

*д. т. н., проф. Зиновкин В.В.,
ассистент Залужный М.Ю.
(ЗНТУ, г. Запорожье, Украина)*

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

Отримано критеріальні умови фізичної подоби та моделювання нестационарних електромагнітних процесів в електротехнічному обладнані, працюючому в мережах з різкозмінними навантаженнями. Теоретичні результати підтверджено експериментальними дослідженнями на масштабній моделі та силовому трансформаторі спеціального призначення.

Общая характеристика исследуемого вопроса. Условия эксплуатации электротехнического оборудования (ЭТО) в системах с резкопеременным характером нагрузки (приводы прокатных станов, преобразовательные и инверторные подстанции линий электропередачи и вставок постоянного тока, дуговые сталеплавильные печи, плазменные электротехнологии и др.) существенно отличаются от систем общего назначения. В ЭТО имеют место нестационарные электромагнитные процессы, которые приводят к большим добавочным потерям, перегревам деталей конструкции, потере электродинамической стойкости, изменениям геометрических размеров и формы обмоток, а также ускоренному старению и пробоям в изоляции и др. Это поясняется тем, что в системах с резкопеременными нагрузками используется ЭТО общего назначения. При его проектировании использовались методики инженерных расчетов и моделирования электромагнитных процессов без учета особенностей возбуждающих параметров (несимметрия и несинусоидальность тока и напряжения, технологические к.з.) и нелинейности электромагнитных характеристик конструкционных и электротехнических сталей. Поэтому аварийность в таких системах значительно выше по сравнению с системами общего назначения. Очевидно, что в системах с резкопеременным характером нагрузки необходимо устанавливать ЭТО специального назначения или модернизировать действующее [1-4]. Таким образом, настоящей необходимостью промышленности является повышение эффективности электротехнологий и надежности

их электроснабжения путем разработки и внедрения энергосберегающих решений и совершенствования действующего ЭТО. Решение отмеченной проблемы подтверждает актуальность разработки методик исследования и моделирования нестационарных электромагнитных процессов в ЭТО и системах с резкопеременным характером нагрузки. Для выбора наиболее оптимального технического решения необходимо изучить различные процессы с учетом влияния условий эксплуатации и реальных режимов, а так же внешних и внутренних факторов. В настоящее время для исследований электромагнитных явлений широко используются математические и физические модели.

При математическом моделировании устанавливаются взаимосвязи между отдельными параметрами, которые исследователь относит к преимущественным. Построение модели основывается на тождественности уравнений в модели и исследуемом объекте, что не всегда соответствует реальной картине протекания физического явления и взаимосвязям между его параметрами. При этом отдельные параметры определяются с большими погрешностями, что не удовлетворяет требованиям решения практических задач.

Физическое моделирование используется как метод исследования совокупности электромагнитных параметров и их взаимосвязи в ЭТО, серийный выпуск которого и эксплуатация требует обеспечения работоспособности в номинальных режимах и обеспечении стойкости в аварийных. Наиболее полную картину взаимосвязей между электромагнитными параметрами и численными их значениями в деталях конструкции и пространстве ЭТО можно получить на масштабных моделях. Здесь уточняются теоретические знания на основании полученных экспериментальных результатов. В основу физического моделирования положена теория подобия, которая определяет условия идентичного протекания электромагнитных процессов в реальном электротехническом оборудовании и его физической (масштабной) модели. Она предопределяет условия и режимы постановки эксперимента, измерения и обработку данных измерений, приведения полученных результатов исследований к проектируемому (модернизируемому) ЭТО и распространение полученных результатов на аналогичное объекты. Теория подобия является связующим звеном между физическим и математическим моделированием, а также экспериментом и режимами оборудования в условиях эксплуатации.[5]

При физическом моделировании происходит изменение масштаба, но сохраняется природа исследуемого явления. Качественные и количественные связи явлений устанавливаются в виде критериальных соотношений, которые безразмерны, а размерность любых электромагнитных параметров можно выразить через них. Это позволяет выделить

наиболее опасные участки и места в деталях электротехнического оборудования, принять меры для их устранения и отработать наиболее оптимальный вариант ЭТО.

Принципиальные основы физического моделирования. При исследованиях нестационарных электромагнитных явлений на физической (масштабной) модели и на реальном электротехническом оборудовании (оригинале) определяющим условием является сохранение природы исследуемого явления. Качественные и количественные связи между параметрами явления устанавливаются в виде критериальных соотношений, которые обеспечивают условия подобия и идентичности их проявления. В настоящей работе внимание уделяется исследованию добавочных потерь в деталях конструкции с целью обеспечения нормируемых их нагревов и снижения потерь в разрабатываемом оборудовании. Таким образом, идентичность потерь в оригинале $P^{(o)}$ и модели $P^{(m)}$ должна обеспечиваться при соблюдении следующего условия:

$$P^{(o)} \cdot \varphi(h, l) \cdot k^{-1} = P^{(m)} \cdot \vartheta(h) \quad (1)$$

где $\varphi(h, l)$ и $\vartheta(h)$ – некоторые функции зависимости потерь от расположения магнитного поля h и линейных разметок l ; k – коэффициент подобия.

При изготовлении деталей конструкции из одинаковых конструкционных сталей, вторые сомножители в (1) можно представить в следующем виде:

$$\vartheta(h) \cdot k = \varphi(h) \cdot \varphi(l) = \varphi(h, l) \quad (2)$$

Коэффициент k , характеризующий подобие электромагнитных процессов, должен оставаться постоянным. В противном случае полученные результаты будут получены с недопустимыми погрешностями. Для нахождения и доказательства условия постоянства коэффициента k продифференцируем (2) по l :

$$\frac{d\varphi(h, l)}{d(h, l)} \cdot \frac{d(h, l)}{dl} = \frac{d\varphi(l)}{dl} \cdot \varphi(h) \quad (3)$$

Очевидно, что при $h = l^{-1}$:

$$\left. \frac{d\varphi(h, l)}{d(h, l)} \right|_{h=l^{-1}} = const \quad (4)$$

Дальнейший анализ показывает, что в геометрически подобных местах (точках) измеренные потери в модели пересчитываются к оригиналу с учетом масштабных коэффициентов.

Моделирование электромагнитных параметров в объеме модели и оригинала требует пространственного представления исследуемых явлений. Для упрощения задачи ограничимся анализом напряженности магнитного $H(t)$, электрического $E(t)$ полей рассеяния и потерь $P_\tau(H)$.

$$\begin{cases} H(t, l) = \Psi^0(N, l, i) = \Theta^0(i) \cdot \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \gamma_1 \\ E(t, l) = \Psi^1(N, l, u) = \Theta^1(u) \cdot \alpha_2 \cdot \beta_2 \cdot \gamma_2 \\ P(t, l) = \Psi^2(I, l, S) = \Theta^2(S) \cdot \alpha_3 \cdot \beta_3 \cdot \gamma_3 \end{cases} \quad (5)$$

Нам необходимо определить каким условиям должна удовлетворять разрабатываемая модель. Для этого прологарифмируем уравнения системы (6):

$$\begin{cases} \lg H(t, l) = \alpha_1 \lg N + \beta_1 \lg l + \gamma_1 \lg i \\ \lg E(t, l) = \alpha_2 \lg N + \beta_2 \lg l + \gamma_2 \lg u \\ \lg P(t, l) = \alpha_3 \lg I + \beta_3 \lg l + \gamma_3 \lg S \end{cases} \quad (6)$$

Эта система имеет одинаковые решения если определитель, составленный из коэффициентов не равен нулю:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 \end{vmatrix} \neq 0 \quad (7)$$

Соблюдение этих условий обеспечивает взаимосвязь и независимость искомых функций в системе (5). Это подтверждает возможность распространения рассматриваемого подхода к значительно большему числу переменных, например электродинамических усилий, звуковой мощности, нагревов и т.д. Следует отметить, что придания большей корректности при исследованиях необходимо классифицировать возбуждающие и вызываемые ими параметры. Таким образом, для соблюдения подобия электромагнитных процессов в модели и оригинале необходимо обеспечить идентичность параметров электромагнитных процессов путем выбора соответствующего коэффициента подобия и размерностей. Практически это достигается путем изготовления модели в соответствующем масштабе, в зависимости от частоты питающего напряжения, с сохранением конструктивных особенностей оригинала (проектируемого или модернизируемого ЭТО). Детали конструкции необходимо изготавливать из одинаковых конструкционных сталей, а систему возбуждения электромагнитного поля – идентичной.

Критерии подобия нестационарных электромагнитных процессов. Выше показано условие идентичности электромагнитных параметров в модели и оригинале применительно к поверхностным потерям в деталях конструкции. Рассмотрим критериальные соотношения обеспечивающее подобие электромагнитного поля рассеяния в пространстве ЭТО. Полагаем, что магнитное поле рассеяния в объеме силового ЭТО пропорционально возбуждаемому току, которое представляем в следующем виде:

$$H_{\xi}^{(0)}(\delta, t) = H^{(m)}(\delta, t) \cdot m_e^{-1} \cdot k\omega_p = H_{\xi}(\delta, t) \cdot m_e^{-1}, \quad (8)$$

$$H_{\xi}^{(0)}(\delta, t) = H_P(\delta, t) + H_O(\delta, t) + H_{\Sigma}(\delta, t), \quad (9)$$

$$H_{\Sigma}(\delta, t) = \left\{ \frac{1}{T} \left[\sum_{v=1}^H H_{m,v} \cdot \cos(v\omega t + \varphi_v) dt \right]^2 \right\}^{0.5}, \quad (10)$$

$$H(\delta, t) = \left\{ T^{-1} [H_m \cos(\omega t + \varphi)]^2 \right\}^{0.5}. \quad (11)$$

где $H_{\xi}(\delta, t)$, $H_{\Sigma}(\delta, t)$ и $H(\delta, t)$ – усреднённые за период первой гармонической составляющей магнитное поле, изменяющееся во времени по резкопеременному, несинусоидальному и синусоидальному законам соответственно; δ – нагрузочный параметр, характеризующий характер изменения поля; t – время; ω – круговая частота; f – промышленная частота; T – период первой гармоники; φ – начальная фаза; m – амплитуда магнитного поля; индексы (0) и (m) обозначают принадлежность поля оригиналу и модели соответственно; $k\omega_p$ – коэффициент эквивалентирования потерь.

Полагаем, что среда, в которой распространяется электромагнитное поле, имеет линейные электромагнитные характеристики. В таком случае, напряжённость электрического поля для оригинала и модели представляем в следующем виде:

$$E_{\xi}^{(0)}(\delta, t) = E_{\xi}^{(m)}(\delta, t) m_e^{-1} = E_{\mathcal{O}}(\delta, t) m_t^{-1} k\omega_E \quad (12)$$

Поскольку масштабная модель является уменьшенной копией оригинала, то электромагнитные процессы протекают идентично в модели и оригинале. Они должны удовлетворять следующим уравнениям Максвелла, для оригинала и модели:

$$\begin{aligned} rot H_{\xi}^{(0)}(\delta, t) &= rot H_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_e m_H^{-1} = \\ &= \left(\sigma E_{\xi}^{(m)}(\delta, t) + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) \cdot m_{\sigma} m_e m_E^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

Целью является исследование электромагнитных процессов в проводящих материалах, то вторым слагаемым в уравнении (6) пренебрегаем (поскольку оно описывает характер изменения электрического поля в диэлектрике), тогда:

$$rot H_{\xi}^{(0)}(\delta, t) = \sigma E_{\xi}^{(m)}(\delta, t) m_E^{-1} m_{\sigma} \quad (14)$$

Очевидно, что это уравнение отражает характер изменения магнитного поля в каждой точке пространственных координат в зависимости от изменения электрического поля.

Для сложной системы электротехнического оборудования второе уравнение Максвелла представляем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{rot}E_{\xi}^{(0)}(\delta, t) &= \text{rot}E_{\xi}^{(m)}(\delta, t) \cdot m_e m_E^{-1} = \\ &= -\mu \frac{\partial H_{\xi}^{(m)}(\delta, t)}{\partial t^{(m)}} \cdot m_t m_H^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

где $m_H = \left. H^{(m)}(\delta, t) \right| / \left. H^{(0)}(\delta, t) \right.$, $m_E = \left. E^{(m)}(\delta, t) \right| / \left. E^{(0)}(\delta, t) \right.$ – масштабы напряжённостей магнитного и электромагнитного полей; $m_{\sigma} = \left. \sigma^{(m)} \right| / \left. \sigma^{(0)} \right.$, $m_{\mu} = \left. \mu^{(m)} \right| / \left. \mu^{(0)} \right.$ – масштабы электрической проводимости и магнитной проницаемости неактивных деталей конструкции, которые изготавливаются из конструкционных сталей; $m_{\omega} = \left. \omega^{(m)} \right| / \left. \omega^{(0)} \right.$, $m_t = \left. t^{(m)} \right| / \left. t^{(0)} \right.$ – масштабы круговой и эквивалентной частоты, а также времени протекания электромагнитного процесса.

Уравнения (12-14) в полной мере отражают характер и идентичность протекания нестационарных электромагнитных процессов в модели и оригинале при условии равенства электрических проводимостей и магнитных проницаемостей.

В случае, когда детали конструкции модели и оригинала изготовлены из одинаковых материалов, то:

$$\sigma^{(0)} = \sigma^{(m)} = \text{const}, \quad (16)$$

$$\mu^{(0)} = \mu^{(m)} = \text{const}. \quad (17)$$

В результате преобразований уравнений Максвелла с учетом (16) – (17) приходим к критериальным уравнениям подобия электромагнитного поля в модели и оригинале.

$$\begin{aligned} (m_e \cdot m_E \cdot m_{\sigma}) m_H &= 1 \\ (m_e \cdot m_{\mu} \cdot m_H) (m_E \cdot m_t)^{-1} &= 1, \end{aligned} \quad (18)$$

или определяющему критерию подобия электромагнитных процессов в модели и оригинале:

$$m_e^2 \cdot m_t^{-1} \cdot m_{\mu} \cdot m_{\sigma} = 1. \quad (19)$$

При выполнении определяющего критерия подобия количественные показатели параметров электромагнитных процессов пересчитываются от модели к оригиналу по соответствующим масштабным коэффициентам.

Экспериментальные исследования и их анализ. Проверка методики осуществлялась на силовом преобразовательном трансформаторе ОДЦНП-175000/±400/500-83У1 (предназначенном для работы в линии

электропередачи постоянного тока) и его масштабной модели, которые показаны на рисунках 1,2. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: 1, 5 – ярмовые балки; 2 – прессующие кольца; 3 – отводы; 4 – система возбуждения электромагнитного поля (блок обмоток); 6 – изоляционный прокладки. На рисунке 2: 1 – выводы соответствующих обмоток; 2 – ярмовые балки; 3 – присоединяющие кольца; 4 – система возбуждения электромагнитного поля (блок обмоток); 5 – боковые ярма магнитной системы; 6 – полка нижней ярмовой балки. При этом использовалось специализированное оборудование и методика исследований совокупности параметров, характеризующих нестационарные электромагнитные. Изменились добавочные потери в наиболее характерных местах неактивных деталей конструкции[5,6]. Магнитная система трансформатора выполнена на двух стержнях. Испытания электромагнитных процессов выполнялись на масштабной модели, а затем сравнивались с измеренными на реальном трансформаторе в условиях завода изготовителя при питании током, изменяющимся во времени, по синусоидальному и несинусоидальному законам. Гармонический состав несинусоидального тока модели и оригинала в опытах выдерживался одинаковым.

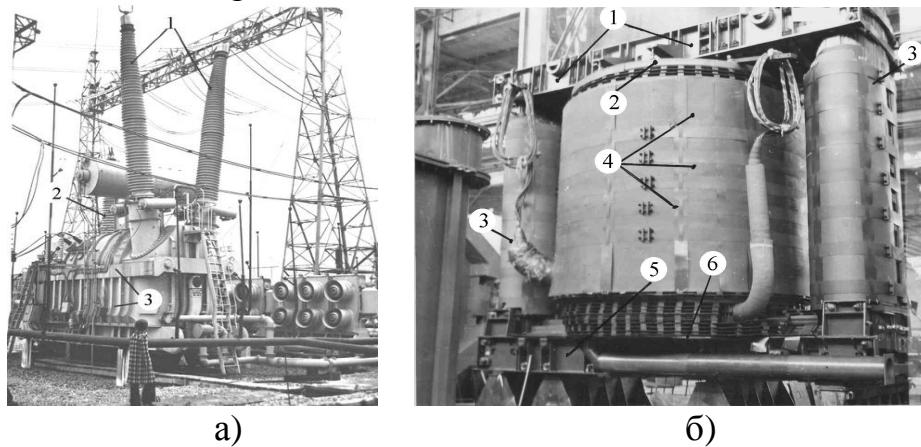


Рисунок 1 – Трансформатор специального назначения мощностью 175 МВА на напряжение ± 400 кВ (оригинал) (а) и его система возбуждения электромагнитного поля (б)

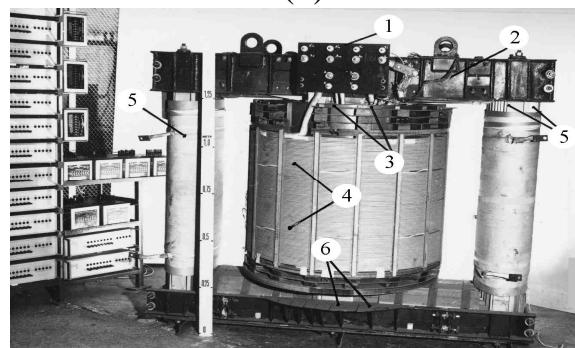


Рисунок 2 – Физическая модель трансформатора специального назначения, выполненная в масштабе 1: 3,16 мощностью 175 МВА

Методика физического моделирования нестационарных электромагнитных процессов использовалась при выборе оптимального варианта конструкции трансформатора специального назначения мощностью 175 МВА. Исследования проводились на масштабной модели, показанной на рис.2. Измерялись удельные потери в неактивных деталях и общие потери в конструкции.

Аналогичные исследования но в значительно меньшем объеме выполнялись на трансформаторе. Полученные результаты оценивались по изменению местных поверхностных потерь:

$$P = F(H_{(0)}, \sigma, \mu), \quad (20)$$

измеренных в стенке бака при синусоидальном токе

$$H_{(0)} = \frac{1}{T} \int_0^T H \sin(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

– касательная составляющая напряженности магнитного поля на поверхности стенки бака при установленных шунтах и при их отсутствии.

По величине этого поля определялась эквивалентная магнитная проницаемость конструкционной стали, из которой изготовлен бак:

$$\mu = \mu_0 |H_{(0)}| \quad (22)$$

Затем исследования проводились при резкопеременном токе:

$$P_{\Sigma} = F(H_{\Sigma(0)}, \sigma, \mu), \quad (23)$$

$$H_{\Sigma(0)} = \frac{1}{T} \sum_{v=1}^{T_v=n} H_v \sin(\omega_v t + \varphi_v), \quad (24)$$

при установленных шунтах на стенке бака и при их отсутствии.

Результаты этих исследований показаны на рисунке 3 и в таблице 1.

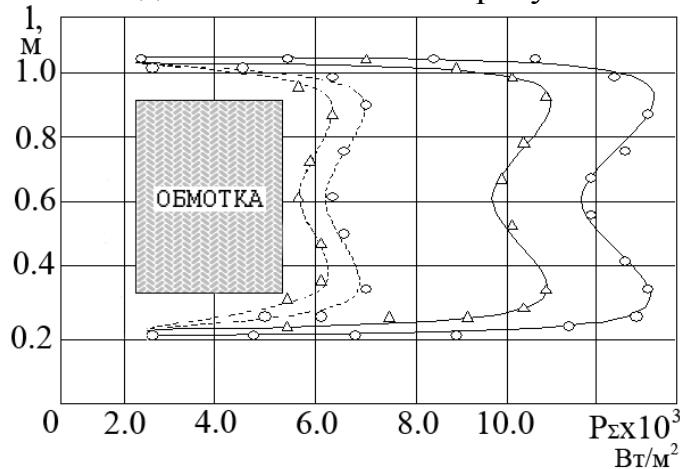


Рисунок 3 – Распределение удельных поверхностных потерь в стенке бака модели силового трансформатора специального назначения при синусоидальном (Δ) и резкопеременном (o) токах: (-) без магнитных шунтов и (- -) под магнитными шунтами; 1 – бак; 2 – магнитные шунты; 3 – устройства крепления шунтов; 4 – система обмоток

Как видно из этого рисунка, система шунтирования является эффективным способом снижения добавочных и местных потерь, а также чрезмерных нагревов стенки бака при существенном снижении материоемкости.

Таблица 1 – Добавочные потери в деталях конструкции силового трансформатора

Детали и материал	Модель		Оригинал			
	Потери Вт/м ²		потери, Вт/м ²		Коэффициент увеличения потерь, о.е.	
	Синус.	Несин.	Синус.	Несин.	эксп.	расчет
Бак	10,3	11,85	105,0	121,8	1,15	1,16
Ярмовая балка	10,8	17,93	108,0	185,7	1,66	1,71
Пластина стержня	13,1	15,46	125,0	151,2	1,18	1,21
Первый пакет	10,2	11,53	98,0	112,7	1,13	1,15

Анализ результатов исследований приведенных на рис.3 и табл. 1 показал, что при несинусоидальности возбуждающего тока $K_f=28.6\%$ поверхностные потери увеличиваются на 30% по сравнению с синусоидальным полем той же интенсивности. При этом если не учитывать нелинейную зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (в модели интенсивность поля находится в области слабых магнитных полей, а в оригинале – в области сильных) то при расчете потери могут быть завышены на 20%. Как видно из результатов, приведенных в табл. 1 смоделированные поверхностные потери хорошо согласуются с измеренными на оригинале. Это подтверждает, что физическое моделирование позволяет получить более достоверные результаты при исследовании нестационарных электромагнитных процессов по сравнению с математическим.

Выводы

1. Добавочные потери в неактивных деталях конструкции электротехнического оборудования в системах с резкопеременным характером нагрузки существенно увеличиваются в 1.3 раза при несинусоидальности 28.6% возбуждающего тока по сравнению с синусоидальным.

2. Наиболее достоверная информация и взаимосвязь между параметрами нестационарных электромагнитных процессах может быть получена на масштабных моделях электротехнического оборудования.

3. При приведении добавочных потерь измеренных на модели к оригиналу без учета нелинейности магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля потери могут быть завышены на 20% в области сильных и средних полей.

Получены критерииальные условия физического подобия и моделирования нестационарных электромагнитных процессов в электротехническом оборудовании, работающего в системах с резкопеременными нагрузками. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями на масштабной модели и силовом трансформаторе специального назначения.

The criterion terms of physical similarity and design of electromagnetic transients in the electrical engineering equipment are got, working in the systems with the non-variable loadings. Theoretical results are confirmed by experimental researches on a scale model and power transformer of the special setting.

Библиографический список.

1. *Actira Nabal, Toshihko Tanaka. Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Spase Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits // IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11. -1996. № 3. – P. 1238-1244.*
2. *Gzarmeski L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems With Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry // IEEE Transactions on Power Delivery.- Vol. 11.-1996.-№3.- P. 1244-1250.*
3. Эксплуатационные особенности трансформаторного оборудования в системах электроснабжения энергоемких электротермических комплексов типа ДСП /В.А.Лейбензон, Н.С.Балабуха, В.В.Зиновкин // Технічна електродинаміка. – 2000.- №5.– С. 56 – 61.
4. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования /применительно к задачам электроэнергетики/. М.: «Высшая школа». – 1984. – 440с.
5. Зиновкин В.В., Кущ В.В., Залужный М.Ю. Методика экспериментальных исследований физических процессов на моделях силового электрооборудования при резкопеременных токах // Доклады 4-й научно-технической конференции: «Метрология электрических измерений в электротехнике». РАО «ЕС России», ОАО «ВНИИЭ». М. 2004. – С. 264 – 268.
6. Зиновкин В.В., Залужный М.Ю.. Моделирование нестационарных электромагнитных процессов в массивных конструкционных сталях. Праці ІЕД НАН України - № 3 (13). - 2006. – с. 41-45.
7. Зиновкин В.В., Залужный М.Ю.. Моделирование добавочных потерь в электрооборудовании и системе электротехнического комплекса при несинусоидальных токах. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 4 (45) частина 1. – 2007. – с 49-53.

Рекомендовано к печати
к. т. н., проф. Паэрандом Ю.Э.