

## ОСОБЕННОСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ТРАНСФОРМАТОРОВ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ИХ СЕРИЙ

*М. В. Загирняк, д.т.н., проф., В. В. Прус, к.т.н., доц., Б. И. Невзлин, к.т.н., доц.  
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина  
E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua*

На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований предложен подход к уточнению взаимосвязей обобщенного геометрического размера и энергетических параметров электрических машин, трансформаторов и электрических аппаратов в широком диапазоне их изменения.

**Ключевые слова:** электрическая машина, трансформатор, электрический аппарат, обобщенный линейный размер.

**Введение.** Существующая мировая тенденция к глобализации существенно расширяет возможности выбора электрических машин (ЭМ), трансформаторов и электрических аппаратов (ЭА). С учетом разнообразия технологий их проектирования и производства, а также различия закладываемых свойств используемых материалов, необходимо разработать критерии оценки, позволяющие производить рациональный выбор отдельных устройств либо их серий с близкими эксплуатационными характеристиками. Выбор должен производиться с учетом сравнения эффективности как отдельных устройств, так и серий, в рамках которых они выпускаются. Прямое определение эффективности, как правило, невозможно в связи с отсутствием детальной информации о действительных потерях и электромагнитных нагрузках. Это объясняется ограниченностью информации на выпускаемую продукцию в каталогах производителей, что затрудняет корректное прямое сравнение отдельных устройств с учетом невозможности закупки всех возможных устройств различных серий для проведения экспериментального сравнения.

**Анализ предыдущих исследований.** Вопросам установления связи между габаритными, электромагнитными и энергетическими характеристиками ЭМ, трансформаторов, ЭА и их рационального выбора посвящены работы многих ученых, но до настоящего времени данная задача в полной мере не была решена. Оценка отдельных устройств и их серий должна базироваться не только на основе сравнения энергетических характеристик, по которым выбирают нужное устройство: мощности, напряжения обмоток, потери короткого замыкания и холостого хода и др., влияющих на эксплуатационные расходы, но и учитывать массогабаритные параметры, значительно влияющие как на возможность размещения устройств в составе промышленного оборудования, так и на стоимостные характеристики [1].

Поэтому уточнение закономерностей, связывающих мощность и геометрические размеры ЭМ, трансформаторов и ЭА, является одним из путей создания критериев их рационального выбора.

В настоящее время считается общепринятым ряд зависимостей вида

$$X = k\ell^n, \quad (1)$$

связывающих обобщенный линейный размер (ОЛР)  $\ell$  с одним из основных параметров  $X$  ЭМ,

в качестве которого может быть электромагнитная мощность  $S_{em}$ , ток якоря  $I_a$ , расход материалов, масса  $M$ , объем  $V$  и др. В (1)  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $n$  – показатель степени, как правило, целое число.

Указанные соотношения используются для геометрически подобных машин [2, 3].

Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту, соотношения типа (1) являются в достаточной мере достоверными и косвенно связаны с такими параметрами, как магнитная индукция  $B$  и плотность тока  $J$ , которые в свою очередь определяются свойствами соответственно магнитных и проводниковых материалов, одинаковых в геометрически подобных ЭМ так же, как и число фаз  $m$ .

В качестве обобщенного линейного размера обычно принимают наружный диаметр  $D_c$  станины ЭМ – размер, по первоначальному предположению, наиболее функционально связанный с мощностью.

В соответствии с существовавшими ранее представлениями, расход материалов, масса  $M$  и объем  $V$  ЭМ пропорциональны третьей степени ОЛР [1]. Также третьей степени ОЛР пропорциональна и мощность суммарных потерь  $\sum AP_i$ . Площадь  $S_c$  поверхности охлаждения и общая площадь пазов в геометрически подобных ЭМ считаются пропорциональными второй степени ОЛР, откуда следует пропорциональность ОЛР линейной токовой нагрузке  $A_a$  и четвертая степень зависимости  $S_{em}$  от  $\ell$ .

Аналогичный результат для  $S_{em}$  получается из формул для машинных постоянных Арнольда, Эссона, Видмара, Рихтера, Шенфера, Рушмеля [1, 3].

Результаты расчетов показывают, что показатель степени в зависимости (1) может существенно отличаться от приведенных выше значений, что нельзя объяснить технологией изготовления ЭМ или изменением их конструкции в пределах одной серии.

Такое несоответствие делает актуальной задачу расширения границ известных закономерностей типа (1), так как в существующем виде они не могут непосредственно использоваться для сравнительной оценки ЭМ различных серий вследствие неопределенности значений  $k$  и  $n$ .

Для трансформаторов подобный подход в классической литературе фактически отсутствует, что

связано как с затруднением выбора ОЛР, особенно для силовых трансформаторов с масляным баком, так и с отсутствием самих исследований по данному вопросу.

Применительно к ЭА задача является еще более сложной по причине существенного разнообразия их типов и необходимости обоснования для каждого из них своих значимых параметров, так как значение электромагнитной мощности  $S_{em}$  не является для них определяющим. Существующие же частные зависимости, связывающие отдельные параметры некоторых типов ЭА, не имеют обобщающего характера и являются эмпирическими.

**Цель работы.** Обобщение на основе полученных зависимостей функциональных взаимосвязей энергетических и электромагнитных параметров ЭМ, трансформаторов и ЭА с их геометрическими размерами для разработки критериев их рационального выбора и определения направлений их совершенствования.

**Материал и результаты исследования.** В процессе исследований [4–6] был обоснован выбор обобщенного линейного размера для ЭМ, трансформаторов и ЭА.

*Выбор ОЛР для ЭМ.* В качестве ОЛР  $\ell$  для ЭМ следует использовать высоту  $h$  оси вращения как обеспечивающую минимальное изменение степенной зависимости параметров ЭМ от ОЛР при переходе от образца к образцу серий промышленных электродвигателей [4].

*Выбор ОЛР для трансформаторов.* В качестве ОЛР для трансформаторов было принято среднее геометрическое трех габаритных размеров: длины  $L$ , ширины  $B$  и высоты  $H$

$$\ell = \sqrt[3]{LBH};$$

$$\ell_b = \sqrt[3]{L_b B_b H_b},$$

где  $\ell, \ell_b$  – ОЛР соответственно расчетного трансформатора серии и трансформатора, принятого в серии за базовый;  $L_b, B_b, H_b$  – соответствующие размеры базового трансформатора [5].

*Выбор ОЛР для ЭА.* Аналогично трансформаторам, в качестве ОЛР для ЭА было принято среднее геометрическое трех габаритных размеров (длины  $L$ , ширины  $B$  и высоты  $H$ ), что позволило получить устойчивые соотношения, связывающие ОЛР с силой нажатия контактов, плотностью тока в обмотках и контактах, силой тяги электромагнита и др. [6].

В ходе исследований были обоснованы расчетные соотношения для ЭМ, трансформаторов и ЭА, которые позволили связать ОЛР с их основными эксплуатационными параметрами и получить ряд рекомендаций относительно особенностей их использования в процессе выбора как отдельных устройств, так и их серий.

*Электрические машины.* Результаты исследований, полученные для ЭМ, позволили обосновать физический смысл использования таких параметров, как плотность тока, магнитная индукция, частота, мощность на валу и мощность потерь при получении соотношений для их взаимосвязи с ОЛР.

Доказано, что действительные значения показателя  $n$  существенно отличаются от известных значений [4], хотя принцип геометрического подобия ЭМ одной серии в основном выполняется. Отличие реальных показателей от общепринятых составляет от –38 % до +124 %.

Полученные соотношения различны для разных диапазонов мощностей ЭМ. Так, для ЭМ малой мощности и микромашин справедлива зависимость

$$S_{em} = k_a k_{bB} \ell^5, \quad (2)$$

где  $k_a, k_{bB}$  – соответственно коэффициенты, характеризующие связь с ОЛР электрических и магнитных параметров ЭМ.

Следует отметить, что на характер зависимости влияют способ возбуждения ЭМ и частота, что приводит в ряде случаев к снижению показателя степени в зависимости (2) до 1,5.

У ЭМ средней мощности, кроме машин специального назначения, как правило, выполняются условия по постоянству влияющих параметров, и тогда для них действительно равенство (1), а электромагнитная мощность является функцией ОЛР в степени от 3,5 до 4, хотя в начале диапазона показатель степени может приближаться к пяти.

В ЭМ большой мощности можно считать постоянной плотность тока, но нельзя пренебрегать фактором влияния центробежных сил, под действием которого нарушается геометрическое подобие ЭМ. С учетом этого было получено

$$S_{em} = k_h k_\varphi \ell^{3,5}, \quad (3)$$

где  $k_h, k_\varphi$  – коэффициенты, учитывающие совместное влияние электромагнитных процессов.

Аналогичные зависимости были получены как для отдельных составляющих, так и для суммарной мощности потерь.

В итоге были обоснованы соотношения для расчета генерального показателя степени  $n_g$  и критерия оптимальности серии  $K_n$  для основных типов ЭМ:

для АД:

$$K_{nIM} = \left( \ln \frac{P_{b1}^2 (1 - \eta_{b2})^2 \eta_{m1} \eta_{b1} \cos \varphi_{m1} \cos \varphi_{b2}}{P_{b2}^2 (1 - \eta_{b1})^2 \eta_{m2} \eta_{b2} \cos \varphi_{m2} \cos \varphi_{b1}} \right) / \left( 2 \ln \frac{\ell_b}{\ell_m} \right);$$

$$n_{gIM} = \frac{\ln \frac{\sqrt{\eta_m \cos \varphi_m} \sqrt{P_m (1 - \eta_m) \eta_b}}{\sqrt{\eta_b \cos \varphi_b} \sqrt{P_b (1 - \eta_b) \eta_m}}}{\ln(\ell_b / \ell_m)}, \quad (4)$$

для МПТ:

$$K_{nDC} = \left( \ln \frac{P_{b1}^2 (1 - \eta_{b2})^2 \eta_{m1} \eta_{b1}}{P_{b2}^2 (1 - \eta_{b1})^2 \eta_{m2} \eta_{b2}} \right) / \left( 2 \ln \frac{\ell_b}{\ell_m} \right);$$

$$n_{gDC} = \left( \ln \frac{P_b (1 - \eta_m)}{P_m (1 - \eta_b)} \right) / \left( 2 \ln \frac{\ell_b}{\ell_m} \right), \quad (5)$$

для СД:

$$K_{nSM} = \left\{ \ln \left[ \frac{P_{b1} (1 - \eta_{b2}) \cos \varphi_{m1} \cos \varphi_{b2}}{P_{b2} (1 - \eta_{b1}) \cos \varphi_{m2} \cos \varphi_{b1}} \right] \frac{\eta_{m1} \eta_{b1}}{\eta_{m2} \eta_{b2}} \right\} / \left( 2 \ln \frac{\ell_b}{\ell_m} \right);$$

$$n_{gSM} = \left( \ln \frac{P_b(1-\eta_m)\cos^2\varphi_m}{P_m(1-\eta_b)\cos^2\varphi_b} \right) / \left( 2 \ln \frac{\ell_b}{\ell_m} \right). \quad (6)$$

Здесь индекс  $b$  относится к самому мощному устройству серии, а  $m$  – к наименее мощному; индекс 1 обозначает первую серию, а индекс 2 – вторую.

Введение этих соотношений позволяет комплексно оценить еще на стадии проектирования технический уровень разрабатываемой серии в сравнении с существующими и выбрать оптимальный вариант ее усовершенствования.

Результаты экспериментальных исследований ЭМ разных типов и серий подтвердили соответствие теории значений показателей степенных зависимостей электромагнитной мощности и суммарной мощности потерь от высоты оси вращения.

Была обоснована возможность дополнительного повышения энергетических параметров ЭМ применением совместно с электромагнитным магнитного возбуждения в синхронных машинах (СМ) и машинах постоянного тока (МПТ), а также использованием в воздушном зазоре вместе с магнитным электрического поля в микромашинах синхронного и асинхронного типов.

*Трансформаторы.* Учет влияния частоты тока, индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора и плотности тока в его обмотках позволил уточнить значение показателя степени в зависимости электромагнитной мощности от ОЛР.

Так, мощность  $m$ -фазного трансформатора оказалась пропорциональной любому линейному размеру в четвертой степени

$$S \sim \ell^4. \quad (7)$$

Из (4) следует, что линейные размеры трансформатора возрастают пропорционально корню четвертой степени из мощности

$$\ell \sim S^{1/4}. \quad (8)$$

Напряжение  $u_c$  одного витка обмотки пропорционально квадрату диаметра стержня  $d^2 \sim \ell^2$  или

$$u_c \sim S^{1/2}, \quad (9)$$

то есть возрастает с ростом мощности трансформатора.

Вес активных материалов трансформатора – стали  $G_{st}$  и материала обмоток  $G_w$ , возрастает пропорционально кубу его линейных размеров

$$G \sim \ell^3 \sim S^{3/4}. \quad (10)$$

Расход активных материалов на единицу мощности трансформатора изменяется пропорционально

$$g = \frac{G}{S} \sim \frac{S^{3/4}}{S} = \frac{1}{S^{1/4}}, \quad (11)$$

то есть падает с ростом мощности. Потери  $\sum AP_i$  в активных материалах стали сердечника и обмоток при сохранении неизменных электромагнитных нагрузок пропорциональны их массам или объемам, и, следовательно, полные потери

$$\sum AP_i \sim S^{3/4}$$

или

$$\sum AP_i = k_P \ell^3, \quad (12)$$

где  $k_P$  – коэффициент пропорциональности.

Потери на единицу мощности

$$\Delta p_i = \frac{\sum AP_i}{S} \sim \frac{1}{S^{1/4}}, \quad (13)$$

снижаются с ростом мощности трансформатора, что приводит, соответственно, к возрастанию его КПД.

Поверхность трансформатора, охлаждаемая воздухом или другой средой, растет пропорционально квадрату линейных размеров

$$S_c \sim \ell^2 \sim S^{1/2},$$

также возрастают потери  $q$ , отнесенные к единице охлаждаемой поверхности

$$q \sim \frac{P}{S_c} \sim \frac{S^{3/4}}{S^{1/2}} = S^{1/4}. \quad (14)$$

Зависимости (7) и (13) показывают, что увеличение единичной мощности трансформатора является экономически выгодным, так как приводит к уменьшению удельного расхода материала на 1 кВА мощности и к повышению КПД. В то же время из выражения (14) следует, что естественный рост охлаждаемой поверхности трансформатора отстает от роста его потерь и, следовательно, с ростом мощности трансформатора усложняется решение проблемы его охлаждения.

В трансформаторах высокого напряжения вследствие особых требований к изоляционным промежуткам обоснована необходимость разделения ОЛР на две части: зависящую от мощности и зависящую от напряжения.

Так как зависимости мощности и массы трансформаторов от ОЛР, определенного по размерам бака силового трансформатора, не укладываются в известные теоретические рамки, был предложен подход к выделению габаритов активной части трансформатора. Он заключается в использовании полученных экспериментальным путем выражений, связывающих ОЛР  $\ell$  с определяемым по баку (корпусу) трансформатора ОЛР  $\ell_t$  для трансформаторов разной мощности.

Кроме этого, была обоснована необходимость учета изменения электромагнитных нагрузок трансформатора с ростом ОЛР.

Расчет ОЛР по активной части трансформатора позволил получить средние значения показателя степенной зависимости от  $\ell$  для мощности, массы и мощности потерь, которые составили соответственно 4,08; 2,98; и 2,89, что достаточно близко к теоретически рассчитанным значениям.

Так как магнитная индукция в магнитопроводе трансформатора остается практически неизменной при увеличении ОЛР, а плотность тока в обмотках геометрически подобных трансформаторов обратно пропорциональна корню квадратному из линейного размера, учет влияния частоты тока, индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора и плотности тока в его обмотках позволяет дополнительно уточнить значение показателя степени в зависимости электромагнитной мощности от ОЛР.

В итоге был предложен критерий рационального выбора для отдельных моделей трансформаторов одинаковой мощности, который основывается на

сравнении обобщенного показателя, учитывающего генеральный показатель степени  $n_g$  и показатель  $n_S$  степени зависимости мощности и потерь от ОЛР:

$$n = n_g + \frac{4}{3} n_S. \quad (15)$$

Коэффициент (4/3) является отношением теоретических показателей степени зависимостей мощности  $S$  и потерь  $\sum \Delta P_i$  от ОЛР.

Характер изменения обобщенного показателя отражает рациональность выбора серий трансформаторов и позволяет сравнивать их только с использованием известных геометрических размеров.

*Электрические аппараты.* Применительно к ЭА рассмотрена возможность получения массогабаритных, электромагнитных и энергетических характеристик по паспортным данным и чертежам, а также путем непосредственных измерений без использования сложных теоретических расчетов [5].

Рассмотрены наиболее широко используемые в промышленности типы ЭА: разъединители внутренней и внешней установки, масляные многообъемные выключатели, электромагнитные реле, автоматические выключатели и предохранители. Для различных ЭА, в зависимости от выполняемой функции, исследованы зависимости основных функциональных параметров (проходной мощности, потерь мощности, напряжения, силы тяги, коэффициента потерь мощности) от ОЛР.

Получены зависимости силы нажатия контактов от обобщенного линейного размера для односточных и многоточечных контактов при их пластической и упругой деформации из условия постоянства температуры в точке контактирования.

Теоретически подтверждена целесообразность применения многоточечных контактов с пластической деформацией (меньшие значения показателей степени) для сильноточных контактов и односточного контакта с упругой деформацией (большие значения показателей степени) для слаботочных контактов.

Выяснено, что плотность тока для обмоток ЭА с охлаждением естественной конвекцией практически не зависит от ОЛР, в то время как для контактов, при условии поддержания постоянства превышения температуры, она должна быть обратно пропорциональна квадратному корню из ОЛР.

Доказано, что сила тяги ряда правильно спроектированных геометрически подобных электромагнитов, используемых в электромагнитных реле, пропорциональна кубу обобщенного линейного размера. Сила, рассчитываемая в соответствии с этим условием, является достаточной для привода контактного механизма соответствующего реле. При этом работа, выполняемая электромагнитом при включении, пропорциональна четвертой-пятой степени ОЛР.

Предложено введение коэффициента потерь мощности, который позволяет, в физически понятной и краткой форме, энергетически сравнивать между собой коммутационные и защитные ЭА в широком диапазоне изменения их параметров.

Обоснована необходимость обеспечения мер по отводу тепла при расчете конструкций контактов с увеличением их габаритов. Альтернативой этому может быть снижение плотности тока с большим показателем степени, чем 0,5. Для компенсации возникающих сил отталкивания в контактах, увеличивающихся с ростом размеров ЭА, начиная с некоторого габарита, необходимо применение электродинамических компенсаторов.

Доказано, что показатели степени зависимостей энергетических параметров ЭА от ОЛР могут отличаться от теоретических значений. Однако кривые, отражающие данные зависимости, асимптотически приближаются к теоретическим значениям.

Для ЭА низкого напряжения: электромагнитных реле, предохранителей и автоматических выключателей – подтверждены теоретические предположения о преимущественном влиянии мощности на габариты. При этом показатель степени зависимости мощности для ЭА низкого напряжения от ОЛР приближается к трем. В ЭА высокого напряжения: разъединителях и отделителях – на габариты, наряду с мощностью, оказывает существенное влияние и значение напряжения, показатель степени зависимости которого от ОЛР приближается к единице.

В результате экспериментальных исследований зависимостей энергетических параметров ЭА от обобщенного линейного размера была подтверждена адекватность приведенных теоретических положений и получены аналитические выражения для критериев рационального выбора ЭА и их серий.

Для установления критерия рационального выбора ЭА был введен показатель удельной по массе мощности

$$S_{pM} = S / M, \quad (16)$$

где  $S$  – пропускаемая через ЭА полная мощность;  $M$  – масса ЭА.

Кроме этого, было обосновано введение дополнительных величин, необходимых для сравнения аппаратов из двух различных серий: пропускаемой полной мощности  $S$  и показателя  $n_S$  степени, отражающего изменение этой мощности в зависимости от  $\ell$ ; коэффициента  $\gamma$  потерь мощности (КПМ), который характеризует расход энергии на выполнение функций ЭА и определяется как отношение мощности потерь в ЭА к мощности на его входе или к пропущенной мощности; показателя  $n_\gamma$  степени, отражающего изменение КПМ в зависимости от  $\ell$ ; показателя удельной по массе мощности  $S_{pM}$  и показателя  $n_{SM} = n_S - n_M$ . Здесь  $n_M$  – показатель степени, характеризующий изменение массы ЭА в зависимости от ОЛР.

При получении аналитического выражения критерия рационального выбора ЭА, учитывающего данные величины, был дополнительно проведен расчет их весовых показателей.

В качестве весового показателя потерь мощности был выбран коэффициент  $k_p$  пропорциональности, отражающей зависимость мощности  $P$  от  $\ell$ ,

поскольку энергия, соответствующая этой мощности, теряется безвозвратно в различных видах ЭА.

Весовой показатель  $k_S$  пропускаемой мощности определяется как произведение усредненного КПД устройств на их усредненный коэффициент мощности

$$k_S = \varepsilon_a \cos \varphi_a. \quad (17)$$

Была доказана практическая независимость этого показателя от рода тока.

Весовой показатель  $k_{pM}$  удельной по массе мощности может быть найден как отношение усредненной стоимости  $C_{MS}$  удельной массы на 1 кВт пропускаемой мощности к общей стоимости  $C_{eS}$  электроэнергии, пропущенной ЭА за срок  $T$  его службы без капитального ремонта.

Усредненная стоимость  $C_{MS}$  удельной массы определяется как отношение стоимости  $C_A$  ЭА к пропускаемой мощности  $C_{MS} = C_A/S$ .

Таким образом,

$$k_{pM} = \frac{C_{MS}}{C_{eS}} = \frac{C_A}{STC_e}, \quad (18)$$

где  $C_e$  – стоимость электроэнергии.

В качестве критерия рационального выбора единичного ЭА предложено использовать минимум отношения суммы затрат, отнесенной к стоимости пропущенной электроэнергии за срок службы ЭА:

$$k_{O1} = \gamma/k_S + k_{pM} \rightarrow \min \quad (19)$$

Первое слагаемое в (15) представляет потери мощности в ЭА с учетом весового показателя без связи со времени его работы, поскольку потери в ЭА существуют практически в любом рабочем режиме. Второе слагаемое связано со сроком службы ЭА и может изменяться в зависимости от него, поскольку представляет собой относительные начальные затраты. Предложенный критерий является технико-экономическим, т.к. первое слагаемое определяется техническими показателями.

Для нахождения критерия рационального выбора серий ЭА, по аналогии с ЭМ, был введен генеральный показатель степени

$$n_g = 0,8n_S - n_p - k_{pM}n_M, \quad (20)$$

где  $n_p$  – показатель степени, отражающий изменение мощности ЭА в зависимости от ОЛР.

В этом показателе третье слагаемое на несколько порядков меньше первых двух, но оно может иметь существенное значение при выборе серии ЭА в случае близости этих слагаемых.

При сравнении генеральных показателей двух серий, имеющих различные границы диапазонов изменения мощности, потерь и массы, эти различия учитываются следующими показателями:

$$n_{SO} = \frac{\ln \frac{S_{b1}S_{m2}}{S_{m1}S_{b2}}}{\ln \frac{\ell_{b1}\ell_{m2}}{\ell_{m1}\ell_{b2}}}; n_{pO} = \frac{\ln \frac{P_{b1}P_{m2}}{P_{m1}P_{b2}}}{\ln \frac{\ell_{b1}\ell_{m2}}{\ell_{m1}\ell_{b2}}}; n_{MO} = \frac{\ln \frac{M_{b1}M_{m2}}{M_{m1}M_{b2}}}{\ln \frac{\ell_{b1}\ell_{m2}}{\ell_{m1}\ell_{b2}}}.$$

Окончательно технико-экономический критерий рационального выбора первой серии ЭА относительно второй имеет вид:

$$k_{OC} = n_{g1} - n_{g2} - 0,8n_{SO} - n_{pO} - k_{pM}n_{MO} = \\ = 0,8(n_{S1} - n_{S2} + n_{SO}) - n_{p1} + n_{p2} - \\ - n_{pO} - k_{pM}(n_{M1} - n_{M2} + n_{MO}). \quad (21)$$

Если показатели  $n_{S1}$ ,  $n_{S2}$ ,  $n_{S3}$ ,  $n_{S4}$  существенно различаются, то, ввиду малости показателя  $k_{pM}$ , им можно пренебречь. В этом случае критерий рационального выбора упрощается, становится чисто техническим и после преобразований приобретает вид:

$$k_{SO} \approx \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{b1}}{S_{m1}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{m1}}{P_{b1}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{b1}}{\ell_{m1}}} - \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{b2}}{S_{m2}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{m2}}{P_{b2}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{b2}}{\ell_{m2}}} + \\ + \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{b1}S_{m2}}{S_{m1}S_{b2}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{m1}P_{b2}}{P_{b1}P_{m2}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{b1}\ell_{m2}}{\ell_{m1}\ell_{b2}}}.$$

Когда определение коэффициента потерь мощности затруднительно или вообще невозможно ввиду отсутствия соответствующих данных в паспортных технических параметрах сравниваемого ЭА, можно использовать частичный критерий рационального выбора, т.е. анализировать только пропускаемую мощность

$$k_{SO} \approx \frac{\ln \frac{S_{b1}}{S_{M1}}}{\ln \frac{\ell_{b1}}{\ell_{M1}}} - \frac{\ln \frac{S_{b2}}{S_{M2}}}{\ln \frac{\ell_{b2}}{\ell_{M2}}} + \frac{\ln \frac{S_{b1}S_{M2}}{S_{M1}S_{b2}}}{\ln \frac{\ell_{b1}\ell_{M2}}{\ell_{M1}\ell_{b2}}}.$$

Применение предложенных критериев выбора показывает их эффективность как для выбора отдельных ЭА, так и их серий, позволяя сравнить технико-экономический уровень рассматриваемых ЭА на основании только паспортных данных: габаритов и массы.

**Выводы.** 1. Обобщены полученные ранее зависимости, связывающие энергетические и электромагнитные параметры ЭМ, трансформаторов и ЭА разной мощности и серий с их геометрическими размерами.

2. Обоснованы условия выбора ЭМ, трансформаторов и ЭА, независимо от особенностей их конструкции, без непосредственного сравнения электромагнитных и энергетических параметров и характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – С. 95–99.

2. Гаррис М., Лауренсон П., Стефенсон Дж. Системы относительных единиц в теории электрических машин: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1975. – 120 с.

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

4. Невзлин Б.И., Загирняк М.В. Расширение границ зависимостей энергетических параметров вращающихся электрических машин от обобщенного линейного размера. Часть 1. Уточнение зависимостей энергетических параметров вращающихся электрических машин от обобщенного линейного размера // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 3. – С. 10–17.

5. Загирняк М.В., Невзлин Б.И. Функциональная взаимосвязь массогабаритных и энергетических параметров трансформаторов. Ч. 1. Известные теоретические и экспериментальные зависимости между энергетическими, электромагнитными и массогабаритными параметрами трансформаторов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2004. – № 6. – С. 47-52.

6. Загирняк М.В., Невзлин Б.И., Дьяченко Ю.Ю.,

Кавакзех М.З.Х. Функциональная взаимосвязь массогабаритных и энергетических параметров электрических аппаратов. Часть 1. Анализ известных теоретических и экспериментальных зависимостей между энергетическими, электромагнитными и массогабаритными параметрами электрических аппаратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 20–26.

Стаття надійшла 02.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## **ОСОБЛИВОСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИБОРУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ СЕРІЙ**

*М. В. Загирняк, д.т.н., проф., В. В. Прус, к.т.н., доц., Б. І. Невзлін, к.т.н., доц.  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна  
E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua*

На основі узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропонований підхід щодо уточнення взаємозв'язків узагальненого геометричного розміру та енергетичних параметрів електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів у широкому діапазоні їх зміни.

**Ключові слова:** електрична машина, трансформатор, електричний апарат, узагальнений лінійний розмір.

## **PECULIAR PROPERTIES OF THE EFFICIENT CHOICE OF ELECTRICAL MACHINES, TRANSFORMERS, ELECTRICAL APPARATUSES AND THEIR SERIES**

*M. Zagirnyak, D. Sc. ( Eng.), Prof., V. Prus, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., B. Nevzlin, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine  
E-mail: mzagirn@kdu.edu.ua*

On the basis of theoretical and experimental researches results generalization approach to specification of correlation of the generalized geometrical size and power parameters of electrical machines, transformers and apparatuses in the wide range of their changes is offered.

**Key words:** electrical machine, transformer, electrical apparatus, generalized linear size.