

В.Ю. Розов, Е.Д. Кундиус, Д.Е. Пелевин

АКТИВНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ, ВСТРОЕННЫХ В ЖИЛЫЕ ДОМА

Показано, что основной задачей синтеза систем активного экранирования (САЭ) с оптимизацией параметров и локализацией их компенсационных обмоток (КО) при обеспечении высокой эффективности экранирования магнитного поля (МП) трансформаторной подстанции (ТП). Ее решение выполнено на основе предложенной тривимірної комп'ютерної моделі з використанням алгоритмів оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень і урахуванням бінарних відносин переваги, що дозволило обґрунтувати можливість зменшення до рівня санітарних норм індукції МП в житлових приміщеннях, розташованих поруч з ТП 6/0,4 кВ потужністю до 2×400 кВА, за допомогою найпростіших САЭ. Синтезована САЭ має дві плоскі КО площею до 10 м² при кількості ампер-витків не більше 30, що встановлюються поблизу стіни (стіл) приміщення ТП, і при енергоспоживанні не більше 0,1 кВт реалізує ефективність екранивання САЭ не менше 6 одиниць, що дозволяє зменшити індукцію магнітного поля в розташованому зверху або збоку від ТП житловому приміщенні площею до 40 м² до рівня 0,5 мкТл. Бібл. 16, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: міська трансформаторна підстанція, житлове приміщення, активне екранивання магнітного поля.

Показано, что основной задачей синтеза систем активного экранирования (САЭ) является оптимизация параметров и локализации их компенсационных обмоток (КО) при обеспечении высокой эффективности экранирования магнитного поля (МП) трансформаторной подстанции (ТП). Ее решение выполнено на основе предложенной трехмерной компьютерной модели с использованием алгоритмов оптимизации мультироєм частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения, что позволило обосновать возможность уменьшения до уровня санитарных норм индукции МП в жилых помещениях, расположенных рядом с ТП 6/0,4 кВ мощностью до 2×400 кВА, с помощью простейших САЭ. Синтезированная САЭ имеет две устанавливаемые вблизи потолка (стен) помещения ТП плоские КО площадью до 10 м² при количестве ампер-витков не более 30, и при энергопотреблении не более 0,1 кВт реализует эффективность экранирования САЭ не менее 6 единиц, что позволяет уменьшить индукцию магнитного поля в расположенном сверху либо сбоку от ТП жилом помещении площадью до 40 м² до уровня 0,5 мкТл. Библ. 16, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: городская трансформаторная подстанция, жилое помещение, активное экранирование магнитного поля.

Введение. Проблеме защиты жилой среды от воздействия магнитного поля (МП) объектов электроэнергетики уделяется большое внимание во всем мире, так как МП промышленной частоты (50-60 Гц) опасно для здоровья людей даже при его слабом, но длительном воздействии [1, 2]. Основными источниками МП в жилой среде, являются расположенные в жилых зонах воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), а также городские трансформаторные подстанции (ТП) [3].

Городские ТП располагаются в отдельных зданиях или встраиваются в жилые дома [3]. Наиболее остро проблема уменьшения внешнего МП ТП стоит в жилых домах со встроенными ТП [2-4], когда расстояния между ТП и жилыми помещениями уменьшаются до нескольких метров. Такие дома (рис. 1) достаточно широко распространены в Украине и других странах.



Рис. 1. Типовой жилой дом в г. Харькове со встроенной ТП

Кроме того, встроенные ТП начали широко использоваться в мире в современных сверхвысотных жилых домах для индивидуального высоковольтного электроснабжения секций из нескольких десятков этажей с целью уменьшения потерь электроэнергии [5, 6].

Проведенные авторами исследования [3] показывают, что внешнее МП типовых встроенных ТП мощностью 400 (800) кВА может превышать уровень санитарных норм в соседних с ТП жилых помещениях в 3-10 раз, что требует принятия мер по уменьшению их МП. При этом основным источником внешнего МП ТП являются их токопроводы, а МП рассеяния трансформаторов ТП на расстояниях более 2 м от ТП можно пренебречь [3].

Наиболее актуальна проблема уменьшения МП ТП в домах старой постройки со встроенными ТП (рис. 1), когда практическое использование методов уменьшения МП за счет совершенствования конструкции ТП [3] затруднено. В настоящее время наиболее распространённым на практике методом уменьшения МП в близлежащих с ТП помещениях является пассивное экранирование стен (потолков) помещений ТП электромагнитными (магнитоэлектрическими) экранами [7]. Однако этот метод экранирования для низкочастотного МП ТП отличается высокой металлоемкостью и стоимостью при невысокой эффективности.

Поэтому перспективным методом уменьшения МП ТП является активное экранирование (компенсация) МП [3, 8-14]. При этом мировая тенденция развития систем активного экранирования (САЭ)

© В.Ю. Розов, Е.Д. Кундиус, Д.Е. Пелевин

направлена на оптимизацию их конструкции по энергопотреблению и стоимости при условии обеспечения необходимой эффективности экранирования.

Однако в Украине развитию методов и средств активного экранирования МП ТП не уделяется должного внимания. Так, до настоящего времени не обоснована возможность и не определены пути создания недорогих бюджетных САЭ с эффективностью, достаточной для уменьшения МП ТП в близлежащих жилых помещениях до уровня санитарных норм.

Целью работы является анализ возможности уменьшения индукции магнитного поля в жилых помещениях, расположенных рядом с городскими трансформаторными подстанциями, до уровня санитарных норм с помощью простейших систем активного экранирования.

Под простейшей САЭ подразумеваем систему с минимальным количеством плоских компенсационных обмоток (КО), размещаемых вблизи поверхности стен (полов) помещений, имеющую ограниченную на уровне сотен ватт мощность потребления.

Метод активного экранирования. Метод активного экранирования потенциального МП ТП в объеме соседнего с ТП жилого помещения реализуется за счет формирования САЭ (рис. 2) компенсирующего МП такой пространственно-временной структуры, суперпозиция которого с исходным МП ТП уменьшает действующее значение индукции МП во всем защищаемом объеме жилого помещения, отстоящего от стен и пола на расстояние более 0,5 м, до уровня санитарных норм (0,5 мкТл) для населения [1, 2]. При этом компенсирующее МП, генерируемое КО, также должно быть потенциальным в объеме жилого помещения, что налагает определенные требования к конфигурации и координатам расположения КО при их синтезе.

САЭ (рис. 2) состоит из следующих основных элементов: компенсационных обмоток (КО); регулируемого источника питания (ИП) выполняющего функцию усилителя мощности, системы управления (СУ); датчиков (Д) тока либо МП. В общем случае САЭ может иметь различное количество КО, Д и реализовываться в замкнутой, либо разомкнутой структуре [11, 12].

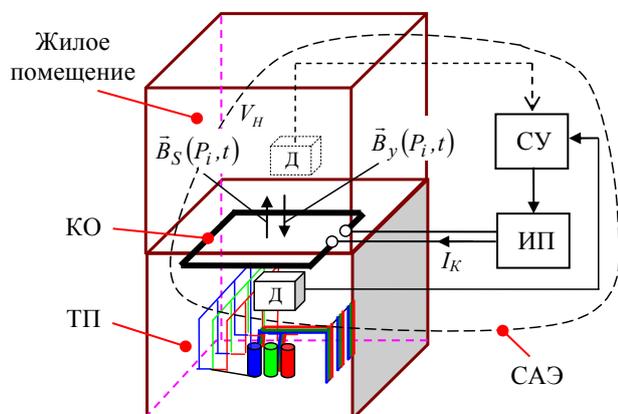


Рис. 2. Активное экранирование внешнего МП ТП

Для определения параметров САЭ (рис. 2) необходимо выполнить ее синтез. Исходными данными

для синтеза САЭ являются: пространственно-временная характеристика исходного МП городской ТП в защищаемом объеме (жилом помещении); взаимное пространственное расположение активных элементов ТП и жилого помещения; геометрия и количество трехфазных токопроводов ТП; нормативное значение уровня индукции МП, который должен быть достигнут в результате экранирования. При этом эффектом экранирования МП ТП стенами и межэтажными перекрытиями жилых домов пренебрегаем ввиду его малости [15, 16].

Реализацию активного экранирования МП ТП осуществляем на основе предложенного в [14] метода синтеза САЭ, созданного для экранирования МП высоковольтных ЛЭП с целью его уменьшения до безопасного для населения уровня в близлежащих жилых домах. Особенностью этого метода является решение задачи экранирования в двумерной постановке, что является допустимым для протяженных ЛЭП, имеющих практически нулевую компоненту индукции МП, направленную вдоль ЛЭП, что позволяет существенно упростить решение задачи синтеза такой САЭ [13, 14].

Более сложная по сравнению с ЛЭП конструкция токопроводов ТП, имеющих конечную длину [3], создает необходимость моделирования МП ТП в трехмерной постановке, что существенно усложняет синтез САЭ ТП. Еще одной особенностью решения задачи синтеза САЭ ТП является необходимость расположения их КО вне жилых помещений. С учетом этих особенностей синтез САЭ МП ТП осуществляем на основе разработанного и представленного ниже модифицированного метода.

Модифицированный метод синтеза САЭ ТП.

Математическая модель исходного внешнего МП ТП в зоне экранирования (жилом помещении), удаленном от ТП более чем на 2 метра [3], не содержащем ферромагнитных элементов и источников магнитного поля, может быть представлена как:

$$\vec{B}_S(P_i, t) = - \sum_{k=1}^K \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{n=1}^N \nabla \left[\frac{\mu_0 (\vec{m}(t)_{lcn}, \vec{R}_{lci})}{4\pi R_{lci}^3} \right]; \quad (1)$$

$$\vec{m}(t)_{lcn} = I(t) \cdot \vec{S}_{lcn},$$

где N – количество микроконтуров в прямолинейном контуре токопровода ТП; k – количество прямолинейных контуров; \vec{S}_{lcn} – вектор площади микроконтура; \vec{n}_i – единичный вектор, нормальный к S_i ; \vec{R}_{lci} – радиус вектор от геометрического центра микроконтура в точку наблюдения P_i ; $I(t)$ – мгновенное значение тока микроконтура; α – номер фазы токопровода ТП ($\alpha = 1, \dots, 3$); μ_0 – магнитная постоянная. В соответствии с (1), МП ТП является потенциальным и спадает при удалении от источника.

Введем вектор искоемых параметров R , компонентами которого являются искомые геометрические параметры, координаты пространственного расположения КО САЭ и искомые параметры КО САЭ. Тогда индукция результирующего потенциального МП, генерируемого токопроводами ТП и САЭ определяется как

$$\bar{B}(R, P_i, t) = \bar{B}_S(P_i, t) + \bar{B}_y(R, P_i, t), \quad (2)$$

где $\bar{B}_y(R, P_i, t)$ – мгновенные значения индукции МП, генерируемого КО САЭ в точках P_i .

По аналогии с [14], определение вектора искомым параметров R сведем к решению задачи многокритериальной оптимизации векторного критерия

$$B(R) = [B(R, P_1), B(R, P_2) \dots B(R, P_m)]^T, \quad (3)$$

компонентами которого $\bar{B}(R, P_i)$ являются значения индукции результирующего МП в точках P_i .

Решение этой задачи многокритериальной оптимизации (3) будем осуществлять при компьютерном моделировании на основе алгоритмов оптимизации мультироем частиц из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения [13, 14]. Моделирование осуществляем в программном пакете MATLAB.

Анализ эффективности активного экранирования МП ТП. Эффективность (фактор) экранирования МП САЭ в точке P_i в соответствии с [11] может быть определена соотношением

$$E_{P_i} = \frac{|\bar{B}_S(P_i)|}{|\bar{B}_S(P_i) + \bar{B}_y(P_i)|} = \frac{1}{\delta_{P_i}}, \quad (4)$$

где $\bar{B}_S(P_i)$, $\bar{B}_y(P_i)$ – действующие значения исходной и создаваемой САЭ индукций МП в точке P_i ; δ_{P_i} – относительная погрешность экранирования САЭ.

Так, при упомянутом выше превышении санитарных норм в 3-10 раз, необходимая эффективность экранирования составит 3 (10) единиц, а допустимая относительная погрешность компенсации индукции МП должна быть не меньше 0,33 (0,1) соответственно. При этом значение δ_{P_i} может быть определено как

$$\delta_{P_i} = \sqrt{\delta_{P_{im}}^2 + \delta_{P_{ir}}^2}, \quad (5)$$

где $\delta_{P_{im}}$ – относительная методическая погрешность САЭ, определяемая несоответствием пространственной структуры исходного МП и компенсирующего МП, генерируемого КО; $\delta_{P_{ir}}$ – относительная погрешность регулирования САЭ.

Анализ соотношения (5) показывает, что основной составляющей погрешности САЭ является методическая погрешность $\delta_{P_{im}}$, определяемая параметрами КО и ограниченная значением 0,1 при эффективности экранирования не более 10 единиц. В этом случае относительная погрешность $\delta_{P_{ir}}$ регулирования САЭ при использовании современных систем автоматического регулирования может быть легко уменьшена до значений 0,01-0,03, при которых она не будет оказывать существенного влияния на суммарную погрешность экранирования δ_{P_i} САЭ. Это позволяет на данном этапе свести синтез САЭ к синтезу ее КО. Поэтому алгоритм управления САЭ в данной статье не рассматривается и является предметом отдельных исследований.

Осуществим решение задачи синтеза КО САЭ и анализа эффективности экранирования МП ТП для типовой городской двухтрансформаторной подстан-

ции (2×400 кВА, 6/0,4 кВ), встроенной в жилой дом на первом этаже. Размеры помещения ТП соответствуют размерам соседних жилых помещений. Схема расположения токопроводов ТП показана на рис. 3, а их геометрия приведена в [3]. Подключение трехфазных токопроводов ТП выполнено с прямым порядком чередования фаз.

Компьютерное моделирование внешнего МП ТП проводилось в соответствии с (1) – (3). При этом рассматривалось два варианта расположения жилого помещения относительно ТП (рис. 1): вариант А – помещение расположено над ТП; вариант Б – помещение расположено рядом с ТП на одном этаже (сбоку от ТП).

Экранирование МП в помещении над ТП (вариант А). Выполним синтез КО САЭ, обеспечивающих необходимую эффективность экранирования МП в помещении, расположенном над ТП (рис. 3).

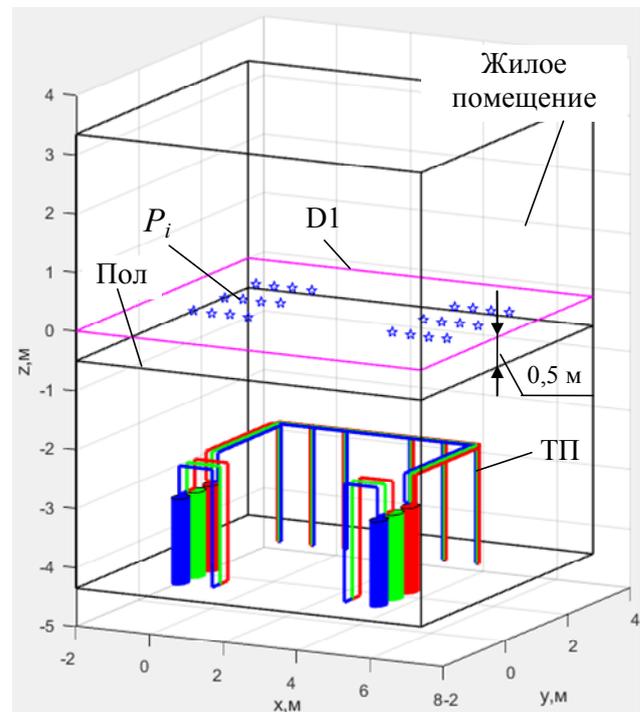
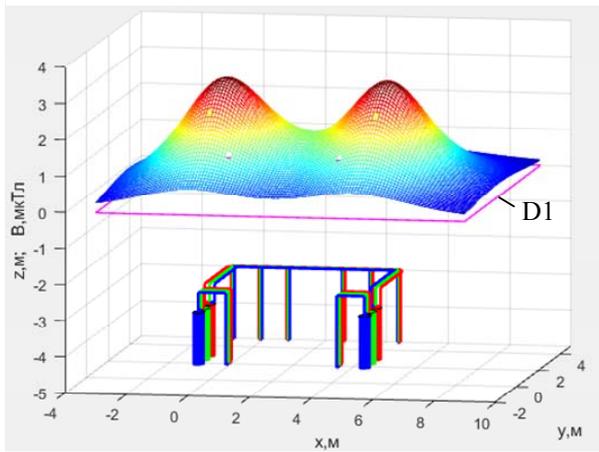


Рис. 3. Расположения помещения над ТП (вариант А)

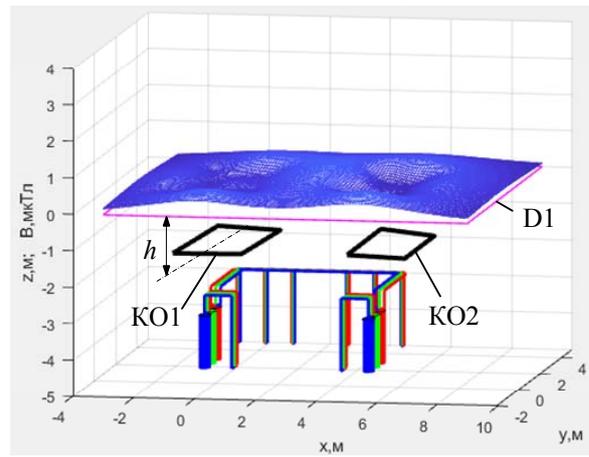
Для гарантированного уменьшения индукции потенциального МП до уровня санитарных норм во всем жилом помещении, достаточно обеспечить соответствующее уменьшение МП на контрольной плоскости D1, отстоящей от пола помещения (рис. 3) на расстояние 0,5 м, где МП нормируется [1, 2].

Расчетное значение индукции исходного МП ТП при номинальной мощности ТП представлено на рис. 4. При этом максимальное значение исходной индукции МП составляет 3 мкТл, что в 6 раз превышает уровень санитарных норм 0,5 мкТл [2].

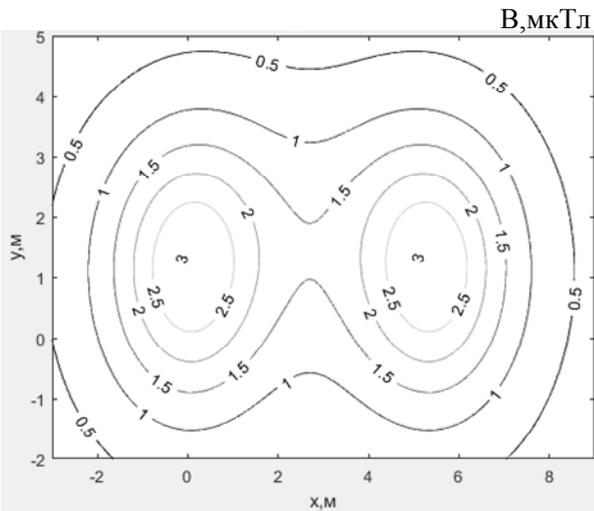
На основе моделирования выполнен синтез КО САЭ (рис. 5), и определены их параметры в соответствии с табл. 1. КО расположены в помещении ТП, параллельно его потолку, на расстоянии 0,55 м от него, и позволяют реализовать необходимую эффективность экранирования, уменьшив исходное МП ТП (рис. 4) до уровня санитарных норм.



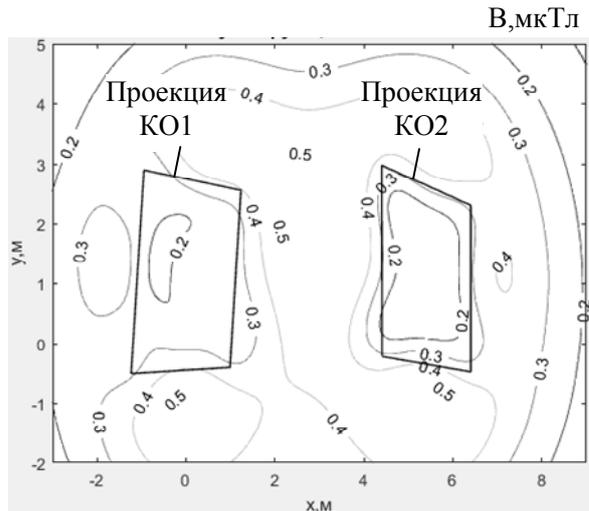
а



а



б



б

Рис. 4. Распределение исходной индукции МП в жилом помещении над ТП, вариант А:
(а) – в помещении; (б) – на контрольной плоскости D1

Рис. 5. Распределение результирующей индукции МП в жилом помещении над ТП при использовании САЭ, вариант А:
(а) – в помещении; (б) – на контрольной плоскости D1

Таблица 1
Параметры компенсационных обмоток САЭ (вариант А)

№ КО	Ампер-витки, мощность КО	Координаты КО
1	$IW1 = 24,5 \text{ A}$, $S = 36 \text{ ВА}$, $h = 1,35 \text{ м}$.	$x11 = -1,23 \text{ м}$, $y11 = -0,51 \text{ м}$, $z11 = -1,35 \text{ м}$, $x12 = -0,94 \text{ м}$, $y12 = 2,90 \text{ м}$, $z12 = -1,35 \text{ м}$, $x13 = 1,24 \text{ м}$, $y13 = 2,55 \text{ м}$, $z13 = -1,35 \text{ м}$, $x14 = 0,99 \text{ м}$, $y14 = -0,40 \text{ м}$, $z14 = -1,35 \text{ м}$.
2	$IW2 = 25,6 \text{ A}$, $S = 36 \text{ ВА}$, $h = 1,35 \text{ м}$.	$x21 = 4,41 \text{ м}$, $y21 = -0,22 \text{ м}$, $z21 = -1,35 \text{ м}$, $x22 = 4,40 \text{ м}$, $y22 = 2,98 \text{ м}$, $z22 = -1,35 \text{ м}$, $x23 = 6,40 \text{ м}$, $y23 = 2,30 \text{ м}$, $z23 = -1,35 \text{ м}$, $x24 = 6,40 \text{ м}$, $y24 = -0,48 \text{ м}$, $z24 = -1,35 \text{ м}$.

Как показывают результаты моделирования (рис. 5), при использовании синтезированной САЭ уровень индукции МП как на плоскости D1, так и во всем жилом помещении уменьшается до безопасного значения 0,5 мкТл. При этом синтезированная САЭ имеет минимальное количество КО, размещенных в помещении ТП и обеспечивает необходимую эффективность экранирования (не менее 6 единиц) при энергопотреблении не более 0,1 кВт.

Экранирование МП в помещении, расположенном рядом с ТП (вариант Б). Выполним синтез КО САЭ, обеспечивающих необходимую эффективность экранирования МП в помещении, расположенном рядом с ТП на одном этаже (рис. 6).

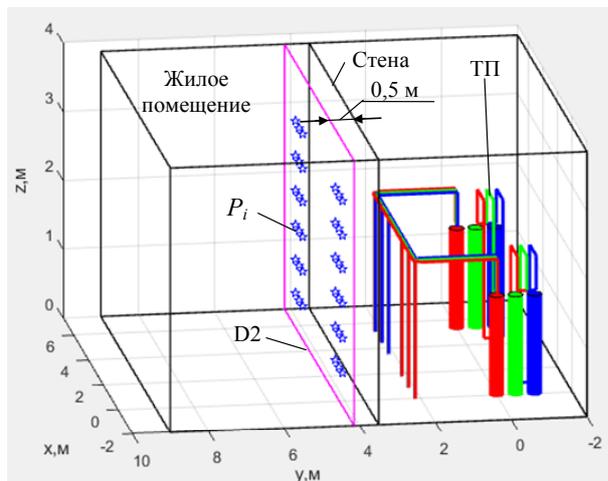


Рис. 6. Расположение помещения сбоку от ТП (вариант Б)

На рис. 7 представлено расчетное значение индукции исходного МП ТП, которое достигает 1,2 мкТл,

что в 2,4 раза превышает уровень санитарных норм 0,5 мкТл.

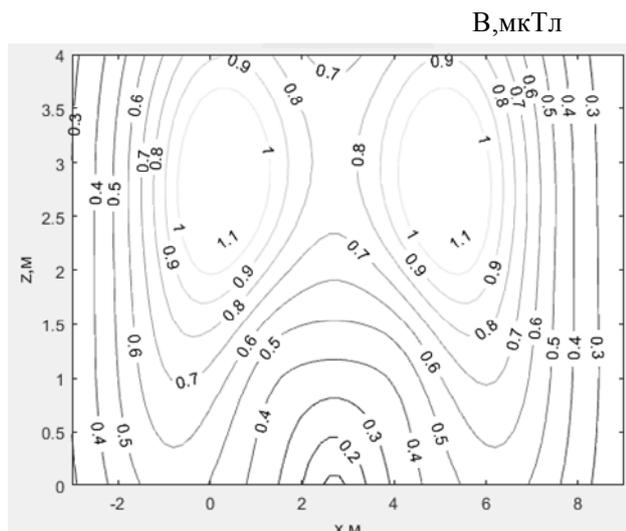


Рис. 7. Распределение исходной индукции МП в жилом помещении, расположенном сбоку от ТП, вариант Б, на плоскости D2, отстоящей на 0,5 м от стены помещения

На основе моделирования выполнен синтез КО САЭ (рис. 8), расположенных на расстоянии 0,35 м от плоскости стены помещения ТП, позволяющих реализовать необходимую эффективность экранирования и уменьшить индукцию исходного МП ТП (рис. 7) до уровня санитарных норм (0,5 мкТл) при использовании КО с параметрами в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Параметры компенсационных обмоток САЭ (вариант Б)

№ КО	Ампер-витки, мощность КО	Координаты КО
1	$IW1 = 9,45 \text{ A}$, $S = 10 \text{ BA}$, $h = 1,15 \text{ м}$.	$x11 = -1,42 \text{ м}$, $y11 = 3,0 \text{ м}$, $z11 = 2,50 \text{ м}$, $x12 = -2,0 \text{ м}$, $y12 = 3,0 \text{ м}$, $z12 = 3,70 \text{ м}$, $x13 = 2,0 \text{ м}$, $y13 = 3,0 \text{ м}$, $z13 = 3,70 \text{ м}$, $x14 = 2,0 \text{ м}$, $y14 = 3,0 \text{ м}$, $z14 = 1,28 \text{ м}$.
2	$IW2 = 9,44 \text{ A}$, $S = 10 \text{ BA}$, $h = 1,15 \text{ м}$.	$x21 = 3,47 \text{ м}$, $y21 = 3,0 \text{ м}$, $z21 = 1,11 \text{ м}$, $x22 = 3,74 \text{ м}$, $y22 = 3,0 \text{ м}$, $z22 = 3,70 \text{ м}$, $x23 = 7,40 \text{ м}$, $y23 = 3,0 \text{ м}$, $z23 = 3,70 \text{ м}$, $x24 = 6,56 \text{ м}$, $y24 = 3,0 \text{ м}$, $z24 = 2,40 \text{ м}$.

Схема расположения КО САЭ показана на рис. 8,а, а расчетное распределение результирующей индукции МП в жилом помещении сбоку от ТП при использовании САЭ (вариант Б) на контрольной плоскости D2 стены помещения представлено на рис. 8,б.

Как показывают результаты моделирования (рис. 8), при использовании синтезированной САЭ уровень индукции МП в объеме жилого помещения уменьшается до безопасного значения 0,5 мкТл. При этом синтезированная САЭ также имеет минимальное количество КО, размещенных вблизи плоскости стены помещения ТП, и обеспечивает необходимую эффективность экранирования (не менее 2,4 единицы) при энергопотреблении не более 0,03 кВт.

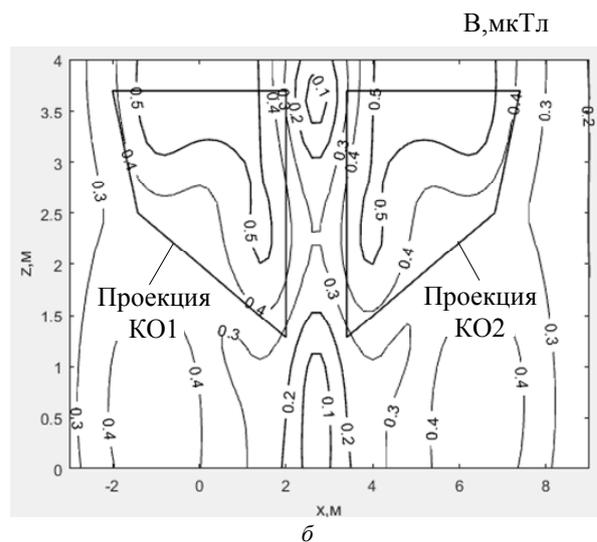
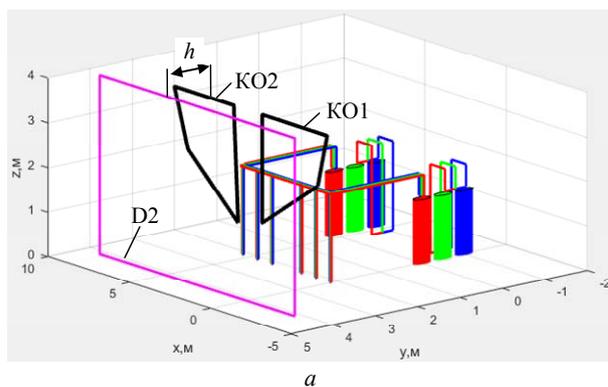


Рис. 8. Распределение результирующей индукции МП в жилом помещении сбоку от ТП при использовании САЭ, вариант Б: (а) – положение КО и ТП; (б) – МП на контрольной плоскости D2

Таким образом, проведенный выше анализ подтверждает возможность уменьшения индукции МП в жилых помещениях площадью 40 м², расположенных рядом с городскими ТП 2×400 кВА, 6/0,4 кВ, до уровня санитарных норм с помощью простейших САЭ с двумя плоскими компенсационными обмотками, размещаемыми вблизи пола (стены) помещений ТП. При этом энергопотребление САЭ составляет не более 0,1 кВт, площадь КО - не более 10 м² при количестве ампер-витков КО не более 30. Эффективность (фактор) экранирования, реализуемая синтезированной САЭ ТП (рис. 2) достигает более 6 единиц, что имеет экспериментальное подтверждение в лабораторных условиях.

На следующих этапах создания САЭ МП ТП планируется разработка ее структурных элементов (рис. 2) и проведение экспериментальных исследований полномасштабных моделей САЭ в жилых домах со встроенными ТП.

Выводы.

1. Впервые обоснована возможность решения задачи уменьшения до уровня санитарных норм индукции магнитного поля в жилом помещении, расположенном рядом с городской трансформаторной подстанцией мощностью до 2×400 кВА, с помощью простейших систем активного экранирования. Обоснование выполнено при компьютерном моделировании с исполь-

зованием алгоритмов оптимизации мультируем частот из множества Парето-оптимальных решений с учетом бинарных отношений предпочтения.

2. Выполнен синтез простейших систем активного экранирования магнитного поля трансформаторных подстанций с двумя плоскими компенсационными обмотками, размещаемыми вблизи потолка (стен) помещения ТП и позволяющих уменьшить до уровня санитарных норм индукцию магнитного поля в расположенном рядом жилым помещением площадью до 40 м². При этом энергопотребление системы активного экранирования составляет не более 0,1 кВт, площадь компенсационных обмоток – не более 10 м² при количестве ампер-витков не более 30, а эффективность (фактор) экранирования достигает более 6 единиц, что имеет экспериментальное подтверждение в лабораторных условиях.

3. Практическое использование синтезированных систем активного экранирования, при условии положительных результатов экспериментальных исследований их полномасштабных физических моделей, позволит эффективно решить актуальную и социально значимую задачу защиты здоровья населения жилых домов со встроенными трансформаторными подстанциями от негативного действия магнитного поля промышленной частоты.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сердюк А.М., Думанський В.Ю., Біткін С.В., Дідик Н.В., Думанський Ю.Д. та інші. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови. *Гігієна населених місць: Сб. наук. пр.*, 2015, № 66, С. 20-29.
2. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
3. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Пелевина Е.Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*, 2017, №5, С. 60-66. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.10.
4. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник. – М: Форум-Инфра, 2006. – 480 с.
5. 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: 10.1002/etep.517.
6. Rahman N.A., Rashid N.A., Mahadi W.N., Rasol Z. Magnetic field exposure assessment of electric power substation in high rise building. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 953-961. doi: 10.3923/jas.2011.953.961.
7. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 752-756. doi: 10.1049/oap-cired.2017.1230.
8. Bravo-Rodríguez J., del-Pino-López 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: 10.3390/en12071332.
9. 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: 10.3233/jae-172286.
10. del Pino Lopez J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitiga-

tion of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol.12, no.6, pp. 1055-1061. doi: 10.1109/tla.2014.6894000.

11. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*, 1996, №1, С. 3-9.
12. Розов В.Ю., Резинкина М.М., Думанский Ю.Д., Гвозденко Л.А. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, 2008, Ч. 2, С. 3-8.
13. Kuznetsov V.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V. High voltage power lines magnetic field system of active shielding with compensation coil different spatial arrangement. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 17-25. doi: 10.20998/2074-272X.2019.4.03.
14. Kuznetsov V.I., Nikitina T.B., Bovdii 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: 10.5281/zenodo.3239130.
15. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Гринченко В.С., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016, №3, С. 6-8. doi: 10.15407/techned2016.03.006.
16. Пелевин Д.Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015, № 4, С. 53-55. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.10.

REFERENCES

1. Serdiuk A.M., Dumanskiy V.Yu., Bitkin S.V., Didyk N.V., Dumanskiy Yu.D. Hygienical ground of requirements to placing and exploitation of cable busses of electricity transmission and their equipment in the conditions of modern municipal building. *Hygiene of populated places*, 2015, no.66, pp. 20-29. (Ukr).
2. *Pravila ulashtuvannya electroustanovok* [Electrical installation regulations]. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
3. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 60-66. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.10.
4. Opoleva G.N. *Skhemy i podstantsii elektrosnabzheniia. Spravochnik* [Schemes and substations of power supply. Directory]. Moscow, Forum-Infra Publ., 2006. 480 p. (Rus).
5. 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: 10.1002/etep.517.
6. Rahman N.A., Rashid N.A., Mahadi W.N., Rasol Z. Magnetic field exposure assessment of electric power substation in high rise building. *Journal of Applied Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 953-961. doi: 10.3923/jas.2011.953.961.
7. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 752-756. doi: 10.1049/oap-cired.2017.1230.
8. Bravo-Rodríguez J., del-Pino-López 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: 10.3390/en12071332.
9. 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: 10.3233/jae-172286.
10. del Pino Lopez J.C., Giaccone L., Canova A., Cruz Romero P. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitiga-

tion of MV/LV substations. *IEEE Latin America Transactions*, 2014, vol.12, no.6, pp. 1055-1061. doi: **10.1109/tla.2014.6894000**.

11. Shydlovskiy A.K., Rozov V.Yu. The system of automatic compensation of external magnetic fields of energy-objects. *Technical electrodynamics*, 1996, no.1, pp. 3-9. (Rus).

12. Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskiy Yu.D., Gvozdenko L.A. The study of man-caused distortions in the geomagnetic field of residential and industrial buildings and to identify ways to reduce them to a safe level. *Technical electrodynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2008, chapter 2, pp. 3-8. (Rus).

13. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V. High voltage power lines magnetic field system of active shielding with compensation coil different spatial arrangement. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 17-25. doi: **10.20998/2074-272X.2019.4.03**.

14. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii 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: **10.5281/zenodo.3239130**.

15. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chumikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Technical Electrodynamic*, 2016, no. 3, pp. 6-8. (Rus). doi: **10.15407/techned2016.03.006**.

16. Pelevin D.Ye. Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses. *Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 53-55. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2015.4.10**.

Поступила (received) 04.05.2020

Розов Владимир Юрьевич¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,
Кундиус Екатерина Дмитриевна¹, аспирант,

Пелевин Дмитрий Евгеньевич¹, к.т.н.,

¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,
e-mail: Rozov@nas.gov.ua, pelevindmitro@ukr.net

V.Yu. Rozov¹, K.D. Kundius¹, D.Ye. Pelevin¹

¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine»,
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations.

This paper deals with the mitigation of low-frequency magnetic field of built-in transformer substations down to the reference level $0.5 \mu T$ in nearby living spaces. To meet the reference level, we substantiate the actuality of the usage of active shielding methods having higher efficiency, comparably to metal consuming passive shielding. We show that the optimization of parameters and localization of compensation coils is the main goal of the synthesis of the active shielding system. The solution of synthesis problem is based on the developed 3D numerical model by using particles multiswarm optimization algorithms from Pareto-optimal solutions set taking into account binary preference relations. This allows justifying the usage of simple active shielding system for magnetic field mitigation down to the reference level in living spaces, located near built-in transformer substations (2×400 kVA, 6/0.4 kV). The synthesized active shielding system has two plane compensation coils installed near the ceiling (wall) of the substation room. The area of each coil is less than 10 m^2 and the number of ampere-turns is less than 30. We show that the efficiency of the active shielding system is 6 when it electric power consumption is less than 100 W. This allows mitigating the magnetic field down to $0.5 \mu T$ in 40 m^2 living space located on top or side from the substation. The application of synthesized active shielding system (subject to the positive results of experimental studies of their full-scale physical models) allows solving the actual and socially significant problem of the health protection of tenants of residential buildings with built-in transformer substations from the negative effects of power frequency magnetic field. References 16, tables 2, figures 8.

Key words: urban transformer substation, living space, active shielding of the magnetic field.