

И.В. Пентегов, С.В. Рымар, В.М. Безручко

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

*Розроблена оптимізаційна математична модель автотрансформаторних фільтрів струмів нульової послідовності, яка дозволяє оптимізувати їх на мінімум маси, об'єму й вартості активних матеріалів або усередненого параметра. Проведено порівняння різних конструкцій автотрансформаторних фільтрів і визначені області значень, у яких вони мають найкращі вартісні й масогабаритні показники.*

*Разработана оптимизационная математическая модель автотрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности, позволяющая оптимизировать их на минимум массы, объема и стоимости активных материалов или усредненного параметра. Проведено сравнение различных конструкций автотрансформаторных фильтров и определены области значений, в которых они имеют наилучшие стоимостные и массогабаритные показатели.*

### ВВЕДЕНИЕ

Устройства фильтрации токов нулевой последовательности (ТНП) в трехфазных сетях с нулевым проводом называют фильтрами токов нулевой последовательности (ФТНП) [1], фазокомпенсирующими, шунтовыми симметрирующими устройствами (ФКУ, ШСУ) [2-4], или Зего-фильтрами. Большой вклад в разработку ФКУ и ШСУ в СССР и Украине внесли ученые Института электродинамики НАН Украины А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, Н.Н. Капличный, А.В. Самков, В.Б. Данилюк, А.Д. Музыченко, И.В. Волков и др.

До 70-80 гг. наиболее эффективные ФТНП типа "автотрансформаторный зигзаг" использовались в основном для симметрирования напряжения и тока в фазах при несимметричном распределении однофазных нагрузок. Расчет ФТНП производился для токов первой гармоники.

Интерес к ФТНП в последнее время заметно вырос в связи с постоянным увеличением в крупных административных зданиях количества нелинейных нагрузок: компьютеров мониторов, принтеров, сканеров, копиров, факсов, энергосберегающих ламп и др., которые даже при равномерном распределении их по фазам, загружают нейтральные провода сети гармониками тока, кратными трем. При этом токи в нейтральных проводах могут превосходить в полтора и более раза токи в фазных проводах.

Целью работы является представление базовых подходов к разработке оптимизационной модели сухих автотрансформаторных (АТ) ФТНП.

### ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Оптимизационная модель АТ ФТНП будет строиться таким образом, что бы его конструкционные параметры удовлетворяли критериям оптимизации – массе, стоимости или обобщенному критерию двухкритериальной задачи оптимизации [5], при обеспечении устройством необходимых фильтрующих свойств.

Как правило, оптимизационная математическая модель содержит оптимизационную функцию, позволяющую рассчитать оптимальные параметры АТ с наложенными на них ограничениями, метод (процедуру) оптимизации, уравнения для расчета выбранных критериев оптимизации и основных параметров АТ. Помимо этого, основным условием правильной разработки оптимизационной функции является полное разделение в ней зависимых и независимых пере-

менных. Для классических трансформаторов и автотрансформаторов эта задача в целом решена [6, 7], а для АТ ФТНП нуждается в дальнейшей разработке, из-за наличия в них ряда ограничений.

Оптимизационная функция АТ имеет вид [5,7]:

$$F = M_C + k_g \cdot M_0, \quad (1)$$

где  $M_C$  – масса стали магнитопровода;  $M_0$  – масса активного материала обмотки;  $k_g$  – обобщенный весовой коэффициент, задающий соотношение между массами активного материала магнитопровода и обмоток. При коэффициенте  $k_g = 1$  расчет ведется на минимум массы активных материалов, при  $k_g = \gamma_c/\gamma_o$  – на минимум объема активных материалов ( $\gamma_o, \gamma_c$  – плотность активного материала обмоток и магнитопровода), при  $k_g = c_o/c_c$  – на минимум стоимости активных материалов ( $c_o, c_c$  – удельная стоимость активного материала обмоток и магнитопровода, у.е./кг). При двухкритериальной оптимизации коэффициент  $k_g$  лучше всего выбирать как среднегеометрическое значений критериев при однокритериальной оптимизации. Например, для массы и стоимости  $k_g = (1 \cdot c_o/c_c)^{1/2}$  [5, 7].

На рис. 1 приведена конструкция трехфазно-двухфазного АТ ФТНП с шихтованным трехстержневым магнитопроводом [8, 9]. На рисунке обозначены:  $a, b$  – толщина и ширина стержня магнитопровода;  $h_{OK}, l_{OK}$  – высота и ширина окна магнитопровода;  $h_K, C_K$  – высота и толщина катушки с обмотками;  $l_K$  – задаваемое расстояние между боковой поверхностью катушки и стержнем в окне магнитопровода;  $\Delta h$  – задаваемая длина выступающих из катушек частей стержня магнитопровода;  $d_0$  – задаваемое расстояние между стержнем магнитопровода и катушкой.

Запишем оптимизационную математическую модель для трехфазно-двухфазного АТ ФТНП.

Масса стали магнитопровода:

$$M_C = \gamma_c \cdot S_c \cdot l_c, \quad (2)$$

где  $\gamma_c$  – плотность стали;  $S_c$  – активное поперечное сечение стержня и яра магнитопровода ( $S_c = k_c \cdot a \cdot b$ );  $k_c = 0,96$  – коэффициент заполнения магнитопровода пластинами электротехнической стали [10];  $l_c$  – суммарная длина всех участков магнитопровода, равная:

$$l_c = 3 \cdot h_{OK} + 4 \cdot l_{OK} + 6 \cdot b. \quad (3)$$

Высота окна магнитопровода:

$$h_{OK} = \Delta h + (w_{cl} + 1) \cdot (b_{np} + \Delta) \cdot k_y, \quad (4)$$

где  $b_{np}$  – больший размер обмоточного провода;  $\Delta$  – изоляционное расстояние между проводниками;  $w_{cl}$  – количество витков одной обмотки в слое. Коэффициент укладки  $k_y$  принимаем равным 1.

Ширина окна магнитопровода

$$l_{ок} = d_0 + l_K + C_K. \quad (5)$$

Толщина катушки с обмотками:

$$C_K = 2 \cdot n_{сл} \cdot (c_{пр} + \delta_{12}) k_p, \quad (6)$$

где  $n_{сл}$  – количество слоев одной обмотки.

Коэффициент разбухания  $k_p$  также принимаем равным 1.

Масса обмоточного материала:

$$M_O = 2 \cdot (\gamma_o \cdot S_o \cdot l_{cp}), \quad (7)$$

где  $\gamma_o$  – плотность проводникового материала.

Поперечное сечение активного материала обмоток в окне магнитопровода для трехфазно-двухфазного ФТНП:

$$S_o = 2 \cdot w \cdot S_{пр}, \quad (8)$$

где  $S_{пр}$  – сечение обмоточного провода ( $S_{пр} \approx b_{пр} \cdot c_{пр}$ );  $c_{пр}$  – малый размер обмоточного провода;  $w$  – количество витков в обмотках, рассчитывается как произведение количества витков в слое  $w_{сл}$  на число слоёв  $n_{сл}$  одной обмотки.

Средняя длина витка обмоток:

$$l_{cp} = 2 \cdot (a + b + 4 \cdot d_0) + \pi \cdot C_K, \quad (9)$$

где  $\delta_{12}$  – изоляционное расстояние между проводниками различных обмоток.

С учетом формул (2)-(9), запишем оптимизационную функцию для геометрических параметров конструкции АТ без разделения зависимых и независимых переменных:

$$F = \gamma_c \cdot k_c \cdot a \cdot b \cdot \{3 \cdot [\Delta h + (w_{сл} + 1) \cdot (b_{пр} + \Delta)] + 4 \cdot [d_0 + l_K + 2 \cdot n_{сл} \cdot (c_{пр} + \delta_{12})] + 6 \cdot b\} + 2 \cdot k_g \cdot \gamma_o \cdot \{2 \cdot w_{сл} \cdot n_{сл} \cdot b_{пр} \cdot c_{пр} \cdot [2 \cdot (a + b + 4 \cdot d_0) + 2 \cdot \pi \cdot n_{сл} \cdot (c_{пр} + \delta_{12})]\}. \quad (10)$$

На следующем этапе разделим зависимые и независимые переменные. Для этого запишем формулы, которые свяжут геометрические и электромагнитные параметры конструкции.

Амплитудное значение магнитной индукции в магнитопроводе АТ [10]:

$$B_m = \sqrt{2} \cdot U / (\omega \cdot k_c \cdot a \cdot b \cdot w_{сл} \cdot n_{сл}), \quad (11)$$

где  $U$  – заданное действующее значение напряжения на обмотке (особенностью рассматриваемого трехфазно-двухфазного ФТНП является то, что напряжение на всех его обмотках одинаково, также как и количество их витков);  $\omega$  – угловая частота напряжения сети, рассчитываемая по заданному значению частоты сети  $f_c$ :  $\omega = 2\pi f_c$ .

Зависимость (11) связывает переменные  $a$ ,  $b$ ,  $w_{сл}$ ,  $n_{сл}$  между собой. Таким образом, взяв одну из переменных можно выразить её через три другие, и тем самым, сделать её зависимой. В качестве такой переменной выбираем  $w_{сл}$ :

$$w_{сл} = \sqrt{2} \cdot U / (\omega \cdot k_c \cdot B_m \cdot a \cdot b \cdot n_{сл}). \quad (12)$$

Для ФТНП предъявляются требования по уровню величины полного сопротивления токам нулевой последовательности (СТНП)  $Z_{ФТНП}^0$ , а также его активной и индуктивной составляющей  $R_{ФТНП}$  и  $X_{ФТНП}^0$  [11]. СТНП является основным параметром, влияющим на фильтрующие свойства.

Значение СТНП стремятся сделать как можно меньше, особенно его индуктивную составляющую, поскольку она заметно увеличивает сопротивление для гармоник токов высших частот.

Индуктивная составляющая сопротивления определяется индуктивностью рассеивания обмоток ФТНП. Ее снижение достигается за счет изготовления катушек двумя способами:

1) с бифилярной намоткой обмоток (однослойная двухходовая спираль);

2) с чередующимися слоями различных обмоток. Методы расчета индуктивностей рассеивания таких обмоток изложены в работах [12-14].

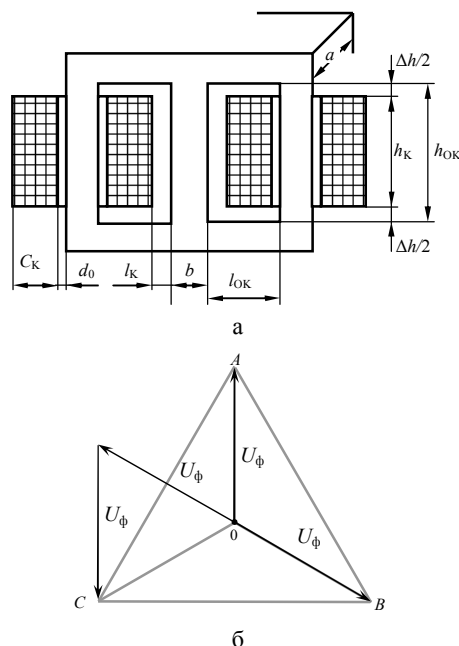


Рис. 1. Конструкция ФТНП с двумя катушками (а); векторная диаграмма напряжений обмоток (б)

Реактивное СТНП обмотки при изготовлении катушек первым способом определяется по формуле (для однослойных катушек):

$$X_{обм}^{0(q)} = q \cdot \omega \cdot \frac{2\mu_0}{\pi} \left[ \ln \frac{2(b_{пр} + \delta_{12})}{\pi \cdot (b_{пр} + c_{пр})} + \frac{3}{2} - \varepsilon + 2 \sum_{i=1}^w (-1)^i (f_i - f_{i+1}) \right] \cdot l_{cp} \cdot w_{сл}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon$ ,  $f_i$  – табличные данные из работы [13];  $q$  – номер гармоники.

Реактивное СТНП обмотки катушки с чередующимися слоями обмоток [12]:

$$X_{обм}^{0(q)} = q \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0 \cdot w_{сл} \cdot k_R \cdot (\delta_{12} / 2 + c_{пр} / 3)}{h_K} \times l_{cp} \cdot w_{сл} \cdot n_{сл}, \quad (14)$$

где  $k_R$  – коэффициент Роговского [14]:  $k_R = 1 - (1 - e^{-\pi u}) / (\pi u)$ ;  $u$  – безразмерный коэффициент  $u = h_K / (2a_{пр} + \delta_{12})$ ;  $\delta_{12}$  – расстояние между проводниками разных обмоток;  $h_K$  – высота катушки:

$$h_K = (w_{сл} + 1) \cdot (b_{пр} + \Delta). \quad (15)$$

Полное СТНП обмотки катушки равно

$$Z_{обм}^{0(q)} = \sqrt{R_{обм}^2 + (X_{обм}^{0(q)})^2},$$

где  $R_{обм}$  – активное сопротивление обмотки.

Полное СТНП трехфазно-двухфазного ФТНП пересчитывается из сопротивления нулевой последовательности одной обмотки по формуле [11]:

$$Z_{ФТНП}^{0(q)} = (4/9) \cdot Z_{обм}^{0(q)}. \quad (16)$$

На величину СТНП накладываются ограничения, обусловленные параметрами сети, в которой необходима установка фильтра. К примеру, в сети с мощно-

стью трансформатора 1000 кВ·А для осуществления эффективной фильтрации необходимо устанавливать фильтр с  $Z_{\text{ФТНП}}^0 = 5-10$  мОм [1].

СТНП может задаваться в относительных единицах:

$$Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)*} = Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)} / Z_6, \quad (17)$$

где  $Z_6$  – базовое сопротивление,  $Z_6 = U_{\text{ном}} / (3 \cdot I_{\text{ном}})$ ;  $I_{\text{ном}}$ ,  $U_{\text{ном}}$  – номинальные значения фазного тока и напряжения фильтра [11].

Некоторые зарубежные производители заявляют об уровне ограничения СТНП в своих ФТНП. Так, у фирмы MIRUS International Inc. (Canada):

$$Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)*} < 0,95\%, \quad X_{\text{ФТНП}}^{0(q)*} < 0,3\% [15].$$

При бифилярной намотке обмоток необходимо усиливать изоляцию между проводниками, поскольку напряжение между ними равно фазному напряжению, и применять электромагнитные экраны между слоями многослойных обмоток, что снижает технологичность изготовления катушек с такими обмотками. Более технологичны катушки с чередующимися слоями различных обмоток, к тому же при многослойной намотке они обладают более низкими индуктивностями рассеяния. Поэтому, при изготовлении ФТНП, рекомендуется применять намотку катушек с чередующимися слоями различных обмоток, которую и будем рассматривать далее. Для нее полное СТНП будет равно:

$$Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)} = 4/9 \cdot l_{\text{ср}} \cdot w_{\text{сл}} \cdot n_{\text{сл}} \times \sqrt{\left(\frac{\rho_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}}}\right)^2 + \left[q \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0 \cdot w_{\text{сл}} \cdot k_R \cdot (\delta_{12}/2 + c_{\text{пр}}/3)}{(w_{\text{сл}} + 1) \cdot (b_{\text{пр}} + \Delta)}\right]^2}, \quad (18)$$

где  $\rho_{\text{пр}}$  – удельное электрическое сопротивление проводника.

Для упрощения аналитического расчета, не внося большой погрешности, можно пренебречь высотой одного витка в слое, при переходе со слоя к слою, считая, что место, необходимое под обмотку определяется количеством витков в слое  $w_{\text{сл}}$ , а не  $w_{\text{сл}} + 1$ . Исходя из этих соображений, преобразуем формулу (18):

$$Z_{\text{ФТНП}}^{0(n)} = \frac{4}{9} \sqrt{\left(\frac{\rho_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}}}\right)^2 + \left[n \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0 \cdot k_R \cdot (\delta_{12}/2 + c_{\text{пр}}/3)}{(b_{\text{пр}} + \Delta)}\right]^2} \times (19)$$

$$\times (2(a + b + 4d_0) + 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{сл}} \cdot (c_{\text{пр}} + \delta_{12})) \cdot n_{\text{сл}} \cdot w_{\text{сл}}.$$

Формула (19) связывает переменные  $a$ ,  $b$ ,  $w_{\text{сл}}$ ,  $n_{\text{сл}}$ ,  $b_{\text{пр}}$ ,  $c_{\text{пр}}$ . Выбрав одну из переменных в качестве зависимой, выражаем её через другие. В качестве такой переменной выбираем  $a$ :

$$a = \frac{9Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)} / (8 \cdot n_{\text{сл}} \cdot w_{\text{сл}})}{\sqrt{\left(\frac{\rho_{\text{пр}}}{b_{\text{пр}} \cdot c_{\text{пр}}}\right)^2 + \left[q \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0 \cdot k_R \cdot (\delta_{12}/2 + c_{\text{пр}}/3)}{(b_{\text{пр}} + \Delta)}\right]^2}} - [(b + 4d_0) + \pi \cdot n_{\text{сл}} \cdot (c_{\text{пр}} + \delta_{12})]. \quad (20)$$

Подставив формулы (12) и (20) в формулу (10) получим оптимизационную функцию  $F$ , которая зависит только от четырех независимых переменных  $b$ ,  $n_{\text{сл}}$ ,  $b_{\text{пр}}$ ,  $c_{\text{пр}}$ .

Независимые переменные определяются в результате минимизации функции  $F$ , а остальные параметры рассчитываются из математической модели АТ. Минимальные значения оптимизационной функции (10) могут быть найдены аналитически из решения системы дифференциальных уравнений:

$$\partial F / \partial b = 0; \quad \partial F / \partial b_{\text{пр}} = 0; \quad \partial F / \partial c_{\text{пр}} = 0; \quad \partial F / \partial n_{\text{сл}} = 0, \quad (21)$$

или при помощи численных методов оптимизации [16] при заданных начальных значениях независимых переменных.

Следует отметить, что в оптимизационной математической модели мы выбираем размеры проводников, исходя из требования обеспечения заданных величин  $Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)*}$  и  $X_{\text{ФТНП}}^{0(q)*}$ . Получаемая при этом плотность тока в проводнике может быть как меньше допустимой длительной плотности тока в проводниках обмоток  $J_{\text{доп}}$ , так и превышать ее.

Поэтому, после того как решение найдено, следует проверить ее величину:

$$J_{\text{дл}} = I_{\text{дл}} / S_{\text{пр}} \leq J_{\text{доп}}, \quad (22)$$

где  $I_{\text{дл}}$  – длительное действующее значение тока в обмотке. В большинстве случаев, особенно при малых значениях СТНП, плотность тока получается меньше допустимой.

Величина допустимой плотности тока  $J_{\text{доп}}$  для разных типов ФТНП может быть различной. Это обусловлено различными условиями охлаждения катушек. Наличие только двух катушек со свободным центральным стержнем, в трехфазно-двухфазном ФТНП, вместо трех, как в классической схеме ФТНП типа зигзаг, позволяет выбирать более высокие значения плотности тока в обмотках, при условии равенства в них температур [17].

В случае, если решение оптимизационной задачи (21) не удовлетворяет условию (22), следует ограничить минимальное сечение проводника и решить оптимизационную задачу с учётом этого ограничения. При этом одну из переменных  $b_{\text{пр}}$  или  $c_{\text{пр}}$  сделать зависимой. В качестве зависимой переменной выбираем:

$$b_{\text{пр}} = I_{\text{дл}} / (J_{\text{доп}} \cdot c_{\text{пр}}). \quad (23)$$

Подставив формулы (12), (20) и (23) в выражение (10) мы получим оптимизационную функцию  $F$ , которая зависит уже от трех независимых переменных  $b$ ,  $n_{\text{сл}}$ ,  $c_{\text{пр}}$ . Определение независимых переменных  $b$ ,  $n_{\text{сл}}$ ,  $c_{\text{пр}}$  производится аналогично, аналитически из решения системы дифференциальных уравнений:

$$\partial F / \partial b = 0; \quad \partial F / \partial c_{\text{пр}} = 0; \quad \partial F / \partial n_{\text{сл}} = 0, \quad (24)$$

или при помощи численных методов.

Отметим, что в современных программных продуктах для математических расчетов предусмотрены специальные функции, которые позволяют реализовать поиск значений переменных для минимума функции без решения системы дифференциальных уравнений. В программном пакете MathCAD это функция minimize. Данная функция позволяет также задавать дополнительные ограничения типа (22). Оптимизация полученных функций выполнялась в этом пакете.

Аналогичные уравнения можно записать и для ФТНП типа зигзаг, конструкция которого, выполненная на шихтованном трехстержневом магнитопроводе, приведена на рис. 2.

Полное СТНП ФТНП типа зигзаг пересчитывается из сопротивления нулевой последовательности одной обмотки по формуле:

$$Z_{\text{ФТНП}}^{0(q)} = (2/3) \cdot Z_{\text{обм}}^{0(q)}.$$

## СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФТНП

На основании математических моделей, предложенных выше, был проведен сравнительный анализ массогабаритных и стоимостных показателей фильтра типа зигзаг и трехфазно-двухфазного ФТНП с чере-

дующимися слоями различных обмоток. Сравнение проводилось при одинаковых напряжениях и токах в обмотках, индукциях в магнитопроводе и СТНП.

Оценивалось отношение масс  $M^*_{\text{ФТНП}}$  и стоимостей  $C^*_{\text{ФТНП}}$  трехфазно-двухфазного ФТНП и ФТНП типа зигзаг при их оптимизационном расчете соответственно на минимум массы ( $k_g = 1$ ), и стоимости (при  $k_g = 2,5$ ) активных материалов. Оказалось, что радикальных преимуществ одной конструкции ФТНП над другой нет. Отношение масс  $M^*_{\text{ФТНП}}$  и стоимостей  $C^*_{\text{ФТНП}}$  различно, может быть больше и меньше 1 и зависит от величины фазного тока (мощности), напряжения на обмотках, плотности тока в них, индукции в магнитопроводе, и уровня СТНП.

Для того чтобы отобразить на двумерной плоскости зависимости  $M^*_{\text{ФТНП}}$  и  $C^*_{\text{ФТНП}}$  в виде одной кривой (а не многочисленного семейства кривых), введем условный безразмерный параметр  $\pi_0$ , который зависит от других параметров таким образом, чтобы кривые соотношения масс и стоимостей активных материалов ФТНП совпадали на начальном отрезке для всех значений фазного тока и напряжений, индукции, плотности тока и СТНП.

Для определения  $\pi_0$  воспользуемся теорией подобия, а именно  $\pi$ -теоремой [18-21], и подберем степени при соответствующих безразмерных параметрах, исходя из теории размерностей:

$$\pi_0 = 10^3 \cdot Z_{\text{ФТНП}}^{0*} \cdot \left(\frac{I_\phi}{I_6}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{B_m}{B_6}\right)^{3/4} \cdot \left(\frac{J_{\text{дл}}}{J_6}\right)^{-5/4}, \quad (25)$$

где  $I_\phi$  – ток фазы ФТНП;  $I_6, J_6$  – базовые значения тока и плотности тока, равные 150 А и 1 А/мм<sup>2</sup>;  $B_6$  – базовое значение магнитной индукции, равное 1 Тл.

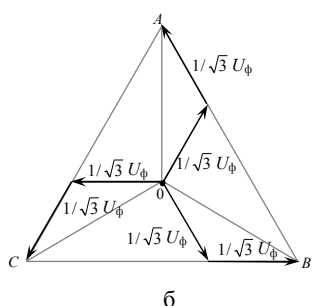
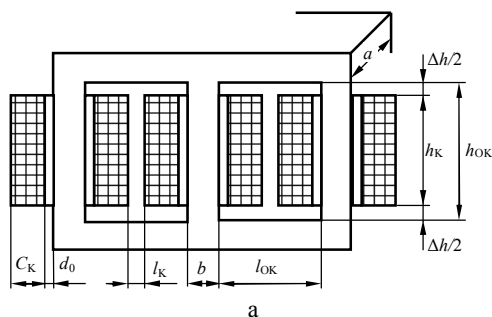


Рис. 2. Конструкция ФТНП с тремя катушками (типа зигзаг) (а); векторная диаграмма напряжений (б)

На рис. 3 и 4 представлены зависимости  $M^*_{\text{ФТНП}}$  и  $C^*_{\text{ФТНП}}$  от безразмерного параметра  $\pi_0$ . Длительное значение плотности тока в обмотках ФТНП типа зигзаг выбрана равной 2 А/мм<sup>2</sup>, что соответствует обычно принимаемой плотности тока в трехфазных сухих трансформаторах. Видно, что есть разные области значения параметров, при которых минимальные массы и стоимости будут у трехфазно-двухфазного

ФТНП и у ФТНП типа зигзаг. Масса активных материалов у первого меньше, чем у второго в области высоких мощностей и магнитных индукций при  $\pi_0 > 6,5$ , а стоимость активных материалов у трехфазно-двухфазного ФТНП меньше чем у ФТНП типа зигзаг при  $\pi_0 > 4,5$ . Дополнительно отметим, что стоимость изготовления двух катушек у трехфазно-двухфазного ФТНП меньше стоимости изготовления 3 катушек у ФТНП типа зигзаг.

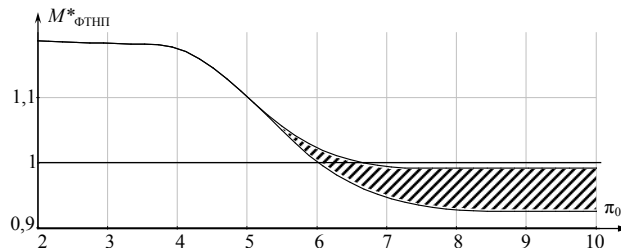


Рис. 3. Отношение масс активных материалов трехфазно-двухфазного ФТНП и ФТНП типа зигзаг с шихтованными магнитопроводами (см. рис. 1, 2) при одинаковых параметрах

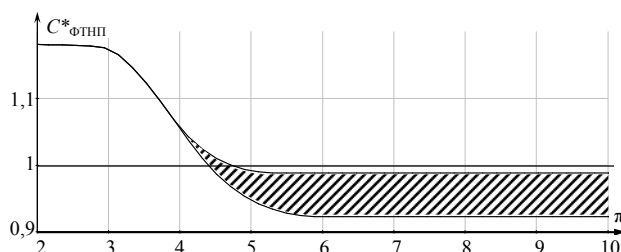


Рис. 4. Отношение стоимостей активных материалов трехфазно-двухфазного ФТНП и ФТНП типа зигзаг с шихтованными магнитопроводами (см. рис. 1, 2) при одинаковых параметрах

Заштрихованные области на рис. 3 и 4 возникают вследствие того, что в зависимости от мощности АТ плотность тока в обмотках конструкции с двумя катушками может выбираться в 1,18 и более раза выше, чем у конструкции с тремя катушками при условии равенства температур в обмотках [17].

Оптимизационные математические модели были также составлены для других конструкций трехфазно-двухфазного ФТНП (см. рис. 5-15).

Конструкции, показанные на рис. 6-15, выполнены на основе ленточных навитых магнитопроводов, поэтому потери в стали в них будут меньшими, чем у других конструкций, за счет чего можно повысить магнитную индукцию в магнитопроводе до 7% при условии одинаковых потерь в стали [17].

На рис. 5 представлена конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с шихтованным магнитопроводом и с разделением обмоток на две пары (конструкция с четырьмя катушками). На рис. 6 представлена аналогичная конструкция, построенная с использованием ленточного стержневого навитого разрезного магнитопровода, имеющего две одинаковые подковообразные части и центральный стержень.

На рис. 7 представлена конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя однофазными ленточными стержневыми навитыми разрезными магнитопроводами и двумя катушками.

На рис. 8 представлена конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками расположенными на двух однофазных ленточных стержневых

навитых разрезных магнитопроводах, каждый из которых состоит из четырех подковообразных частей.

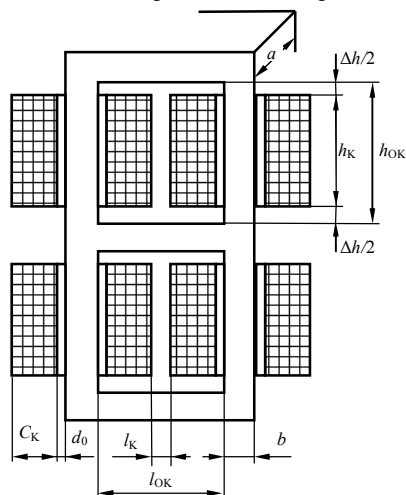


Рис. 5. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с шихтованным магнитопроводом с четырьмя катушками

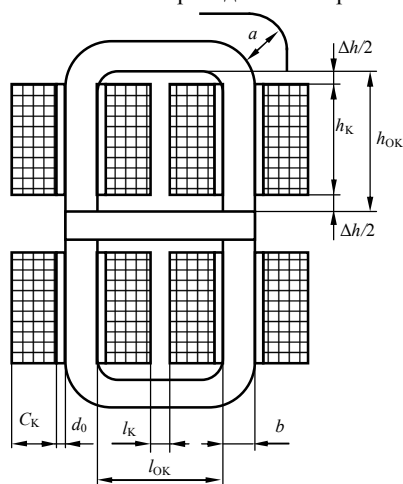


Рис. 6. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с ленточным навитым магнитопроводом с четырьмя катушками

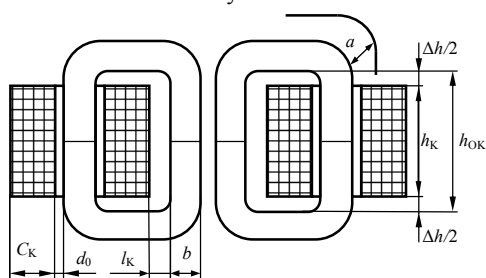


Рис. 7. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя однофазными ленточными стержневыми навитыми разрезными магнитопроводами

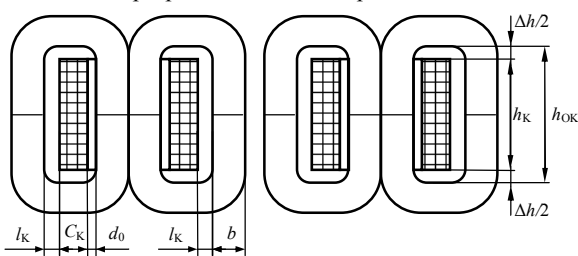


Рис. 8. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками, выполненная на четырех однофазных ленточных навитых магнитопроводах

На рис. 9 представлена конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП на двух однофазных ленточных стержневых навитых разрезных магнитопроводах с разделением обмоток на две пары и четырьмя катушками.

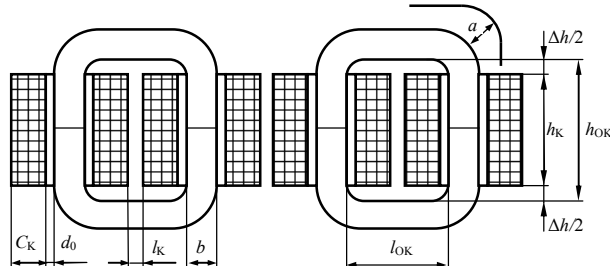


Рис. 9. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с четырьмя катушками, выполненная на двух однофазных ленточных навитых магнитопроводах

На рис. 10 представлены две проекции трехфазно-двухфазного ФТНП [17] конструкцией магнитопровода состоящего из трех ленточных навитых разрезных магнитопровода, одного большого и двух малых, каждый из которых состоит из двух одинаковых подковообразных частей. Два малых одинаковых магнитопровода наложены на большой магнитопровод, при этом крайние стержни большого и малых магнитопроводов совмещены и образуют крайние стержни многостержневого магнитопровода. Центральный стержень образуется крайними стержнями малых магнитопроводов.

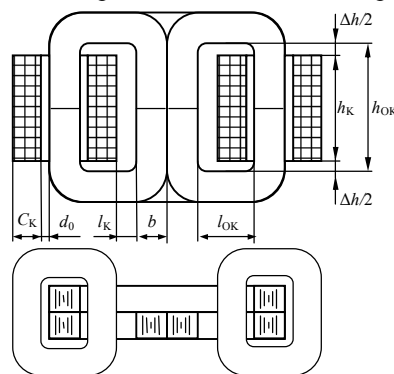


Рис. 10. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками, выполненная на трех ленточных навитых магнитопроводах со смешиваемыми магнитными потоками

На рис. 11 представлена аналогичная конструкция, за исключением того, что малые магнитопроводы размещаются с фронтальной и тыльной сторон большого магнитопровода. Таким образом, центральный стержень получается расщепленным.

На рис. 12 представлен трехфазно-двухфазный ФТНП выполненный с наиболее распространенной конструкции магнитопровода трехфазного трансформатора. Такой магнитопровод содержит три стержневые ленточные навитые разрезные магнитопровода, каждый из которых состоит из двух подковообразных частей. Два малых магнитопровода имеют одинаковые габариты и размещены таким образом, чтобы большой магнитопровод охватывал их по внешнему периметру.

Между малыми и большим магнитопроводами существуют технологические зазоры. Переход магнитных потоков из одного магнитопровода в другой крайне затруднен. Магнитные потоки в трех магнитопроводах не смешиваются, поэтому возникает необ-

ходимость в увеличении поперечного сечения магнитопровода в  $2/\sqrt{3}$  раза [22].

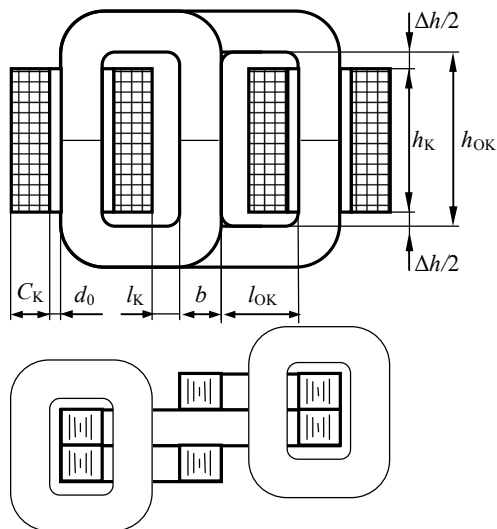


Рис. 11. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками выполненная на трех ленточных навитых магнитопроводах со смешиваемыми магнитными потоками

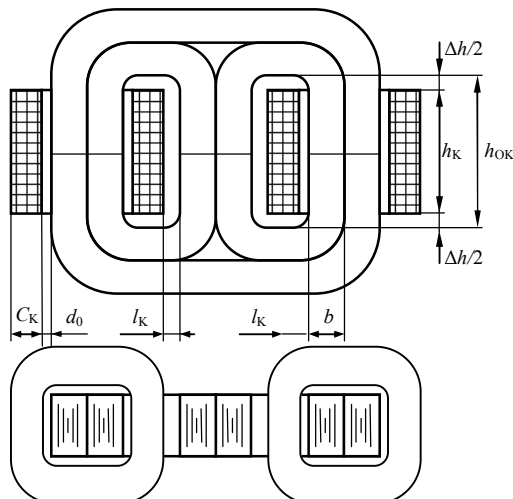


Рис. 12. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками выполненная на трех ленточных навитых магнитопроводах с несмешиваемыми магнитными потоками

На рис. 13 представлен трехфазно-двухфазный ФТНП, который состоит из трех стержневых навитых разрезных магнитопроводов. Два малых магнитопровода имеют одинаковые габариты и размещаются по бокам большего магнитопровода таким образом, что крайние стержни большего и малых магнитопроводов совмещены и образуют крайние стержни многостержневого магнитопровода. Центральный стержень расщеплен. Магнитные потоки в такой конструкции не смешиваются.

На рис. 14 представлена конструкция ФТНП, у которой малые магнитопроводы размещаются с фронтальной стороны большего магнитопровода, перпендикулярно ему. Магнитные потоки в такой конструкции не смешиваются.

На рис. 15 и 16 показаны диаграммы относительных масс и стоимостей активных материалов ФТНП различных конструкций. Массы и стоимости приведе-

ны к массе и стоимости трехфазно-двухфазного ФТНП с шихтованным магнитопроводом (рис. 1) с такими же параметрами. Заштрихованная область это область, в которой может изменяться соотношение масс и стоимостей ФТНП в зависимости от мощности, СТНП и заданного значения магнитной индукции в магнитопроводе. Индукция в магнитопроводе, СТНП, максимальная плотность тока в обмотках, мощность для сравниваемых конструкций одинаковы.

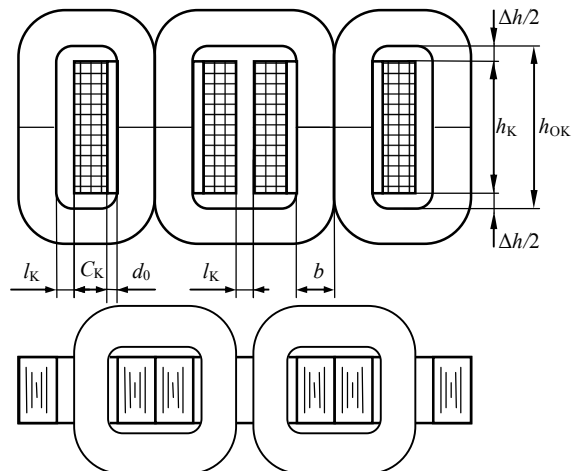


Рис. 13. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками выполненная на трех ленточных навитых магнитопроводах с несмешиваемыми потоками

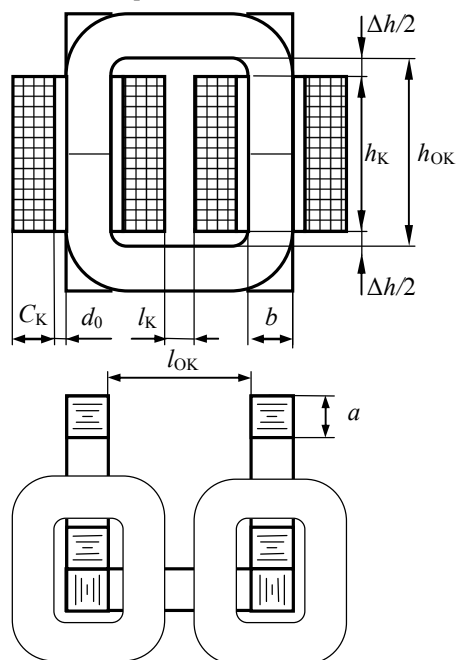


Рис. 14. Конструкция трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками, выполненная на трех ленточных навитых магнитопроводах с несмешиваемыми потоками

Из диаграмм видно, что наилучшими массогабаритными и стоимостными показателями обладают конструкции ФТНП, приведенные на рис. 6, 8, 11 и 13.

На рис. 17 и 18 приведены зависимости относительной массы и стоимости активных материалов конструкции трехфазно-двухфазного ФТНП, выполненной на четырех однофазных ленточных навитых магнитопроводах (рис. 8), к массе и стоимости активных материалов конструкции ФТНП типа зигзаг, выполненной на шихтованном магнитопроводе (рис. 2) с

аналогичными параметрами. Видно, что ФТНП типа зигзаг также целесообразно выполнять с использованием навитых магнитопроводов, в частности, представленных на рис. 10 и 12 при наличии обмоток на центральном стержне.

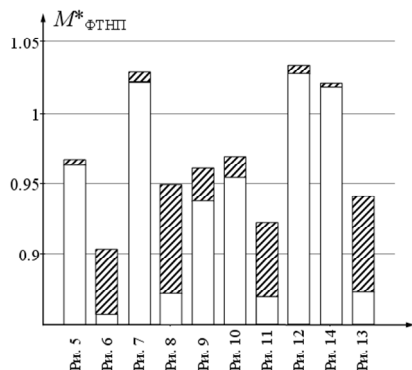


Рис. 15. Отношение масс активных материалов трехфазно-двухфазных конструкций ФТНП к массе активных материалов конструкции ФТНП с шихтованным магнитопроводом (рис. 1) при одинаковых параметрах

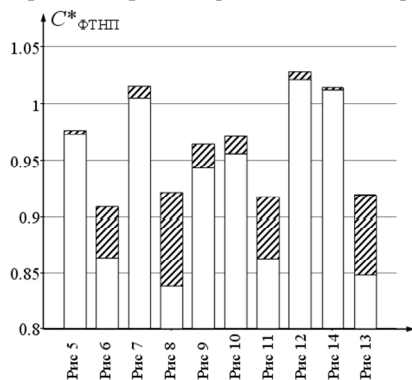


Рис. 16. Отношение стоимостей активных материалов трехфазно-двухфазных конструкций ФТНП к стоимости активных материалов конструкции ФТНП с шихтованным магнитопроводом (рис. 1) при одинаковых параметрах

Отношения массы и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг изготовленного на навитом магнитопроводе (рис. 12) к массе и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг с шихтованным магнитопроводом представлены на рис. 19. Видно, что при изготовлении ФТНП типа зигзаг на этом магнитопроводе затраты на активные материалы возрастают на 2,5-3,2 %, а масса увеличивается на 3-4 %.

Отношение массы и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг с навитым магнитопроводом (рис. 10), к массе и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг с шихтованным магнитопроводом представлены на рис. 20. При расчетах учитывалось, что в конструкции ФТНП типа зигзаг, выполненном на магнитопроводе рис. 10, есть возможность повысить плотность тока в обмотках на 7 % за счет улучшенных условий охлаждения катушек, по сравнению с конструкцией с классическим шихтованным магнитопроводом.

На рис. 20 видно, что при изготовлении ФТНП типа зигзаг на данном магнитопроводе затраты на активные материалы и их масса уменьшаются на 6,5-9,0 %.

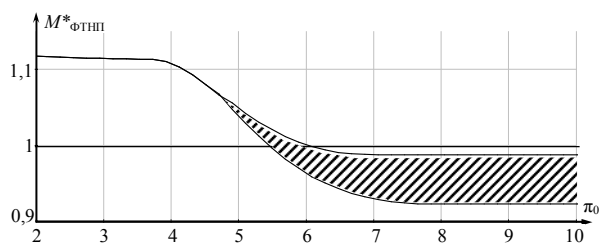


Рис. 17. Отношение массы активных материалов конструкции трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками, выполненной на четырех однофазных ленточных навитых магнитопроводах (рис. 8), к массе ФТНП типа зигзаг, выполненного на шихтованном магнитопроводе (рис. 2) с аналогичными параметрами

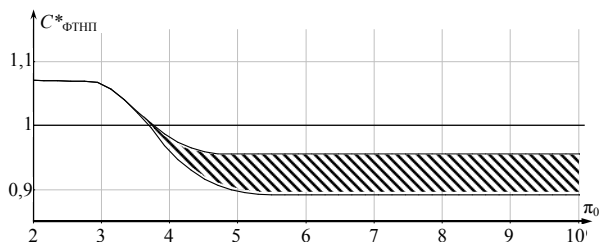


Рис. 18. Отношение стоимости активных материалов конструкции трехфазно-двухфазного ФТНП с двумя катушками, выполненной на четырех однофазных ленточных навитых магнитопроводах (рис. 8), к стоимости активных материалов зигзага выполненного на шихтованном магнитопроводе (рис. 2) с аналогичными параметрами

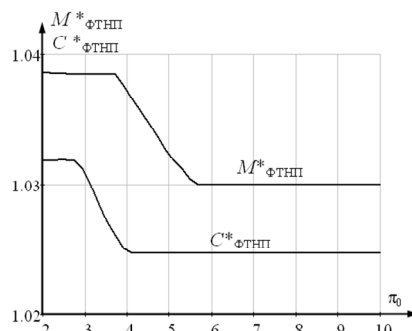


Рис. 19. Отношения массы и стоимости активных материалов конструкции ФТНП типа зигзаг выполненного на навитых магнитопроводах (рис. 12), к массе и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг, выполненного на шихтованном магнитопроводе (рис. 2) с аналогичными параметрами

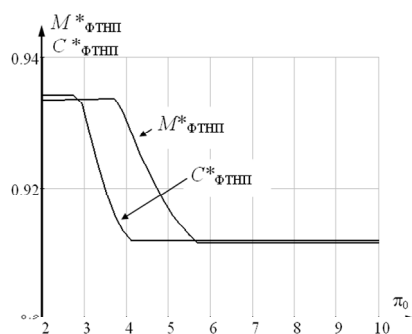


Рис. 20. Отношения массы и стоимости активных материалов конструкции ФТНП типа зигзаг выполненного на навитых магнитопроводах (рис. 10), к массе и стоимости активных материалов ФТНП типа зигзаг, выполненного на шихтованном магнитопроводе (рис. 2) с аналогичными параметрами

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные основные подходы при разработке оптимизационной математической модели фильтров тока нулевой последовательности автотрансформаторного типа позволяют оптимизировать автотрансформаторные ФТНП на минимум массы, объема, стоимости активных материалов или усредненного параметра.

Проведенное сравнение различных конструкций ФТНП по массогабаритным и стоимостным показателям позволило получить области, в которых различные конструкции ФТНП обладают наилучшими стоимостными и массогабаритными показателями, что дает возможность выбирать устройства с улучшенной технологичностью при изготовлении (устройства с двумя катушками) без (или при малом) увеличении затрат на активные материалы конструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
3. Шидловский А.К., Новский В.А., Капличный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.
4. А.с. SU 1206881 А1 СССР, МКИ Н 02 J 3/26. Фильтросимметрирующее устройство для трехфазной сети с нулевым проводом / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, Н.Н. Капличный и др. – № 3643941/24-07; Заявлено 23.09.83; Оpubл. 23.01.86. Бюл. № 3. – 4 с.
5. Пентегов И.В., Рымар С.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов // Электричество. – 2006. – № 3. – С. 37-47.
6. Баев Н.Г. Трансформаторы с оптимальной геометрией сердечников // Электричество. – 1991. – № 2. – С. 74-75.
7. Пентегов И.В., Рымар С.В., Стемковский Е.П. Оптимизационная математическая модель трехфазного трансформатора и выбор его расчетного варианта при многокритериальной оптимизации // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 22-28.
8. Пат. UA 88912 С2 Україна, МПК (2009) Н 01 F 27/24. Трифазний фільтр гармонік струмів нульової послідовності автотрансформаторного типу / І.В. Пентегов, І.В. Волков, С.В. Рymar та ін. – № а 2007 01489; Заявл. 12.02.2007; Оpubл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
9. Пат. UA 88913 С2 Україна, МПК (2009) Н 01 F 27/24. Трифазний фільтр гармонік струмів нульової послідовності автотрансформаторного типу / І.В. Пентегов, І.В. Волков, С.В. Рymar та ін. – № а 2007 01508; Заявл. 12.02.2007; Оpubл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
10. Особенности работы трехфазно-двухфазного фильтра токов нулевой последовательности / И.В. Пентегов, И.В. Волков, В.М. Безручко и др. // Вісник НТУ "ХП". – 2008. – № 45. – С. 110-118.
11. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. – 432с.
12. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
13. Пентегов И.В., Рымар С.В., Безручко В.М. Расчет и сравнение индуктивностей цепей протекания токов нулевой последовательности в автотрансформаторных фильтрах // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 38-45.
14. Technical Data Sheet. for Neutral Current Eliminator of MIRUS International Inc. – 2005. Режим доступа [http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20\(NCE%20Tech%20Sheet\).pdf](http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20(NCE%20Tech%20Sheet).pdf)
15. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
16. Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. Новые конструкции трехфазно-двухфазных трансформаторов // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 3. – С. 49-55.
17. Бриджмен П.В. Анализ размерностей. – Ижевск: НИЦ "Регулируемая и хаотическая динамика", 2001. – 148 с.
18. Веников В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высш. шк., 1966. – 488 с.
19. Пентегов И.В. Основы заряда цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук. думка, 1982. – 424 с.
20. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1972. – 440 с.
21. William M. Flanagan Handbook of transformer design and applications. – New York: McGraw Hill, 1993. – 388 p.

Поступила 20.09.2010

*Пентегов Игорь Владимирович, д.т.н., проф., в.н.с.*

*Рymar Сергей Владимирович, к.т.н., с.н.с., в.н.с.*

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины

отдел "Электротермия"

03680, Киев-150, ул. Боженко, 11

тел. (044) 287-23-88, e-mail: magn@i.com.ua,

elmag@paton.kiev.ua

*Безручко Вячеслав Михайлович*

Черниговский государственный технологический

университет

кафедра "Электрические системы и сети"

14000, Чернигов, ул. Шевченко, 95

тел. (04622) 3-22-99, e-mail: slavajm@meta.ua

*I.V. Pentegov, S.V. Rymar, V.M. Bezruchko*

### **Optimization of autotransformer-type zero sequence current filters and their comparative analysis.**

A model of autotransformer zero sequence current filters is developed to allow their optimization over the minimum weight, volume and cost of active materials or an average parameter. Comparison of various autotransformer filter designs is made, the value area in which the filters have the best cost and mass factors is specified.

**Key words** – zero sequence current filters, autotransformer, autotransformer filter designs.