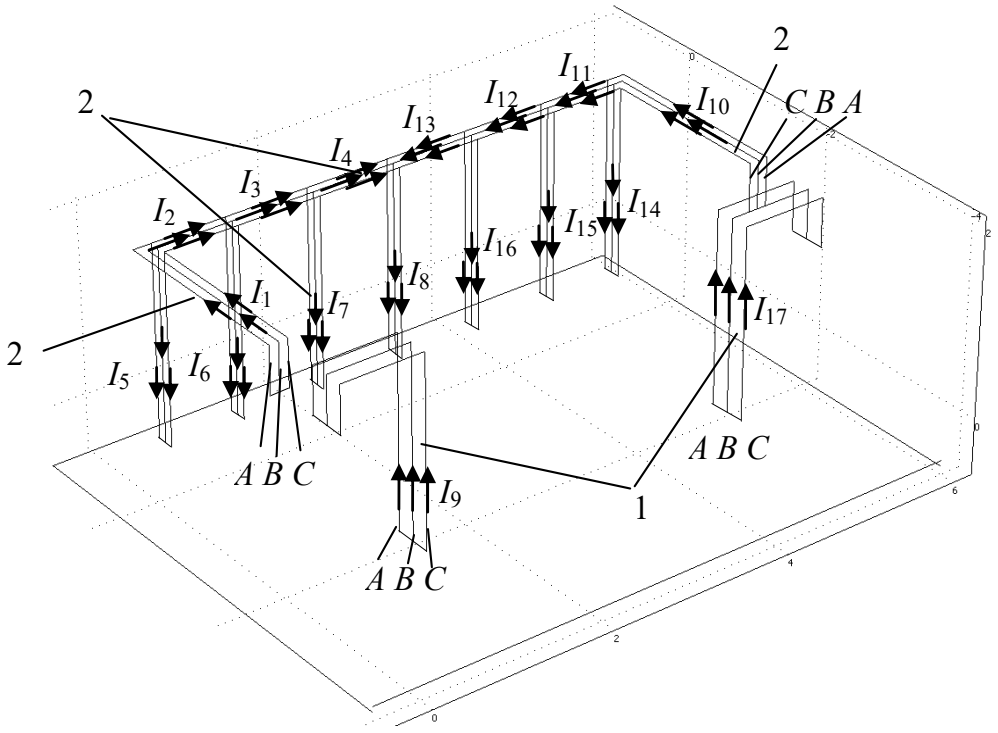
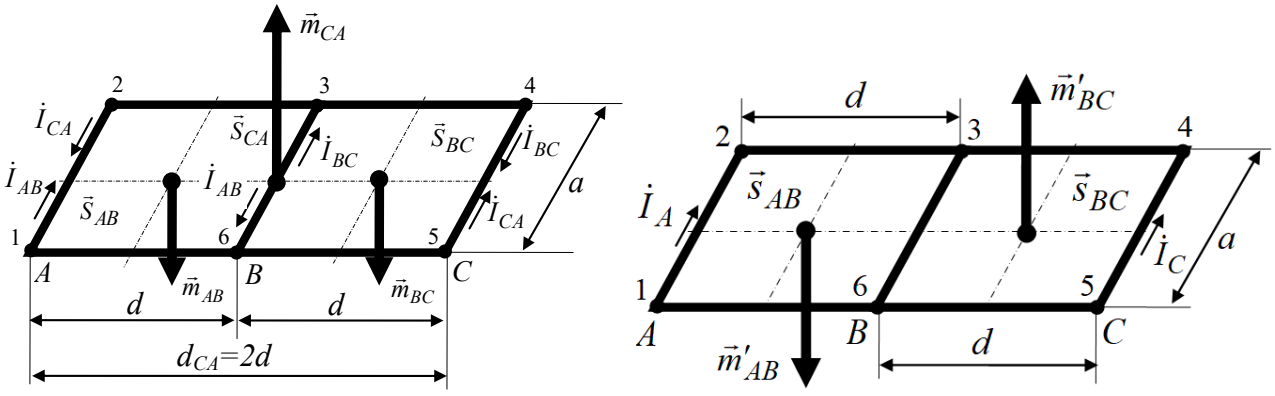


Рисунок 2.10 – Розрахункова модель типового струмопроводу ТП з двома трансформаторами

1 – струмопроводи високої напруги,

2 – струмопроводи низької напруги



а) *б)*

Рисунок 2.11 – Дипольне уявлення елементарного трифазного електричного ланцюга як джерела МП:

а) – трифазна модель,

б) – двофазна модель

Як показано в розділі 1 дисертації, МП елементарного трифазного

струмопроводу при використанні відомих методів моделювання [21] визначається як суперпозиція від МП 3-х ММ (рис. 2.11 *а*) відповідно до співвідношення (1.14) [21].

Тоді відповідно до [21] та (1.14) відома мультидипольна модель МП для трифазного струмопроводу ТП може бути представлена як:

$$\dot{\vec{B}}_{TП}(P) = -\mu_0 \sum_{l=1}^{K} \sum_{i=1}^{N} \left[\nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{ABli}, \vec{R}_{ABli} \right)}{4\pi R_{ABli}^3} \right] + \nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{BCli}, \vec{R}_{BCli} \right)}{4\pi R_{BCli}^3} \right] + \nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{CAli}, \vec{R}_{CAli} \right)}{4\pi R_{CAli}^3} \right] \right],$$

$$\dot{\vec{m}}_{ABli} = \dot{I}_{ABli} \cdot \vec{S}_{ABli} = \dot{I}_{ABli} \cdot a_{li} \cdot d_{ABli} \cdot \vec{n}_{li},$$

$$\dot{\vec{m}}_{BCli} = \dot{I}_{BCli} \cdot \vec{S}_{BCli} = \dot{I}_{BCli} \cdot a_{li} \cdot d_{BCli} \cdot \vec{n}_{li},$$

$$\dot{\vec{m}}_{CAli} = \dot{I}_{CAli} \cdot \vec{S}_{CAli} = \dot{I}_{CAli} \cdot a_{li} \cdot d_{CAli} \cdot \vec{n}_{li}, \qquad (2.4)$$

де K – кількість прямолінійних участків струмопроводу;

l – номер прямолінійного контуру ТП ($l=1...,K$);

інші позначення відповідають (1.12), (1.14).

При цьому мінімально можливий габаритний розмір елементарного мікроконтуру, який визначає умови застосування моделі (1.15) і мінімальну відстань до точки спостереження, складає подвійну міжфазну відстань (2d), і це обмежує застосування такої моделі мінімальною відстанню до розрахункової області в 6d , що при d=0,3 м складає 1,8 м. Але фактична мінімальна відстань у вбудованих ТП від струмопроводу до житлового приміщення може складати до 1 м.

Для розширення області застосування мультидипольної моделі для вбудованих ТП при малих відстанях до житлового приміщення (1–3 м), здобувачем запропоновано удосконалення мультидипольної моделі (1.14) шляхом її побудови на основі двофазної моделі трифазного контуру [64] (рис. 2.11 *б*), (рис. 1.7) замість трифазної моделі (рис. 2.11 *а*). Тоді МП елементарного трифазного струмопроводу може бути представлено як суперпозиція МП від 2-х ММ (2.5) $\dot{\vec{m}}'_{BC}, \dot{\vec{m}}'_{AB}$ замість трьох ММ $\dot{\vec{m}}_{ABli}, \dot{\vec{m}}_{BCli}, \dot{\vec{m}}_{CAli}$:

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\nabla \frac{\left(\dot{\vec{m}}'_{AB}, \vec{R}_{AB}\right)}{4\pi R_{AB}^3} - \nabla \frac{\left(\dot{\vec{m}}'_{BC}, \vec{R}_{BC}\right)}{4\pi R_{BC}^3}, \qquad (2.5)$$

$$\dot{\vec{m}}'_{AB} = \dot{I}_A \cdot \vec{S}_{AB}\,,\ \dot{\vec{m}}'_{BC} = -\dot{I}_C \cdot \vec{S}_{BC}\,,$$

де позначення відповідають (1.12), (1.14).

При цьому максимальний габаритний розмір елементарного мікроконтуру (рис. 2.11) зменшується із 2*d* *до d,* що дозволяє вдвічі зменшити відстань до області застосування моделі – із 6*d* до 3*d* (до 0,9 м).

Розподіл ММ мікроконтурів прямолінійної частини трифазного струмопроводу при використанні запропонованої удосконаленої моделі представлений на рис. 2.12.

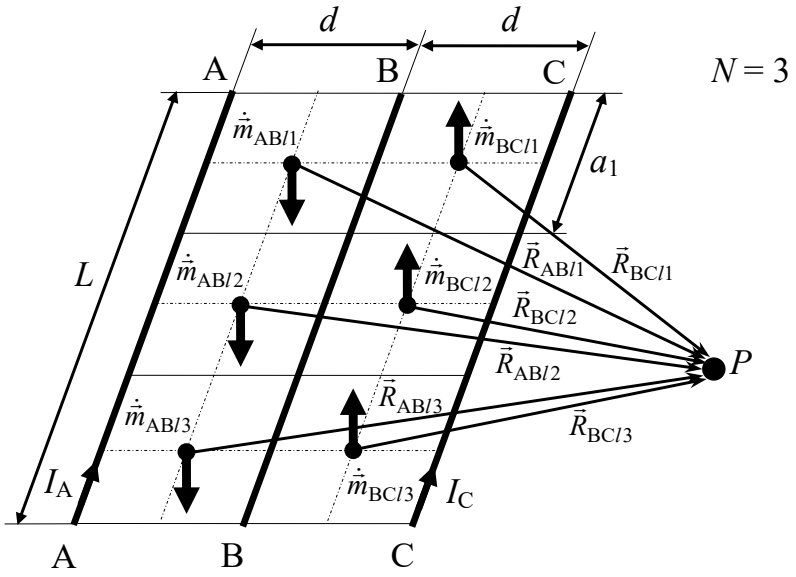


Рисунок 2.12 –Двофазне мультидипольне уявлення МП прямолінійної частини трифазного струмопроводу

При цьому індукція МП частини (рис. 2.12) струмопроводу складе:

$$\vec{B}_{TII}(P) = -\mu_0 \sum_{i=1}^{N} \left[\nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{ABi}, \vec{R}_{ABi}\right)}{4\pi R_{ABi}^3} \right] + \nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{BCi}, \vec{R}_{BCi}\right)}{4\pi R_{BCi}^3} \right] \right],$$

$$\dot{\vec{m}}_{ABi} = \dot{I}_{Ai} \cdot \vec{S}_{ABi} = \dot{I}_{Ai} \cdot a_i \cdot d \cdot \vec{n}_i\,,\ \dot{\vec{m}}_{BCi} = -\dot{I}_{Ci} \cdot \vec{S}_{BCi} = -\dot{I}_{Ci} \cdot a_i \cdot d \cdot \vec{n}_i\,.$$

Тоді на основі викладеного та (2.5), (1.13) отримаємо наступну удосконалену мультидипольну математичну модель МП реального трифазного струмопроводу ТП, що складається із K прямолінійних контурів, які мають N двофазних мікроконтурів [37, 75]:

$$\vec{B}_{TП}(P) = -\mu_0 \sum_{l=1}^{K} \sum_{i=1}^{N} \left[\nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{ABli}, \vec{R}_{ABli} \right)}{4\pi R_{ABli}^3} \right] + \nabla \left[\frac{\left(\dot{\vec{m}}_{BCli}, \vec{R}_{BCli} \right)}{4\pi R_{BCli}^3} \right] \right] \tag{2.6}$$

$$\dot{\vec{m}}_{ABli} = \dot{I}_{Ali} \cdot \vec{S}_{ABli} = \dot{I}_{Ali} \cdot a_i \cdot d_l \cdot \vec{n}_{li},$$

$$\dot{\vec{m}}_{BCli} = -\dot{I}_{Cli} \cdot \vec{S}_{BCli} = -\dot{I}_{Cli} \cdot a_i \cdot d_l \cdot \vec{n}_{li},$$

де позначення відповідають (1.12), (1.14) та (2.4).

На рис. 2.13 представлена схема розподілу ММ лівої частини низьковольтного струмопроводу ТП (рис. 2.10) при реалізації запропонованої удосконаленої двофазної мультидипольної моделі (2.6) [37].

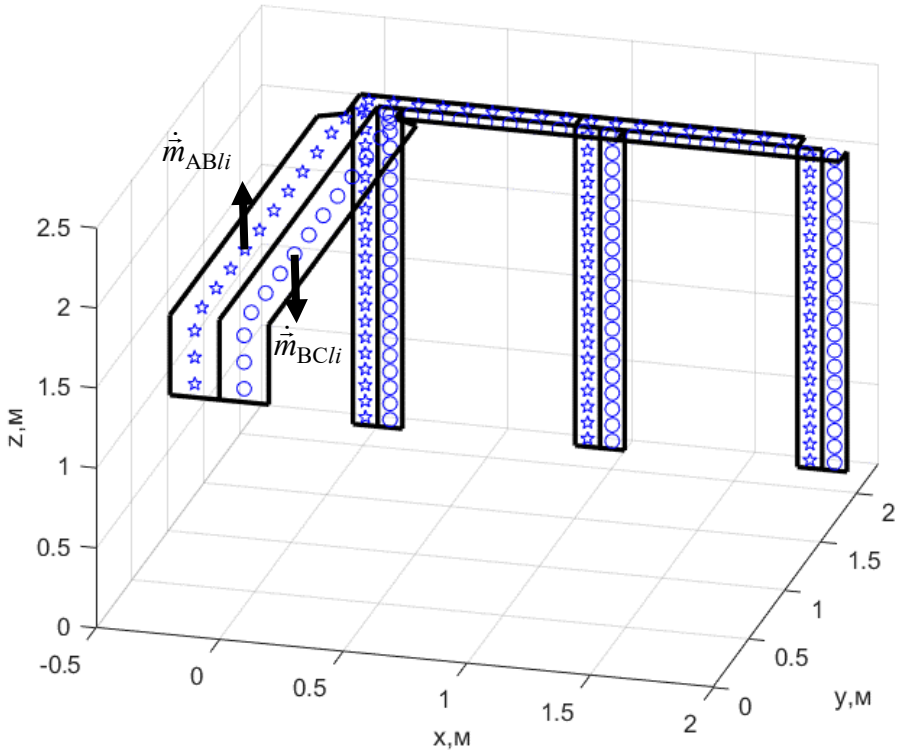


Рисунок 2.13 – Розподіл ММ мікроконтурів низьковольтного струмопроводу ТП (рис. 2.10) при використанні удосконаленої мультидипольної математичної моделі його МП

Таким чином, запропонована здобувачем удосконалена двофазна мультидипольна математична модель МП ТП (2.6) дозволяє вдвічі наблизити розрахункову область за рахунок зменшення мінімального габаритного розміру мікроконтуру – із подвійної міжфазної відстані *2d* (1.15) до міжфазної відстані *d*, що робить можливим моделювання ЗМП для всіх вбудованих ТП при відстанях від 1 м до їх струмопроводів. Крім того, удосконалена модель (2.6) дозволяє зменшити обсяг обчислень за рахунок відповідного зменшення кількості ММ у порівнянні із відомою моделлю (2.4) [37].

Тому запропонована удосконалена мультидипольна математична модель (2.6) має вказані вище істотні переваги над відомою моделлю і в подальшому використовується здобувачем для розрахунку ЗМП струмопроводів ТП, а також для синтезу систем активного екранування МП ТП на її основі.

Здійснимо верифікацію запропонованої удосконаленої моделі ЗМП ТП (2.6) на прикладі вбудованої ТП потужністю 715 кВА (рис. 2.1 *г*) шляхом порівняння результату розрахунку МП із результатами вимірів індукції МП в житловому приміщенні (рис. 2.5) розташованому над діючою ТП, а також її верифікацію на основі порівняння результатів розрахунку МП струмопроводу ТП 100 кВА і вимірів індукції МП повномасштабного лабораторного макету цього струмопроводу.

Верифікація запропонованої удосконаленої мультидипольної математичної моделі ЗМП ТП на реальному об'єкті – житловому приміщенні над вбудованою ТП 715 кВА.

Експериментальні дослідження виконувалися в житловому будинку (рис. 2.1 г) із діючою вбудованою двотрансформаторною ТП 715 кВА.

Розрахункова схема ТП 715 кВА відповідає рис. 2.14. і містить 18 прямолінійних трифазних струмових контурів (K=18) з наданими на рис. 2.14 розмірами та фактичними струмами I_1=312 А, I_2=208 А, I_3=108 А, I_4=104 А, I_5=100 А, I_6=108 А, I_7=21 А, I_8=174 А, I_9=114 А, I_{10}=62 А, I_{11}=60 А, I_{12}=52 А, I_{13}=62 А, I_{14}=12 А, які визначені експериментально при навантаженні ТП 0,45 Q_{nom}.

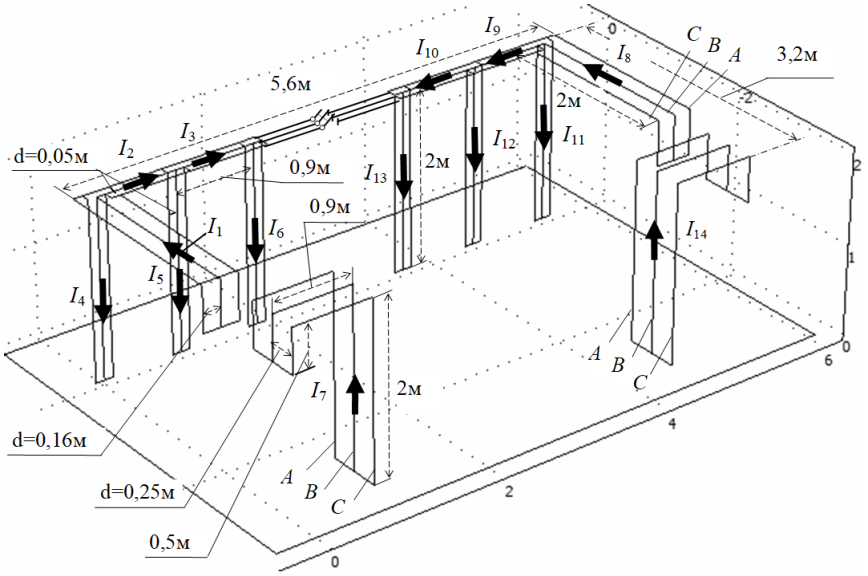


Рисунок 2.14 – Геометрія струмопроводів досліджуваної вбудованої двотрансформаторної ТП 715 кВА

Результати розрахунку індукції МП у горизонтальній площині, розташованій на висоті 2,35 м над ТП (0,5 м від підлоги розташованого над ТП житлового приміщення), виконані відповідно до (2.6) та представлені на рис. 2.15 [32].

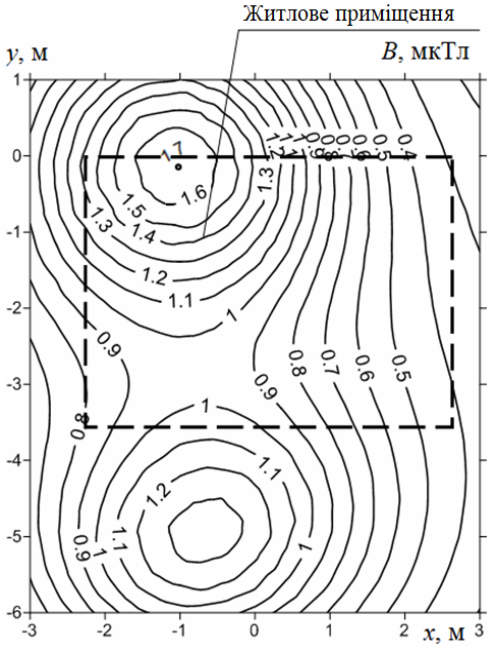


Рисунок 2.15 – Розрахункові значення розподілу індукції МП на висоті 0,5 м від підлоги житлового приміщення (рис. 2.1 *г*), розташованого над вбудованою ТП потужністю $Q_{\text{ном}}$ =715 кВА при розрахунковому навантаженні 0,45 $Q_{\text{ном}}$.

Порівняння результатів розрахунку (рис. 2.15) з результатами експерименту (рис. 2.5) свідчить, що максимальне розрахункове значення індукції МП (1,7 мкТл) з похибкою менше ніж 10% збігається з результатами експерименту (1,6 мкТл). Це підтверджує коректність запропонованої здобувачем моделі розрахунку індукції ЗМП ТП та прийнятих вище припущень [32].

Верифікація запропонованої спрощеної двофазної математичної моделі ЗМП ТП на лабораторному макеті вбудованої ТП потужністю 100 кВА.

Розрахункова схема ТП 100 кВА представлена на рис. 2.16, де ЗМП ТП моделюється низьковольтним та високовольтним струмопроводами.

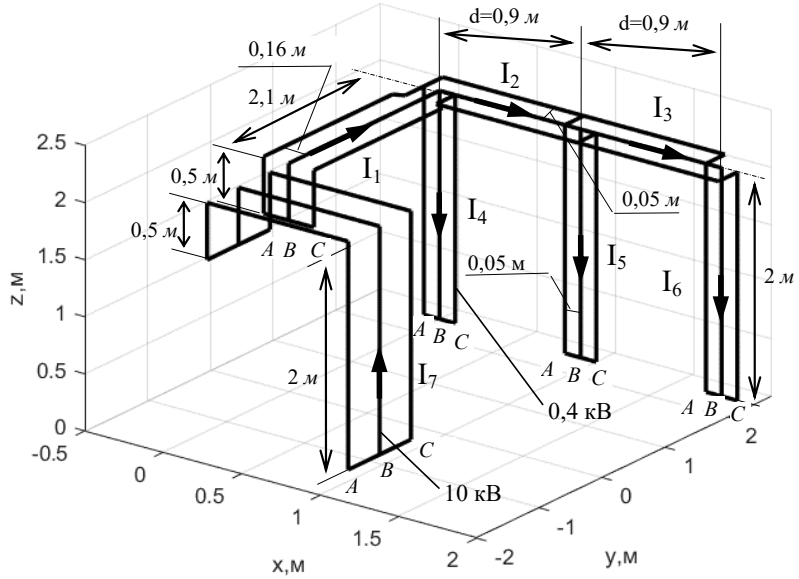


Рисунок 2.16 – Низьковольтні та високовольтні струмопроводи ТП 100 кВА

$I_{ном1}$ = 150 А (0,4 кВ); $I_{ном2}$ = 6 А (10 кВ);

$I_1 = I_{ном1}$; $I_2 = 2/3\ I_{ном1}$, $I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 1/3 I_{ном1}$; $I_7 = I_{ном2}$

Розрахунок МП ТП (рис. 2.19) виконано по (2.6) на горизонтальній площині, розташованій на висоті 1,835 м над струмопроводом ТП (на висоті 0,5 м над підлогою приміщення). Результати розрахунку представлені на рис. 2.17.

Аналіз приведених на рис. 2.17 результатів розрахунку показує, що високовольтні струмопроводи ТП не здійснюють істотного впливу на ЗМП ТП і в подальшому можуть не враховуватися.

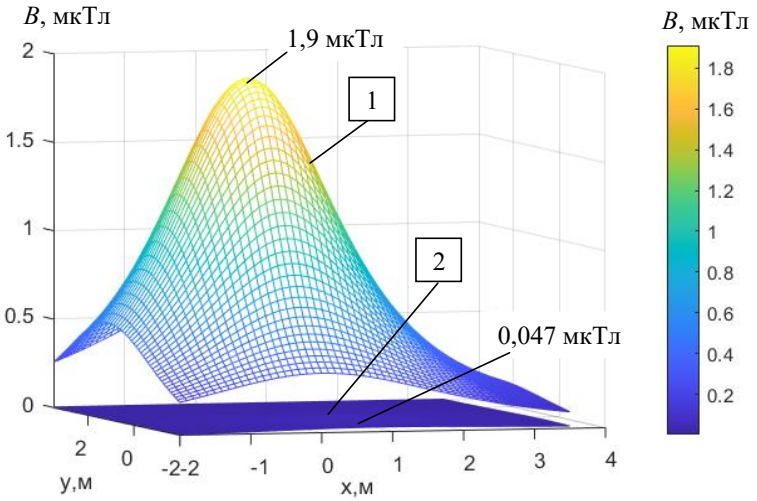


Рисунок 2.17 – Розрахункові значення розподілу ЗМП струмопроводів над ТП 100 кВА при номінальному навантаженні: 1 – ЗМП низьковольтних струмопроводів; 2 – ЗМП високовольтних струмопроводів

Верифікацію запропонованої здобувачем спрощеної двофазної математичної моделі ЗМП ТП (2.6) здійснимо на прикладі низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 2.18) [37].

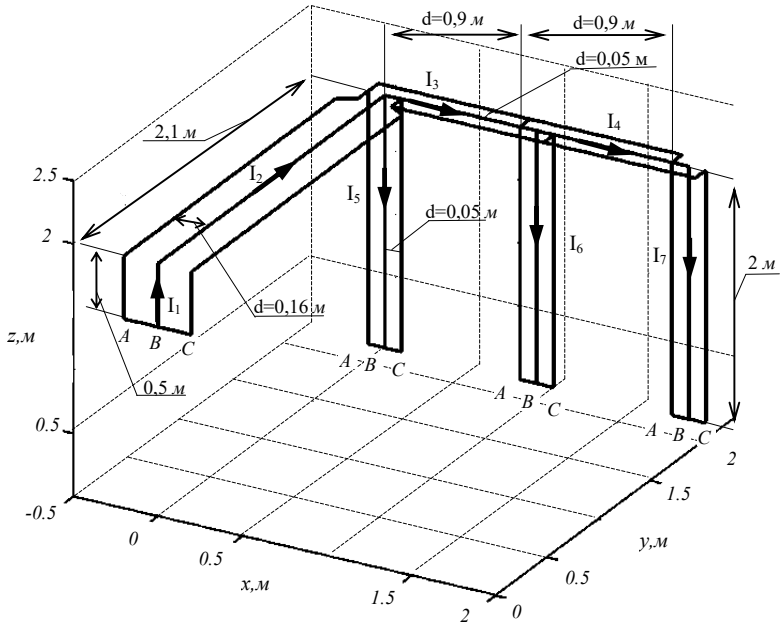
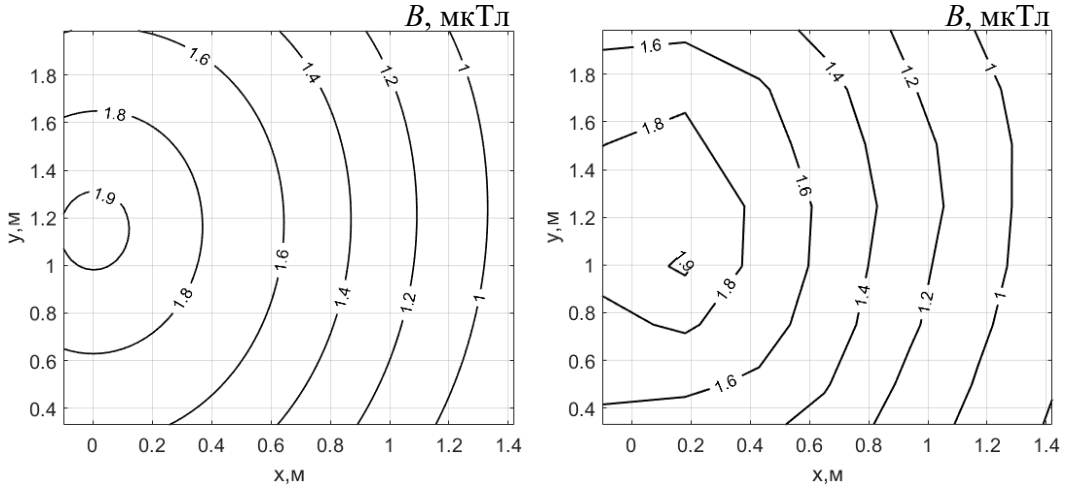


Рисунок 2.18 – Низьковольтний струмопровід ТП 100 кВА

$I_{ном}$ = 150 А (0,4 кВ); $I_1 = I_2 = I_{ном}$; I_3 =2/3 $I_{ном}$, $I_4 = I_5 = I_6 = I_7$ =1/3$I_{ном}$

Результати розрахунку індукції МП у горизонтальній площині, розташованій на висоті 1,835 м над струмопроводом ТП представлені на рис. 2.19*а* та табл. 2.4 [37].



а) *б)*

Рисунок 2.19 – Розподіл ЗМП ТП 100 кВА в горизонтальній площині над ТП на висоті 1,835 м над ТП при номінальному навантаженні:
(*а*) – розрахунок; (*б*) – експеримент

Експериментальні дослідження ЗМП ТП проведені на створеному здобувачем повномасштабному лабораторному макеті ТП 100 кВА, де джерелом МП є низьковольтний струмопровід (рис. 2.18) [37]. Опис лабораторного макету ТП (рис. 4.1) та методика вимірювання представлені в розділі 4 дисертації. Результати вимірів індукції ЗМП макету ТП представлені на рис. 2.19*б* та табл. 2.4.

Порівняння результатів розрахунку (рис. 2.19*а*, табл. 2.4) з результатами експерименту (рис. 2.19*б*, табл. 2.4) показує, що розрахункове значення індукції МП з похибкою менше 7% збігається з результатами експерименту. Це підтверджує коректність запропонованої здобувачем удосконаленої двофазної мультидипольної моделі ЗМП ТП та прийнятих вище припущень.

Таким чином, здобувачем запропоновано удосконалену двофазну мультидипольну математичну модель для розрахунку ЗМП струмопроводів ТП (2.6) та виконано її експериментальну перевірку в приміщенні реального

житлового будинку із вбудованою ТП та на лабораторному макеті струмопроводу ТП 100 кВА. Порівняння результатів розрахунку та експерименту (розкид максимальних значень індукції МП не більш 7%, підтверджує коректність запропонованої удосконаленої математичної моделі та розрахункових співвідношень на її основі.

Таблиця 2.4 – Результати порівняння розрахунку та вимірів ЗМП ТП 100 кВА

x, м	*y*, м	Розрахунок *B*, мкТл	Експеримент *B*, мкТл	Похибка, %
–0,1	0,33	1,630	1,526	6,38
0,43	0,33	1,520	1,443	5,07
0,94	0,33	1,162	1,098	5,51
1,42	0,33	0,817	0,779	4,65
0,18	0,5	1,715	1,640	4,37
0,65	0,5	1,453	1,418	2,41
1,17	0,5	1,036	0,984	5,02
–0,1	0,75	1,836	1,757	4,30
0,94	0,75	1,287	1,230	4,43
0,18	1	1,874	1,914	2,13
0,65	1	1,584	1,546	2,40
–0,1	1,25	1,898	1,863	1,84
0,43	1,25	1,760	1,785	1,42
0,94	1,25	1,335	1,302	2,47
1,42	1,25	0,931	0,886	4,83
0,18	1,51	1,832	1,847	0,82
0,65	1,51	1,559	1,524	2,25
–0,1	1,74	1,746	1,700	2,63
0,43	1,74	1,638	1,625	0,79
0,94	1,74	1,264	1,214	3,96
1,42	1,74	0,898	0,876	2,45
0,18	1,99	1,595	1,556	2,45
0,65	1,99	1,386	1,345	2,96

2.5 Аналіз вкладу окремих джерел магнітного поля в сумарне зовнішнє магнітне поле трансформаторних підстанцій

Аналіз виконаємо для ТП максимальної потужності на прикладі двотрансформаторної підстанції ТП-2-77/79-630 сумарною потужністю

1260 кВА, розрахункова схема струмопроводів якої представлена на рис. 2.10. Конструктивне виконання ТП представлено на рис. 2.20.

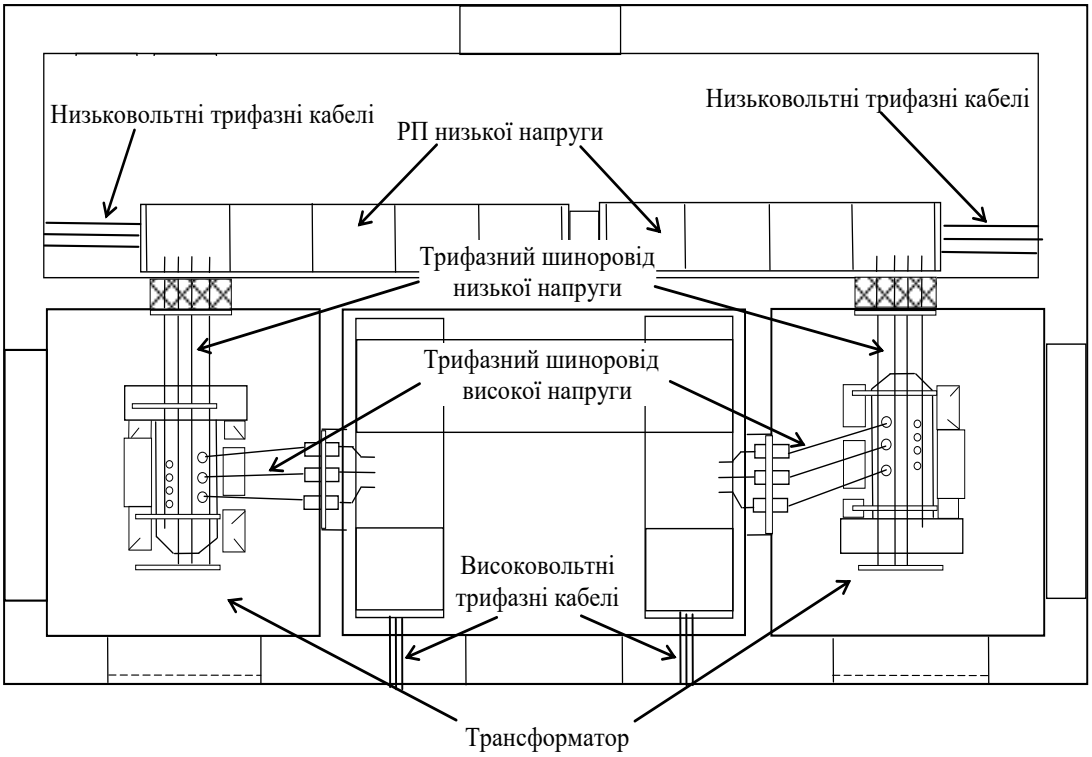


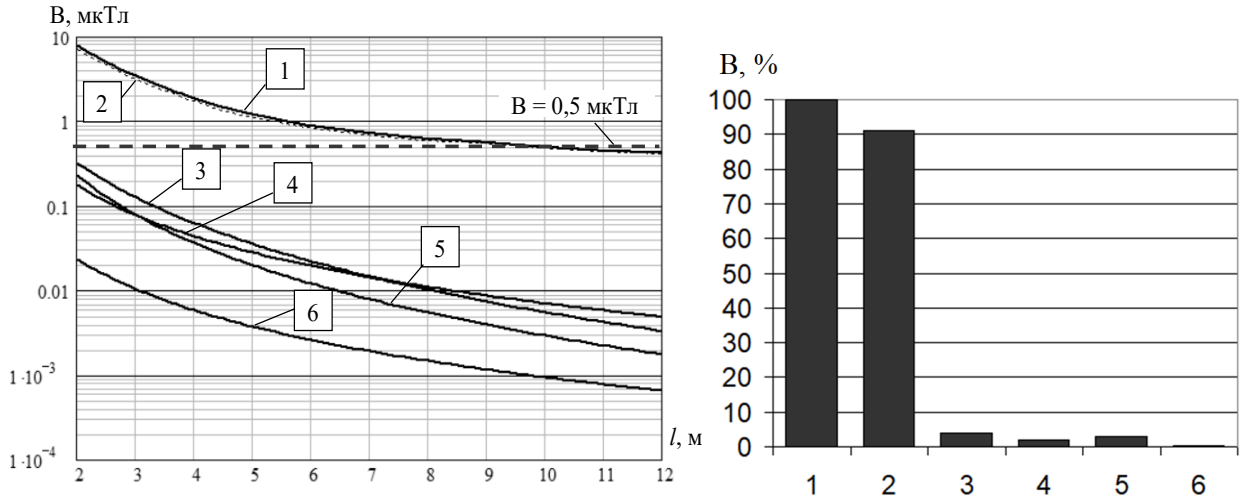
Рисунок 2.20 – Конструкція трансформаторної підстанції ТП-2-77/79-630

Аналіз розподілу індукції МП виконаємо зовні приміщення ТП 10/0,4 кВ на відстані 2 м від таких досліджуваних джерел МП (рис. 1.4), як: низьковольтні та високовольтні кабелі відповідно до (2.2), де вибрано кабелі з максимальним рівнем МП (рис. 2.6*б*, 2.7); трансформатор відповідно до (2.3) з максимальним рівнем МП (рис. 2.9); високовольтний та низьковольтний струмопроводи з номінальними струмами відповідно до (2.6). Сумарне ЗМП ТП (рис. 2.3) визначено за результатами розрахунку та експериментальних досліджень ТП 1260 кВА. Результати аналізу представлені на рис. 2.21 і показують наступне [37].

ЗМП високовольтних кабелів у сумарному ЗМП ТП на відстані 2 м складає менше 1 %, низьковольтних кабелів – менше 2,2 %, трансформаторів – менше 4 %, високовольтного струмопроводу – менше 2,2 %.

Всі ці джерела несуттєво впливають на вихідний рівень ЗМП ТП і в подальшому інженерному аналізі можуть не враховуватися.

Основний вклад в ЗМП ТП дають низьковольтні трифазні струмопроводи ТП (рис. 2.21), що підтверджується результатами як розрахунку ЗМП ТП так і експерименту.



а) *б*)

Рисунок 2.21 – (*а*) залежність індукції ЗМП ТП 1260 кВА основних джерел МП ТП від відстані *l* точки спостереження до поверхні джерел ТП та (*б*) вплив окремих джерел ЗМП ТП на загальний рівень ЗМП на відстані 2 м від них (1 – сумарне ЗМП ТП; 2 – ЗМП низьковольтного струмопроводу; 3 – ЗМП трансформатору; 4 – ЗМП низьковольтного кабелю; 5 – ЗМП високовольтного струмопроводу; 6 – ЗМП високовольтного кабелю)

Результати виконаного аналізу можна розповсюдити на всі вбудовані ТП різної потужності, тому що вони виконані по типовим проектам та мають типове розташування електрообладнання у приміщені ТП.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що основним джерелом ЗМП ТП потужністю 100–1260 кВА є низьковольтні трифазні струмопроводи ТП, а сумарний рівень ЗМП високовольтних і низьковольтних трифазних кабелів, високовольтних струмопроводів та трансформаторів складає менше 10%.

2.6 Визначення необхідної ефективності екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

Результати виконаних експериментальних досліджень (рис. 2.3) показують, що індукція ЗМП ТП спадає до гранично допустимого рівня (0,5 мкТл) при віддаленні від ТП з потужністю 1260 кВА на 10 м, з потужністю 800 кВА на 8 м, з потужністю 630 кВА на 6,8 м, з потужністю 100 кВА на 6 м.

На зовнішній поверхні приміщення ТП максимальній рівень індукції магнітного поля становить: для ТП потужністю 1260 кВА – 8 мкТл, потужністю 800 кВА – 4,8 мкТл, потужністю 630 кВА – 3,2 мкТл, потужністю 100 кВА – 2 мкТл (рис. 2.3).

У приміщення зверху над ТП максимальний рівень індукції магнітного поля становить для ТП потужністю 360 кВА – 1,8 мкТл, потужністю 440 кВА – 2,8 мкТл, потужністю 630 кВА – 2,1 мкТл, потужністю 715 кВА – 3,8 мкТл, потужністю 565 кВА – 2,1 мкТл, потужністю 640 кВА – 3,05 мкТл (рис. 2.5).

Таким чином, максимальний рівень індукції МП у сусідніх до ТП житлових приміщеннях на відстані 2 м від ТП потужністю від 100 кВА до 1260 кВА може досягати від 1,8 мкТл до 8 мкТл і складає небезпеку для населення на відстанях від 6 до 10 м від ТП.Для обмеження до безпечного рівня ЗМП вбудованих у житлові будинки міських ТП, необхідно зменшення індукції їх МП у сусідніх житлових приміщення з 2 (8) мкТл до 0,5 мкТл, що потребує використання методів та засобів екранування ЗМП ТП з ефективністю SF=(4–16).

2.7 Висновки по розділу 2

1. Проведено комплексні експериментальні дослідження розподілу індукції зовнішнього магнітного поля частотою 50 Гц, для 110 діючих міських трансформаторних підстанцій 10(6)/0,4 кВ встановленої потужності від 100 кВА до 1260 кВА м. Харкова, в тому числі 6 вбудованих у житлові

будинки, та проведено їх аналіз як джерел магнітного поля. Показано, що індукція магнітного поля в прилеглих житлових приміщеннях, може перевищувати нормативний рівень (0,5 мкТл) за умови наближення ТП від 6 м (100 кВА) до 10 м (1260 кВА). Показано, що вбудовані підстанції можуть створювати в прилеглих житлових приміщеннях магнітне поле з індукцією 2-8 мкТл, що представляє небезпеку для здоров'я населення і потребує зменшення від 4 до 16 разів.

2. Запропоновано математичну модель МП трифазних вхідних та вихідних кабелів ТП на основі просторового гармонічного аналізу їх ЗМП у циліндричній системі координат із визначенням просторових циліндричних гармонік їх МП, та виконано розрахунок індукції МП від кабелів ТП, що підтвердив коректність запропонованих розрахункових співвідношень та незначний вплив ЗМП кабелів на загальне ЗМП ТП (не більше 3%) на відстанях 2 м.

3. Визначено рівень індукції ЗМП трансформаторів ТП на основі ймовірнісно-статистичного методу визначення їх магнітних моментів, та виконано розрахунок індукції МП від трансформаторів ТП потужністю від 100 до 630 кВА, що підтверджує незначний (не більше 4%) вплив трансформаторів на загальний рівень ЗМП ТП, що не перевищує 0,3 мкТл на відстані 2 м від його корпусу і в подальшому може не враховуватися.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що основним джерелом ЗМП міських ТП є низьковольтний струмопровід, вклад якого в загальний рівень магнітного поля на відстані 2 м складає більше 90%, що дозволяє в інженерних розрахунках не враховувати інші джерела магнітного поля.

5. Удосконалено мультидипольну математичну модель зовнішнього магнітного поля трифазних струмопроводів, шляхом її побудови на основі двофазної моделі трифазного електричного кола і в порівнянні із відомою мультидипольною моделлю дозволяє без збільшення похибки вдвічі наблизити розрахункову область, і це дозволяє виконувати розрахунок у всіх прилеглих

житлових приміщеннях будинку, які розташовані на відстані від одного метра до підстанції.

6. Виконано верифікацію запропонованої удосконаленої мультидипольної математичної моделі для розрахунку ЗМП ТП на реальному об’єкті – житловому приміщенні над вбудованою ТП 715 кВА. Порівняння результатів розрахунку з результатами експерименту свідчить, що максимальне розрахункове значення індукції МП (1,7 мкТл) з похибкою менше ніж 10% збігається з результатами експерименту (1,6 мкТл), що підтверджує коректність запропонованої здобувачем моделі розрахунку індукції ЗМП ТП та прийнятих припущень.

7. Результати досліджень, представлених у цьому розділі, опубліковані у роботах здобувача [31, 32, 34, 37].

РОЗДІЛ 3
СИНТЕЗ СИСТЕМ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ, ВБУДОВАНИХ У ЖИТЛОВІ БУДИНКИ

У цьому розділі обґрунтовано та запропоновано структуру САЕ ЗМП вбудованих ТП, розроблено методику синтезу САЕ МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП. Виконано синтез САЕ МП для 6 типів вбудованих ТП потужністю від 100 кВА до 1260 кВА із однією, двома та чотирма КО при різних (1–2 м) відстанях від ТП до житлових приміщень. На основі синтезу виявлені структури та параметри САЕ, які доступні для фізичної реалізації і дозволяють зменшити рівень МП в прилеглих житлових приміщеннях до рівня санітарних норм для населення.

3.1 Структура та склад системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

Проведений в розділі 1 аналіз дозволяє сформулювати основні вимоги до САЕ ЗМП вбудованих ТП, які повинні автоматично функціонувати у всіх режимах навантаження ТП шляхом формування в об'ємі сусіднього з ТП житлового приміщення компенсуючого МП такої просторово-часової структури, суперпозиція якого з ЗМП ТП зменшує діюче значення індукції МП у всьому об’ємі житлового приміщення до мінімального рівня, що відповідає вимогам санітарних норм для населення (0,5 мкТл) [28, 57].

Основні конструктивні елементи САЕ ТП (рис. 1.9) розташовуються у житловому приміщенні. САЕ живиться від квартирного лічильника і експлуатується його мешканцями. Тому САЕ повинна, при необхідній ефективності екранування, мати мінімальну кількість елементів, а також мінімальну металоємність і потужність електроспоживання.

Важливою і специфічною характеристикою САЕ МП ТП є її інваріантність до внутрішнього магнітного поля (ВМП) житлового приміщення, що створюється розташованими у приміщенні побутовими електроприладами (електричними нагрівачами, кондиціонерами, електропечами тощо) [49]. Тому САЕ не повинна реагувати на ВМП житлового приміщення, тому що при цьому не буде ефективно функціонувати, а також буде споживати надмірну енергію.

У зв'язку з цим САЕ ТП, за умови інваріантності до розташованих усередині житлового приміщення побутових джерел МП, не може бути виконана у замкненій структурі (рис. 1.11*а*) із датчиком МП, розміщеним у зоні екранування – усередині житлового приміщення. Тому, в подальшому, САЕ МП вбудованих ТП розглядаємо тільки у розімкненій структурі (рис. 1.11*б*).

Як правило, у САЕ (рис. 1.11*б*) використовується штатний датчик струму ТП, що установлений на вході струмопроводу низької напруги ТП. В окремих випадках, коли ЗМП ТП в основному формується вертикальними струмопроводами вихідних фідерів ТП (житлове приміщення розташоване збоку від ТП (рис. 3.3*б*), може бути доцільною установка додаткових ДС на фідерах ТП.

При реалізації САЕ в розімкненій структурі повинно бути передбачено попереднє настроювання та високу температурну та часову стабільність коефіцієнтів передачі амплітуди і фази струму КО, а також їх автоматичне регулювання шляхом слідкування за загальним струмом навантаження ТП, або струмами його вихідних фідерів.

Розроблені структурні схеми САЕ МП ТП, що відповідають цим вимогам, представлені на рис. 3.1. САЕ складається із КО, ПУ з можливістю точного настроювання коефіцієнтів передачі струму $I_{КО}$ за амплітудою та фазою, і підсилювача напруги (ПН). ПН охоплений внутрішнім зворотним зв'язком із датчика струму КО ($ДС_{КО}$) через ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційний) регулятор струму (РС) для реалізації роботи ПН в режимі джерела струму КО. Джерело живлення (ДЖ) ПН підключене до внутрішньої мережі 220 В приміщення. Сигнал управління на ПУ формується датчиком струму фази А ТП ($ДС_{ТП}$).

Форма КО САЕ повинна максимально вписуватися у прямокутне житлове приміщення і тому реалізується у вигляді чотирикутника.

На вхід ПУ (рис. 3.1) оператором подаються цифрові сигнали завдання, що дозволяють плавно регулювати його коефіцієнти передачі для задання струму КО за амплітудою і фазою (± 180 ел. град) під контролем індукції МП, що, як правило, виконується при пусконалагоджувальних та регламентних роботах САЕ.

Двоканальна структура (рис.3.1 *б*) використовується при необхідності підвищення ефективності екранування САЕ шляхом подвоєння кількості її КО.

Всі елементи САЕ (рис. 3.1), крім КО і $ДС_{ТП}$, розміщуються в житловому приміщенні. КО доцільно розміщувати в приміщенні ТП біля його стелі (стіни) паралельно площі струмопроводу ТП, що екранується (рис. 1.9).

ПН САЕ може бути виконаний на основі стандартних інтегральних підсилювачів звукової частоти класу АВ (наприклад типу TDA 7294.) потужністю до 50 Вт з напругою живлення ± 36 В і КПД $Q_{пн} = 0{,}75$.

ДЖ САЕ може бути виконане на основі двох стандартних імпульсних джерел живлення потужністю до 50 Вт, 1,4 А (наприклад, типу GPA50A-36Б) з КПД $Q_{ДЖ} = 0{,}95$. При цьому потужність ДЖ ($P_{ДЖ}$), що визначає потужність живлення САЕ ($P_{САЕ}$), може бути визначена на основі отриманого в [102] співвідношення як

$$P_{CAE} = \frac{1}{Q_{ДЖ} \cdot Q_{ПН}} \sum_{k=1}^{K} \frac{j_k \cdot \rho_{ok} \cdot M_k \cdot l_k}{cos\,\varphi_k \cdot S_k}, \qquad (3.1)$$

де K – кількість КО САЕ;

j_k – густина струму КО;

ρ_{ok} – питомий опір обмотки КО;

M_k – магнітний момент КО;

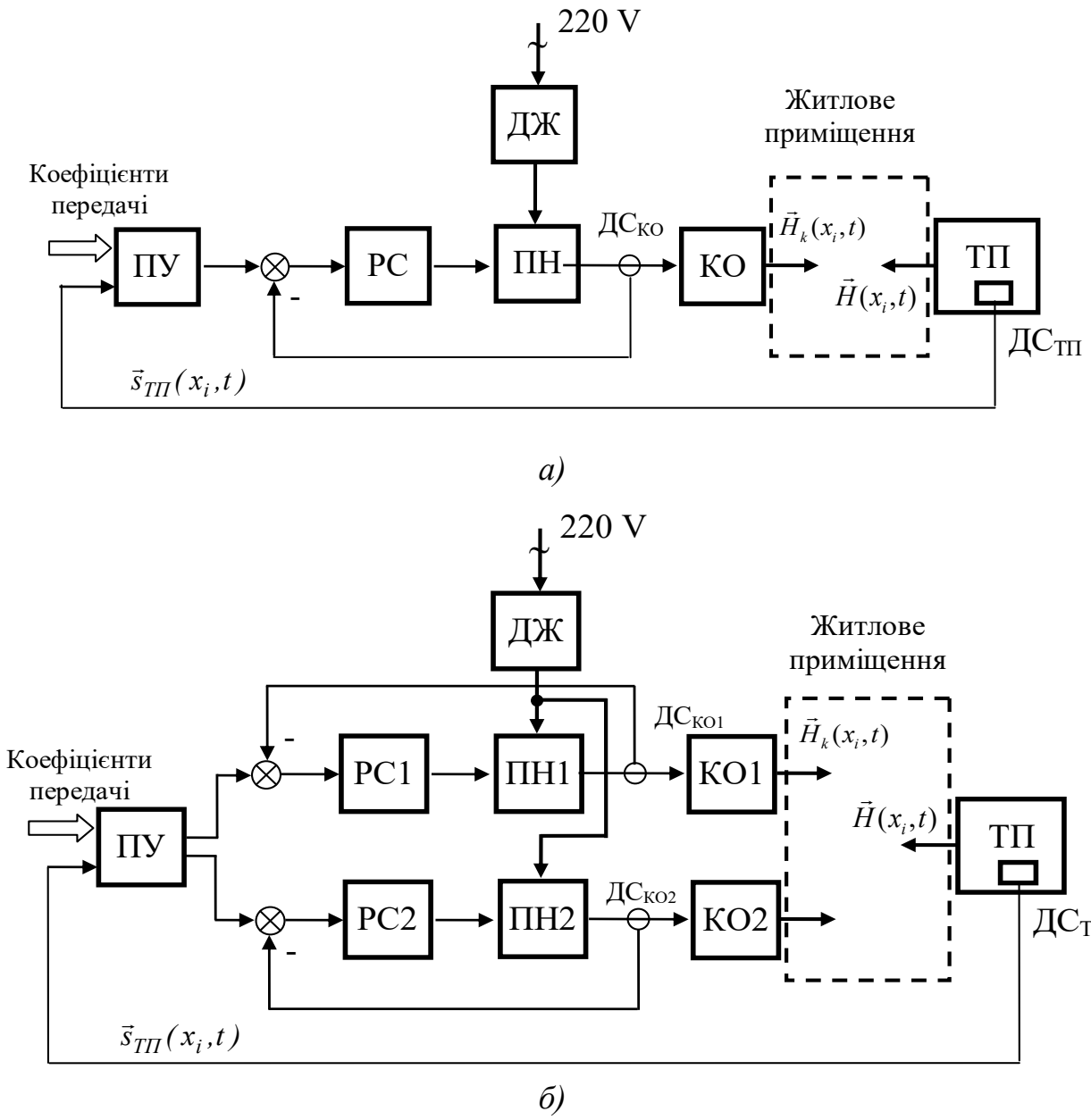
l_k, S_k – довжина та площа витка КО;

$cos\,\varphi_k$ – коефіцієнт потужності КО.

При $cos\,\varphi_k = 0{,}707$, густині струму 3 А/мм^2, $Q_{ДЖ} = 0{,}95$, $Q_{пн} = 0{,}75$, $\rho_o = 0.017$ Ом·мм^2/м, розрахункове співвідношення (3.1) прийме вигляд

$$P_{CAE} = 0.101 \cdot \sum_{k=1}^{K} \frac{M_k \cdot l_k}{S_k}. \qquad (3.2)$$

Співвідношення (3.2) в подальшому використаємо для розрахунку потужності споживання САЕ, що синтезуються.



а)

б)

Рисунок 3.1 – Структурна схема одноканальної (*а*) і двоканальної (*б*) САЕ

3.2 Методика синтезу системи активного екранування магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

Синтез САЕ МП вбудованих ТП здійснюємо на основі подальшого розвитку запропонованого в [29] методу синтезу САЕ для ЛЕП. Більш складна в порівнянні з ЛЕП геометрія струмопроводів ТП, що мають кінцеву довжину [32], створює необхідність моделювання МП ТП в тривимірній постановці, що істотно ускладнює синтез САЕ ТП. Ще однією особливістю рішення задачі синтезу САЕ вбудованих ТП є необхідність екранування МП поблизу струмопроводів ТП – на відстанях 1–2 м від їх поверхні. При синтезі САЕ, ефектом екранування МП ТП стінами і міжповерховими перекриттями житлових будинків відповідно до розділу 1 дисертації та [97, 98] нехтуємо. З урахуванням викладеного, та результатів проведеного в розділі 1 дисертації аналізу, створена методика синтезу САЕ МП ТП.

Методика синтезу ґрунтується на удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі МП струмопроводу ТП, законі Біо-Савара для визначення магнітного поля САЕ, а також методі оптимізації елементів САЕ мультироєм частинок.

Просторово-часова структура вихідного МП вбудованої ТП із похибкою менш ніж 10% визначається ЗМП низьковольтних струмопроводів ТП. Тоді вектор індукції МП ТП $\vec{B}_S(P_i,t)$ у точці P_i у момент часу t отримано на основі удосконаленої двофазної мультидипольної математичної моделі ЗМП ТП (2.6) [37]. Це МП є потенційним і спадає при віддаленні від ТП. МП САЕ формується у функції струму $I_{KO}(t)$ її САЕ і визначається амплітудою та фазою струму КО, а також їх геометричними параметрами (координатами просторового положення кутів чотирикутних КО та кількістю КО), що є шуканими параметрами при синтезі. Вектор індукції МП КО $\vec{B}_y(I(t),L,P_i,t)$ у точці P_i у момент часу t визначається за законом Біо-Савара (1.8), (1.9) як суперпозиція МП n прямолінійних відрізків зі струмом $I(t)$ з яких складається прямокутний контур КО L [30]

$$\vec{B}_y\left(I(t), L, P_i, t\right) = \frac{\mu_0 I(t)}{4\pi} \sum_{j=1}^{n} \frac{\vec{L}_j \times \vec{R}_j}{{R_j}^3}, \tag{3.3}$$

де $\vec{L}_j$ – вектор, що визначається координатами кінців *j*-го прямолінійного відрізку КО;

$\vec{R}_j$ – радіус-вектор у точку спостереження P_i із кінця *j*-го прямолінійного відрізку КО.

Визначимо геометричні параметри чотирикутних КО як

$$L_{KO} = \left\{x_j, y_j, z_j\right\}, \tag{3.4}$$

де x_j, y_j, z_j – координати кінців прямолінійних ділянок КО.

Визначимо шукані параметрів контуру управління САЕ як [103]

$$\Psi = \left\{I_k, \varphi_k\right\}, \tag{3.5}$$

де I_k – шукані амплітуди струму розімкненого контуру управління;

φ_k – шукані здвиги фаз струму контуру управління відносно виміряного струму у фазі А струмопроводу ТП.

Тоді шукані параметри САЕ МП ТП визначаються як

$$G = \left\{L_{KO}, \Psi_1\right\}. \tag{3.6}$$

Результуючий вектор індукції, що генерується вбудованою ТП $\vec{B}_{TП}\left(P_i, t\right)$ та КО САЕ визначаєтья як

$$\vec{B}\left(G, P_i\right) = \vec{B}_{TП}\left(P_i, t\right) + \vec{B}_y\left(\Psi, L_{KO}, P_i, t\right), \tag{3.7}$$

де $\vec{B}_y\left(\Psi, L_{KO}, P_i, t\right)$ – вектор індукції МП КО САЕ, що визначається відповідно до (3.3).

Введемо обмеження на шукані параметри *G* при синтезі САЕ

$$I_k \in \lfloor I_{k\,st}, I_{k\,end} \rfloor,\ \varphi_k \in \lfloor \varphi_{k\,st}, \varphi_{k\,end} \rfloor,\ L_{KO} \in \lfloor L_{KO\,st}, L_{KO\,end} \rfloor. \qquad (3.8)$$

Шукані параметри САЕ G визначаються як:

$$fun(G) = \arg\max_{P_i} \left| \vec{B}(G, P_i) \right|,$$

$$G^* = \arg\min_{G} fun(G). \qquad (3.9)$$

Відповідно до проведеного у розділі 1 дисертації аналізу (1.16) – (1.20), та співвідношень (3.3) – (3.9), розроблена методика синтезу САЕ МП ТП, основні складові якої представлені на рис. 3.2.

Реалізація методики (рис. 3.2) здійснена у вигляді оригінальної комп'ютерної програми у програмному пакеті MATLAB з використанням функції «fmincon» [91, 104], а також прикладних програм FORTRAN [92] у вигляді вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, на основі алгоритму оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги [29, 103].

Вхідними параметрами для синтезу САЕ є геометрія струмопроводу ТП, координати його розташування у приміщенні ТП, та відстань $h_в$ *або* $h_б$ від нього до житлового приміщення та його площа, величина струмів струмопроводу, вибрана кількість КО (рис. 3.3).

Необхідно відмітити, що збільшення кількості КО при синтезі, як правило, дозволяє збільшити ефективність екранування за рахунок зменшення методичної похибки формування компенсуючого МП синтезованою САЕ.

Синтез САЕ здійснено для максимального значення індукції МП ТП при номінальних струмах у струмопроводах, що в зв'язку із лінійною залежністю індукції МП ТП від величини його струму (2.6) дозволяє забезпечити необхідну ефективність екранування у всьому діапазоні змін струму навантаження ТП. Тут прийнято, що всі елементи САЕ є ідеальними та мають лінійні і стабільні вихідні характеристики.

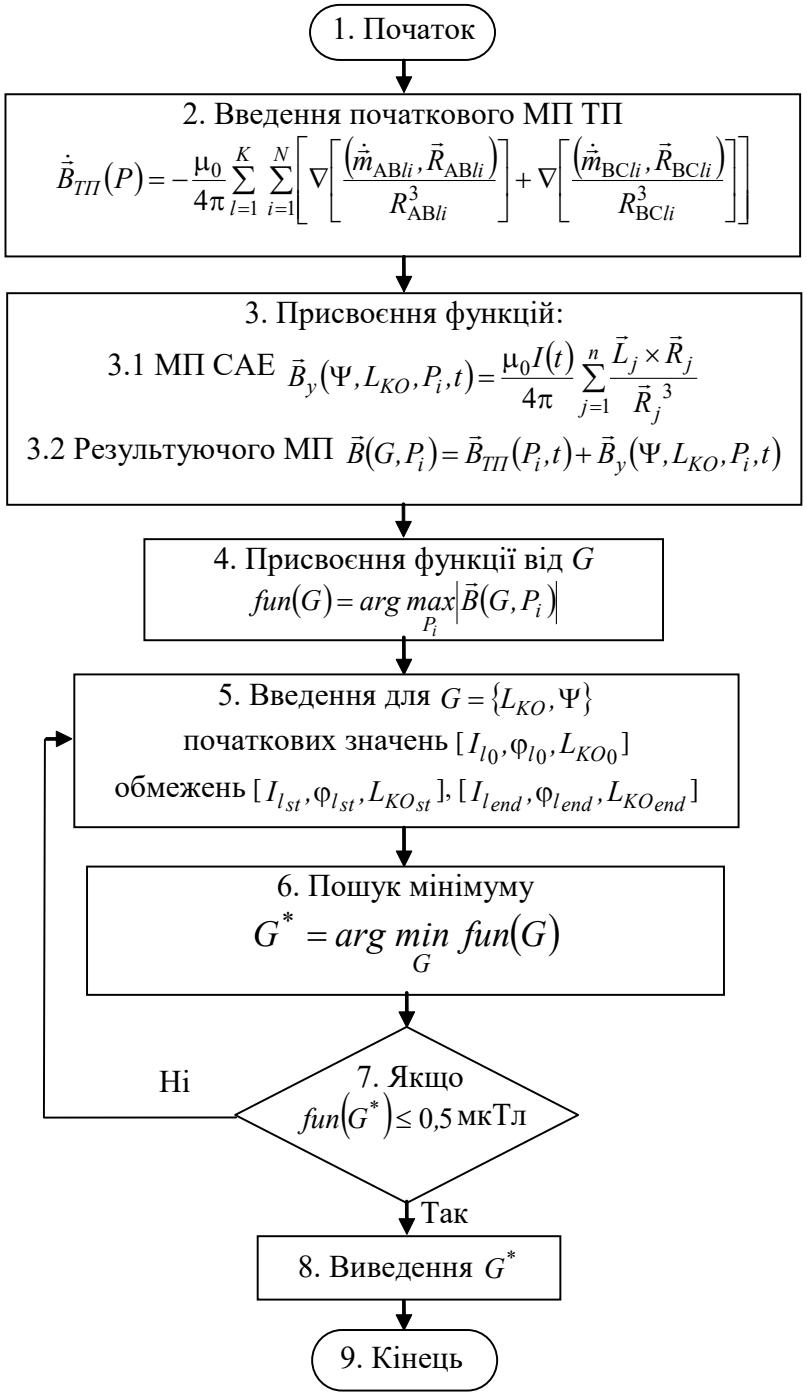
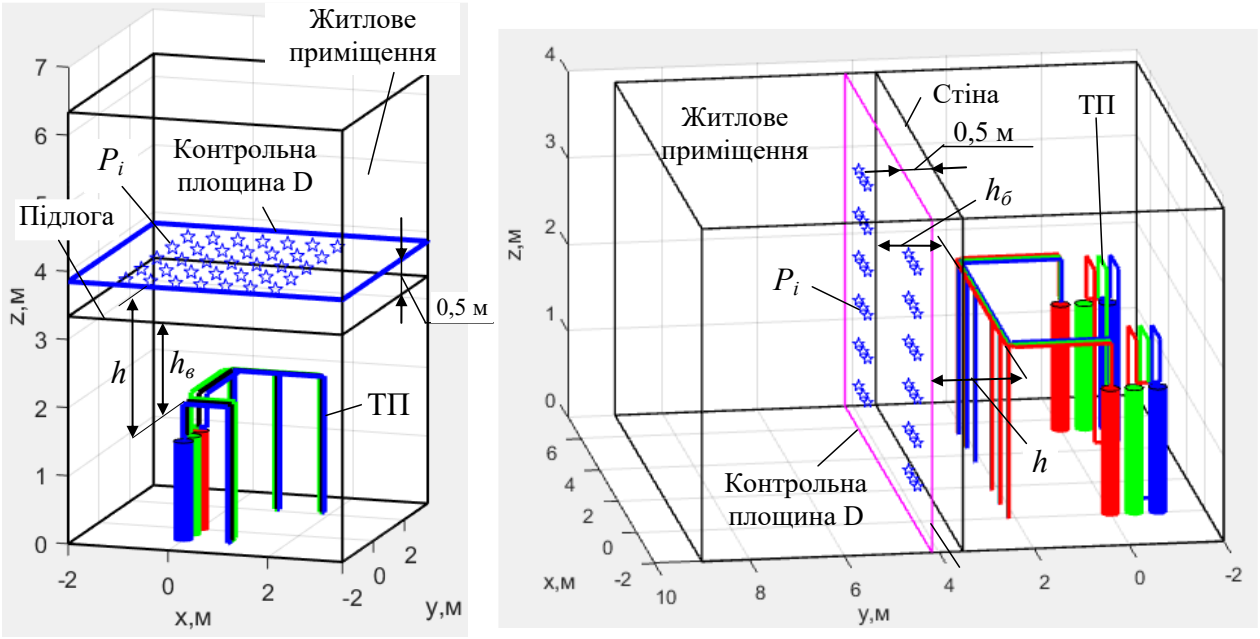


Рисунок 3.2 – Етапи методики синтезу САЕ ЗМП ТП

Для зменшення обсягу розрахунку при синтезі САЕ доцільно попередньо визначити мінімально достатню кількість КО, що може бути здійснено при аналізі величини сумарного ММ струмопроводу відповідно до (2.6), який визначає необхідний для компенсації ММ КО.

Як правило, синтез відомих САЕ ЛЕП [15-18, 29, 30, 88, 103] здійснюється на основі розрахунку МП у всьому об’ємі приміщення, що потребує значного

обсягу розрахунку. Для спрощення розрахунку при синтезі САЕ МП ТП пропонується виконувати розрахунок потенційного МП ТП не у всьому об’ємі приміщення, а на контрольній площині D, що розташовується у житловому приміщенні паралельно підлозі (рис. 3.3*а*) або стіні (рис. 3.3*б*) на відстані 0,5 м від них [33, 35, 36, 38, 75]. При цьому розташування контрольної площини D відповідає мінімальній відстані 0,5 м від стін (підлоги), на якій відповідно до [28] та табл. 1.2 індукція МП обмежується санітарними нормами – 0,5 мкТл.



а) *б)*

Рисунок 3.3 – Положення контрольної площини D у житловому приміщенні, розташованому над ТП (*а*) та збоку від ТП (*б*)

Тоді, у зв’язку із потенційністю МП ТП (1.3), (2.6) та його однозначним спаданням при віддаленні від джерела, зменшення МП ТП до нормативного рівня на контрольній площині D гарантує його зменшення і у усьому об’ємі приміщення. Такий розрахунок МП ТП на площині D дозволяє істотно, на порядок і більше, зменшити обсяг розрахунку при синтезі САЕ.

Таким чином для зменшення обсягу обчислень у методиці синтезу САЕ ЗМП ТП (рис. 3.2) вихідними даними є початкове МП ТП у точках P_i на контрольній площині D.

Шуканими параметри синтезу САЕ є $\Psi(I_l, \varphi_l)$ - амплітуда I_l, фаза φ_l струму КО САЕ, L_{KOl} – координатии просторового положення кутів КО САЕ. Реалізація методики синтезу виконується за наступними етапами (рис. 3.2):

п. 2. Введення початкового МП ТП – формується масив даних значення вектору індукції МП ТП у точках P_i. Для розрахунку використано удосконалену двофазну мультидипольну математичну модель МП струмопроводу (2.6);

п. 3. Присвоєння функцій – функція (п. 3.1) втановлює залежність МП САЕ від шуканих параметрів G (МП САЕ визначається (3.3) по закону Біо-Савара), функція (п. 3.2) формує масив даних результуючого МП у точках P_i як сума векторів індукції МП ТП та МП САЕ (3.7);

п. 4. Присвоєння функції від G – функція втановлює залежність шуканих параметрів G від максимуму модуля індукції МП визначеного із масиву даних результуючого МП у точках P_i (3.9);

п. 5. Введення обмежень для шуканих параметрів G та їх початкових значень для задачі оптимізації (3.8);

п. 6. Пошук мінімуму – визначаются шукані параметри G^* методом оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги (1.22, 1.23);

п. 7. Перевірка рівня результуючого МП у точках P_i з оптимальними параметрами САЕ G^*.

3.3 Синтез систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

Метою синтезу є оптимізація параметрів САЕ для ТП різної потужності та просторового розташування, що дозволяють зменшити ЗМП ТП у житловому приміщенні до рівня санітарних норм та можуть бути фізично реалізовані.

Синтез САЕ виконаємо на основі розробленої методики (рис. 3.2) для наступних характерних вбудованих і функціонуючих ТП з одним та двома трансформаторами потужністю від 100 кВА до 1260 кВА. [33, 35, 36, 38, 75]:

1. Для 1.1 ТП та 1.2 ТП 10/0,4 кВ 100 кВА при відстані $h_в$ між струмопроводом і житловим приміщенням (рис 3.4) 1,335 м та 1 м;

2. Для 2.1 ТП, 2.2 ТП, 2.3 ТП 6/0,4 кВ 2х400 кВА при двох відстанях $h_в$ зверху над ТП (рис 3.10) 1,85 м та 1,45 м, у приміщені збоку від ТП на мінімальній відстані $h_б$ =1.44 м (рис. 3.15);

3. Для 3.1 ТП 6/0,4 кВ 2х630 кВА у приміщені зверху над ТП на відстані $h_в$= 1,835 м (рис. 3.17).

Синтез систем активного екранування 1.1 ТП, 1.2 ТП (10/0,4 кВ 100 кВА). Вихідні дані для синтезу САЕ 1.1 ТП. Житлове приміщення площею 20 м^2, розташоване над ТП 10/0,4 кВ (рис. 3.4) з одним трансформатором потужністю 100 кВА [36, 38, 75]. Геометричні розміри струмопроводів ТП приведено на рис. 2.18. Мінімальна відстань від струмопроводу до підлоги житлового приміщення складає $h_в$ = 1,335 м. Номінальна величина струмів струмопроводу: $I_{ном}$ = 150 А (0,4 кВ); I_1= I_2 = $I_{ном}$; I_3 = 2/3$I_{ном}$; I_4 = I_5 = I_6 = I_7 =1/3$I_{ном}$.

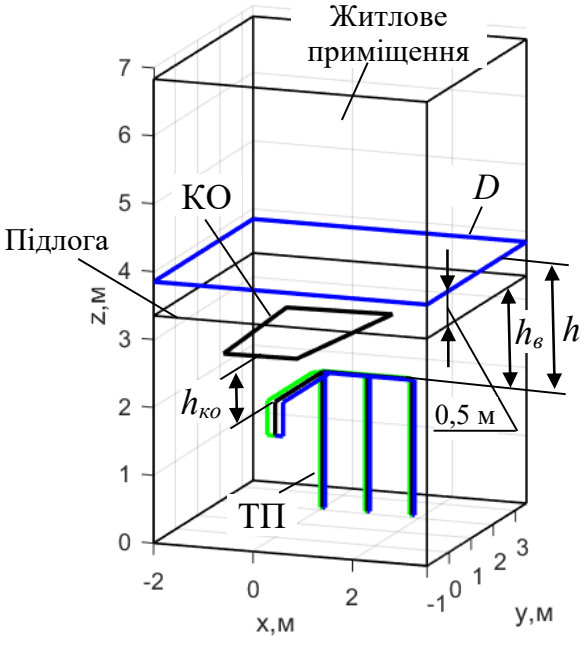


Рисунок 3.4 – Розташування житлового приміщення
та КО САЕ 1.1 ТП (1.2 ТП) 100 кВА

Синтез САЕ здійснимо з однією КО відповідно до рис. 3.4. Структура

САЕ відповідає рис. 3.1*а*. Розраховані по (2.6) значення індукції вихідного МП ТП на контрольній площині D представлені на рис. 3.5*а*. Максимальне значення індукції МП становить 1,9 мкТл, що практично в 4 рази перевищує нормативний рівень для населення. Результати виконаного синтезу САЕ 1.1 ТП із визначення основних параметрів САЕ, достатніх для її проектування, приведені у табл. 3.1.

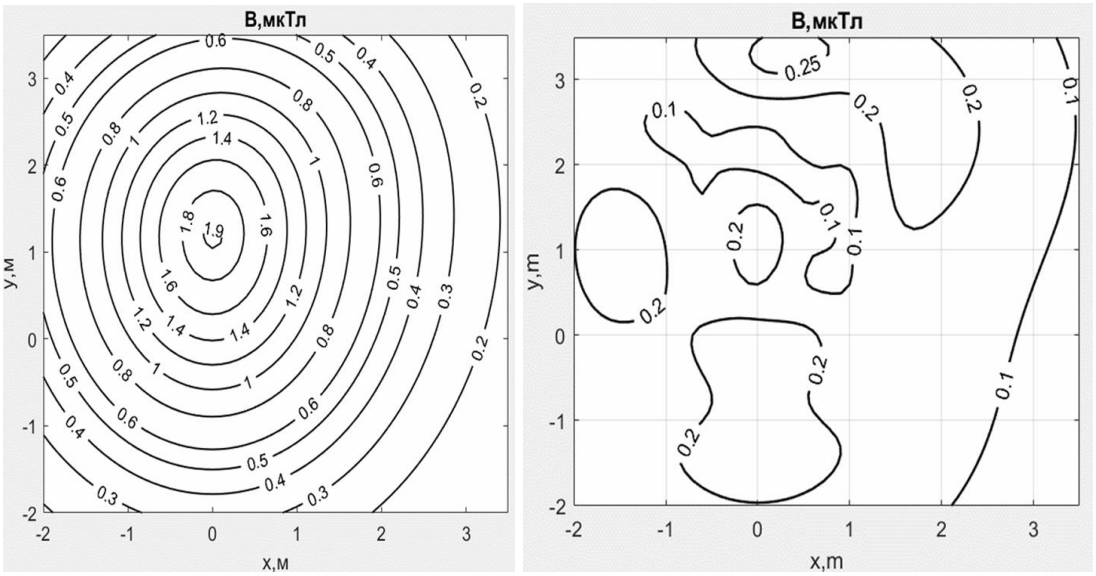
Таблиця 3.1 – Параметри синтезованої САЕ для 1.1 ТП 100 кВА

№ КО	Ампер-витки *IW* КО, Магнітний момент M_{KO}, фазовий зсув (φ) струму КО відносно струму фази А струмопроводу.	Координати кутів КО (x,y,z), відстань між КО та струмопроводом (h_{KO}), відстань між струмопроводом та житловим приміщенням ($h_в$), відстань між КО та площею D (h)
1	IW = 10,8 Ав, M_{KO} = 64,3 А·м^2 φ = 1,5709 рад.	$x1$ = -0.82 м, $x2$ = -0,93 м, $x3$ = 1,15 м, $x4$ = 0,8 м, z = 2,8 м, $y1$ = -0.68 м, $y2$ = 2,6 м, $y3$ = 2,7 м, $y4$ = -0,6 м, h = 1,05 м, h_{KO} = 0,8 м, $h_в$ =1,335 м, S=6 м^2.

Компенсаційна обмотка САЕ розміщена над ТП паралельно підлозі на відстані h_{KO} = 0,8 м від струмопроводу ТП (рис. 3.4), має площу 6 м^2 та екранує МП ТП до рівня 0,25 мкТл і менше, як на площині D, так і у всьому житловому приміщенні (рис. 3.5*б*, 3.6), (на відстані більше 0,5 м від стін та підлоги приміщення).

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 7,6 одиниць, а її споживна потужність (P_{CAE}), що визначена відповідно до (3.2) для КО із мідного проводу, складає 0,012 кВт.

Таким чином, синтезована САЕ 1.1 ТП 100 кВА (рис. 3.4) дозволяє зменшити максимальну індукцію МП (1,9 мкТл) у житловому приміщені площею до 20 м^2, розташованому на відстані 1,335 м над ТП до рівня санітарних норм (0,5 мкТл). При цьому вона має одну КО із магнітнім моментом 64,3 А·м^2 і споживає потужність 0,012 кВт.



а) *б)*

Рисунок 3.5 – Розподіл індукції МП 1.1 ТП 100 кВА на контрольній площині D приміщення: вихідний (*а*), екранований САЕ (*б*)

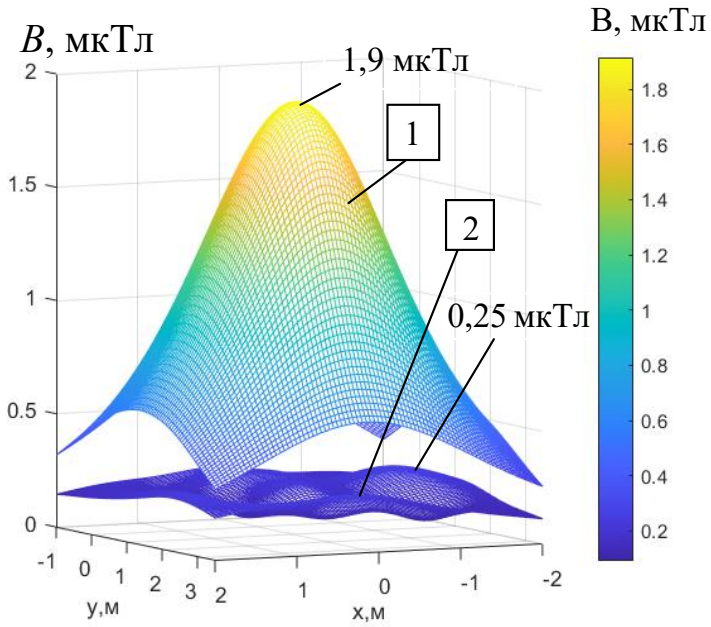


Рисунок 3.6 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житловому приміщенні над 1.1 ТП 100 кВА при $h_в$=1,335 м: 1 – вихідний, 2 – екранований САЕ

В табл. 3.2. представлені розраховані максимальні рівні індукції МП ТП до і після екранування при зміні струму I_1, від 30А до 150 А та розрахунковий коефіцієнт екранування *SF* (7.33).

Таблиця 3.2 – Розраховані максимальні рівні індукції МП ТП до і після екранування САЕ та коефіцієнт екранування *SF* при різних струмах

I_1, А	30	50	70	90	110	130	150
Вихідний рівень B_{0max}, мкТл	0,3823	0,6371	0,8919	1,1468	1,4016	1,6565	1,9113
Результуючій рівень B_{Smax}, мкТл	0,0522	0,0869	0,1217	0,1565	0,1913	0,2260	0,2608
SF, одиниці	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33

Визначені за результатами синтезу параметри САЕ, що зведені у табл. 3.2 і використані в розділі 4 дисертації для їх порівняння із результатами експерименту. Результати синтезу САЕ можуть бути використані для її проектування і практичної реалізації.

Синтез САЕ 1.2 ТП (10/0,4 кВ 100 кВА), при $h_в$=1 м, із однією КО (рис. 3.4) виконаний аналогічно синтезу САЕ 1.1 ТП. Максимальне значення індукції МП при номінальному навантаженні становить 3,1 мкТл (рис 3.7).

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 8,6 одиниць і дозволяє зменшити індукцію МП у житловому приміщенні до 0,36 мкТл (рис. 3.7).

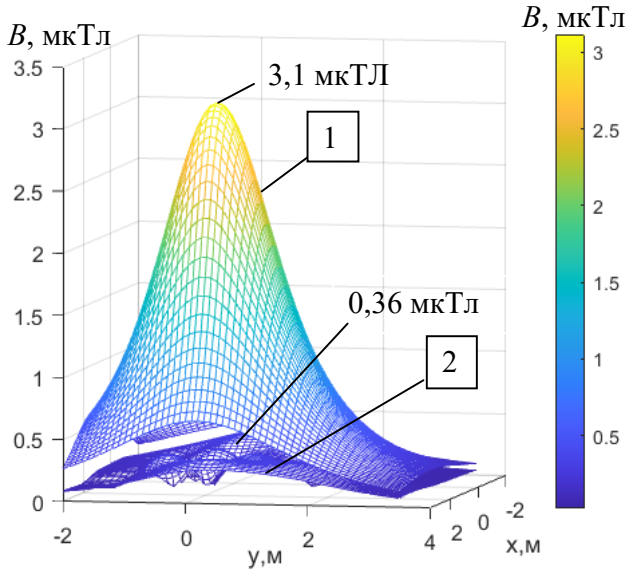


Рисунок 3.7 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житловому приміщенні над 1.2 ТП 100 кВА при $h_в$=1 м: 1– вихідний, 2 – екранований САЕ

Таким чином, синтезована САЕ для 1.2 ТП 100 кВА (рис. 3.4) дозволяє зменшити індукцію МП у житловому приміщені площею до 20 м^2, розташованому на відстані 1 м над ТП до рівня санітарних норм (меньше 0,5 мкТл). При цьому синтезована САЕ має одну КО із магнітнім моментом 81,93 А·м^2 і споживає потужність 0,016 кВт.

Синтез систем активного екранування 2.1 ТП, 2.2 ТП, 2.3 ТП (6/0,4 кВ 2х400 кВА). Вихідні дані для синтезу 2.1 ТП. Два житлових приміщення площею по 20 м^2, розташовані над ТП 6/0,4 кВ (рис. 3.8) з двома трансформаторами потужністю по 400 кВА. Геометричні розміри струмопроводів ТП відповідають рис. 2.14 [33, 75]. Мінімальна відстань від струмопроводу до підлоги житлового приміщення $h_в$ = 1,85 м. Номінальна величина струмів струмопроводу: $I_{ном1}$ = 600 А (0,4 кВ); $I_{ном2}$ = 40 А (6 кВ); I_1= I_8=$I_{ном1}$; I_2 = I_9 =2/3$I_{ном1}$; I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{13} = 1/3$I_{ном1}$; I_7 = I_{14} = $I_{ном2}$.

Синтез САЕ здійснимо з двома КО відповідно до рис. 3.8. Структура САЕ – дві одноканальні САЕ рис. 3.1 *а* [33, 75].

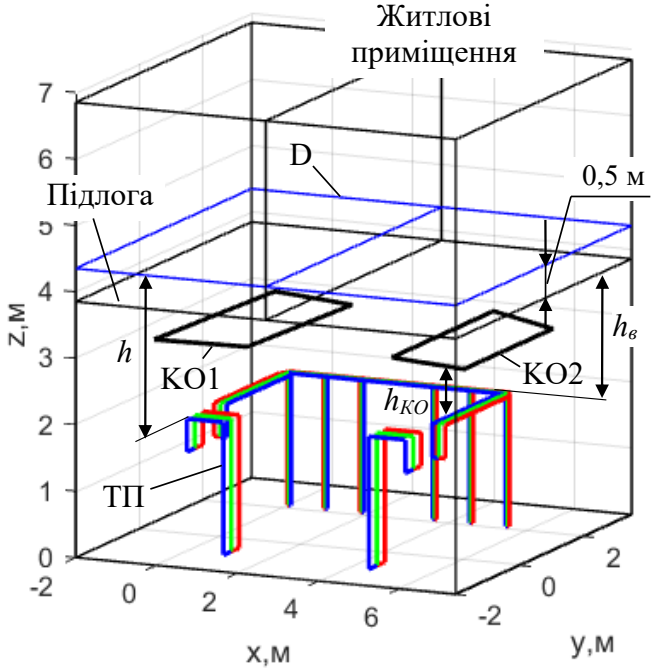


Рисунок 3.8 – Розташування житлових приміщень
та КО САЕ 2.1, 2.2 ТП над ТП 2х400 кВА

В результаті виконання синтезу САЕ визначені основні параметри САЕ, достатні для її проектування і приведені у табл. 3.3.

Розраховані по (2.6) значення індукції вихідного МП ТП при номінальних струмах на контрольній площині D представлені на рис. 3.9 *а*. Максимальне значення індукції МП становить 3 мкТл.

Кожна з 2-х КО САЕ розміщена над ТП паралельно підлозі на мінімальній відстані h_{KO} = 1 м від струмопроводу ТП (рис. 3.8), має площу 6,5 м^2 та екранує МП ТП до рівня 0,5 мкТл і менше, як на площині D, так і у всьому об'ємі житлових приміщень (рис. 3.9б, 3.10), (на відстані більше 0,5 м від стін та підлоги приміщення).

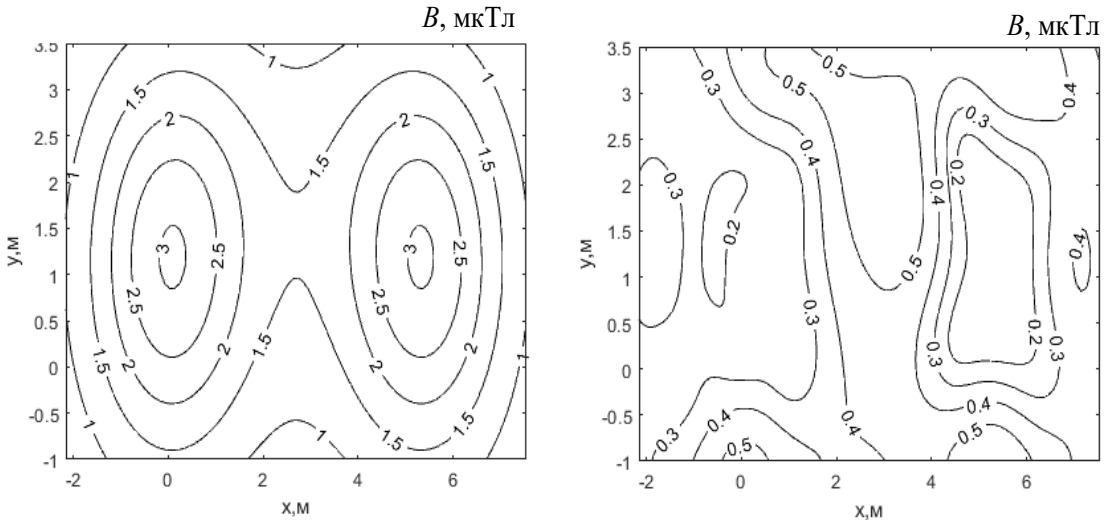
Таблиця 3.3 – Параметри синтезованої САЕ для 2.1 ТП 2х400 кВА

№ КО	Ампер-витки *IW* КО, Магнітний момент M_{KO}, фазовий зсув (φ) струму КО відносно струму фази А струмопроводу.	Координати кутів КО (*x,y,z*), відстань між КО та струмопроводом (h_{KO}), відстань між струмопроводом та житловим приміщенням ($h_в$), відстань між КО та площею D (*h*)
1	*IW1* = 24,5 Ав, $M_{ко1}$=172,2 А·м^2, $\varphi 1$=1,5051 рад.	$x11$ = -1,23 м, $y11$ = -0,51 м, $x12$ = -0,94 м, $y12$ = 2,90 м, $x13$ = 1,24 м, $y13$ = 2,55 м, $x14$ = 0,99 м,$y14$ = -0,40 м, *S1*=7 м^2, $z11 = z12 = z13 = z14$ = -1,35 м, $h_в$=1,85 м, h_{KO} = 1 м, *h* =1,35 м.
2	*IW2* = 25,6 Ав, $M_{ко2}$=153,1 А·м^2, $\varphi 2$= -1,587 рад.	$x21$ = 4,41 м, $y21$ = -0,22 м, $x22$ = 4,40 м, $y22$ = 2,98 м, $x23$ = 6,40 м, $y23$ = 2,30 м, $x24$ = 6,40 м, $y24$ = -0,48 м, *S2*=6 м^2, $z21 = z22 = z23 = z24$ = -1,35 м, $h_в$=1,85 м, h_{KO} = 1 м.

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 6 одиниць, а їх споживна потужність P_{CAE} відповідно до (3.2) складає 0,055 кВт.

Таким чином, синтезована САЕ 2.1 ТП 2х400 кВА (рис. 3.8) дозволяє зменшити індукцію МП у двох житлових приміщеннях площею по 20 м^2, розташованих на відстані 1,85 м над ТП до рівня санітарних норм (0,5 мкТл). При цьому синтезовані САЕ мають по одній КО із магнітнім моментом

162,55 А·м^2 і споживають потужність по 0,0225 кВт (сумарна потужність 0,055 кВт).



а) *б)*

Рисунок 3.9 – Розподіл індукції МП 2.1 ТП 2х400 кВА на контрольній площині D приміщень: вихідний (*а*), екранований САЕ (*б*)

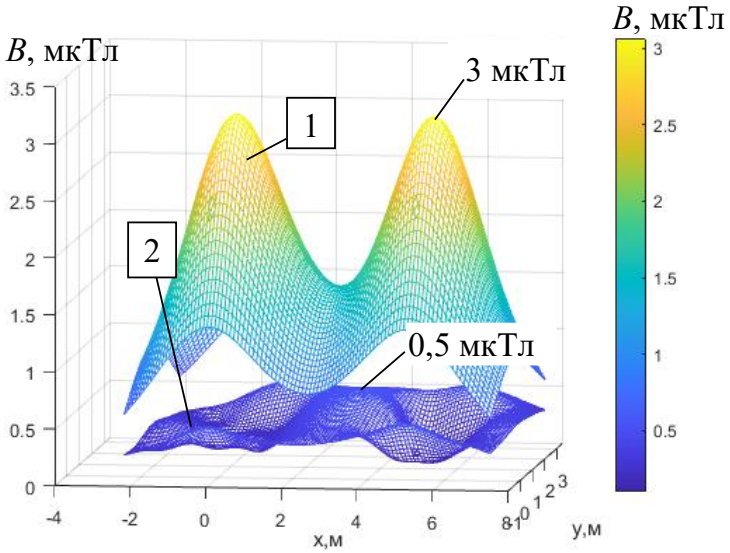


Рисунок 3.10 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житлових приміщеннях над 2.1 ТП 2х400 кВА: 1– вихідний, 2 – екранований САЕ

Синтез САЕ 2.2 ТП (6/0,4 кВ 2х400 кВА), при $h_в$=1,45 м, із чотирма КО (рис. 3.11) виконаний аналогічно синтезу САЕ 2.1 ТП. САЕ має чотири КО відповідно до рис. 3.11. Структура – дві двоканальні САЕ (рис. 3.1 *б*).

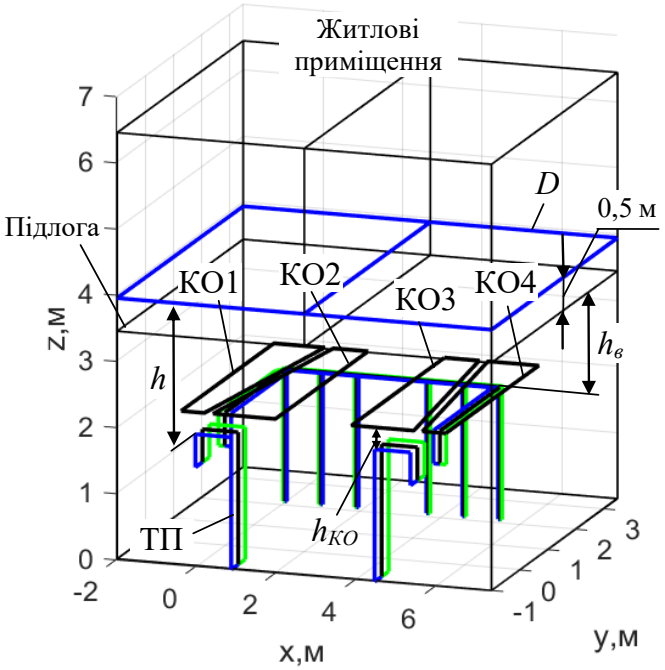


Рисунок 3.11 – Розташування житлового приміщення
та КО САЕ над 2.2 ТП 2х400 кВА

Чотири компенсаційні обмотки САЕ розміщені над ТП паралельно підлозі на відстані $h_{КО}$ = 0,2 м від струмопроводу ТП (рис. 3.11), мають сумарну площу 14,3 м^2 та екранують МП ТП до рівня 0,5 мкТл і менше, як на площині D, так і у всьому об’ємі житлових приміщень (рис. 3.12), (на відстані більше 0,5 м від стін та підлоги приміщення).

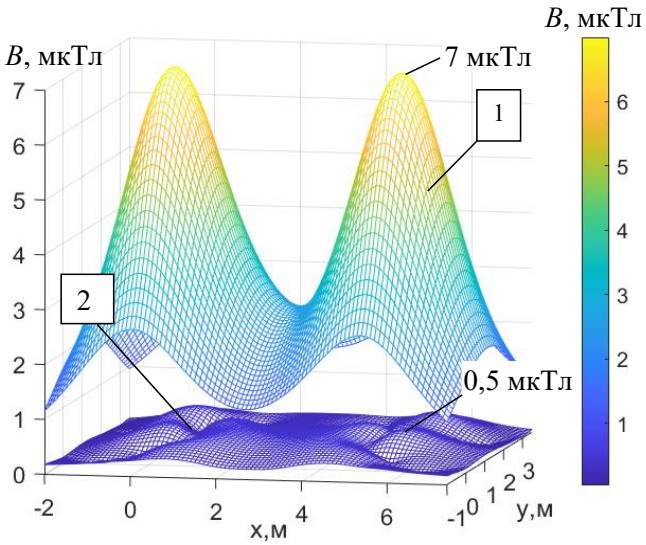


Рисунок 3.12 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житловому приміщенні над 2.2 ТП 2х400 кВА- 1 – вихідний, 2 – екранований САЕ

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 14 одиниць. Сумарна споживна потужність синтезованої САЕ (P_{CAE}) визначена по (3.2) складає 0,186 кВт.

Таким чином, синтезована САЕ 2.2 ТП 2х400 кВА (рис. 3.11) дозволяє зменшити індукцію МП у двох житлових приміщеннях площею по 20 м^2, розташованих на відстані $h_в$ = 1,45 м над ТП до рівня санітарних норм (0,5 мкТл). При цьому синтезована САЕ має чотири КО із сумарним магнітнім моментом 675,8 А·м^2 і споживає потужність 0,186 кВт.

Синтез САЕ 2.3 ТП (6/0,4 кВ 2х400 кВА), при розташуванні житлових приміщень збоку від ТП виконаний аналогічно. Житлові приміщення площею по 20 м^2, розташовані на мінімальній відстані $h_б$=1,44 м збоку від ТП 6/0,4 кВ (рис. 3.13) [33, 75]. Геометричні розміри струмопроводів ТП приведено на рис. 2.14.

Синтез САЕ здійснимо з двома КО відповідно до рис. 3.13. Структура САЕ – дві одноканальні САЕ рис. 3.1 *а* [33, 75].

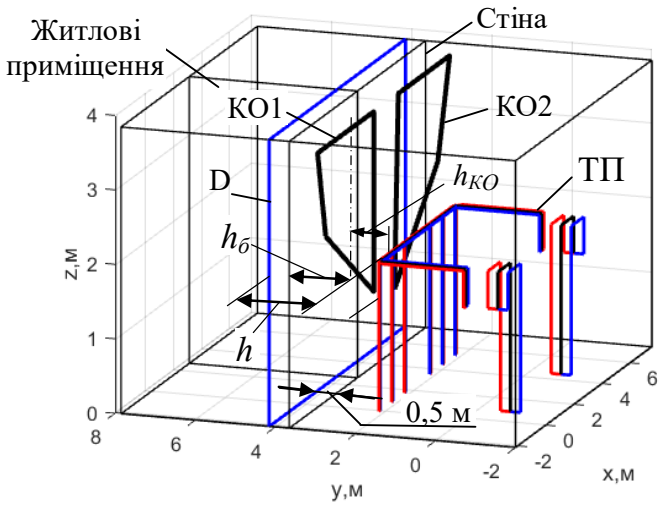


Рисунок 3.13 – Розташування житлових приміщень та КО САЕ збоку від 2.3 ТП 2х400 кВА

Розраховані по (2.6) максимальні значення індукції вихідного МП ТП на контрольній площині D представлені на рис. 3.14. Максимальне значення індукції МП ТП становить 1,2 мкТл.

Дві компенсаційні обмотки САЕ розміщені збоку ТП паралельно стіни на мінімальній відстані h_{KO} = 1,3 м від струмопроводу ТП (рис. 3.13), мають площу 12,73 м^2 та екранують МП ТП до рівня 0,5 мкТл і менше, як на площині D, так і у всьому об'ємі житлових приміщень (рис. 3.14), (на відстані більше 0,5 м від стін та підлоги приміщення).

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 2,4 одиниці, а її споживна потужність (P_{CAE}) визначена по (3.2) для КО із мідного проводу і складає 0,022 кВт.

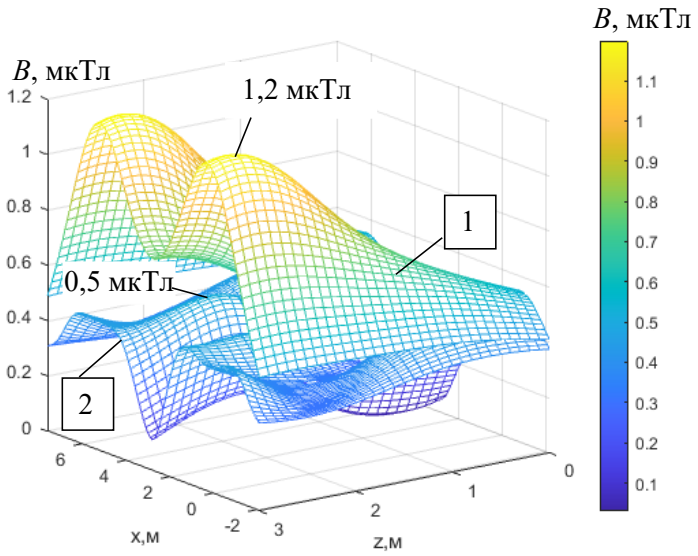


Рисунок 3.14 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житлових приміщеннях збоку від 2.3 ТП 2х400 кВА: 1 – вихідний, 2 – екранований САЕ

Таким чином, синтезована САЕ для 2.3 ТП 2х400 кВА (рис. 3.13) дозволяє зменшити індукцію МП у двох житлових приміщеннях площею по 20 м^2, розташованих на відстані 1,44 м збоку від ТП до рівня санітарних норм (0,5 мкТл). При цьому синтезована САЕ має дві КО і із сумарним магнітнім моментом 120,5 А·м^2 і споживає потужність 0,022 кВт.

Синтез системи активного екранування 3.1 ТП (6/0,4 кВ 2х630 кВА). Вихідні дані для синтезу. Два житлових приміщення площею по 25 м^2, розташовані над ТП 6/0,4 кВ (рис. 3.15) з двома трансформаторами потужністю по 630 кВА [38]. Геометричні розміри струмопроводів ТП приведено на

рис. 2.14. Мінімальна відстань від струмопроводу до підлоги житлових приміщення складає $h_в$ =1,835 м. Номінальна величина струмів струмопроводу: $I_{ном1}$ = 900 А (0,4 кВ); $I_{ном2}$ = 60 А (6 кВ); I_1= I_8=$I_{ном1}$; I_2 = I_9 =2/3$I_{ном1}$; I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = I_{10} = I_{11} = I_{12} = I_{13} = 1/3$I_{ном1}$; I_7 = I_{14} = $I_{ном2}$.

Синтез САЕ здійснимо з чотирма КО відповідно до рис. 3.15. Структура САЕ – дві двоканальні САЕ рис. 3.1 *б* [38].

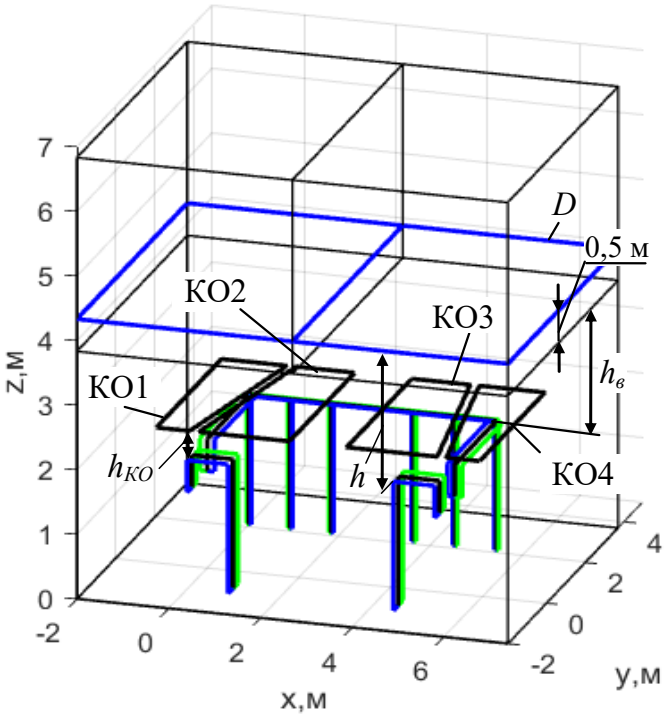


Рисунок 3.15 – Розташування житлового приміщення
та КО САЕ над 3.1 ТП 2х630 кВА

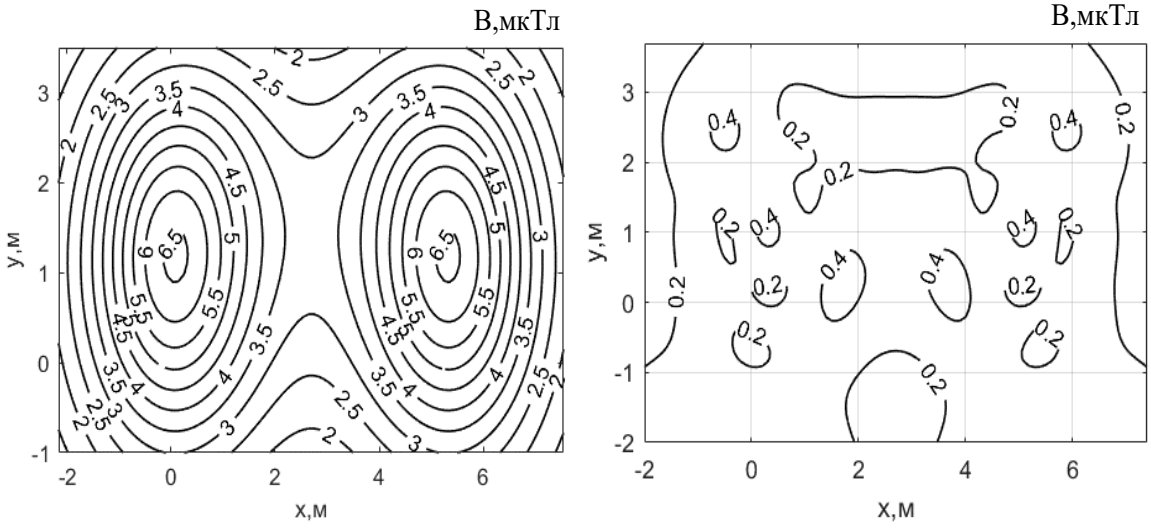
В результаті виконання синтезу САЕ визначені основні параметри САЕ, необхідні для її проектування, які приведені у табл. 3.4.

Розраховані по (2.6) значення індукції вихідного МП ТП на контрольній площині D представлені на рис. 3.16 *а*. Максимальне значення індукції МП становить 6,5 мкТл.

Розрахункова ефективність екранування синтезованої САЕ складає SF = 16 одиниць, а її сумарна споживна потужність (P_{CAE}), що визначена по (3.2) для КО із мідного проводу складає 0,229 кВт.

Таблиця 3.4 – Параметри синтезованої САЕ для 3.1 ТП 2х630 кВА

№ КО	Ампер-витки *IW* КО, Магнітний момент M_{KO}, фазовий зсув (φ) струму КО відносно струму фази А струмопроводу.	Координати кутів КО (*x,y,z*), відстань між КО та струмопроводом (h_{KO}), відстань між струмопроводом та житловим приміщенням ($h_в$), відстань між КО та площею D (*h*)
1	*IW1* = 104,7 Ав, $M_{ко1}$=379,5 А·м^2, φ1=1,637 рад.	x11 = x21 = -0,73 м, x31 = 0,7 м, x41 = 0 м, z1 = 2,33 м, y11 = y41 = -0,68 м, y21 = y31 = 2,7 м, $h_в$ = 1,835 м, h_{KO} = 0,33 м, *h* =2 м, *S1*=3,63 м^2.
2	*IW2* = 19,1 Ав, $M_{ко2}$=104,6 А·м^2, φ2=1,31 рад.	x12 = x22 = 1,98 м, x32 = 0 м, x42 = 0,7 м, z2 = 2,33 м, y12 = y42 = 2,7 м, y22 = y32 = -0,68 м, $h_в$ = 1,835 м, h_{KO} = 0,33 м, *h* =2 м, *S2*=5,48 м^2.
3	*IW3* = 19,1 Ав, $M_{ко3}$=104,6 А·м^2, φ3=1, 31 рад.	x13 = x23 = 3,42 м, x33 = 5,4 м, x43 = 4,7 м, z3 = 2,33 м, y13 = y43 = 2,7 м, y23 = y33 = -0,68 м, $h_в$ = 1,835 м, h_{KO} = 0,33 м, *h* =2 м, *S3*=5,48 м^2.
4	*IW4* = 104,7 Ав, $M_{ко4}$=379,5 А·м^2, φ4=1,637 рад.	x14 = x24 = 6,13 м, x34 = 4,7 м, x44 = 5,4 м, z4 = 2,33 м, y14 = y44 = -0,68 м, y24 = y34 = 2,7 м, $h_в$ = 1,835 м, h_{KO} = 0,33 м, *h* =2 м, *S4*=3,63 м^2.



а) *б*)

Рисунок 3.16 – Розподіл індукції МП 3.1 ТП 2х630 кВА на контрольній площині D приміщень: вихідний (*а*), екранований САЕ (*б*)

Таким чином, синтезована САЕ для 3.1 ТП 2х630 кВА (рис. 3.17) дозволяє зменшити індукцію МП у двох житлових приміщеннях площею по

25 м^2, розташованих на відстані 1,835 м над ТП до рівня санітарних норм (0,5 мкТл). При цьому синтезована САЕ має чотири КО із сумарним магнітнім моментом 974,2 А·м^2 і споживає потужність 0,229 кВт.

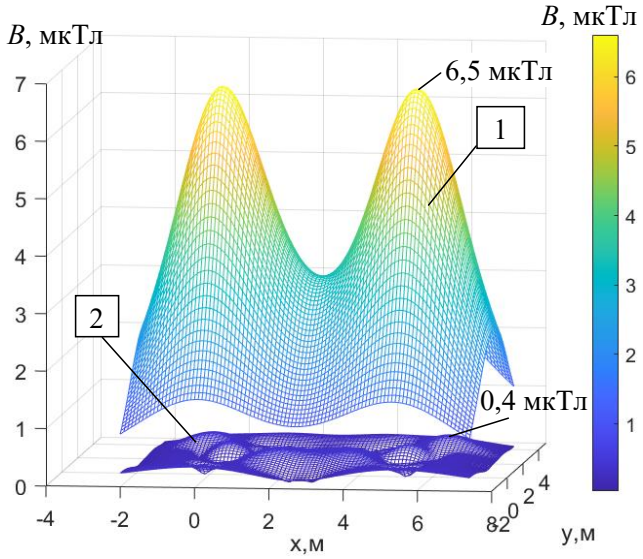


Рисунок 3.17 – Розподіл максимальних значень індукції МП у житловому приміщенні над 3.1 ТП 2х630 кВА: 1 – вихідний, 2 – екранований САЕ

3.4 Аналіз результатів синтезу систем активного екранування вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю 100-1260 кВА

У табл. 3.5 приведено узагальнені параметри синтезованих САЕ ЗМП вбудованих ТП.

Синтезовані САЕ дозволяють нормалізувати до рівня санітарних норм МП в розглянутих житлових приміщеннях як над ТП (рис. 3.3*а*) так і збоку від ТП (рис. 3.3*б*). При цьому теоретична ефективність екранування МП складає біля 8 од. при використанні САЕ з однією КО і біля 16 од. при використанні САЕ з двома КО. В останньому випадку питома потужність САЕ зростає практично в 7 разів – із 0,7 Вт/м^2 житлової площі до 4,7 Вт/м^2, що обумовлює відповідне збільшення як вартості як САЕ так і її експлуатації. Тому використання САЕ із високою ефективністю потребує ретельного економічного обґрунтування.

Таблиця 3.5 – Параметри синтезованих САЕ МП вбудованих ТП

№ ТП	Номінальна потужність ТП кВА/ кількість трансформаторів ТП	Площа житлового приміщення, м^2	Мінімальна відстань від струмопроводу ТП до житлового приміщення, $h_в$, $h_б$, м	Максимальний вихідний рівень МП у приміщенні, мкТл	Максимальний рівень МП у приміщенні після екранування, мкТл	Теоретична ефективність екранування САЕ SF, од	Кількість КО САЕ	Сумарний ММ КО, А·м^2	Загальна номінальна потужність САЕ, кВт	Питома потужність САЕ на 1 м^2 приміщення Вт/м^2	Середнє (0,5) енергоспоживання САЕ у місяць, кВт·год
1.1	100/1	20	$h_в$ = 1,335	1,9	0,25	7,6	1	64	0,012	0,6	4,5
1.2	100/1	20	$h_в$ = 1	3,1	0,36	8	1	82	0,016	0,8	6
2.1	800/2	2х20	$h_в$ = 1,85	3	0,5	6	2	325	0,055	1,375	20
2.2	800/2	2х20	$h_в$ =1,45	7	0,5	14	4	676	0,186	4,65	67
2.3	800/2	2х20	$h_б$ = 1,44	1,2	0,5	2,4	2	121	0,022	1,1	8
3.1	1260/2	2х25	$h_в$ = 1,835	6,5	0,4	16	4	974	0,229	4,58	83

3.5 Висновки по розділу 3

1. Розроблено методику синтезу систем активного екранування магнітного поля в житлових приміщеннях будинків із вбудованими підстанціями. Методика ґрунтується на запропонованій здобувачем удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі зовнішнього магнітного поля трифазних струмопроводів ТП та законі Біо-Савара, а також методі оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги, реалізація якої дозволяє синтезувати системи активного екранування з плоскими компенсаційними обмотками із ефективністю 6-16 одиниць, та зменшує індукцію магнітного поля частотою 50 Гц в житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

2. Запропоновано здійснювати синтез САЕ вбудованих ТП на основі визначення та зменшення їх ЗМП не в усьому об’ємі житлового приміщення, а на контрольній площині D, яка розташовується у приміщенні на межі зони нормування МП, паралельно його підлоги або стіни з максимальним наближенням до струмопроводу ТП, що дозволяє у зв’язку із потенційністю МП гарантувати його зменшення в усьому об’ємі приміщення, за площиною D, і при цьому істотно зменшити обсяг обчислень.

3. За розробленою методикою виконано синтез систем активного екранування магнітного поля вбудованих підстанцій потужністю від 100 до 1620 кВА в житлових приміщеннях площею 20–25 м^2, які розташовані над підстанцією та збоку від неї на відстанях від 1 м до 1,85 м. Синтезовані САЕ потужністю від 0,012 до 0,229 кВт, виконуються за одноканальною або двоканальною розімкненою структурою, мають одну, дві, чотири плоскі чотирикутні компенсаційні обмотки із магнітними моментами від 64 до 974 А·м^2 та забезпечують теоретичну ефективність екранування до 16 одиниць і дозволяють зменшити рівень магнітного поля в усіх житлових приміщеннях від 1,2–7 мкТл до рівня санітарних норм 0,5 мкТл.

4. Вперше показано, що використання САЕ із високою ефективністю (більше 10 од.) призводить до істотного (до 4 разів) збільшення питомої потужності, що споживається САЕ на 1 м^2 площі житлових приміщень, які екрануються.

5. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [33, 35- 38].

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА УДОСКОНАЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТРУМОПРОВОДУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АКТИВНОГО ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВБУДОВАНОЇ ТП 100 кВА

У цьому розділі приведено опис лабораторної установки, створеної для фізичного моделювання ЗМП ТП 100 кВА та синтезованої для цієї ТП САЕ. Представлено програму та методику експериментальних досліджень. Приведені результати експериментальних досліджень та виконано їх аналіз. Запропоновані практичні рекомендації із побудови систем активного екранування зовнішнього МП вбудованих ТП.

4.1 Лабораторна установка для експериментальних досліджень магнітного поля струмопроводу та системи активного екранування трансформаторних підстанцій

Лабораторну установку створено для експериментальної перевірки запропонованої математичної моделі (2.6) ЗМП струмопроводу ТП та експериментальної перевірки теоретичних положень методики синтезу САЕ МП ТП.

Згідно проведених у підрозділах 2.3, 2.5 досліджень визначено, що основним джерелом ЗМП ТП є низьковольтний струмопровід (рис. 2.18). Тому МП ТП моделюється низьковольтним струмопроводом.

До складу установки входять повномасштабний фізичний макет низьковольтного струмопроводу трансформаторної підстанції ТП 10/0,4 кВ номінальною потужністю 100 кВА (рис. 4.1) та фізичний макет її синтезованої САЕ (рис. 4.4) [35-38].

Фізичний макет низьковольтного струмопроводу (рис. 4.1) змонтовано на робочому місці магнітовимірювального стенду магнітодинамічного комплексу

ІПМаш НАН України [37, 105]. Він виконаний у геометричному масштабі 1:1 із проводу ПВС з перерізом 30 мм^2 та дерев'яних рейок. Для спрощення вимірювань індукції МП, макет ТП (рис. 4.4) покладений на бік.

Рисунок 4.1 – Повномасштабний фізичний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА із координатним пристроєм на магнітовимірювальному стенді

Макет струмопроводу живиться за схемою (рис. 4.2) від індукційного регулятора типу ІР 59/32 (рис. 4.3 *а*) через резистори навантаження R_H (рис. 4.3 *в*) із можливістю регулювання трифазного струму у діапазоні 0-220 А.

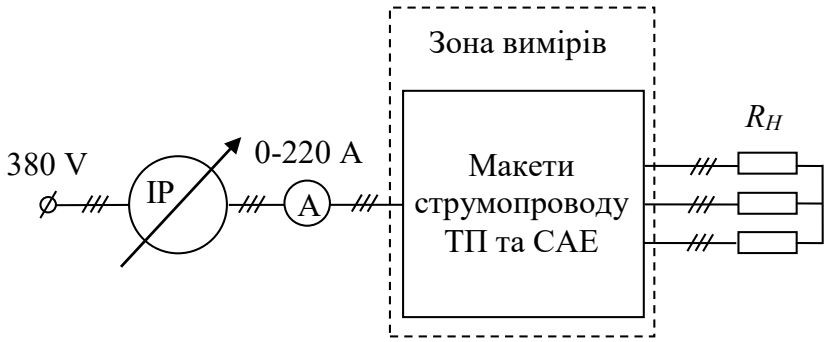


Рисунок 4.2 – Схема лабораторної установки для дослідження ЗМП фізичних макетів низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА та САЕ

Струм у струмопроводах макету вимірюється за допомогою трансформаторів струму I508M та комплекту вимірювального К50, що розміщений на робочому місті оператора управління ІР-59/32 (рис. 4.3 *б*).

а) *б)* *в)*

Рисунок 4.3 – Основні силові елементи лабораторної установки (*а*) індукційний регулятор ІР-59/32; (*б*) робоче місце оператора управління ІР-59/32; (в) резистори навантаження струмопроводу ТП.

Діюче значення індукції МП вимірюється векторними магнітометрами типів EMF-828 (рис. 4.4*а*) та Magnetoscop 1.069 (рис. 4.4*б*)

а) *б)*

Рисунок 4.4 – Магнітовимірювальні прилади лабораторної установки

Фізичний макет синтезованої у підрозділі 3.3 дисертації одноканальної САЕ (рис. 4.4) виконаний у розімкненій структурі (рис. 3.1*а*). Макет містить:

повномасштабну КО з параметрами, наведеними у табл. 3.1, виконану з проводу ПВ3 із перерізом 0,75 мм^2 та дерев'яних рейок (рис. 4.5), та блок системи керування струмом КО (БК), який складається з ПУ, ПН, РС, ДЖ (рис. 4.6*а*).

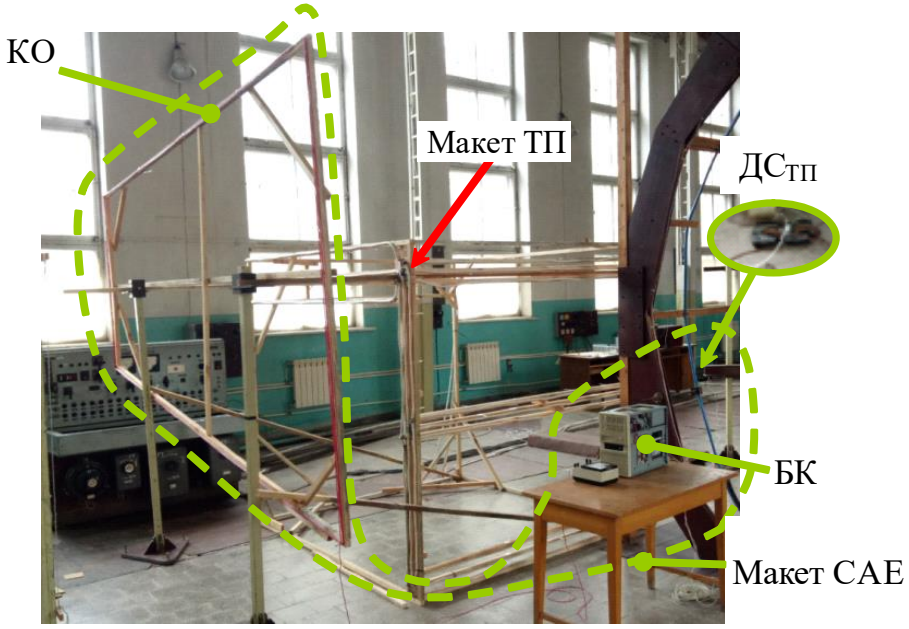


Рисунок 4.5 – Досліджувані макети струмопроводу ТП 100 кВА та САЕ на магнітовимірювальному стенді

а) *б)*

Рисунок 4.6 – Компенсаційна обмотка макету САЕ (*а*) та блок БК системи керування її струмом (*б*)

Блок БК САЕ (рис. 4.6) [106, 107], виконаний за схемою відповідно до

рис. 3.1*а*. ПН САЕ побудований на основі інтегрального підсилювача звукової частоти класу АВ типу TDA 7294 потужністю по 50 Вт із напругою живлення ± 36 В, який формується його внутрішнім джерелом живлення. ПУ блоку БК виконаний на аналогових елементах і забезпечує настроювання діапазону регулювання фази вихідного струму відносно вхідного сигналу від 8 до 178 ел. град. та вихідного струму від нуля до 7 А, що достатньо для функціонування досліджуваної САЕ.

4.2 Програма та методика експериментальних досліджень макетів струмопроводу та синтезованої системи активного екранування

Експериментальні дослідженя проведені для перевірки запропонованої у підрозділі 2.4 дисертації мультидипольної математичної моделі ЗМП ТП (2.6) та перевірки теоретичних положень методики синтезу (рис. 3.2) САЕ МП вбудованих ТП.

Програма експериментальних досліджень включає:

а) дослідження індукції МП низьковольтного струмопроводу макету ТП 100 кВА (рис. 4.1);

б) експериментальну перевірку синтезованої САЕ МП ТП 100 кВА (рис. 3.4) на її повномасштабному фізичному макеті при номінальному робочому струмі (150 А) та його зміні.

Методика експериментальних досліджень ЗМП фізичного макету струмопроводу ТП 100 кВА складається з наступних етапів:

1. Об'єкт досліджень – МП макету струмопроводу ТП.

2. Прилади для вимірювань індукції МП частотою 50 Гц:

- магнітометр EMF-828, вимірює діюче значення індукції МП в діапазоні 0,1-2000 мкТл з похибкою не більше 5%;

- magnetoscop 1.069, вимірює діюче значення індукції МП в діапазоні 0,01-600 мкТл з похибкою не більше 2,5%.

3. Підготовка до проведення вимірювань магнітного поля:

- вибрати систему координат X, Y, Z, до якої будуть прив'язані результати вимірювань;

- вибрати сітку вимірювань згідно рис. 3.3*а* із шагом 0,25 м;

- підготовку магнітометру проводити відповідно до інструкції з експлуатації приладу;

- подати струм у струмопровід макету ТП.

4. Порядок проведення вимірів МП:

1) Виставити необхідне значення струму у струмопроводі макету ТП.

2) Провести вимірювання діючого значення індукції магнітного поля Bd_x , Bd_y , Bd_z у кожній точці вимірювань P_i.

3) По результатам вимірювань у кожній точці P_i розрахувати модуль індукції магнітного поля Bd_i за формулою (2.1).

5. Порівняння результатів експерименту з результатами розрахунку.

Провести розрахунок МП макету ТП по формулі (2.6) та визначити розкид результатів розрахунку та експерименту.

Методика експериментальних досліджень синтезованої САЕ МП ТП 100 кВА складається з наступних етапів:

1. Об'єкт досліджень – САЕ МП ТП.

2. Прилади для вимірювань індукції МП частотою 50 Гц:

- магнітометр EMF-828, вимірює діюче значення індукції МП в діапазоні 0,1-2000 мкТл з похибкою не більше 5%;

- magnetoscop 1.069 , вимірює діюче значення індукції МП в діапазоні 0,01-600 мкТл з похибкою не більше 2,5%.

3. Досліджуване джерело МП частотою 50 Гц.

Для проведення досліджень ефективності САЕ МП ТП використовується фізичний макет ТП 100 кВА (рис. 4.1), який живиться від трифазного індукційного регулятора типу ІР 59/32. Схема підключення приведена на рис. 4.2.

4. Схема дослідження.

Ефективність екранування визначається за результатами вимірювання

індукції вихідного магнітного поля *Bd* в точках P_i області екранування без САЕ, і магнітного поля *Bds* в цих же точках, при використанні САЕ.

5. Підготовка до проведення вимірювань магнітного поля:

- вибрати систему координат X, Y, Z, до якої будуть прив'язані результати вимірювань;

- вибрати сітку вимірювань на контрольній площині D згідно рис. 3.3*а*;

- підготовку магнітометру проводити відповідно до інструкції з експлуатації приладу;

- підготовити САЕ МП ТП;

- підготовити макет ТП;

- створити у зоні вимірювання вихідне магнітне поле струмопроводу ТП.

6. Порядок проведення дослідження ефективності екранування САЕ МП ТП:

1) Виставити необхідне значення струму у струмопроводі макету ТП.

2) Провести вимірювання діючого значення індукції МП Bd_x , Bd_y , Bd_z у кожній точці вимірювань P_i.

3) По результатам вимірювань у кожній точці P_i. розрахувати модуль індукції МП Bd_i за формулою (2.1) та визначити максимум із розрахованого масиву даних Bd_{max}.

4) Включити САЕ МП ТП.

5) Провести вимірювання екранованого САЕ діючого значення індукції магнітного поля Bds_x , Bds_y , Bds_z у кожній точці вимірювань P_i.

6) По результатам вимірювань у кожній точці P_i. розрахувати модуль індукції МП Bds_i за формулою (2.1) та визначити максимум із розрахованого масиву даних Bds_{max}.

7) Розрахувати коефіцієнт екранування *SF* за визначеними у пункті 3) Bd_{max} і у пункті 6) Bds_{max} за формулою (1.16).

7. Порівняння результатів експерименту з результатами розрахунку.

На контрольній площині D у точках P_i розрахувати діюче значення індукції МП макету ТП за формулою (2.6) та визначити максимум із

розрахованого масиву даних. У точках P_i відповідно (3.7) розрахувати діюче значення індукції МП, екрановане САЕ та визначити максимум із розрахованого масиву даних. Розрахувати коефіцієнт екранування *SF* за формулою (1.16) та порівняти з результатами експерименту.

4.3 Результати експериментальних досліджень індукції ЗМП фізичного макету ТП 100 кВА

Дослідження виконані на повномасштабному фізичному макеті струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 4.1) по методиці, приведеній у підрозділі 4.2 дисертації при номінальних струмах.

Вихідні данні експерименту. Номінальні струми у струмопроводі макету ТП відповідають рис. 2.18: $I_{ном}$ = 150 А; I_1= I_2 = $I_{ном}$; I_3 =2/3 $I_{ном}$, I_4 = I_5 = I_6 = I_7 =1/3$I_{ном}$. Мінімальна відстань від поверхні струмопроводу до контрольної площини D $h_в$=1,835 м.

Результати вимірів представлені у табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Результати вимірів індукції ЗМП макету ТП 100 кВА

x, м	*y*, м	Модуль індукції МП *B*, мкТл
1	2	3
–0,1	0,33	1,526
0,43	0,33	1,443
0,94	0,33	1,098
1,42	0,33	0,779
0,18	0,5	1,640
0,65	0,5	1,418
1,17	0,5	0,984
–0,1	0,75	1,757
0,94	0,75	1,230
0,18	1	1,914
0,65	1	1,546
–0,1	1,25	1,863
0,43	1,25	1,785

Продовження табл. 4.1

1	2	3
0,94	1,25	1,302
1,42	1,25	0,886
0,18	1,51	1,847
0,65	1,51	1,524
–0,1	1,74	1,700
0,43	1,74	1,625
0,94	1,74	1,214
1,42	1,74	0,876
0,18	1,99	1,556
0,65	1,99	1,345
1,17	1,99	0,990

Порівняння отриманих результатів експерименту (табл. 4.1) з результатами розрахунку (рис. 2.19*а*, табл. 2.4), виконане у розділі 2 дисертації свідчить, що результати експерименту збігаються із розрахунком індукції МП із незначним розкидом, що не перевищує 7%. Це підтверджує коректність запропонованої здобувачем удосконаленої двофазної мультидипольної моделі ЗМП ТП (2.6), на основі якої виконаний розрахунок.

4.4 Результати експериментальних досліджень фізичного макету САЕ ЗМП ТП 100 кВА

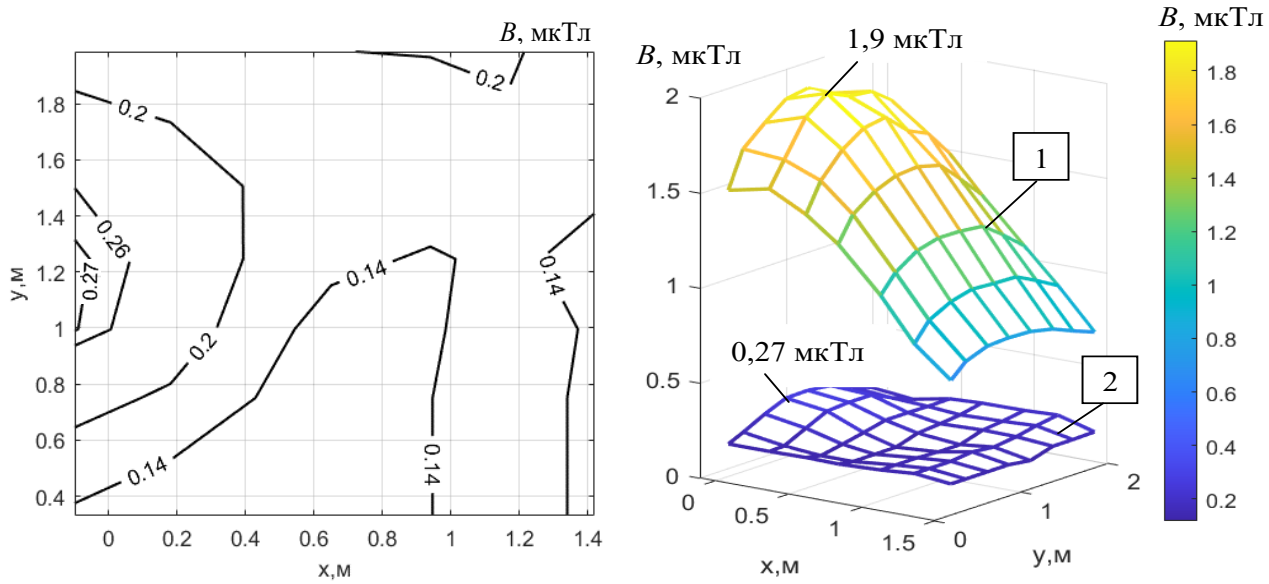
Нижче представлені результати вимірів діючого значення індукції МП фізичного макету ТП (рис. 4.7) разом із фізичним макетом синтезованої САЕ з однією плоскою КО (рис. 3.4) [35-38]. Виміри виконані по методиці, приведеній у підрозділі 4.2 дисертації.

Вихідні данні експерименту. Навантаження макету ТП задавалися у діапазоні I_l=[0.2 – 1] $I_{ном}$, де $I_{ном}$=150 А. Діюче значення струму у струмопроводі макету ТП (рис. 2.18) при $I_{ном}$ = 150 А (0,4 кВ) мали наступні значення I_1= I_2 = $I_{ном}$; I_3 =2/3 $I_{ном}$, I_4 = I_5 = I_6 = I_7 =1/3$I_{ном}$ і при зміні навантаження

змінювалися пропорційно струму $I_{l.}$ Діюче значення струму в КО (рис. 4.5), при $I_{ном}$, складало $I_{КО}$ =1,08 А.

Мінімальна відстань від струмопроводу до контрольної площини D $h_в$=1,835 м. Мінімальна відстані від КО до струмопроводу макету ТП $h_{КО}$ = 0,8 м. Виміри МП проводилися на площині D (рис. 3.4).

Експериментально визначене значення вихідної індукції МП макету ТП на площині D представлено на рис. 2.19*б*, де максимальне значення індукції МП становить B_{0max} = 1,9 мкТл. Експериментально визначене значення індукції МП макету ТП на площині D при екрануванні САЕ представлено на рис. 4.7.



а) *б)*

Рисунок 4.7 – Експериментально визначений розподіл індукції МП макету ТП 100 кВА при I $_{ном}$ = 150 А на контрольній площині D після екранування (*а*), а також вихідний (1) та екранований (2) розподіл індукції МП (*б*)

Максимальне значення екранованого МП становить B_{Smax} = 0,27 мкТл, (рис. 4.7*а*), а ефективність екранування *SF* відповідно до рис. 4.7*б* складає не менше 7 одиниць і добре узгоджується із розрахунком (рис. 3.6).

Узагальнені результати експериментальних досліджень ефективності САЕ МП ТП при різних робочих струмах макету ТП (у діапазоні I_l = [0.2 – 1] $I_{ном}$) приведено у табл. 4.2 та на рис. 4.8.

На рис. 4.8 та у табл 4.3 представлені результати порівняння виконаного в розділі 3 дисертації розрахунку (табл. 3.2) та експерименту (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Експериментально визначені максимальні рівні індукції МП ТП до і після екранування МП та коефіцієнт екранування *SF* САЕ при зміні робочого струму ТП

I_1, А	30	50	70	90	110	130	150
Вихідний рівень B_{0max}, мкТл	0,392	0,61	0,91	1,13	1,42	1,65	1,9
Результуючій рівень B_{Smax}, мкТл	0,057	0,088	0,13	0,163	0,204	0,235	0,27
SF, одиниць	6,88	6,93	7,00	6,93	6,96	7,02	7,04

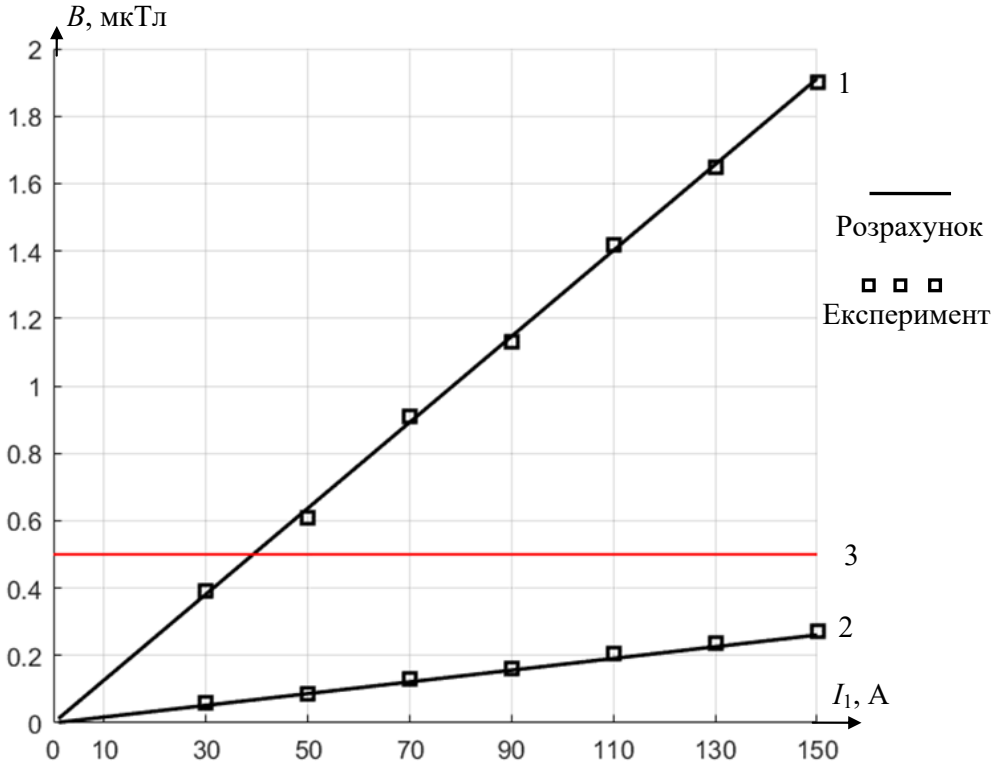


Рисунок 4.8 – Залежність максимальних значень індукції МП ТП на контрольній площині від струму I_1 ($I_{1ном}$=150 А) до (1) і після (2) екранування САЕ: 1 – вихідний рівень (без використання САЕ), 2 – екранований рівень (при використанні САЕ), 3 – гранично-допустимий рівень МП для житлових приміщень

Порівняння розрахункових та експериментальних даних (табл. 3.2, табл. 4.3) свідчить, що розкид *SF* (δ_{SF}) є меншим 10 %, і це підтверджує правильність отриманих здобувачем теоретичних положень та коректність запропонованої методики синтезу САЕ.

Із табл. 4.2, табл. 4.3 також слідує, що експериментально визначена ефективність САЕ при зміні робочого струму ТП I_1 у діапазоні 30 – 150 А (6,88-7,04) теж близька до розрахункової (7.33), і це підтверджує працездатність САЕ при зміні навантаження ТП.

Таблиця 4.3 – Порівняння результатів розрахунку та експерименту при використанні синтезованої САЕ МП ТП 100 кВА

	I_1, А	30	50	70	90	110	130	150
Розрахунок	Вихідний рівень B_{0max}, мкТл	0,3823	0,6371	0,8919	1,1468	1,4016	1,6565	1,9113
	Результуючий рівень B_{Smax}, мкТл	0,0522	0,0869	0,1217	0,1565	0,1913	0,2260	0,2608
	SF, одиниць	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33	7,33
Експеримент	Вихідний рівень B_{0max}, мкТл	0,392	0,61	0,91	1,13	1,42	1,65	1,9
	Результуючий рівень B_{Smax}, мкТл	0,057	0,088	0,13	0,163	0,204	0,235	0,27
	SF, одиниць	6,88	6,93	7,00	6,93	6,96	7,02	7,04
	δ_{SF}, %	9,2	1,3	6,8	4,2	6,6	4,0	3,5

Таким чином, результати експерименту підтверджують, що розроблена здобувачем методика синтезу САЕ дозволяє синтезувати САЕ МП вбудованих ТП із розрахунковою ефективністю, достатньою для зменшення індукції МП частотою 50 Гц до рівня санітарних норм в житлових приміщеннях, наближених до вбудованої ТП потужністю 100 кВА.

4.5 Практичні рекомендації із побудови систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій

В розділі 3 дисертації здобувачем синтезовані та експериментально досліджені САЕ МП ТП при ідеальних умовах – відсутності поблизу КО САЕ струмопровідних та феромагнітних мас, та при ідеальних елементах БК САЕ. Оцінимо вплив цих факторів на ефективність реальних САЕ.

4.4.1 В реальних умовах КО САЕ монтується в приміщенні ТП, що має металеві конструктивні елементи (шафи, елементи кріплення тощо), які спотворюють МП КО САЕ та можуть зменшувати ефективність екранування МП ТП у порівнянні із визначеними у дисертації теоретичними значеннями.

На жаль, здобувачу в умовах військових дій, не вдалося в рамках дисертації виконати дослідження ефективності САЕ в реальних умовах – у будинках із вбудованими ТП, та дослідити вказаний ефект можливого зменшення ефективності САЕ від впливу металевих конструкцій. Але аналіз результатів виконаних в розділі 2 дисертації експериментальних досліджень (рис. 2.5) розподілу індукції МП в реальному житловому приміщенні над вбудованою ТП (рис. 2.1 *г*) потужністю $Q_{\text{nom}} = 715$ кВА, та результатів розрахунку (рис. 2.15) показує, що хоча просторова структура виміряного МП є спотвореною, але максимальні значення індукції її МП практично співпадають (1,7 мкТл – розрахунок і 1,6 мкТл – експеримент), де виміряне МП ослаблене на 6 %.

Із високою вірогідністю можна припустити, що спотворення МП від КО САЕ буде аналогічним із незначним зменшенням максимальних значень індукції, і при песимістичному прогнозі буде складати приблизно 10%, що призведе до аналогічного зменшення ефективності екранування САЕ. Таким чином теоретична ефективність синтезованих САЕ при їх використанні в реальних умовах повинна бути зменшена приблизно на 10%.

Дослідження вказаного ефекту можливого зменшення ефективності

екранування САЕ в реальних житлових приміщеннях є предметом подальших досліджень здобувача.

4.4.2 На ефективність роботи синтезованих САЕ вбудованих ТП, які виконуються у розімкненій структурі, негативно впливає нелінійність та нестабільність передатних характеристик її елементів в умовах тривалої експлуатації, що потребує виконання наступних рекомендацій при проектуванні та експлуатації САЕ.

1. Такі функціональні елементи САЕ (рис. 3.1), як ПУ, РС, $ДС_{КО}$, $ДС_{ТП}$ повинні мати похибку коефіцієнта передачі та його довготривалої стабільності, обмежену на рівні 0,5%. Тому доцільна реалізація елементів ПУ, РС на основі мікроконтролеру, та їх програмування і настроювання за допомогою ПК. В якості мікроконтролера може бути рекомендований 16-розрядний мікроконтролер типу STM з тактовою частотою 32 мГц.

2. Підсилювач напруги ПН при визначених потужностях САЕ до 50 Вт доцільно виконувати на основі стандартних інтегральних підсилювачів звукової частоти класу АВ (наприклад типу TDA 7294), які мають вихідну потужність до 50 Вт, напругу живлення ± 36 В і КПД $Q_{пн} = 0,75$. Використання підсилювачів із широтно-імпульсною модуляцією в САЕ недоцільно у зв’язку із широким спектром частот їх вихідного струму.

3. В якості $ДС_{ТП}$ доцільно використовувати штатні вимірювальні трансформатори струму ТП класу точності 0,5.

4. ДЖ САЕ може бути виконане на основі серійних імпульсних джерел живлення, наприклад, типу GPA50A-36Б із КПД $Q_{ДЖ} = 0,95$.

5. Доцільно проводити періодичне (раз у півроку) настроювання ПУ САЕ (рис. 3.1) під контролем МП у приміщенні.

Виконання вказаних вище рекомендацій дозволить забезпечити реальну ефективність екранування систем активного екранування МП в житлових приміщеннях будинків із вбудованими ТП не менше 90% від результатів розрахунку і складє 4–14 одиниць.

4.6 Висновки по розділу 4

1. Для проведення експериментальних досліджень, на магнітовимірювальноу стенді унікального магнітодинамічного комплексу ІПМаш НАН України створено лабораторну установку із повномасштабним фізичним макетом низьковольтного струмопровроду підстанції 100 кВА та повномасштабним фізичним макетом синтезованої для неї системи активного екранування. Установка дозволяє здійснити вимірювання магнітного поля підстанції із системою активного екранування за розробленими здобувачем методиками вимірювань.

2. Здійснено експериментальну перевірку запропонованої удосконаленої двофазної мультидипольної моделі магнітного поля трифазного струмопроводу на повномасштабному фізичному макеті струмопроводу підстанції 100 кВА, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 7% та коректність запропонованої удосконаленої математичної моделі.

3. Здійснено експериментальну перевірку теоретичних положень запропонованої методики синтезу систем активного екранування магнітного поля на повномасштабному фізичному макеті системи активного екранування зовнішнього магнітного поля підстанції 100 кВА, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 10% та коректність запропонованої методики синтезу.

4. Розроблені практичні рекомендації з побудови систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих підстанцій, виконання яких дозволить в реальних умовах експлуатації забезпечити фактичну ефективність екранування до 14 одиниць.

5. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [35-38].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання – виконано синтез систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих у житлові будинки міських трансформаторних підстанцій потужністю 100–1260 кВА для зменшення індукції їх магнітного поля до безпечного для населення рівня в прилеглих житлових приміщеннях. Основні висновки полягають в наступному.

1. На основі аналізу відомих в світі результатів досліджень зовнішнього магнітного поля промислової частоти міських трансформаторних підстанцій, які вбудовуються у житлові будинки, та аналізу відомих методів та засобів його нормування, моделювання та зменшення до безпечного рівня, обґрунтована актуальність досліджень зовнішнього магнітного поля вбудованих у житлові будинки міських підстанцій потужністю 100–1260 кВА, та синтезу систем активного екранування їх зовнішнього магнітного поля для вирішення завдання зменшення індукції магнітного поля в прилеглих житлових приміщеннях до безпечного рівня.

2. Проведено комплексні експериментальні дослідження розподілу індукції зовнішнього магнітного поля частотою 50 Гц, створеного 110 типовими міськими трансформаторними підстанціями 10(6)/0,4 кВ встановленої потужності від 100 кВА до 1260 кВА м. Харкова, які можуть вбудовуватися у житлові будинки, та проведено їх аналіз як джерел магнітного поля. Показано, що індукція магнітного поля в прилеглих житлових приміщеннях може перевищувати нормативний рівень для житлових приміщень (0,5 мкТл) за умови наближення на відстань від 6 м (100 кВА) до 10 м (1260 кВА). Показано, що вбудовані підстанції можуть створювати в прилеглих житлових приміщеннях магнітне поле з індукцією 2–8 мкТл, що представляє небезпеку для його здоров'я і потребує зменшення від 4 до 16 разів.

3. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що основним джерелом зовнішнього магнітного поля будованих трансформаторних

підстанцій є низьковольтний струмопровід 0,4 кВ, вклад якого в загальний рівень магнітного поля на відстані 2 м складає більше 90%, і це дозволяє в подальших розрахунках не враховувати інші джерела магнітного поля.

4. Удосконалено мультидипольну математичну модель зовнішнього магнітного поля трифазних струмопроводів шляхом її побудови на основі двофазної моделі трифазного електричного кола, що в порівнянні із відомою мультидипольною моделлю дозволяє без збільшення похибки вдвічі наблизити розрахункову область, і виконувати розрахунок у всіх прилеглих житлових приміщеннях будинку, які розташовані на відстані від одного метра до підстанції.

5. Розроблено методику синтезу систем активного екранування магнітного поля в житлових приміщеннях будинків із вбудованими підстанціями, яка ґрунтується на запропонованій здобувачем удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі зовнішнього магнітного поля трифазних струмопроводів трансформаторних підстанцій та законі Біо-Савара, а також методі оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень з урахуванням бінарних відносин переваги, реалізація якої дозволяє синтезувати системи активного екранування з плоскими компенсаційними обмотками із теоретичною ефективністю 6–16 одиниць, та зменшити індукцію магнітного поля частотою 50 Гц в житлових приміщеннях до рівня санітарних норм.

6. За розробленою методикою синтезу виконано синтез систем активного екранування магнітного поля вбудованих підстанцій потужністю від 100 до 1260 кВА в житлових приміщеннях площею 20–25 м^2, які розташовані над підстанцією та збоку від неї на відстанях від 1 м до 1,85 м. Синтезовані системи активного екранування потужністю від 0,012 до 0,229 кВт, виконуються за одноканальною або двоканальною розімкненою структурою, мають одну, дві, чотири плоскі чотирикутні компенсаційні обмотки із магнітними моментами від 64 до 974 А·м^2 та забезпечують теоретичну ефективність екранування від 6

до 16 одиниць і дозволяють зменшити рівень магнітного поля в усіх житлових приміщеннях від 1,2–7 мкТл до рівня санітарних норм 0,5 мкТл.

7. Для проведення експериментальних досліджень на магнітовимірювальному стенді унікального магнітодинамічного комплексу Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України створено лабораторну установку із повномасштабним фізичним макетом низьковольтного струмопровроду підстанції 100 кВА та повномасштабним фізичним макетом синтезованої для неї системи активного екранування. Установка дозволяє здійснити вимірювання магнітного поля підстанції із системою активного екранування за розробленими здобувачем методиками вимірювань.

8. Здійснено експериментальну перевірку запропонованої удосконаленої двофазної мультидипольної математичної моделі магнітного поля трифазного струмопроводу на повномасштабному фізичному макеті струмопроводу підстанції 100 кВА, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 7% та коректність запропонованої удосконаленої математичної моделі.

9. Здійснено експериментальну перевірку теоретичних положень запропонованої методики синтезу систем активного екранування магнітного поля на повномасштабному фізичному макеті системи активного екранування зовнішнього магнітного поля підстанції 100 кВА, яка підтвердила співпадіння результатів розрахунку і експерименту з розкидом менше 10% та коректність запропонованої методики синтезу.

10. Розроблені рекомендації з практичної побудови систем активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих підстанцій, виконання яких дозволить в реальних умовах експлуатації забезпечити фактичну ефективність екранування до 14 одиниць.

11. Основні теоретичні положення та результати експериментальних досліджень використано при виконанні фундаментальних досліджень в рамках тематичного плану за наступними науково-дослідними роботами: 1 «Розвиток

наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків» (шифр «БІОМАГ 2», № ДР 0116U005462, 2017 – 2021 рр.);
2. «Розвиток методів та засобів нормалізації магнітного поля промислової частоти у приміщеннях житлових будинків, що створюється вбудованими трансформаторними підстанціями та побутовим електрообладнанням» (шифр «ЕКОМ», № ДР 0122U001772, 2022 – 2026 рр.), та передано до впровадження ТОВ «КиївПромЕлектроПроект».

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Leung S.W., Chan K.H., Fung L.C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*, 2011, vol. 21, no. 5, pp. 1711-1718. doi: https://doi.org/10.1002/etep.517.

2. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIRED – Open Access Proceedings Journal*, 2017, no. 1, pp. 752-756. doi: https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1230.

3. Thuroczy G., Janossy G., Nagy N., Bakos J., Szabo J., Mezei G. Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary. *Radiation protection dosimetry*, 2008, vol. 131, no. 4, pp. 469–473. doi: https://doi.org/10.1093/rpd/ncn199.

4. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT transactions on modelling and simulation*, 2005, vol. 39, pp. 695–704. doi: https://doi.org/10.2495/BE050641.

5. Salinas E., Aspemyr L., Daalder J., Hamnerius Y., Luomi J. Power Frequency Magnetic Fields from In-house Secondary Substations. "*CIRED'99, 15th Conference on Electricity Distribution, Technical Reports*". Liege, 1999, session 2, pp. 161-164.

6. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 8–9, pp. 769–775. doi: https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

7. Bravo-Rodriguez J., Del-Pino-Lopez J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 7, p. 1332. doi: https://doi.org/10.3390/en12071332.

8. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. "*42nd International Universities*

Power Engineering Conference". Brighton, UK, 2007. pp. 832–836. doi: https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469057.

9. Buccella C., Feliziani M., Prudenzi A. Active shielding design for a MV/LV distribution transformer substation. "*2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility"*. Beijing, China, 2002, pp. 350-353. doi: https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2002.1177442.

10. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, vol. 56, pp. 97–106. doi: https://doi.org/10.3233/JAE-172286.

11. Del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 1055–1061. doi: https://doi.org/10.1109/TLA.2014.6894000.

12. Del-Pino-Lopez J., Giaccone L., Canova A., Cruz-Romero P. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings. *Electric Power Systems Research*, 2015, vol. 119, pp. 337–344. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr. 2014.10.019.

13. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. "*IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*". Boston, 2003, vol. 1, pp. 197–202. doi: https://doi.org/10.1109/ISEMC.2003.1236591.

14. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2004, vol. 72, pp. 569–579. doi: https://doi.org/10.2495/SC040561.

15. Celozzi S., Garzia F.. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, 2004, vol. 151, no. 1, pp. 2-7. doi: https://doi.org/10.1049/ip-smt:20040002.

16. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 2, pp. 254–265.

17. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, MN, USA, 2002, pp. 222–226. doi: https://doi.org/10.1109/isemc.2002.1032478.

18. Canova A., del-Pino-Lopez J.C., Giaccone L., Manca M. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015. vol. 51, no. 3, pp. 1-4. doi: https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2354515.

19. The International EMF Project. *Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization*, Geneva, Switzerland, 1996, 2 p. URL: https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project .

20. World Health Organization. Electromagnetic fields and public health. Exposure to extremely low frequency fields. URL: https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure-to-extremely-low-frequency-field. (дата звернення: 05.05.2023).

21. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013, № 2, С. 3–9.

22. Пелевин Д.Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 14-16.

23. Szabo J., Janossy G., Thuroczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 48–52. doi: https://doi.org/10.1002/bem.20264.

24. Ilonen K., Markkanen A., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure.

Bioelectromagnetics, 2008, vol 29, no 3, pp. 213–218. doi: https://doi.org/10.1002/bem.20385.

25. Okokon E. O., Roivainen P., Kheifets L., Mezei G., Juutilainen J. Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2014, vol. 24, no. 1. pp. 100–104. doi: https://doi.org/10.1038/jes.2013.54.

26. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 KV substation and proposal of mitigation techniques. "*Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*". Belgrade, 2016, pp. 1–8. doi: https://doi.org/10.1049/cp.2016.1025.

27. Rahman N.A., Rashid N.A., Mahadi W.N., Rasol Z., 2011. Magnetic Field Exposure Assessment of Electric Power Substation in High Rise Building. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 953-961. doi: https://doi.org/10.3923/jas.2011.953.961.

28. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України, Видавництво «Форт», Харків, 2017, 760 с.

29. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdui I.V. Active shielding of power frequency magnetic field in buildings in the vicinity of the electric airlines. *Problemele energeticii regionale*, 2019, no. 1-1(40), pp. 11-24. doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.3239130.

30. Кузнецов Б.И.,Туренко А.Н., Никитина Т.Б., Волошко А.В., Коломиец В.В. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 4, С. 8-10. doi: https://doi.org/10.15407/techned2016.04.008.

31. Ерисов А.В., Пелевин Д.Е., Пелевина (Кундиус) Е.Д. Метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи на основе цилиндрических пространственных гармоник. *Електротехніка і електромеханіка*, 2016, № 2, С. 24-27. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.2.04.

32. Розов В.Ю. Пелевин Д.Е., Пелевина (Кундиус) Е.Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, №5, С. 60-66. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10.

33. Розов В.Ю., Кундиус Е.Д., Пелевин Д.Е. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, №3, С. 24-30. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04.

34. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., Кундіус К.Д. Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції "Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення".* м. Київ, 12–13 листопада 2020 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2020, Вип. 20, С. 24-26.

35. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., Кундіус К.Д. Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанція. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзєєвські читання) "Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України".* м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2021, Вип. 21, С. 329-331.

36. Pelevin D., Kundius K., Sokol O., Grinchenko V. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop. "*Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021".* Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Science*s*, 2021, pp. 81-82.

37. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Е., Кундіус К.Д. Моделювання магнітного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу.

Електротехніка і електромеханіка, 2023, № 5, С. 87-93. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13.

38. Кундіус К.Д. Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит,* 2022, № 11-12, С. 50-62. doi: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05.

39. ДБН Б.2.2-12:2019: Планування і забудова територій. Київ: Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово- комунального господарства України, 2019, 117 с.

40. Розов В.Ю. Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: автореф. дис…д-ра техн. наук: 05.09.03. Харків, 2002, 37 с.

41. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Киев. Институт электродинамики, 1995, №772, 42 с. (Препринт. НАН Украины.)

42. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. Київ: Наукова думка, 1969, 351 с.

43. Izagirre J., Del Rio L., Gilbert I. P., Rodriguez-Seco J. E., Güemes J. A., Iralagoitia A. M. Application of a new IEC magnetic field assessment methodology to promote transformer substation sustainable development. *IEEE 2011 EnergyTech*, Cleveland, OH, USA, 2011, pp. 1-6. doi: https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2011.5948529.

44. Huss A., Goris K., Vermeule, R., Kromhout H. Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels? *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 2013, vol. 23, no. 5, pp. 554–558. doi: https://doi.org/10.1038/jes.2012.130.

45. Tarmizi A. I., Rotaru M. D., Sykulski J. K. Magnetic field calculations within substation environment for EMC studies. "*2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering".* Florence, Italy, 2016, pp. 1-6. doi: https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555613

46. Said I., Hussain H. B., Dave V. Characterization of magnetic field at distribution substations. "*9th International Conference on Environment and Electrical Engineering"*. Prague, Czech Republic, 2010, pp. 423-426. doi: https://doi.org/10.1109/EEEIC.2010.5489920.

47. Шевченко С. Ю., Волохін В. В., Окунь О. О. Визначення магнітного поля підстанцій високої напруги на основі метода скінченних елементів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2012, №2(4). С. 35-39.

48. Navarro-Camba E.A., Segura-García J., Gomez-Perretta C. Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Homes and Areas Surrounding Urban Transformer Stations in Silla (Spain): Environmental Impact Assessment. *Sustainability,* 2018, vol. 10, no. 8, p. 2641. doi: https://doi.org/10.3390/su10082641.

49. Röösli M., Jenni D., Kheifets L., Mezei G. Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *The Science of the total environment*, 2011, vol. 409, no. 18, pp. 3364–3369. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041.

50. WHO. Participating countries & entities in EMF Project by WHO Regions URL: https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project/participating-countries-entities. (дата звернення: 26.06.2023).

51. WHO. Fact sheet №322: Electromagnetic fields and public health: Exposure to extremely low frequency fields. *WHO Press*, 2007. URL: https://www.nrc.gov/docs/ML1004/ML100481077.pdf. (дата звернення: 26.06.2023).

52. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human, 2002, no. 80, p. 395.

53. Wertheimer N., Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*, 1979, no. 109(3) pp. 273–284.

54. WHO. Exposure limits URL: http://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITS (дата звернення: 25.05.2023).

55. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM−2015 − [acting from may 2015]. Germany: Institut fer Baubiologie + Ekologie IBN, 2015, 5 p. URL: https://www.baubiologie.de/site/wp-content/uploads/richtwerte-2015-englisch (дата звернення: 05.05.2023).

56. Сердюк А.М., Думанський В.Ю., Біткін С.В., Дідик Н.В., Думанський Ю.Д., та ін. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови. *Гігієна населених місць: Зб. Наук. Пр*, 2015, № 66, С. 20–29.

57. ICNIRP Guidelines.
URL: http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPEMFgdlRus.pdf (дата звернення: 25.05.2023).

58. Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport. Author: Rianne Stam, The Netherlands, 2018. 18 p. https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Comparison%20of%20international%20policies%20on%20electromagnetic%20fields%202018.pdf (дата звернення: 25.05.2023).

59. WHO. Exposure limits for low-frequency fields (public). URL: https://apps.who.int/gho/data/node.main.EMFLIMITSPUBLICLOW?lang=en (дата звернення: 25.05.2023).

60. Васецкий Ю. М. Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. Київ: Наукова думка, 2010, 271 с.

61. Розов В.Ю., Волохов С.А., Ерисов А.В., Заутнер Ф.Л., Пилюгина О.Ю. Особенности снижения внешних магнитных полей электрических машин. Киев: Ин-т электродинамики, 1996, №778, 41 с. (Препринт. НАН Украины)

62. Заутнер Ф.Л., Пилюгина О.Ю., Розов В.Ю. Вероятностный метод прогнозирования электромагнитных помех электрооборудования в низкочастотном диапазоне. *Техническая электродинамика*, 1994, №1, С. 3–6.

63. Болюх В. Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.О. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя. *Интегрированные технологии и энергосбережение*, 2009, № 3, С. 34-40.

64. Розов В.Ю. Пелевин Д.Е. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи *Технічна електродинаміка*, 2012, №4, С. 3-7.

65. Hasselgren L., Moller E. Hamnerius Y., Calculation of magnetic shielding of a substation at power frequency using FEM. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, vol. 9, no. 3, pp. 1398-1405. doi: https://doi.org/10.1109/61.311168

66. Bavastro D., Canova A., Giaccone L., Manca M. Numerical and experimental development of multilayer magnetic shields. *Electric Power Systems Research*, 2014, no.116, pp. 374–380. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.07.004.

67. Okun O., Shevchenko S., Korpinen L. A comparison of magnetic fields inside and outside high-voltage urban 110-kV power substations with the exposure recommendations of the Ukrainian regulatory authorities. *Radiation protection dosimetry*, 2013, vol. 154, no. 4, pp. 417–429. doi: https://doi.org/10.1093/rpd/ncs268.

68. Hasselgren L., Hamnerius Y. Calculation of low-frequency magnetic shielding of a substation using a two-dimensional finite-element method. *European Transactions on Electrical Power*, 2007, no. 5, pp. 81-90. doi: https://doi.org/10.1002/etep.4450050202.

69. San Segundo H., Roig V., Reduction of low voltage power cables electromag-netic field emission in MV/LV substations. *Electr. Power Syst. Res*, 2008, no. 78, pp. 1080–1088. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.09.006.

70. Ansys. URL: http://www.ansys.com/ (дата звернення: 05.05.2023).

71. FEMM. URL: http://www.femm.info (дата звернення: 05.05.2023).

72. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. Jones & Bartlett Publishers, 2009, 872 p.

73. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лупиков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и

полупроводниковых преобразователей. Киев. Институт электродинамики, 1996, 46 с. (Препринт. НАН Украины).

74. Розов В.Ю., Пилюгина О.Ю., Добродеев П.Н., Гетьман А.В., Волохов С.А., Лупиков В.С. Введение в демагнетизацию технических объектов. *Электротехника и Электромеханика*, 2006, № 4, С. 55-59.

75. Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків (шифр БІОМАГ 2) звіт про НДР/ Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України». № ДР 0116U005462, Харків. 2021 р. 158 с.

76. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. *Техническая электродинамика*, 1996, №1, С. 3-9.

77. Волошко О. В. Синтез систем активного екранування магнітного поля повітряних ліній електропередачі. За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 29 березня 2017 року. *Вісник Національної академії наук України*, 2017, № 7, С. 64–73. DOI: https://doi.org/10.15407/visn2017.07.064.

78. Barsali S., Giglioli R., Poli D. Active shielding of overhead line magnetic field: Design and applications. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 110, pp. 55-63. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.005

79. Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2009-2016. doi: https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813.

80. Beltran H., Fuster V., Garcia M. Magnetic field reduction screening system for a magnetic field source used in industrial applications. *9 Congreso Hispano Luso de Ingenieria Electrica*, 2005, pp. 84-99.

81. Canova A., Giaccone L., Cirimele V. Active and passive shield for aerial power lines. "*Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution"*. Madrid, 2019, no. 1096. doi: http://dx.doi.org/10.34890/516.

82. Celozzi S., Garzia F. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 2003, vol. 7, pp. 79-89.

83. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Экспериментальное исследование влияния пространственного расположения датчиков магнитного поля на эффективность замкнутой системы активного экранирования магнитного поля линий электропередачи. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, № 1, С. 16-20. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.03.

84. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Котляров Д.А. Экспериментальные исследования системы активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты с различными алгоритмами управления с помощью одной обмотки. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015, № 2, С. 21-25. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.2.04.

85. Bovdui I., Kuznetsov B., Voloshko A., Nikitina T. Experimental Research of Effectiveness of Active Shielding System of Overhead Transmission Lines Magnetic Field with Various Control Algorithms. "*2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)".* 2018, pp. 151-154. doi: https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559496.

86. Кузнецов Б.И., Пелевин Д.Е., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В. Котляров Д.А. Экспериментальное исследование макета системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2013, № 1, С. 134-137.

87.Кузнецов Б.И., Пелевин Д.Е., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Котляров Д.А. Исследование эффективности системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Вестник НТУ «ХПИ» Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*, 2013, № 36, С. 349-350.

88.Кузнецов Б.И., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Котляров Д.А. Синтез комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты. *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, 2014, №15 (91), С. 412 - 414.

89. Гальченко В.Я, Якимов А.Н. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роем частиц. Черкаси: ЧДТУ, 2015, 158 с.

90. Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu, Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: *Theory and Applications, Elsevier,* Inc., 2013. 450 p. doi: https://doi.org/10.1016/C2012-0-02754-8.

91. Matlab. URL: https://www.mathworks.com/products/matlab.html. (дата звернення: 05.06.2023).

92. Fortran. URL: https://fortran-lang.org/ru/index (дата звернення: 05.06.2023).

93. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем: монография. Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017, 170 с.

94. Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами. *Электротехника*, 1999, №5, С.2-6.

95. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines, in IEEE Std 644-2019 (Revision of IEEE Std 644-2008), 2020, pp.1-40.

96. Bowman J.D., Kelsh M.A., Kaune W.T. Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposures. *Publications Dissemination, EID, National Institute for Occupational Safety and Health*, 4676 Columbia Parkway, Cincinnati, OH 45226, USA, 1998, 137 p.

97. Пелевин Д.Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015, №4, С. 49-52.

98. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля жилых домов расположенных вблизи линии электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016, №3, С. 6-8.

99. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011. «Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ Настанова (зі змінами)». К.: Мінпаливенерго України, 2017, С. 139.

100. Розов В.Ю. Построение систем автоматической компенсации внешних магнитных полей подвижных объектов, содержащих ферромагнитные массы. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки»,* 2002, Ч. 2, С. 9-14.

101. Розов В.Ю., Гетьман А.В., Петров С.В., Ерисов А.В. Меланченко А.Г., Хорошилов В.С., Шмидт И.Р. Магнетизм космических аппаратов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»,* 2010, Ч.2, С. 144-147.

102. Розов В.Ю. Особенности построения полупроводниковых источников питания электромагнитных компенсаторов магнитных полей. *Техническая электродинамика*, 2001, №2, С. 24–30.

103. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б.,Волошко А.В. Снижение уровня техногенного магнитного поля промышленной частоты внутри заданной области пространства методами активного экранирования на основе алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации. *Електротехніка і електромеханіка,* 2015, № 3, С. 41-47. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.3.06.

104. López C. P. MATLAB Optimization Techniques. Apress Berkeley, CA, 2014. 292 p.

105. Баранов М.І., Розов В.Ю. Сокол Е.І. До 100-річчя Національної академії наук України–колиски вітчизняної науки і техніки. *Електротехніка і*

електромеханіка, 2018, № 5, С. 3-11. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.01.

106. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Котляров Д.А. Активное экранирование магнитного поля вблизи генераторных токопроводов электростанций. *Електротехніка і електромеханіка,* 2013, № 6, С. 66-71. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.6.12.

107. B.I. Kuznetsov, T.B. Nikitina, I.V. Bovdui, S.V. Petrov, V.V. Kolomiets, B.B. Kobilyanskiy. Active shielding of magnetic field with circular space-time characteristic. *Electrical engineering & electromechanics,* 2020, №2, 26-32 pp. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.04.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», к.т.н., ст.досл.

_____ В. Грінченко

«15» листопада 2021 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Кундіус Катерини Дмитрівни на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Ми, що нижче підписалися, представники Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (ДУ «ІТПМ НАН України»), вчений секретар, к.т.н., ст.досл. Добродєєв Павло Миколайович і завідуючий відділом №30 ДУ «ІТПМ НАН України», д.т.н., проф. Кузнецов Борис Іванович склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Кундіус К.Д. впроваджені у Державній установі «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України при вирішенні проблеми зменшення до безпечного рівня електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій в рамках виконання фундаментальної відомчої НДР «Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків» (шифр «БІОМАГ 2», № ДР 0116U005462).

Результати виконаних Кундіус К.Д. досліджень, в тому числі запропоновані методи моделювання магнітного поля трансформаторних підстанцій, методи та засоби активного екранування магнітного поля і запропоновані практичні рекомендації з їх енергоефективної реалізації, мають істотне значення для практичного вирішення актуальної і соціально значимої задачі захисту здоров'я мешканців житлових будинків із вбудованими трансформаторними підстанціями від негативної дії магнітного поля промислової частоти.

Вчений секретар
ДУ «ІТПМ НАНУ», к.т.н., ст.досл. _____ П.М. Добродєєв

Завідуючий відділом №30
ДУ «ІТПМ НАНУ, д.т.н., проф. _____ Б.І. Кузнецов

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ДУ «ІТПМ НАН України»
_____ В.Ю.Розов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «КиївПромЕлектроПроект»
_____ Ю.С. Громадський

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписалися, від Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (ДУ «ІТПМ НАН України») заступник директора з наукової роботи Грінченко В.С. і завідувач лабораторії магнітних вимірювань Пєлєвін Д. Є. з одного боку, та від Товариства з обмеженою відповідальністю «КиївПромЕлектроПроект» Громадський Ю.С., склали цей акт про наступне.

Розроблені в 2019 році ДУ «ІТПМ НАН України» за цільовою комплексною міждисциплінарною програмою наукових досліджень НАН України з розроблення наукових засад раціонального використання природно-ресурсного потенціалу та сталого розвитку в рамках науково-дослідної роботи «Розроблення наукових засад зменшення електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій (шифр ЕМП ТП) » **рекомендації** з практичної реалізації наукових засад зменшення до безпечного рівня електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій 10(6)/0,4 кВ **використані** Товариством з обмеженою відповідальністю «КиївПромЕлектроПроект» для розробки нормативних документів з проектування міських трансформаторних підстанцій із екологічно безпечним для населення рівнем електромагнітного поля промислової частоти.

Від ДУ «ІТПМ НАН України»

Заступник директора з наукової роботи
_____ В.С. Грінченко

Завідувач лабораторії магнітних вимірювань
_____ Д.Є. Пєлєвін

Від ТОВ «КиївПромЕлектроПроект»

Директор
_____ Ю.С.Громадський.

ДОДАТОК В

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Пелевина (Кундиус) Е.Д. Метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи на основе цилиндрических пространственных гармонік. Ерисов А.В., Пелевин Д.Е., Пелевина (Кундиус) Е.Д. // *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 2. С. 24-27. URL: doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.2.04

(Наказ МОН України № 1328 від 21.12.2015, журнал Україна входить до наукометричної бази Web of Science, Україна)

2. Пелевина (Кундиус) Е.Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации / В.Ю. Розов Д.Е. Пелевин, Е.Д. Пелевина (Кундиус) // *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. №5. С. 60-66. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10

(Наказ МОН України № 1328 від 21.12.2015, журнал Україна входить до наукометричної бази Web of Science, Україна)

3. Кундиус Е.Д. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома / В.Ю. Розов, Е.Д. Кундиус, Д.Е. Пелевин // *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. №3. С. 24-30. URL: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04

(Наказ МОН України № 1412 від 18.12.2018, журнал категорії «А», входить до наукометричної бази Web of Science, Україна)

4. Кундіус К.Д. Моделювання магнітного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу / В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевін, К.Д. Кундіус // *Електротехніка і електромеханіка*. 2023. №5. С. 87-93. URL: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13

(Наказ МОН України № 1412 від 18.12.2018, журнал категорії «А»,входить до наукометричної бази Scopus (Q3), Україна)

Статті у періодичних наукових виданнях, що увійшли до переліку наукових фахових видань України:

5. Кундіус. К.Д. Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВА. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2022. №12. URL: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2022.11.05

(Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020, журнал категорії «Б», Україна)

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Кундіус К.Д. Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій / В.Ю. Розов, Д.Е. Пєлєвін, К.Д. Кундіус // Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення», м. Київ, 12–13 листопада 2020 р. – Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України». – 2020 р. – Вип. 20. – С. 24-26.

7. Кундіус К.Д. Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанція / В.Ю. Розов, Д.Е. Пєлєвін, К.Д. Кундіус // Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзєєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України», м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. – Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України». – 2021 р. – Вип. 21. – С. 329-331.

8. Kundius K. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop / D. Pelevin, K. Kundius, O. Sokol, V. Grinchenko // Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021, Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. – Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences. – 2021. – pp. 81-82.