

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

ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГОРОДСКИХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ И МЕТОДЫ ЕГО НОРМАЛИЗАЦИИ

Метою роботи є дослідження зовнішнього магнітного поля міських трансформаторних підстанцій (ТП) і методів його зменшення в розташованих поблизу житлових приміщеннях до нормативного рівня. Виконано комплексні експериментальні дослідження магнітного поля частотою 50 Гц, що створюється типовими міськими ТП у зовнішньому середовищі. Показано, що індукція магнітного поля в розташованих поблизу житлових приміщеннях не перевищує нормативного рівня (0,5 мкТл), якщо приміщення розташовані на відстанях більше 8 м від корпусу ТП. Запропоновано мультидипольну математичну модель для розрахунку зовнішнього магнітного поля ТП і наведено приклад її практичного використання для розрахунку індукції зовнішнього магнітного поля, що створюється в прилеглому житловому приміщенні ТП потужністю 715 кВА, що вбудована в житловий будинок. Наведено порівняння результатів розрахунку і експерименту. Показано, що вбудовані в житлові будинки ТП можуть створювати в сусідніх житлових приміщеннях небезпечно для здоров'я населення магнітне поле з індукцією 1,5-7 мкТл, що в 3-14 разів перевищує його нормативний рівень. Запропоновано методи нормалізації зовнішнього магнітного поля вбудованих ТП, що ґрунтуються на вдосконаленні конструкції ТП, а також методах зовнішнього пасивного і активного екранування (компенсації). Бібл. 22, Рис. 9.

Ключові слова: трансформаторна підстанція, зовнішнє магнітне поле, житлові приміщення, мультидипольна модель, методи нормалізації.

Целью работы является исследование внешнего магнитного поля городских трансформаторных подстанций (ТП) и методов его уменьшения в близлежащих жилых помещениях до нормативного уровня. Выполнены комплексные экспериментальные исследования магнитного поля частотой 50 Гц, создаваемого типовыми городскими ТП во внешней среде. Показано, что индукция магнитного поля в близлежащих жилых помещениях не превышает нормативного уровня (0,5 мкТл), если помещения расположены на расстояниях более 8 м от корпуса ТП. Предложена мультидипольная математическая модель для расчета внешнего магнитного поля ТП и приведен пример ее практического использования для расчета индукции внешнего магнитного поля, создаваемого в близлежащем жилом помещении ТП мощностью 715 кВА, встроенной в жилой дом. Приведено сравнение результатов расчета и эксперимента. Показано, что встроенные в жилые дома ТП могут создавать в соседних жилых помещениях опасное для здоровья населения магнитное поле с индукцией 1,5-7 мкТл, что в 3-14 раз превышает его нормативный уровень. Предложены методы нормализации внешнего магнитного поля встроенных ТП, основанные на совершенствовании конструкции ТП, а также методах внешнего пассивного и активного экранирования (компенсации). Библ. 22, рис. 9.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, внешнее магнитное поле, жилые помещения, мультидипольная модель, методы нормализации.

Введение. Магнитное поле (МП) промышленной частоты 50 Гц наиболее опасно для здоровья людей даже при его слабом, но длительном воздействии [1]. Основными источниками, создающими такое МП внутри жилых помещений, являются расположенные в жилых зонах объекты электроэнергетики – воздушные и кабельные линии электропередачи (ЛЭП), а также городские трансформаторные подстанции (ТП).

Предельно допустимый уровень (ПДУ) индукции МП 50 Гц для населения, создаваемого электроустановками, регламентирован в [2] и составляет 10 мкТл на территории жилой застройки и 0,5 мкТл внутри жилых помещений.

Наиболее остро проблема нормализации внешнего магнитного поля (ВМП) ТП стоит в жилых домах со встроенными ТП [2, 6], когда расстояния между ТП и жилыми помещениями уменьшается до нескольких метров. Такие дома (рис. 1) достаточно широко распространены в Украине и других странах. Кроме того, встроенные ТП начали широко использоваться в мире для электроснабжения секций из 10-20 этажей в современных сверхвысотных жилых домах [7] с целью уменьшения потерь электроэнергии. Проблема нормализации их МП также требует своего решения.

В настоящее время наиболее полно исследовано МП ЛЭП и определены методы его уменьшения до

безопасного для населения уровня [3-5]. В тоже время исследованию ВМП ТП не уделялось должного внимания, хотя в отдельных случаях – при приближении ТП к жилым помещениям, их МП может превышать ПДУ.



Рис. 1. Типичный жилой дом со встроенной ТП (г Харьков, ул. Данилевского, 19)

Таким образом, ВМП ТП в настоящее время исследовано не достаточно, что затрудняет решение актуальной и социально значимой проблемы нормализации

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

МП частотой 50 Гц в помещениях жилых домов, расположенных вблизи ТП.

Целью работы является исследование ВМП городских ТП и методов его уменьшения до нормативного уровня в близлежащих жилых помещениях.

ТП как источник МП. Городские ТП осуществляют электроснабжение жилых домов. Они выполняют функции преобразования трехфазного высокого напряжения 6 (10) кВ в напряжение 0,38 кВ и распределения электроэнергии напряжением 380 В (220 В) конечным потребителям [2, 6]. Типовые городские ТП (рис. 2) имеют мощность от 100 кВА до 1400 кВА и комплектуются одним либо двумя понижающими трехфазными трансформаторами с заземленной нейтралью. ТП содержат секционированные распределительные устройства (РУ) из токопроводов (шин, кабелей) с необходимой коммутационной, защитной и измерительной аппаратурой.



а



б

Рис. 2. Конструктивное исполнение городской ТП (а) и ее РУ (б)

Основными источниками ВМП ТП являются трехфазные токопроводы РУ, каждый из которых при симметричной нагрузке разных фаз, в общем случае образует три токовых контура [5, 8, 9], создающих МП.

Трехфазные трансформаторы РУ имеют симметричную конструкцию, теоретически исключающую создание ВМП [8]. Практически они создают ВМП, вызванное технологическими отклонениями от симметрии [8, 10]. Индукция этого МП незначительна и не превышает 10 % от суммарного ВМП ТП. ВМП трансформатора, имеет дипольный характер [9], быстро спа-

дает при удалении от ТП (рис. 3) и при дальнейшем анализе не учитывается.

Остальные элементы РУ, в том числе коммутационная, защитная и измерительная аппаратура ТП, а также входные и выходные витые трехфазные кабели, также практически не влияют на ВМП ТП [9].

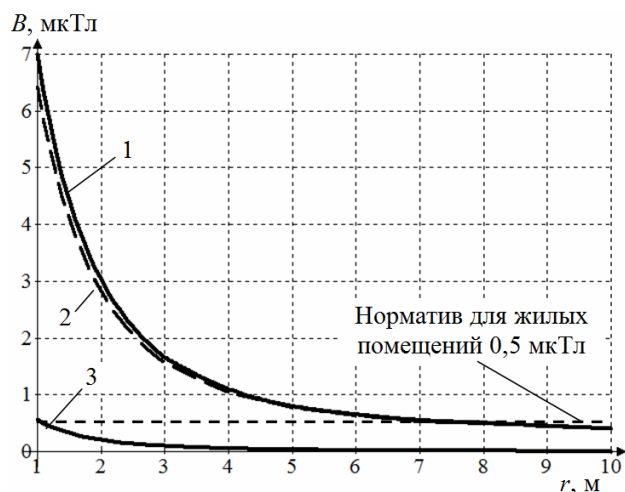


Рис. 3. Характерное спадание индукции МП ТП типа К-42-630 при удалении на расстояние r от ее корпуса (1 – суммарное МП ТП; 2 – МП токопроводов; 3 – МП трансформатора)

Таким образом, ВМП ТП определяется МП трехфазных токопроводов ТП, которые могут быть представлены в соответствии с рис. 4.

Экспериментальные исследования ВМП ТП.

Экспериментальные исследования ВМП ТП выполнены для 42 городских ТП г. Харькова номинальной мощностью ($S_{ном}$) от 100 до 1260 кВА. Исследовано 36 ТП, расположенных в отдельных строениях (внутри микрорайонов), и 6 ТП, встроенных в жилые дома.

В основу исследований положены прямые измерения действующего значения индукции переменного МП в ограниченном количестве точек с использованием векторных магнитометров типа Magnetoscop 1.069 фирмы Foerster (диапазон измерений индукции МП 0-600 мкТл, относительная погрешность 2,5 %) и EMF-828 (диапазон измерения индукции 0-2000 мкТл, относительная погрешность 4 %).

Индукция МП в i -й точке измерения определялась по измерениям индукции МП в трех ортогональных положениях датчика магнитометра по формуле

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2 + B_{zi}^2}, \quad (1)$$

где B_{xi} , B_{yi} , B_{zi} – измеренное действующее значение пространственных компонент индукции МП в i -й точке измерений по осям датчиков магнитометра X , Y , Z .

Начало координатной сетки совмещалось с поверхностью корпуса ТП. Измерения МП проводились при удалении от ТП в горизонтальном (вертикальном) направлении, соответствующем максимальным значениям МП с фиксацией фактических токов в токопроводах ТП. Результирующее значение индукции МП ТП приводилось к номинальной мощности ТП.

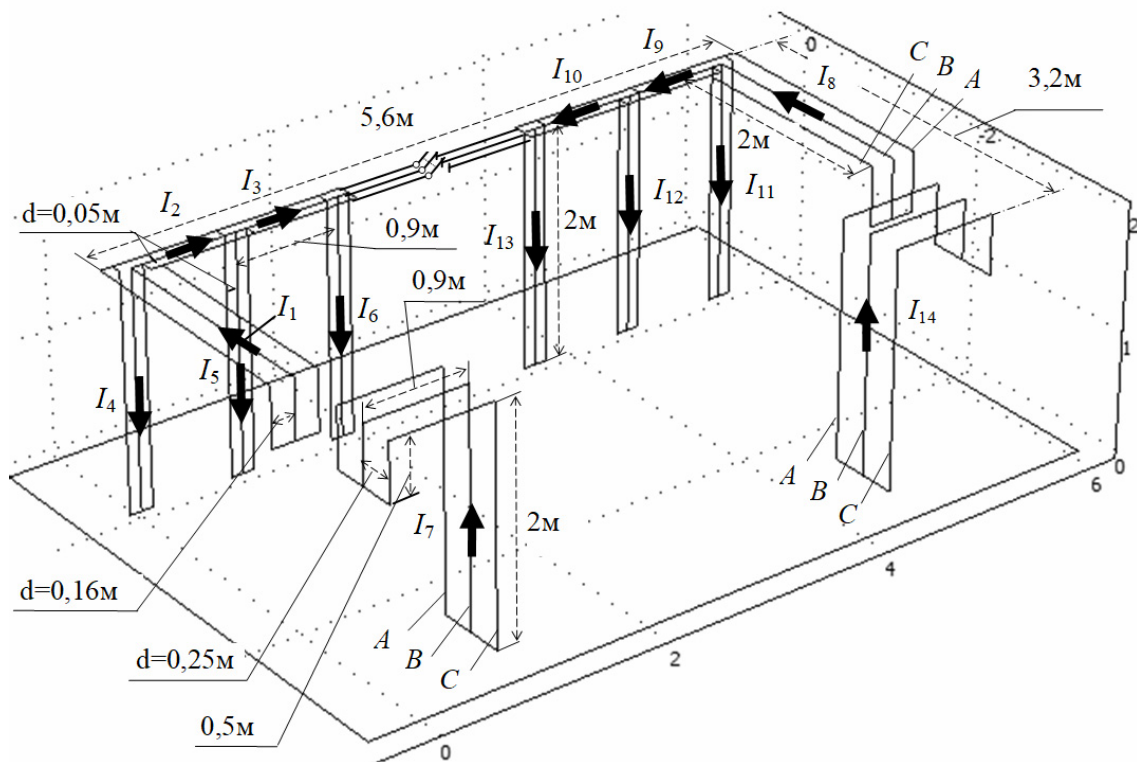


Рис. 4. Конфигурация токопроводов исследуемой двухтрансформаторной ТП мощностью 715 кВА

В жилой зоне точки измерения располагались на линиях, перпендикулярных стенам здания, с шагом 1 м на высоте 1 м. При измерении МП в близлежащих жилых помещениях, точки измерения располагались в узлах пространственной сетки, параллельной стенам помещений. Базовая сетка измерений имела шаг 0,5 м и располагалась в горизонтальной плоскости, на высоте 0,5 м от пола помещения.

Обобщенные результаты измерений индукции МП ТП различной мощности представлены на рис. 5, где значение индукции вблизи внешней стены помещения ТП соответствует $r = 2$ м, расстояние между которой и корпусом отдельно стоящих ТП составляет 2 м.

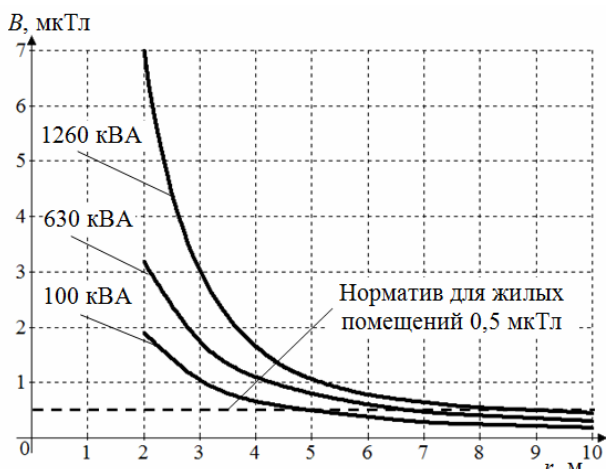


Рис. 5. Экспериментальные значения индукции ВМП отдельно стоящих ТП различной мощности, приведенные к их номинальной нагрузке при удалении точки измерения от их корпуса (r – расстояние корпуса ТП до точки наблюдения)

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает следующее. Индукция ВМП ТП спадает до ПДУ (значений 0,5 мкТл) при удалении от ТП максимальной мощности (1260 кВА) на 8 м. При минимальной мощности ТП (100 кВА) его ВМП спадает до ПДУ на расстоянии 5 м.

Так как все отдельно стоящие ТП находятся на удалении более 15 м от жилых домов, опасности для ее жильцов они не представляют.

Максимум индукции ВМП рассматриваемых ТП (рис. 5) возникает вблизи внешних стен их помещений и составляет 7 мкТл, что не превышает ПДУ для территории жилой застройки (10 мкТл) в соответствии с [2].

Поэтому городские ТП не представляют опасности для здоровья населения, когда они расположены на расстоянии более 8 м от жилых домов. Однако это условие нарушается для встроенных ТП, когда расстояние между корпусом ТП и жилыми помещениями сокращается до нескольких метров.

Так, на рис. 6 представлено распределение индукции МП, построенное по результатам измерений в жилом помещении, расположенном на втором этаже дома (рис. 1) над встроенной двухтрансформаторной ТП мощностью 715 кВА. Расстояние от корпуса ТП до пола жилого помещения 2-го этажа составляет 1,85 м. Фактическая нагрузка ТП во время измерений составляла 45 % от номинальной ($0,45 \cdot S_{\text{ном}}$).

Результаты измерений представлены на (рис. 6). Их анализ показывает, что максимальный уровень индукции МП в жилом помещении над встроенной ТП даже при уменьшенной нагрузке ТП ($0,45 \cdot S_{\text{ном}}$), составляет 1,6 мкТл, что более чем в 3 раза превышает ПДУ. При большей установленной мощности ТП,

работающей в режиме номинальной нагрузки, значение индукции МП в соответствии с рис. 5 может достигать 7 мкТл.

Таким образом, встроенные ТП могут создавать в соседних жилых помещениях МП с индукцией, в 3-14 раз превышающей ПДУ, что представляет опасность для здоровья населения и требует принятия мер по нормализации их ВМП.

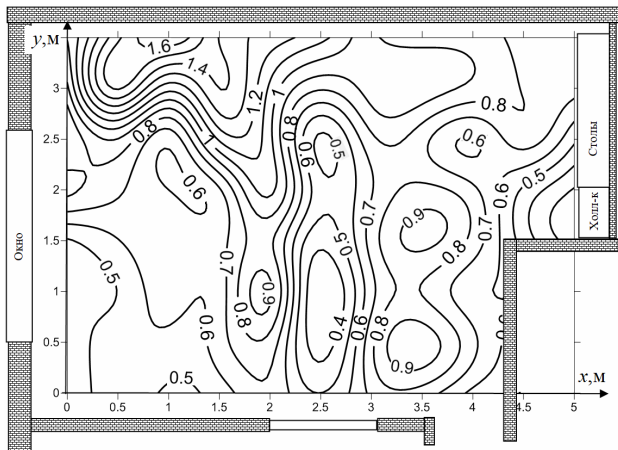


Рис. 6. Экспериментальные значения распределения индукции МП (мкТл) на высоте 0,5 м от пола жилого помещения, расположенного над встроенной ТП мощностью $S_{\text{ном}} = 715$ кВА при фактической нагрузке $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$

Моделирование ВМП ТП. Проведенный анализ показывает, что ВМП ТП нормируется во внешней области пространства – в точках, удаленных на расстояние R_0 от корпуса ТП. Это расстояние составляет не менее 2 м и значительно превышает расстояния d между осями фазных токопроводов ТП (0,05-0,5 м) [6], что создает условия для применения мультидипольной математической модели при расчете ВМП ТП [8, 11, 12]. Эта модель, при характерном для ТП большом количестве токопроводов со сложной конфигурацией, позволяет по сравнению с методом Био-Савара и численными методами упростить расчет ВМП ТП при ограниченной методической погрешности (менее 10 %) [3, 8]. Кроме того, мультидипольная модель имеет четкую физическую интерпретацию, что позволяет упростить синтез средств снижения МП на ее основе [3].

Для построения мультидипольной модели ВМП ТП может быть использован реализованный в [3] подход, когда каждый линейный контур с током I ТП (рис. 4) протяженностью L и шириной d условно разбивается на N элементарных микроконтуров с площадями $S_i = a_i \cdot d$, характеризующихся дипольными магнитными моментами \vec{m}_i (рис. 7). При этом необходимо выполнение следующих условий [3, 8]:

$$R_0 > 2d; R_0 > 2a; a = \frac{L}{N} < 0,5R_0. \quad (2)$$

В этом случае напряженность МП $\vec{H}_k(P)$, создаваемая единичным прямолинейным однофазным контуром с током (рис. 7) в точке наблюдения P может быть определена выражениями [3, 8]

$$\vec{H}_k(P) = -\sum_{i=1}^N \nabla \left[\frac{(\vec{m}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right]; \quad (3)$$

$$\vec{m}_i = I \cdot \vec{S}_i = I \cdot e^{-j\varphi} \cdot a_i \cdot d \cdot \vec{n}, \quad (4)$$

где N – количество микроконтуров в прямолинейном контуре ТП; \vec{S}_i – вектор площади i -го микроконтуров; \vec{n}_i – единичный вектор, нормальный к S_i ; \vec{R}_i – радиус вектор от геометрического центра i -го микроконтуров в точку наблюдения P ; φ – фаза тока I .

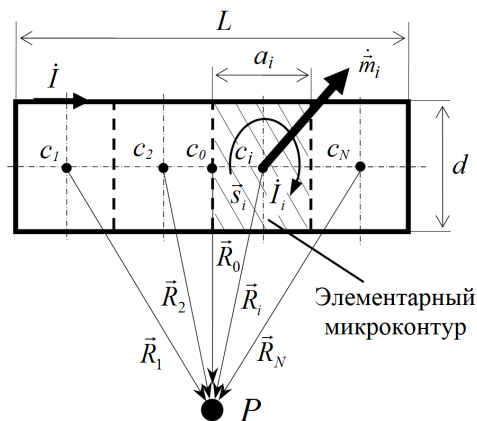


Рис. 7. Мультидипольное представление элементарного контура с переменным током I как источника МП

Тогда индукция \vec{B}_{TS} ВМП ТП (рис. 4), содержащей K трехфазных прямолинейных контуров ТП может быть определена как

$$\vec{B}_{TS}(P) = -\sum_{l=1}^K \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{i=1}^N \nabla \left[\frac{\mu_0 (\vec{m}_{l\alpha i}, \vec{R}_{l\alpha i})}{4\pi R_{l\alpha i}^3} \right], \quad (5)$$

где α – номер фазы токопровода ТП ($\alpha = 1, \dots, 3$); l – номер контура ТП ($l = 1, \dots, K$); μ_0 – магнитная постоянная.

Используем предложенную мультидипольную модель (5) для расчета индукции ВМП встроенной ТП. Расчет проведем для реальной городской 2-х трансформаторной ТП мощностью 715 кВА, встроенной в жилой дом (рис. 1). При расчете полагаем, что токи в фазах всех контуров ТП синусоидальны, сдвинуты на 120 эл. градусов и образуют симметричную систему. Токопроводы ТП представляют собой токовые нити. Внешняя среда не содержит источников МП. Влиянием на ВМП металлических частей корпуса ТП и стен жилого дома в соответствии с [9, 13] пренебрегаем.

Расчетная схема ТП соответствует рис. 4 и содержит 18 прямолинейных трехфазных токовых контуров ($K = 18$) с приведенными на рис. 4 размерами и фактическими токами, определенными экспериментально при нагрузке ТП $0,45 \cdot S_{\text{ном}}$: $I_1 = 312$ 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.

Результаты расчета индукции МП в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте 2,35 м над ТП, выполнены в соответствии с (5) и представлены на рис. 8.

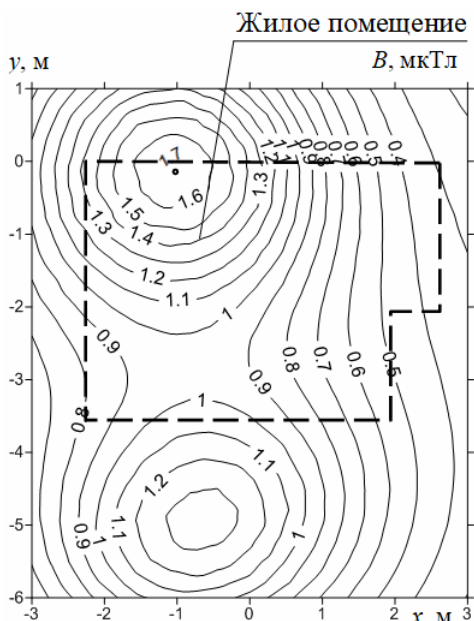


Рис. 8. Расчетные значения распределение индукции МП (мкТл) на высоте 0,5 м от пола жилого помещения (рис. 1), расположенного над встроенной ТП мощностью $S_{ном} = 715$ кВА при расчетной нагрузке $0,45 \cdot S_{ном}$

Сравнение результатов расчета (рис. 8) с результатами эксперимента (рис. 6) показывает, что максимальное расчетное значение индукции МП (1,7 мкТл) с погрешностью менее 10 % совпадает с результатами эксперимента (1,6 мкТл). Это подтверждает корректность

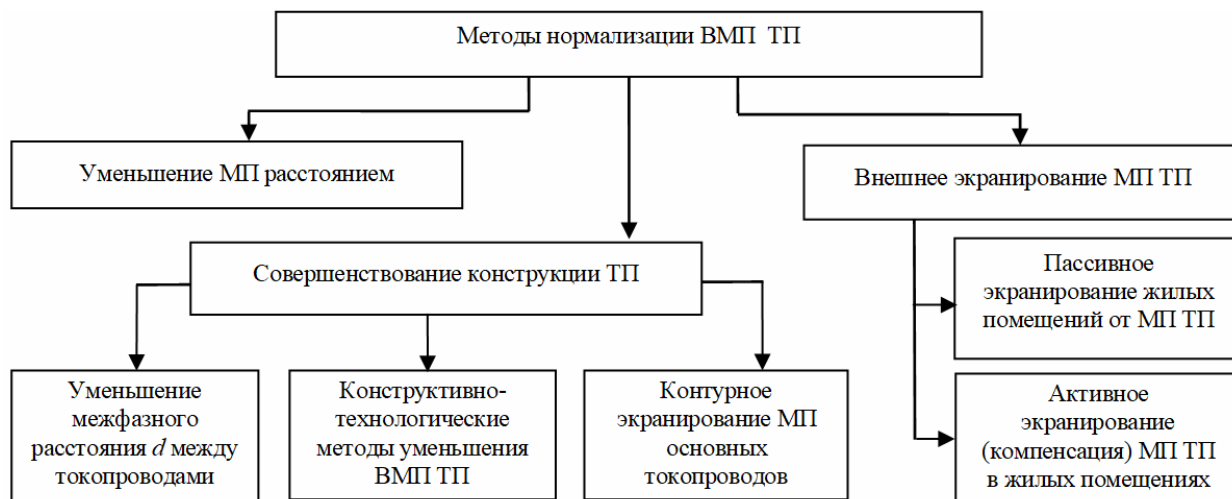


Рис. 9. Классификация методов нормализации ВМП, создаваемого ТП в близлежащих жилых помещениях

Большой интерес с точки зрения стоимости реализации при высокой эффективности представляют методы активного экранирования МП [4, 8, 9, 16-22]. Однако они требуют своего развития применительно к ТП, что и является предметом дальнейших исследований.

Выводы.

1. Впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования распределения индукции

предложенной методики расчета индукции ВМП ТП и принятых выше допущений.

Методы нормализации ВМП ТП. Как следует из проведенного выше анализа, нормализация ВМП требуется для встроенных в жилые дома ТП, когда расстояние между корпусом ТП и жилым помещением составляет менее 8 м. Основные методы нормализации ВМП ТП представлены на рис. 9.

ВМП ТП интенсивно спадает в функции расстояния (рис. 5), что позволяет существенно уменьшить МП при удалении ТП от жилых помещений. Однако реализация этого метода возможна только при наличии свободного пространства, что ограничивает его применение.

Существенное уменьшение ВМП ТП возможно за счет его специального конструктивного исполнения ТП. Так, предложенные в [8, 9] конструктивно-технологические методы (симметрирование, транспонирование, расщепление токопроводов, локальное активное и пассивное экранирование МП) позволяют на порядок и более снизить ВМП ТП. Перспективным методом уменьшения ВМП ТП является контурное экранирование его токопроводов в соответствии с [5, 9]. Однако изменение конструкции действующих ТП технически сложно и имеет юридические ограничения, а промышленный выпуск ТП в специальном конструктивном исполнении требует значительных инвестиций.

Поэтому более предпочтительными для практической реализации являются методы внешнего экранирования МП ТП. Пассивное экранирование осуществляется с помощью электропроводных (ферромагнитных) материалов, размещаемых на стенах и потолках расположенных вблизи ТП жилых помещений [14, 15]. Этот метод универсален, однако на низкой частоте 50 Гц его реализация требует существенных материальных средств.

внешнего магнитного поля частотой 50 Гц, создаваемого 42 типовыми городскими трансформаторными подстанциями (ТП) установленной мощностью от 100 кВА до 1260 кВА. Показано, что индукция магнитного поля в близлежащих жилых помещениях не превышает нормативного уровня (0,5 мкТл) при условии удаления ТП от жилых помещений на расстояние более 8 м.

2. Предложена и экспериментально обоснована мультидипольная математическая модель для расчета внешнего магнитного поля ТП, позволяющая упростить расчет при ограниченной погрешности (10 %) и имеющая четкую физическую интерпретацию. Модель построена на основе дипольных источников магнитного поля, характеризуемых магнитными моментами независимых элементарных микроконтуров $d \times a_i$, на которые с шагом a_i условно разбиваются все линейные участки трехфазных токопроводов ТП с межфазным расстоянием d . Магнитное поле в точке наблюдения, удаленной на расстояние более $2d$ ($2a_i$), определяется как суперпозиция магнитного поля, создаваемого магнитными моментами элементарных микроконтуров всех линейных участков токопроводов ТП.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что наибольшую опасность для здоровья населения представляют встроенные в жилые дома ТП, которые могут создавать в соседних жилых помещениях магнитное поле с индукцией 1,5-7 мкТл, что в 3-14 раз превышает нормативный уровень.

4. Рассмотрены методы нормализации внешнего магнитного поля ТП в жилых помещениях, основанные на совершенствовании конструкции ТП, использовании внешнего экранирования (компенсации) магнитного поля ТП и обоснована перспективность развития методов внешнего активного экранирования магнитного поля.

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. – К., 2015. – Вип. 66. – С. 20-29.
2. Правила улаштування електроустановок. – 5-те вид., переробл. й доповн. (станом на 22.08.2014). – Х.: Форт, 2014. – 800 с.
3. 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.
4. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Бовдуй И.В., Волошко А.В., Виниченко Е.В., Кобылянский Б.Б. Синтез систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи на основе многокритериальной оптимизации // Електротехніка і електромеханіка – 2016. – №6. – С. 26-30. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.
5. Розов В.Ю., Добродеев П.Н., Квицинский А.А. Двухконтурное пассивное экранирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий в зонах соединительных муфт // Технічна електродинаміка. – 2017. – №1. – С. 23-28.
6. Ополева Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения. Справочник. – М: Форум-Инфра, 2006. – 480 с.
7. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations // Universities Power Engineering Conference, 42nd International. – 2007. – pp. 832-836. doi: 10.1109/UPEC.2007.4469057.
8. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики; №772. – К.: 1995. – 42 с.
9. Розов В.Ю., Ерисов А.В., Лупиков В.С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных уст-

ройств и полупроводниковых преобразователей Препр. НАН Украины. Ин-т электродинамики; №791. – К.: 1996. – 46 с.

10. Заутнер Ф.Л., Пилюгина О.Ю., Розов В.Ю. Вероятностный метод прогнозирования электромагнитных помех электрооборудования в низкочастотном диапазоне // Технічна електродинаміка. – 1994. – №1. – С. 3-6.

11. 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.

12. 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.

13. Розов В.Ю., Гринченко В.С., Пелевин Д.Е., Чунихин К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи // Техническая электродинамика. – 2016. – №3. – С. 6-9.

14. Szabó J., Jánossy G., Thuróczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations // Bioelectromagnetics. – 2007. – vol.28. – no.6. – pp. 48-52. doi: 10.1002/bem.20264.

15. 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:10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

16. Шидловский А.К., Розов В.Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов // Технічна електродинаміка. – 1996. – №1. – С. 3-9.

17. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А., Реуцкий С.Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.4. – С. 97-100.

18. Розов В.Ю., Ассуиров Д.А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С.13-16.

19. Волошко О.В. Синтез систем активного экранирования магнитного поля повітряних ліній електропередачі // Вісник НАН України. – 2017. – №7. – С. 64-73. doi: 10.15407/visn2017.07.064.

20. Cruz P., Riquelme J.M., de la Villa A., Martínez J.L. Gabbased passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines: neural network applications in electrical engineering, // Neurocomputing. – 2007. – vol.70. – no.16-18. – pp. 2679-2686. doi:10.1016/j.neucom.2006.05.016.

21. del-Pino-López 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: 10.1016/j.epr.2014.10.019.

22. Garzia, F., Geri, A. Active shielding design of indoor MV/LV substations using genetic algorithms optimization // IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2003. – vol.1. – pp.197-202.

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. *Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok 5-te vyd., pererobl. j dopovn. (stanom na 22.08.2014)* [Electrical Installation Regu-

lations. 5 edition, Revised and enlarged]. Kharkiv, Fort Publ., 2014. 800 p. (Ukr).

3. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Pelevin D.Ye., Pilyugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2013, no.2, pp. 3-9. (Rus).
4. Kuznetsov B.I., Nikitiina T.B., Voloshko A.V., Bovdyj I.V., Vinichenko E.V., Kobilyanskiy B.B.. Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 26-30. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.05.
5. Rozov V.Yu., Dobrodeyev P.N., Kvytsynskiy A.A. Double-circuit passive shielding of the magnetic field of high-voltage cable lines in junction zones. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2017, no.1, pp. 23-28. (Rus).
6. Opoleva G.N. *Skhemy i podstantsii elektrosnabzheniia. Spravochnik* [Schemes and substations of power supply. Directory]. Moscow, Forum-Infra Publ., 2006. 480 p. (Rus).
7. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *Universities Power Engineering Conference, 42nd International*. 2007, pp. 832-836. doi: 10.1109/UPEC.2007.4469057.
8. Rozov V.Yu. *Vneshnie magnitnye polia silovogo elektrooborudovaniia i metody ikh umen'sheniia* [External magnetic fields of power electrical equipment and methods for reducing them]. Kiev, The Institute of Electrodynamics Publ., 1995, no.772. 42 p. (Rus).
9. Rozov V. Yu., Erisov A.V., Lupikov V.S. *Osobennosti snizheniia vneshnikh magnitnykh polei raspredelitel'nykh ustroystv i poluprovodnikovyykh preobrazovatelei* [Features of reducing external magnetic fields of switchgears and semiconductor converters]. Kiev, The Institute of Electrodynamics Publ., 1996, no.791. 46 p. (Rus).
10. Zautner F.L., Pilyugina O.Yu., Rozov V.Yu. Probabilistic method for predicting electromagnetic interference of electrical equipment in the low-frequency range. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1994, no.1, pp. 3-6. (Rus).
11. Rozov V.Yu. Construction of systems for automatic compensation of external magnetic fields of mobile objects containing ferromagnetic masses. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2002, no.2, pp. 9-14. (Rus).
12. Rozov V.Yu., Getman A.V., Petrov S.V., Ericov A.V., Melanchenko A.H., Horoshilov V.S., Shmidt I.R. Magnetism of spacecraft. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2010, no.2, pp. 144-147. (Rus).
13. Rozov V.Yu., Grinchenko V.S., Pelevin D.Ye., Chunikhin K.V. Simulation of electromagnetic field in residential buildings located near overhead lines. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2016, no.3, pp.6-9. (Rus).
14. Szabó J., Jánossy G., Thuróczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*, 2007, vol.28, no.6, pp. 48-52. doi: 10.1002/bem.20264.
15. 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:10.1016/S0360-1323(02)00043-4.
16. Shidlovskij A.K., Rozov V.Yu. Automatic compensation systems for external magnetic fields of energy-saturated objects. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 1996, no.1, pp.3-9. (Rus).
17. Rozov V.Yu., Assuirov D.A., Reuckij S.Ju. Closed systems for compensation of the magnetic field of technical objects with different methods of feedback formation. *Tekhnichna Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*, 2008, no.4, pp. 97-100. (Rus).
18. Rozov V.Yu., Assuirov D.A. The method of active shielding of the external magnetic field of technical objects. *Tekhnichna*

Elektrodynamika. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering», 2006, no.3, pp. 13-16. (Rus).

19. Voloshko A.V. Synthesis of active shielding systems of power transmission lines magnetic field. *Visnyk Nac. Akad. Nauk Ukr.*, 2017, no.7, pp. 64-73. (Ukr). doi: 10.15407/visn2017.07.064.
20. Cruz P., Riquelme J.M., de la Villa A., Martínez J.L. GABased passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines: neural network applications in electrical engineering. *Neurocomputing*, 2007, vol.70, no.16-18, pp. 2679-2686. doi:10.1016/j.neucom.2006.05.016.
21. del-Pino-López J.C., 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: 10.1016/j.epsr.2014.10.019.
22. Garzia F., Geri A. Active shielding design of indoor MV/LV substations using genetic algorithms optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol.1, pp.197-202.

Поступила (received) 12.08.2017

Розов Владимир Юрьевич¹, д.т.н., чл.-корр. НАН Украины, Пелевин Дмитрий Евгеньевич¹, к.т.н., Пелевина Екатерина Дмитриевна¹, аспирантка,
¹ Государственное учреждение «Институт технических проблем магнетизма Национальной Академии Наук Украины», 61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19, тел/phone: +38 0572 992162, e-mail: pelevindmitro@ukr.net

V.Yu. Rozov¹, D.Ye. Pelevin¹, K.D. Pielievina¹
¹ State Institution «Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine», 19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization.

Purpose. Research of external magnetic field of urban transformer substations and the methods it reduction to the standard level in the living quarters of nearby. **Methodology.** Experiment based on the actual values the measuring magnetic flux density of the alternating magnetic field. Theories of electromagnetic field on quasi-static formulation is basis of external magnetic field of urban transformer substations description. **Results.** We have made comprehensive experimental researches the magnetic field of a 50 Hz through model urban transformer substations on the external environment. For calculating the external magnetic field of transformer substations the mathematical model of multi-dipole is proposed. It practical uses for induction external magnetic field of calculating created in nearby built in house transformer substations power 715 kVA is proposed. Comparison of results calculation and experiment was conducted. **Originality.** We have established that magnetic flux density of the magnetic field does not exceed standard level in the living quarters of nearby (0.5 μT) if quarters the location distances of more than 8 m from the transformer substation on the first time. Transformer substations in the built-in houses can create the dangerous to public health magnetic field which induction 1.5-7 μT in neighboring living quarters. It exceeds the normative level in 3-14 times. **Practical value.** We have proposed normalization methods of the external magnetic field built-in transformer substations. Methods are based on improving construction transformer substations. And methods of external passive and active shielding are considered. References 22, figures 9.
Key words: transformation substation, external magnetic field, living spaces, multi-dipole model, methods of normalization.