

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АНТИРЕЗОНАНСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ 220 КВ С РАЗОМКНУТЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

© 2010 В.Д. Лебедев

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

Поступила в редакцию 01.04.2010

Изложены основные требования к трансформаторам напряжения. Предложены новые конструкции антирезонансных трансформаторов напряжения 220 кВ с разомкнутыми стержневыми сердечниками. Предложены методы расчёта на основе двухмерного и трёхмерного полевого моделирования методом конечных элементов с помощью компьютерных программ. Представлены результаты моделирования электромагнитных полей и принципиальная схема трансформатора, составленная с применением программ Matlab, SimPowerSystem и Simulink, позволяющая проводить анализ работы, осуществлять подбор параметров.

Ключевые слова: *антирезонансные трансформаторы, математическое моделирование, магнитопровод*

Трансформаторы напряжения (ТН) используются в электроэнергетике на всех уровнях напряжений и работают в качестве измерительных преобразователей, передают информацию о напряжении в сети системам защиты и измерений. К трансформаторам напряжения предъявляются все возрастающие требования по точности, одновременно возрастают требования по надёжности и взрывобезопасности. Работа обычных электромагнитных трансформаторов напряжения во время переходных процессов может приводить к возникновению феррорезонансов. Феррорезонансы, в свою очередь, приводят к неправильной работе электроэнергетического оборудования, выводу его из строя, развитию крупных аварий. Возникновение резонансов связано с насыщением магнитопровода, изменением индуктивности намагничивания трансформатора. Феррорезонанс в цепи индуктивного ТН возможен только при наличии в той же цепи емкостных элементов. При отключении модульных выключателей ТН остаётся подключенным к сети через последовательные ёмкостные делители, предназначенные для выравнивания поля выключателя. Данная цепь представляет собой резонансный контур.

Меры по борьбе с феррорезонансными явлениями изложены в руководстве по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (РД 153-34.3-35.125-99), где в качестве одной из основных мер по борьбе с феррорезонансными явлениями предлагается использование антирезонансных ТН. В настоящее время наиболее распространены антирезонансные ТН типа НАМИ, выпускаемые на ОАО «Раменский электро-технический завод «Энергия». Конструкция ТН типа НАМИ аналогична традиционным ТН типа НКФ, но в магнитопроводе помимо электротехнической применена также и толстолистовая конструкционная сталь. Потери энергии в стали снижают добротность колебательного контура, понижая тем самым амплитуду феррорезонансных колебаний. Как показали теоретические и экспериментальные исследования ТН НАМИ 500 кВ риск возникновения колебаний возможен на субгармонике 1/3. Кроме того, возможен резонанс при параллельной работе нескольких ТН на шинах подстанции, при этом антирезонансные свойства их снижаются [1-2]. В настоящее время на Раменском заводе ведётся работа по созданию антирезонансных ТН новой конструкции с разомкнутыми магнитопроводами [3, 4].

Обеспечение высоковольтной изоляции осуществляется секционированием, причем каждая секция – ферромагнитный стержень с

Лебедев Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук. Email: vd_lebedev@mail.ru

обмотками. Один из разрабатываемых вариантов конструкции трансформатора легко размещается внутри фарфорового изолятора стандартного трансформатора тока (рис. 1), этому способствует отсутствие замкнутого магнитопровода. Катушки трансформатора могут иметь как вертикальное, так и горизонтальное расположение.



Рис. 1. Трансформатор напряжения

Расчет конструкции и режимов работы данного типа трансформатора не может быть выполнен стандартными методами, применяемыми для трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами. Магнитное поле трансформаторов со стержневым магнитопроводом имеет разветвленное поле рассеяния, а основной магнитный поток только часть своего пути проходит по сердечнику. Использование существующих инженерных методик расчета трансформаторов, основанных на предположении того, что весь магнитный поток проходит и замыкается по ферромагнитному сердечнику, приводит к существенным погрешностям в результатах расчетов. Получение достоверных значений возможно только на основе расчёта электромагнитного поля трансформатора. В настоящее время для расчётов полей получили широкое применение компьютерные программы на основе метода конечных элементов, такие как ANSYS, ELCUT, COMSOL Multiphysics. Для расчета

ТН была выбрана программа COMSOL Multiphysics имеющая широкие возможности в области моделирования не только электромагнитных, но и тепловых, механических и др., а также имеющая возможности интеграции с пакетом Matlab.

Выполнение расчётов преследует следующие цели:

- определение статических (метрологических) параметров трансформатора, включающее анализ магнитного поля и на его основе определение собственных и взаимных индуктивностей обмоток;
- исследование динамических процессов трансформатора при взаимодействии с внешними элементами схемы с ёмкостными элементами выключателей;
- исследование распределения электрического поля трансформатора.

В качестве исходных данных для построения компьютерной полевой модели необходимы геометрические данные трансформатора или готовые модели, полученные, в том числе, с помощью программных средств, таких как AutoCAD или КОМПАС. Также при моделировании необходимо задавать электрические свойства материалов (электропроводность и магнитную проницаемость).

Отдельные секции трансформатора – ферромагнитные стержени с обмотками – обладают осевой симметрией (рис. 2), поэтому для выполнения расчётов можно использовать двухмерное (2D) моделирование. При симметричном вертикальном расположении катушек в режиме 2D можно моделировать весь трансформатор, при горизонтальном расположении катушек необходимо использовать режим трёхмерного моделирования – 3D.

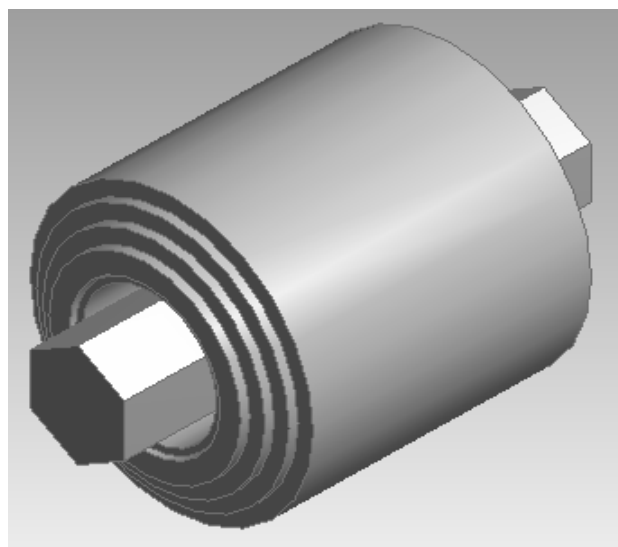


Рис. 2. Секция ТН, состоящая из ферромагнитного сердечника и обмоток

Важным этапом в создании модели является разбиение расчётной области на сеть конечных элементов, которая должна быть по возможности более мелкой, но при слишком мелкой сетке возникают погрешности из-за округления чисел в ЭВМ. Традиционно в качестве конечных элементов используются треугольные элементы, однако как показали вычислительные эксперименты, наибольшая точность расчётов получается при использовании сочетания прямоугольных и треугольных элементов. Разбиение расчётного пространства на конечные элементы в 2D и 3D моделях представлено на рис. 3 и рис 4 соответственно.

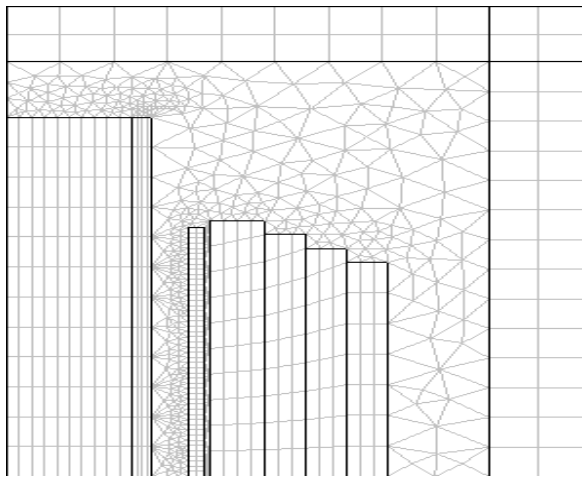


Рис. 3. Сеть конечных элементов в 2D модели

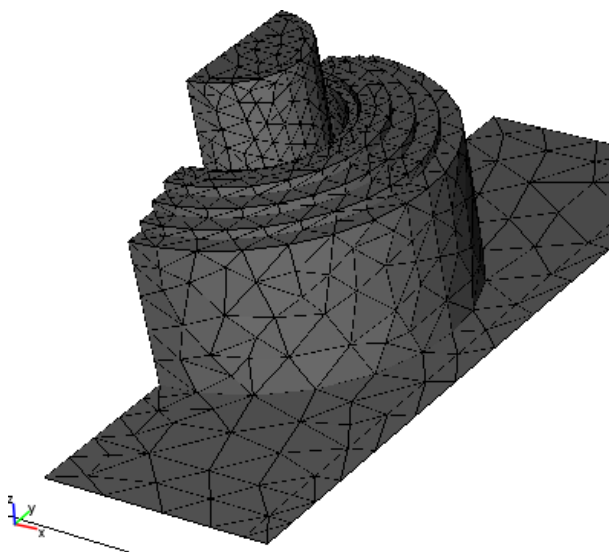


Рис. 4. Сеть конечных элементов в 3D модели

Определение метрологических параметров требует проведения расчётов с высокой точностью. Режимы работы трансформатора при определении погрешностей такие же, как и при реальных испытаниях, определяются

при заданном напряжении и неизменной нагрузке (номинальной и 1/4 от номинальной). Полевые расчёты направлены на определение собственных и взаимных индуктивностей, получаемых на основе решения статического или квазистатического полей с помощью, представленных ниже уравнений (1) и (2) соответственно. Уравнение, записанное в пространственной области, позволяет определять значения векторного магнитного потенциала во всех точках расчётной области:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}, \quad (1)$$

где ∇ - дифференциальный оператор Гамильтона, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ - относительная магнитная проницаемость, \vec{A} - векторный магнитный потенциал, \vec{J} - вектор плотности сторонних токов. Недостатком использования данного уравнения является невозможность учёта наведённых вихревых токов в элементах конструкции трансформатора.

Уравнение в пространственно-частотной области имеет вид:

$$(j\omega\sigma \vec{A}) + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}, \quad (2)$$

где $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, σ - электропроводность (проводника обмотки).

При соответствующем выборе координат и благодаря осевой симметрии катушек векторы плотности тока и векторного магнитного потенциала имеют только одну угловую компоненту: $\vec{J} = J_\phi \vec{1}_\phi$ и $\vec{A} = A_\phi \vec{1}_\phi$. Плотности токов в катушках задаются исходя из соотношения:

$$J = \frac{I * n}{S}, \quad (3)$$

где I - сила тока, протекающего в катушке, n - число витков катушки, S - площадь поперечного сечения катушки.

Следует отметить, что задаваемые плотности токов в моделях катушек будут меньше реальной плотности тока в проводах обмоток из-за наличия межслойной изоляции и неполного заполнения (коэффициента заполнения). Реальная плотность тока в проводниках обмоток j_{np} определяется по формуле:

$$j_{np} = I/S_{np}, \quad (4)$$

где S_{np} - площадь поперечного сечения обмоток.

Расчёт трансформатора по уравнению (2) позволяет учесть не только токи в обмотках трансформатора, но и наведённые токи в металлических элементах конструкции трансформатора. При соблюдении определённых условий можно также учесть наличие вихревых токов в пластинах сердечника. Однако расчёт по уравнению (2) требует несколько больше компьютерных ресурсов по сравнению с решением по уравнению (1). При моделировании необходимо вводить граничные условия, учитывающие распределение магнитного поля на границах расчётной области.

Учёт вихревых токов в отдельных пластинах непосредственно только методом конечных элементов без приближений приводит к тому, что область сердечника разбивается на такое большое количество конечных элементов, что не только расчёты в 3D, но и в 2D (рис. 5) на современных ПК практически невозможны. Один из вариантов учета вихревых токов в пластинах сердечника предложен в [7] в виде задания эквивалентной проводимости сердечника (во много раз большей реальной проводимости стали), как бы учитывающей электрическую изоляцию между пластинами. Однако такой подход не учитывает различное значение индукции магнитного поля в различных частях сердечника и требует выполнения итераций, заключающихся в подборе эквивалентной проводимости сердечника с целью соответствия потерь в сердечнике и индукции магнитного поля. Другой подход заключается также в эквивалентной замене шихтованного сердечника сплошной средой, не обладающей электропроводностью (в расчётах всё же необходимо задавать электропроводность отличную от нуля, чтобы исключить возникновение сингулярности). При этом основное уравнение поля (2) дополняется соотношениями, позволяющими учесть возникающие потери от вихревых токов и снижение индукции в сердечнике, вызванное теми же вихревыми токами. Картины электромагнитного поля, полученные в результате расчёта, представлены на рис. 6 в виде силовых линий магнитного поля (линий равного магнитного потенциала).

Выполненные расчёты на моделях позволили более правильно распределить витки катушек по слоям, исходя из ЭДС электромагнитной индукции, приходящейся на один виток. Картина поля распределения ЭДС представлена на рис. 7. Наиболее выгодное место расположения витков находится в центральной части катушки, поэтому крайние витки можно перенести в центральную часть, увеличив радиальный размер катушки до максимально возможного размера (вплоть до стенок изолятора).

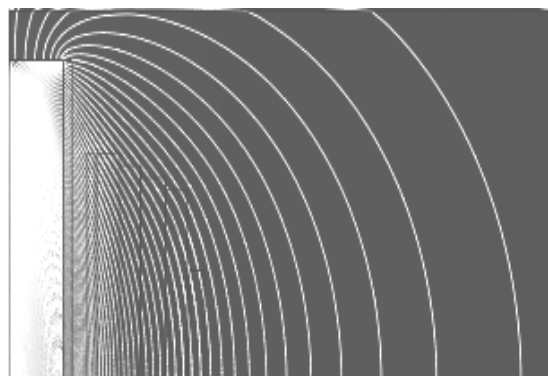


Рис. 5. Картина магнитного поля в 2D-модели

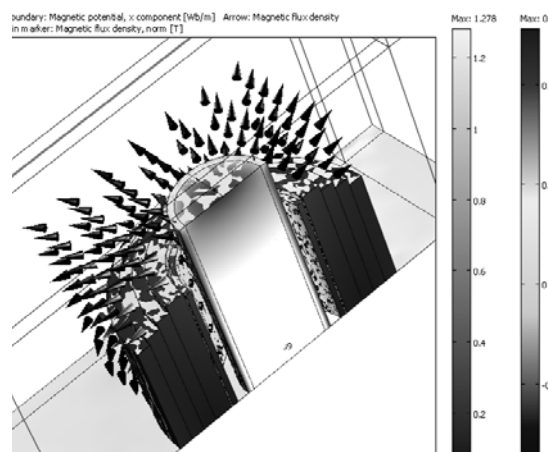


Рис. 6. Картина магнитного поля в 3D-модели

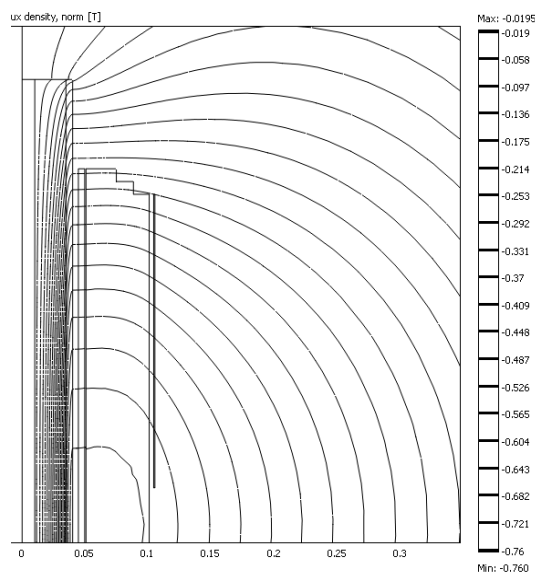


Рис. 7. Распределение ЭДС электромагнитной индукции на один виток катушки

По результатам расчетов полей могут быть определены основные параметры – собственные и взаимные индуктивности. Собственная индуктивность в статическом режиме вычисляется из формулы магнитной энергии:

$$L = \frac{2W}{I^2}, \quad (5)$$

где I – ток обмотки катушки,

$$W = \int_V w dv \quad (6)$$

W – энергия магнитного поля катушки, определяемая через объёмный интеграл по всей расчетной области от удельной плотности энергии w , которую в свою очередь можно определить из основных параметров поля:

$$w = \frac{\vec{H} \cdot \vec{B}}{2} \quad (7)$$

В частотной области (Time-Harmonic) среднее значение плотности энергии за период можно вычислить с помощью функций комплексного переменного:

$$w_{av} = \frac{1}{4} \operatorname{Re} \left(\dot{\vec{H}} \cdot \dot{\vec{B}} \right) \quad (8)$$

кроме того, энергию магнитного поля можно определить путём интегрирования произведения вектора плотности тока и проекции векторного магнитного потенциала на вектор плотности тока:

$$W = \frac{1}{2} \int_{V_J} \vec{J} \cdot \vec{A}_J dV_J \quad (9)$$

причем направления векторов \vec{J} и \vec{A}_J определяются направлением намотки катушек трансформатора. Ряд выполненных вычислительных экспериментов показал, что при вычислении энергии, а через неё и индуктивности наиболее целесообразно использовать формулы (9) дающую наиболее точный результат при использовании открытых границ.

В квазистатическом режиме как собственные, так и взаимные индуктивности можно определять аналогично, как это делается в реальных устройствах на основании опытов холостого хода и короткого замыкания. Индуктивность в этом случае можно вычислить по формуле:

$$L = \frac{2\mathcal{E} \cdot n}{I \cdot \omega}, \quad (10)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, $\mathcal{E} = 2\pi \cdot E_\phi$ – ЭДС одного витка обмотки, вычисляемая через

наведённую напряженность электрического поля E_ϕ , I – ток протекающий в обмотке, создающей магнитное поле, n – число витков. Коэффициент 2 необходим в случае моделирования половины катушки. Формула (10) позволяет определять и взаимную индуктивность, если ток I задавать в одной обмотке, а ЭДС и число витков брать для другой обмотки. Данный расчет также даёт незначительную погрешность в определении индуктивностей.

Взаимное влияние (взаимную индуктивность) катушек расположенных в пространстве параллельно друг другу можно определить только на основании трёхмерного моделирования (3D), однако 3D модели содержат значительно большее число конечных элементов и, как следствие, большее число степеней свободы в уравнениях. Поэтому с целью снижения требуемой оперативной памяти компьютера необходимо максимально учитывать симметрию и моделируя только часть катушек, а также использовать открытые границы расчётной области. Несмотря на указанные меры смоделировать весь трансформатор на имеющемся компьютерном и программном обеспечении автору не удалось. Однако оценить взаимное влияние соседних катушек оказалось возможным на основании 3D-моделирования одной катушки с использованием соответствующих граничных условий. Расчёт выполнялся в статическом режиме с использованием уравнения (1), источниками поля, в котором служат плотности токов, которые при соответствующем выборе системы координат (ось катушки совпадает с осью Y) заданы по кругу в плоскости XZ: $J_x = -J \cdot \cos(\operatorname{atan}(x/z))$; $J_y = 0$; $J_z = J \cdot \sin(\operatorname{atan}(x/z))$. Индуктивности также определяем с использованием формулы (9), где значение A_J определим аналогично задаваемой плотности тока:

$$\vec{A}_J = -\dot{A}_x \cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{x}{z} \right) \right) + \dot{A}_z \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{x}{z} \right) \right) \quad (11)$$

Полученные модели могут служить основой для исследования динамических процессов в трансформаторе, в том числе с учетом насыщения стали и явлений гистерезиса [6]. Полученные параметры (индуктивности и активные сопротивления) легли в основу системы уравнений теории цепей реализованных как непосредственно в программе Matlab, так и посредством схемотехнического моделирования с использованием программ Simulink и SimPowerSystem с возможностью изменения параметров катушек и схемы соединений (рис. 8).

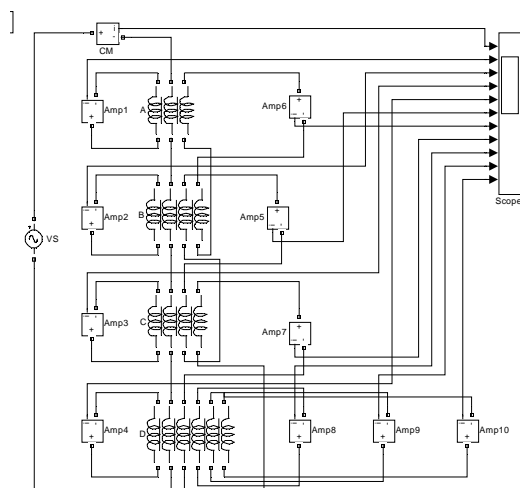


Рис. 8. Моделирование трансформатора в программах Simulink и SimPowerSystem

Одним из важных вопросов при разработке трансформатора является оптимизация конструкции по допустимым напряженностям электрического поля. Для этого в программе Comsol выполнен расчет электрического поля на основе выполненного ранее расчета напряжений в обмотках. Исследование устойчивости трансформатора к феррорезонансным явлениям на основе математических моделей с учётом потерь на гистерезис и вихревые токи может быть основано на решениях, представленных в [6] и [7]. Кроме рассмотренных вопросов, необходимо провести моделирование режимов работы трансформатора в переходных режимах с учетом воздействий импульсов напряжений и предусмотреть меры по преду-

ждению выхода из строя обмоток трансформатора по этим причинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лавров, Ю.А. Современные антирезонансные трансформаторы напряжения. Анализ эффективности работы / Ю.А. Лавров, О.А. Лантев // Новости электротехники. – 2009. – № 5(59). – С. 32-36.
2. Зихерман, М.Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Перспективы развития // Новости электротехники. – 2008. – № 3(51). – С ?
3. Федотов, С.П. Разработка антирезонансного индуктивного трансформатора напряжения / С.П. Федотов, В.Д. Лебедев // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 102-105.
4. Федотов, С.П. Антирезонансный индуктивный трансформатора напряжения / С.П. Федотов, В.Д. Лебедев // Электромеханика. – 2008. – Спец. вып. 2. – С. 69-70.
5. Лебедев, В.Д. Учет потерь в электротехнической стали при полевом моделировании электротехнических устройств / В.Д. Лебедев, М.Е. Морозов // Вестник научно-промышленного общества. – 2008. – Вып.12. – С.46-50.
6. Лебедев, В.Д. Применение программ Matlab и Simulink для моделирования электрических элементов с гистерезисом. Вестник научно-промышленного общества. – 2009. – Вып. 13. – С.38-44.
7. Зайцев, Е.С. Анализ устойчивости цепей с индуктивными трансформаторами напряжения средствами Matlab // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Пятнадцатая Междунар. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. - Т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - С.343-344.

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODELING THE ANTIRESONANT POTENTIAL TRANSFORMERS 220 kV WITH OPENED MAGNETIC CONDUCTORS

© 2010 V.D. Lebedev

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin

The basic requirements to potencial transformers are stated. New designs of antiresonant potencial transformers 220 kV with opened rod cores are offered. Methods of calculation on the basis of two-dimensional and three-dimensional field modelling by a method of final elements by means of computer programs are offered. Results of modelling the electromagnetic fields and basic scheme of the transformer made with application of programs Matlab, SimPowerSystem and Simulink are presented, allowing to spend the analysis of work, to carry out selection of parameters.

Key words: *antiresonant transformers, mathematical modelling, magnetic conductor*

Vladimir Lebedev, Candidate of Technical Sciences. Email: vd_lebedev@mail.ru