

**ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ИХ СЕРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ  
ОТ ОБОБЩЕННОГО ЛИНЕЙНОГО РАЗМЕРА**

**М.В.Загирняк**, докт.техн.наук, **В.В.Прус**, канд.техн.наук, **Б.И.Невзлин**, канд.техн.наук,  
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,  
ул. Первомайская, 20, 39600, Кременчуг, Украина.  
E-mail: [mzagirn@kdu.edu.ua](mailto:mzagirn@kdu.edu.ua)

*Целью работы была разработка метода сравнительной оценки электрических машин и их серий с использованием уточненных зависимостей основных параметров от обобщенного линейного размера. Подтверждена низкая достоверность применения существующих соотношений, связывающих массогабаритные и энергетические показатели электрических машин по причине отклонения от идеальных законов подобия в машинах разной мощности. Установлены зависимости энергетических и электромагнитных параметров электрических машин от обобщенного линейного размера. Получены показатели и предложены критерии сравнения электрических машин и их серий. Обоснован выбор обобщенного линейного размера. Проведена сравнительная оценка электрических машин известных производителей. Приведены рекомендации по улучшению параметров электрических машин. Библиография: 11.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, обобщенный линейный размер, параметр.

**Введение.** Одним из важнейших этапов, преимущественно определяющих стоимость и функциональность разрабатываемых технологических агрегатов и систем, является правильный выбор электрических машин (ЭМ), который затрудняется в силу сложности и отсутствия унификации самого подхода к их выбору, а также вследствие наличия большого числа сравниваемых параметров.

**Анализ предыдущих исследований.** На практике при выборе ЭМ используется следующий подход. Согласно [2, 3, 5] в ЭМ выделяют главные размеры, определяющие, при прочих равных условиях, другие геометрические параметры, габариты, массу и основные технико-экономические показатели. Это означает, что данные параметры могут нести полезную информацию о соотношении между массогабаритными и энергетическими показателями ЭМ. Для ЭМ переменного тока к главным размерам относят внутренний диаметр  $D_1$  и длину  $l_1$  сердечника статора; для ЭМ постоянного тока – наружный диаметр  $D_{a2}$  и длину  $l_2$  сердечника якоря.

По [2] указанные параметры определенным образом связаны с частотой вращения, электромагнитными нагрузками (линейной нагрузкой и магнитной индукцией в воздушном зазоре), а также с другими параметрами машин. Связь эта чаще всего выражается через машинную постоянную Арнольда  $C_A$ , которая, несмотря на кажущуюся простоту, отражает физический смысл электромеханического преобразования энергии [1]. Машинная постоянная Арнольда универсальна и с небольшими изменениями может применяться для любого типа ЭМ. При ее использовании можно аналитически оценить влияние отдельных факторов на эксплуатационные характеристики и главные размеры, оценить степень использования проводниковых и магнитных материалов при различных значениях электромагнитных нагрузок.

Отметим, что чем больше линейная нагрузка  $A$  и индукция  $B_\delta$  в воздушном зазоре, тем меньше главные размеры и полнее использование активных материалов в машине [1]. Однако увеличение электромагнитных нагрузок, сопровождаемое повышением температуры активных частей машины, ограничивается классом нагревостойкости изоляции. При выборе электромагнитных нагрузок следует также учитывать, что отношение  $A/B_\delta$  должно быть в определенных пределах, так как его значение влияет на технико-экономические показатели машин переменного тока – коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , пусковые характеристики и массу, а в машинах постоянного тока – на КПД, регулировочные свойства, коммутационные показатели и массу машины.

Одно и то же значение  $D_1^2 l_1$  для машин переменного тока или  $D_{a2}^2 l_2$  для машин постоянного тока может быть получено при разных значениях соответствующего диаметра  $D$  и длины  $l$ , а следовательно, при разных отношениях  $\lambda = l/D$ . Отношение  $l/D$  влияет на массу, динамический момент инерции вращающейся части, энергетические и другие технико-экономические показатели машины.

В [2, 4, 6] сформулированы критерии подобия электрических машин, связывающие их основные параметры с геометрическими размерами. Параметры машин, входящих в ряд по возрастанию мощности, согласно этим критериям, изменяются в зависимости от мощности, подчиняясь определенным закономерностям. ЭМ в рамках одной серии чаще всего рассматриваются как ряд геометрически подобных машин, т.е. машин, у которых все линейные размеры (диаметр, длина сердечника, высота и ширина пазов и т. п.) изменяются пропорционально. При их рассмотрении магнитную индукцию  $B$  и плотность  $J$  тока в обмотке принимают постоянными и не зависящими от мощности машины  $P_1$ , а площадь поперечного сечения магнитопровода  $s_{mc}$  и общую площадь поперечного сечения проводников обмотки  $s_{win}$  – возрастающими в квадрате с увеличением линейных размеров. С учетом этого получен ряд зависимостей, связывающих энергетические, массогабаритные и стоимостные показатели ЭМ [2].

Однако на практике значения  $B$  и  $J$  в ряде машин не сохраняются постоянными, и отклонения от идеальных законов подобия неизбежны, так как в машинах малой мощности возрастают падение напряжения, относительный ток холостого хода и их можно выдержать в допустимых пределах только путем увеличения размеров, а в машинах большой мощности требуется повышение интенсивности охлаждения, что также нарушает закон подобия. Поэтому приведенные в [2] соотношения выдерживаются тем точнее, чем уже диапазон рассматриваемого ряда машин. Но, хотя при расширении диапазона и неизбежны отклонения, знание общих закономерностей имеет практическое значение, так как дает возможность оценить тот или иной характерный параметр для всего ряда ЭМ, если он известен только для одной машины.

**Цель работы.** Разработка метода сравнительной оценки ЭМ на основе реальных зависимостей их параметров от обобщенного линейного размера.

**Материал и результаты исследований.** Оценка применимости существующих зависимостей. В настоящее время считается общепринятой [4] зависимость электромагнитной мощности  $S_{em}$  ЭМ от условного (обобщенного) линейного размера (ОЛР)  $\ell$  в виде

$$S_{em} = k_S \ell^4, \quad S_{em} = k E_a I_a, \quad (1)$$

где  $k$  – число фаз;  $E_a, I_a$  – электродвижущая сила (ЭДС) и ток обмотки якоря, соответственно;  $k_S$  – коэффициент пропорциональности. (Подчеркнем, что здесь и далее каждый коэффициент пропорциональности имеет свою размерность; так для  $k_S$  – ВА/м<sup>4</sup>).

Действительно, поскольку ЭДС пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$  в магнитопроводе ЭМ, частоте изменения его направления  $f$  и числу витков обмотки  $W$ , а магнитный поток равен произведению магнитной индукции  $B$  на площадь поперечного сечения магнитопровода  $s_{mc}$ , то

$$E_a = B s_{mc} f W.$$

Ток якоря может быть представлен как произведение плотности  $J$  тока на суммарную площадь  $s_{win}$  поперечного сечения всех параллельных проводников обмотки якоря  $I_a = J s_{win}$ .

Для геометрически подобных машин, т.е. ЭМ такого ряда, в котором все геометрические размеры изменяются в одинаковое число раз [4, 6], очевидно  $s_{mc} = k_{mag} \ell^2$ ,  $s_{win} = k_c \ell^2$ , где  $k_{mag}$  и  $k_c$  – коэффициенты пропорциональности,  $W = \text{const}$ .

Значения  $B$  и  $J$  определяются свойствами соответственно магнитных и проводниковых материалов, одинаковых в геометрически подобных ЭМ, также как и число фаз. Следовательно, при постоянстве  $f$  получаем  $k f B J W = \text{const}$ , из чего следует равенство (1).

Очевидно, что расход материалов, масса  $m$  и объем  $V$  ЭМ пропорциональны третьей степени ОЛР [2]. Также третьей степени ОЛР пропорциональна и мощность  $\Delta P_s$  суммарных потерь, поскольку при  $f B J = \text{const}$  электрические и магнитные потери мощности пропорциональны объемам соответственно электрических проводников и магнитопровода, а механические – третьей степени диаметра якоря, тогда

$$\Delta P_s = k_{\Delta p} \ell^3, \quad (2)$$

где  $k_{\Delta p}$  – коэффициент пропорциональности. Площадь  $s_{col}$  поверхности охлаждения ЭМ считается пропорциональной второй степени ОЛР  $s_{col} = k_{col} \ell^2$ , где  $k_{col}$  – коэффициент пропорциональности.

Проверка существующих зависимостей параметров от обобщенного линейного размера была выполнена на ЭМ различных видов: машинах постоянного тока (МПТ) серий П, 2П, 4ПФ, асинхрон-

ных двигателях (АД) серий АО2, 4А, АИР, синхронных машинах (СМ) серий СДТ, ТВВ, ОС в широком диапазоне мощностей [8]. Параметры этих ЭМ приведены в [5].

В качестве ОЛР предварительно был выбран наружный диаметр  $D_c$  станины ЭМ – размер, по нашим первоначальным предположениям, наиболее функционально связанный с мощностью.

Результаты расчетов подтвердили, что показатель степени в зависимости (1), которую в более общем виде можно записать как  $S_{em} = k_s \ell^{n_s}$ , значительно отличается от значения 4 как в меньшую, так и, особенно, в большую сторону на значения, которые объяснить технологией изготовления ЭМ или изменением конструкции внутри одной серии не представляется возможным. При этом принцип геометрического подобия ЭМ одной серии в основном выполняется.

Аналогичный вывод был сделан и для показателя  $n_{\Delta p}$  в (2):  $\Delta P_s = k_{\Delta p} \ell^{n_{\Delta p}}$ . Отличие реального показателя  $n_{\Delta p}$  от общепринятого составило от -38 % до +124 %.

*Уточнение зависимостей параметров от ОЛР.* Представленное несоответствие поставило задачу расширения границ известных закономерностей на основе следующих положений.

Как указано выше, значения произведения  $kfBJW$  были приняты постоянными. Однако при изменении размеров ЭМ в широких пределах это утверждение не всегда корректно [7]. Из определения геометрического подобия ЭМ неизменными являются только числа  $k$  фаз и  $W$  витков обмотки, поскольку их изменение может привести к нарушению геометрического подобия, если не машины в целом, то отдельных ее узлов. Значения  $f$ ,  $B$  и  $J$  могут изменяться в зависимости от ОЛР по разным причинам даже при полном соблюдении принципа геометрического подобия.

В [8] из условия выбора плотности  $J$  тока в проводнике, исходя из интенсивности теплоотдачи с его поверхности и температурного индекса изоляции обмотки, получено

$$J = k_J / \sqrt{\ell}, \quad (3)$$

где  $k_J$  – коэффициент пропорциональности.

Данное соотношение справедливо для ЭМ малой и микромощности с естественным охлаждением. В машинах от средней до предельных мощностей для поддержания высоких значений  $J$  охлаждение интенсифицируют путем сочетания внутренней и внешней вентиляции и улучшения охлаждающей среды (замена воздуха на водород и воду). Это позволяет удерживать плотность тока практически независимой от ОЛР и даже повышать с ростом  $\ell$  за счет отхода от геометрического подобия.

Магнитная индукция в ЭМ ограничивается двумя основными факторами: индукцией насыщения магнитопроводящего материала и магнитодвижущей силой (МДС) обмотки возбуждения, которая в части машин совмещена с рабочей обмоткой, например, в АД – с обмоткой статора. Индукция насыщения, не зависящая от ОЛР, ограничивает верхнее значение индукции в ЭМ мощностью от десятков кВт и выше. Поскольку в микромашинах индукция не достигает значений насыщения, а определяется значением МДС ввиду его малости, то для таких машин при постоянстве плотности тока справедливо  $B = k_{aB} J s_{dw} W_{dw} / \ell = k_{bB} \ell$ , а если плотность тока зависит от ОЛР по (3), то

$$B = k_{aB} k_J s_{dw} W_{dw} / (\ell \sqrt{\ell}) = k_{cB} \ell^{0,5}, \quad (4)$$

где  $k_{aB}$ ,  $k_{bB}$ ,  $k_{cB}$  – коэффициенты пропорциональности,  $s_{dw}$  – площадь поперечного сечения проводника обмотки возбуждения,  $W_{dw}$  – число витков обмотки возбуждения.

В машинах с возбуждением от постоянных магнитов индукцию можно считать не зависящей от ОЛР, поскольку МДС постоянного магнита пропорциональна  $\ell$ , так же как и значение воздушного зазора, на проведение магнитного потока по которому расходуется основная часть МДС.

Частота  $f$  для большинства ЭМ, работающих с сетью, равна 50 Гц, однако в автономных сетях могут быть другие значения, верхний предел которых ограничивается размером проводников. В [8] с учетом глубины проникновения тока в проводник на определенной частоте получено следующее соотношение:

$$f = k_f / \ell^2, \quad (5)$$

где  $k_f$  – коэффициент пропорциональности.

При учете действия центробежных сил, что характерно для ЭМ больших и предельных мощностей и приводит к нарушению геометрического подобия ЭМ, получено

$$f = k_\phi / \sqrt{\ell}, \quad (6)$$

где  $k_\varphi$  – коэффициент пропорциональности.

Зависимость мощности от ОЛР была рассмотрена отдельно для различных диапазонов мощностей. В ЭМ малой и микромощности с электромагнитным возбуждением при постоянстве частоты и неизменной плотности тока имеют место равенства  $kfWJ = k_a - \text{const}$ ,  $B = k_{bB}\ell$ , откуда  $S_{em} = k_a k_{bB} \ell^5$ . В случае возбуждения на постоянных магнитах при тех же условиях выполняется (1).

Если плотность тока зависит от ОЛР по (3), то при электромагнитном возбуждении получаем  $kfWJ = k_a - \text{const}$ ,  $kfW = k_b - \text{const}$ ,  $J = k_J / \ell^{0,5}$ ,  $B = k_{cB} \ell^{0,5}$  и

$$S_{em} = k_b k_J k_{cB} \ell^4, \quad (7)$$

а при возбуждении от постоянных магнитов –  $kfWB = k_c - \text{const}$ ,  $J = k_J / \ell^{0,5}$  и

$$S_{em} = k_c k_J \ell^{3,5}. \quad (8)$$

Если ЭМ может работать на произвольной частоте, то выполняется равенство (5). Тогда при электромагнитном возбуждении и постоянстве плотности тока ( $kJW = k_d - \text{const}$ ,  $B = k_{bB}\ell$ ,  $f = k_f / \ell^2$ )

$$S_{em} = k_d k_{bB} k_f \ell^3.$$

Выполнение (4) приводит к тому, что  $kW = k_g - \text{const}$ ,  $B = k_{cB} \ell^{0,5}$ ,  $J = k_J / \ell^{0,5}$ ,  $f = k_f / \ell^2$ , откуда  $S_{em} = k_g k_{cB} k_J k_f \ell^2$ .

При возбуждении от постоянных магнитов (МПТ, СМ)  $kWB = k_e - \text{const}$ ,  $J = k_J / \ell^{0,5}$ ,  $f = k_f / \ell^2$  и  $S_{em} = k_e k_J k_f \ell^{1,5}$ , то есть электромагнитная мощность малых ЭМ пропорциональна ОЛР в степени от полутора до пяти.

У ЭМ средней мощности, кроме машин специального назначения, как правило, выполняются условия  $kfBJW - \text{const}$  или  $kfBW - \text{const}$ ,  $J = k_J / \sqrt{\ell}$  и тогда для них действительны равенства (1) или (8). Следовательно, электромагнитная мощность является функцией ОЛР в степени от 3,5 до 4, хотя в начале диапазона мощностей показатель степени может приближаться к пяти.

В ЭМ большой и предельных мощностей применяют меры для поддержания постоянства плотности тока и даже некоторого ее повышения. Поэтому можно считать выполняемым условие  $kJBW = k_h - \text{const}$ . Однако в этих ЭМ нельзя пренебрегать действием центробежных сил, что с учетом (6) приводит к зависимости вида  $S_{em} = k_h k_\varphi \ell^{3,5}$ .

Зависимость мощности потерь от ОЛР определяется прежде всего мощностью ЭМ. В ЭМ мощностью от единиц кВт и более мощность  $\Delta P_{ew}$  электрических потерь на возбуждение при  $J - \text{const}$  пропорциональна квадрату ОЛР, поскольку МДС пропорциональна ширине воздушного зазора и соответственно  $\ell$

$$\Delta P_{ew} = \rho W_{dw} l_{dw} J^2 s_{dw} = k_{\Delta pw} \ell^2, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $k_{\Delta pw}$  – коэффициент пропорциональности,  $l_{dw}$  – длина витка обмотки возбуждения, как и  $W_{dw}$ , пропорциональная ОЛР:  $l_{dw}$  – из принципа геометрического подобия, а  $W_{dw}$  – для обеспечения независимости индукции от  $\ell$ ;  $s_{dw}$  от  $\ell$  не зависит. Если считать  $s_{dw}$  пропорциональной  $\ell^2$ , то, исходя из того, что МДС обмотки должна быть пропорциональна ширине воздушного зазора  $\ell$ , число витков обратно пропорционально  $\ell$ , и (9) остается справедливым. Следовательно, мощность потерь в рассматриваемых ЭМ растет медленнее, чем  $\ell^3$ .

Для микромашин, а также ЭМ других мощностей при выполнении условия (4) справедливо

$$\Delta P_e = \rho l_c S_c J^2 = \rho l_c S_c k_J^2 / \ell = k_{cJ} \ell^2, \quad (10)$$

где  $l_c, S_c$  – длина и площадь сечения проводника, следовательно мощность электрических потерь в обмотке якоря МПТ или СМ, а также статора и ротора АД пропорциональна квадрату ОЛР.

Мощность потерь на возбуждение МПТ и СМ при том же условии

$$\Delta P_{ew1} = \rho W_{dw} l_{dw} s_{dw} k_J^2 / \ell = k_{\Delta pw1} \ell.$$

Однако, если выполняется равенство  $B = k_{bB}\ell$  или  $B = k_{cB}\sqrt{\ell}$ , то при постоянной плотности тока потери на возбуждение равны

$$\Delta P_{ew2} = \rho W_{dw} l_{dw} S_{dw} J^2 = k_{\Delta pw} \ell^3, \quad \text{а при } J = k_J / \sqrt{\ell} -$$

$$\Delta P_{ew3} = \rho W_{dw} l_{dw} S_{dw} k_J^2 / \ell = k_{\Delta pw1} \ell^2.$$

Как видно, зависимости потерь на возбуждение от ОЛР совпадают по виду с зависимостями от ОЛР других электрических потерь и пропорциональны значениям от  $\ell$  до  $\ell^3$ .

Магнитные потери  $\Delta P_{mag}$  пропорциональны  $B^2$  [2] и могут быть принятыми пропорциональными  $f^{1,3}$ :  $\Delta P_{mag} = k_{\Delta psm} S_{cm} \ell_{cm} B^2 f^{1,3} = k_{mn} \ell^3 B^2 f^{1,3}$ , где  $k_{\Delta psm}$  – коэффициент пропорциональности удельных (на единицу объема магнитопровода) магнитных потерь;  $k_{\Delta pm} = k_{\Delta psm} S_{mc} l_m / \ell$  – коэффициент магнитных потерь;  $l_m$  – средняя длина магнитной силовой линии в ЭМ.

Если  $B$  и  $f$  не зависят от ОЛР, то магнитные потери пропорциональны  $\ell^3$ . Однако в случае  $\partial B / \partial \ell \neq 0$  или  $\partial f / \partial \ell \neq 0$  степень при ОЛР изменяется, что подробно объясняется в [8]. Из полученных результатов следует, что степень зависимости  $\Delta P_{mag}$  от ОЛР может изменяться от 5 до 0,4.

Для электрических потерь в [8] получено соотношение  $\Delta P_e = \rho \ell_c S_c J^2 = k_{cJ1} \ell^{2n_S - 5 - 2n_B}$ , где  $n_B$  – показатель степени зависимости магнитной индукции от ОЛР. Следовательно, при  $n_B = 1$  и  $n_S = 5$  получаем  $\Delta P_e = k_{cJ1} \ell^3$ , а при  $n_B = 0,5$  и  $n_S = 4$  –  $\Delta P_e = k_{cJ1} \ell^2$ , что соответствует полученным выше выражениям.

Суммарные потери могут иметь  $n_{\Delta p} > 3$  при  $n_B > 0$ , в частности, если  $n_B = 1$ . Тогда, учитывая, что на магнитные потери в АД малой мощности приходится до 25 % суммарных потерь [11], и считая остальные потери пропорциональными  $\ell^3$ , можно записать  $\Delta P_s = k_{\Delta p1} (0,75 \ell^3 + k_{pm} 0,25 \ell^5)$ , где  $k_{\Delta p1}$  – коэффициент пропорциональности,  $k_{pm}$  – поправочный коэффициент, учитывающий изменение степени зависимости магнитных потерь от ОЛР.

Считая неизменным коэффициент  $k_{\Delta p1}$  и приняв изменения коэффициента  $k_{pm}$  в пределах, соответствующих диапазону изменения мощности микроаппаратов в зависимости от их ОЛР, получим для мощности потерь  $\Delta P_s = k_{\Delta p1} (0,75 \ell^3 + k_{pm} 0,25 \ell^5) = k_{\Delta p1} (0,494 \ell^3 + 0,189 k_{pm} \ell^5) \approx k_{\Delta p1} \ell^{3,5}$ .

Таким образом, показатель  $n_{\Delta p}$  может достигать значений от 2 до 3,5.

*Критерии сравнения серий ЭМ.* Как правило, разные серии ЭМ могут иметь отличающиеся показатели  $n_S$  и  $n_{\Delta p}$  степени, что затрудняет их непосредственное сравнение. При выборе базовой машины для оценки серии ЭМ с точки зрения экономичности предпочтительней, чтобы для ЭМ мощности больше базовой зависимость  $S_{em}$  от  $\ell$  имела максимальный показатель степени, а зависимость  $\Delta P_s$  от  $\ell$  – минимальный; а для ЭМ мощности меньше базовой – наоборот.

При выполнении этих положений с ростом ОЛР мощность растет быстрее, а потери медленнее. Это способствует не только повышению экономичности ЭМ, но и быстрому росту КПД. При снижении ОЛР мощность уменьшается медленнее, а потери – быстрее, и КПД, как и экономичность ЭМ, снижаются не так быстро [9].

На основании изложенного был сформулирован *предварительный критерий сравнения серий ЭМ*: из двух или нескольких серий ЭМ наиболее оптимальной является та, в которой при одинаковых для всех серий базовых ЭМ показатель степени  $n_S$  является максимальным для машин мощностей больших базовой и минимальным – для машин мощностей меньших базовой, а показатель  $n_{\Delta p}$  степени минимален для машин мощностей больших базовой и максимален – для машин мощностей меньших базовой. Альтернативой может быть оценка разности показателей  $(n_S - n_{\Delta p})$ , которая должна быть максимальной для ЭМ мощностей больших базовой и минимальной для ЭМ мощностей меньших базовой.

Возможности по достижению оптимальности серий ЭМ для машин большой мощности заключаются в удержании плотности тока и частоты независимыми от  $\ell$ . Это достигается путем интенсификации

охлаждения и укрепления обмоток ротора, а также ограничения размеров элементарных проводников обмоток. Кроме того, следует отдавать предпочтение повышению мощности потерь на возбуждение (в МПТ и СМ), которая пропорциональна  $\ell^2$ , а не росту электрических потерь в обмотке якоря.

Для машин малой мощности данная возможность обеспечивается при использовании возбуждения постоянными магнитами, повышении плотности тока в соответствии с (4), а также повышении частоты при автономном питании в соответствии с (5).

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предварительный критерий сравнения серий ЭМ имеет два существенных недостатка. Первый заключается в том, что при сравнении серий ЭМ редко предоставляется возможность найти двигатели различных серий, обладающие одинаковыми параметрами. В результате серия ЭМ, содержащая машины с явно худшими параметрами, может иметь больший показатель  $n_S$  и большую разность  $(n_S - n_{\Delta p})$ .

Вторым недостатком является некоторая неопределенность критерия, так как одна серия может иметь максимальный  $n_S$ , не обеспечивая при этом минимальный  $n_{\Delta p}$ . В итоге разность данных показателей может не быть максимальной или минимальной.

Во избежание этих недостатков был введен уточненный показатель степени  $n_g$

$$n_g = n_S - 0,5n_{\Delta p}, \quad (11)$$

где  $n_S = \ln(S_b/S_{sm})/\ln(\ell_b/\ell_{sm})$ ;  $n_{\Delta p} = \ln(\Delta P_{sb}/\Delta P_{ss})/\ln(\ell_b/\ell_{sm})$ ;  $S_b, S_{sm}$  – электромагнитная мощность соответственно базовой (наибольшей) и наименьшей ЭМ серии;  $\Delta P_{sb}, \Delta P_{ss}$  – суммарные потери мощности базовой (наибольшей) и наименьшей машин серии;  $\ell_b, \ell_{sm}$  – ОЛР тех же машин.

Весовой коэффициент 0,5 перед  $n_{\Delta p}$  в (11) используется с целью корреляции более важного показателя мощности ЭМ с менее важным показателем суммарных потерь. Для АД уточненный показатель имеет вид

$$n_{gIM} = \ln \left( \frac{S_b}{S_{sm}} \sqrt{\frac{\Delta P_{ss}}{\Delta P_{sb}}} \right) \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{sm}(1-\eta_{sm})\cos\varphi_{sm}}{P_b(1-\eta_b)\cos\varphi_b} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}, \quad (12)$$

где  $\cos\varphi$  – номинальный коэффициент мощности,  $\eta$  – номинальный КПД,  $P$  – номинальная механическая мощность на валу электрической машины, принимаемые по паспортным данным, индексы  $b$  и  $sm$  относятся соответственно к номинальным параметрам ЭМ базовой и наименьшей мощностей серии.

Для сравнения ЭМ двух серий 1 и 2, имеющих одинаковый диапазон ОЛР от  $\ell_{sm}$  до  $\ell_b$ , помимо разности уточненных показателей  $(n_{g1} - n_{g2})$ , следует использовать показатель относительной мощности  $n_{Sr}$  минимальных и максимальных ЭМ серий, вычисляемый по тому же принципу, что и показатель  $n_S$

$$n_{Sr} = \ln \frac{P_{sm1}P_{b1}}{P_{sm2}P_{b2}} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}, \quad (13)$$

а также показатель  $n_{\Delta pr}$  относительных потерь мощности ЭМ начала и конца диапазона

$$n_{\Delta pr} = \ln \frac{\Delta P_{ss1}\Delta P_{sb1}}{\Delta P_{ss2}\Delta P_{sb2}} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}. \quad (14)$$

Вычисление критерия  $K$  оптимальности первой серии относительно второй производится по формуле

$$K = n_{g1} - n_{g2} + n_{Sr} - 0,5n_{\Delta pr}, \quad (15)$$

поскольку в ней учитываются абсолютные параметры ЭМ начала и конца диапазона серий с тем же «весом», что и в генеральном показателе. Подставив (12–14) в (15), для АД было получено [8]:

$$K_{IM} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{b1}^2(1-\eta_{b2})^2 \eta_{sm1}\eta_{b1} \cos\varphi_{sm1} \cos\varphi_{b2}}{P_{b2}^2(1-\eta_{b1})^2 \eta_{sm2}\eta_{b2} \cos\varphi_{sm2} \cos\varphi_{b1}} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}. \quad (16)$$

Для МПТ уточненный показатель и критерий оптимальности имеют вид

$$n_{gDC} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_b(1-\eta_{sm})}{P_{sm}(1-\eta_b)} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}; \quad K_{DC} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{b1}^2(1-\eta_{b2})^2 \eta_{sm1}\eta_{b1}}{P_{b2}^2(1-\eta_{b1})^2 \eta_{sm2}\eta_{b2}} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}. \quad (17)$$

Соответственно, для СМ

$$n_{gSM} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_b (1 - \eta_{sm}) \cos^2 \varphi_{sm}}{P_{sm} (1 - \eta_b) \cos^2 \varphi_b} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}; \quad K_{SM} = \frac{1}{2} \ln \frac{(P_{b1} (1 - \eta_{b2}) \cos \varphi_{sm1} \cos \varphi_{b2})^2 \eta_{sm1} \eta_{b1}}{(P_{b2} (1 - \eta_{b1}) \cos \varphi_{sm2} \cos \varphi_{b1})^2 \eta_{sm2} \eta_{b2}} \ln^{-1} \frac{\ell_b}{\ell_{sm}}. \quad (18)$$

*Обоснование выбора обобщенного линейного размера.* В качестве ОЛР наиболее целесообразно выбирать геометрический параметр ЭМ, который либо приводится в паспорте, либо может быть определен по самой ЭМ без ее разборки и углубленного изучения справочных данных.

Таких величин, находящихся в наибольшей корреляционной связи с объемом и мощностью ЭМ три: высота оси вращения (ВОВ)  $h$ , наружный диаметр станины  $D_c$  и полная длина машины  $L$ . Применение последней величины в качестве ОЛР нежелательно, т.к. ЭМ большей длины может иметь меньшую мощность, чем ЭМ меньшей длины и близкой частоты вращения. В отношении величин  $h$  и  $D_c$  такая диспропорция не наблюдается. По приведенным в [9] результатам корреляционного анализа была подтверждена целесообразность использования в качестве ОЛР  $\ell$  ВОВ  $h$  как обеспечивающей минимальное изменение степенной зависимости параметров ЭМ от ОЛР при переходе от образца к образцу серий промышленных электродвигателей.

Для достоверной оценки полученных экспериментальных соотношений с теоретических позиций в [10] было получено соотношение для определения относительной погрешности отношений высот оси вращения к реальным обобщенным линейным размерам  $\delta_\ell$ , которое дает относительную разность между двумя приближенными значениями ОЛР

$$\delta_\ell = \left[ 1 - h_b h_i^{-1} (L_i D_i^2 L_b^{-1} D_b^{-2})^{1/3} \right] \cdot 100\%, \quad (19)$$

где  $h_b, L_b, D_b, h_i, L_i, D_i$ , – размеры  $h, L, D$  соответственно базовой (максимальной мощности) и  $i$ -й ЭМ серии.

*Экспериментальная оценка теоретических зависимостей.* В [10] оценены области существования показателей степени  $n_S$  и  $n_{\Delta p}$  в машинах средней мощности для каждого их вида (АД, МПТ, СМ) и основных серий отдельно. Так как практически во всех рассматриваемых ЭМ возбуждение электромагнитное, в качестве базовых приняты ЭМ минимальной мощности. Результаты расчетов подтвердили более высокую точность полученных авторами закономерностей по сравнению с существующими.

При этом был отмечен ряд случаев несоответствия экспериментальных и теоретических зависимостей. Так, двигатели постоянного тока серии П имеют значительное превышение расчетных показателей степени над соответствующими как известными, так и предлагаемыми теоретическими значениями. При этом следует отметить небольшие значения диапазонов изменения показателей  $n_S$  (0,659) и  $n_{\Delta p}$  (0,468) – минимальное из всех исследованных ЭМ. Так, если для двигателей малой мощности среднее значение  $n_S$  составляет 5,34, что вполне объяснимо, то в ЭМ средней мощности –  $n_S = 5,09$ , а  $n_{\Delta p} = 3,72$ , что объяснить не представляется возможным.

В еще большей степени отличаются от теоретических показатели степени генераторов постоянного тока серии П. При минимальной базовой мощности показатель  $n_S$  составляет от 5,16 до 13,6, а  $n_{\Delta p}$  изменяется в диапазоне от 4,56 до 13. Даже при максимальной базовой мощности показатели составляют  $4,2 \leq n_S \leq 5,6$ ;  $3,33 \leq n_{\Delta p} \leq 4,7$ . Хотя при этом разность  $(n_S - n_{\Delta p})$ , в подавляющем большинстве случаев, составляет 1...2 единицы, то есть соответствует предлагаемым теоретическим положениям.

Синхронные генераторы серии Т при минимальной базовой мощности и таком же диапазоне изменения показателей, что и ЭМ серии ТВВ, обладают необъяснимо большими показателями степеней  $n_S$  и  $n_{\Delta p}$ . Эти показатели для турбогенераторов серии ТВВ, при максимальной базовой мощности также не укладываются в полученные пределы, что может быть следствием несоблюдения принципа геометрического подобия, который явно нарушается при проектировании СМ таких мощностей.

Из исследованных синхронных двигателей явное несоответствие экспериментальных и теоретических данных наблюдается в ЭМ серии СДКМ как при минимальной, так и при максимальной базовых мощностях. При этом существенно не соответствуют теории как значения показателей  $n_S, n_{\Delta p}$  так и их разности  $(n_S - n_{\Delta p})$ .

Кроме этого, полученные значения рассматриваемых показателей степеней были проверены для серий зарубежных ЭМ – синхронных генераторов к дизельным электростанциям производства Великобритании. Так как ВОВ этих ЭМ одинаковы и составляют 142 мм для типов D8A–D8C и 170 мм для типов D11A–D11C, то в качестве обобщенного линейного размера был принят корень кубический из массы генератора в кг.

Результаты расчетов, представленные в [10], дали примерно те же значения показателей степенных зависимостей, что и для ЭМ производства стран бывшего СНГ – показатель  $n_{\Sigma} \approx 5$  и более, показатель  $n_{\Delta p}$  при малой мощности составляет около 4 и приближается к трем в диапазоне средней мощности.

**Выводы.** 1. Известные зависимости электромагнитной мощности ЭМ от обобщенного линейного размера, полученные теоретически и эмпирически, представляют степенную функцию с показателем 4, а зависимости суммарной мощности потерь в ЭМ от линейного размера – степенную функцию с показателем 3.

2. Исследования современных и ранее выпускавшихся серий ЭМ показали значительное расхождение существующей теории с числовым экспериментом по отдельным показателям степенных зависимостей на 30...50 % и более.

3. На основе уточнения зависимостей величин  $J, B, f$  от обобщенного линейного размера установлено, что общепринятые для геометрически подобных машин степенные зависимости электромагнитной мощности и суммарной мощности потерь от линейного размера с показателями, соответственно, 4 и 3 являются частными случаями более общих степенных зависимостей с показателями для мощности от 1,5 до 5 и для потерь – от менее 2 до 3,5. Разность этих показателей может составлять от 0 до 2, в основном приближаясь к 1.

4. Для АД, МПТ, а также СМ малой, средней и части большой мощности в качестве ОЛР целесообразно использовать высоту оси вращения.

5. Все исследованные серии АД, серии 2П и 4ПФ МПТ и большая часть серий СМ имеют показатели степенных зависимостей электромагнитной мощности и суммарной мощности потерь от высоты оси вращения, соответствующие изложенной теории. Показатели МПТ старых серий и части СМ объяснить не представляется возможным.

6. Предложен критерий сравнения серий ЭМ, обладающих разными энергетическими параметрами при одинаковых частоте вращения и диапазоне обобщенного линейного размера, позволяющий комплексно оценить технический уровень различных серий и выбрать оптимальный вариант.

1. Беспалов В.Я., Бородин Д.А., Бородин В.Д. Постоянная Арнольда // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 60–73.
2. Гольдберг О.Д. и др. Проектирование электрических машин. – М.: МГОУ, 2001. – 161 с.
3. Загирняк М.В., Невзлин Б.И., Аль-Машагбех А.С. Сравнительная оценка зависимостей энергетических параметров от высоты вращения асинхронных электродвигателей общепромышленного и специального назначения // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2000. – Ч.4. – С. 60 – 63.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
5. Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам.: В 2 т. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Костенко М.П., Пиотровский Л.Н. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1964. – Ч. 1. – 548 с.; – Л.: Энергия, 1965. – Ч. 2. – 704 с.
7. Невзлин Б.И. К вопросу о влиянии размеров электрической машины на ее параметры // Вестник Восточноукраинского государственного университета. – 1997. – № 2. – С. 170-173.
8. 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.
9. Невзлин Б.И., Загирняк М.В. Расширение границ зависимостей энергетических параметров вращающихся электрических машин от обобщенного линейного размера. Часть 2. Исследования реальных взаимосвязей параметров электрических машин с обобщенным линейным размером // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 5.
10. Невзлин Б.И., Загирняк М.В. Расширение границ зависимостей энергетических параметров вращающихся электрических машин от обобщенного линейного размера. Часть 3. Оценка погрешности определения обобщенного линейного размера и соответствия теоретических положений экспериментальным данным. Сравнение серий электрических машин по критерию оптимальности // Известия вузов. Электромеханика. – 2003. – № 1. – С. 17–23.
11. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1969.

**ОЦІНКА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА ЇХНІХ СЕРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ВІД УЗАГАЛЬНЕНОГО ЛІНІЙНОГО РОЗМІРУ****М.В.Загірняк**, докт.техн.наук, **В.В.Прус**, канд.техн.наук, **Б.І.Невзлін**, канд.техн.наук,**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,**

вул. Першотравнева, 20, 39600, Кременчук, Україна.

E-mail: [mzagirn@kdu.edu.ua](mailto:mzagirn@kdu.edu.ua)

*Метою роботи була розробка метода порівнювального оцінювання електричних машин та їхніх серій із використанням уточнених залежностей основних параметрів від узагальненого лінійного розміру. Підтверджено низьку достовірність застосування існуючих співвідношень, що пов'язують масогабаритні та енергетичні показники електричних машин із причини відходу від ідеальних законів подібності у машинах різної потужності. Встановлено залежності енергетичних та електромагнітних параметрів електричних машин від узагальненого лінійного розміру. Отримано показники та запропоновано критерії для порівняння електричних машин та їхніх серій. Обгрунтовано вибір узагальненого лінійного розміру. Виконано порівняльну оцінку електричних машин відомих виробників. Наведено рекомендації щодо покращення параметрів електричних машин. Бібл. 11.*

**Ключові слова:** електрична машина, узагальнений лінійний розмір, параметри.

**ESTIMATION OF ELECTRIC MACHINES AND THEIR SERIES USING PARAMETER FUNCTIONAL DEPENDENCES ON THE GENERALIZED LINEAR SIZE****M.Zagirnyak, V. Prus, B.Nevzlin,****Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyy National University,**

vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine.

E-mail: [mzagirn@kdu.edu.ua](mailto:mzagirn@kdu.edu.ua)

*The aim of the paper consists in the development of the method for comparative estimation of electric machines and their series, using critical parameters corrected dependences on generalized linear size. Low reliability of applying existing relations connecting mass-overall size and power indices of electric machines due to the deviation from ideal scaling law in various-power machines has been confirmed. Electric machines electromagnetic and energy parameter dependences on the generalized linear size have been determined. The indices have been found and the criteria for comparison of electric machines and their series have been offered. The choice of the generalized linear size has been grounded. The comparative estimation of electric machines made by famous manufacturers has been carried out. Recommendations for improvement of electric machines parameters have been offered. References 11.*

**Key words:** electric machine, generalized linear size, parameter.

1. *Bespalov V. Ya., Borodin D.A., Borodin V.D.* Arnold constant // *Elektrichestvo*. – 2012. – No. 4. – Pp. 60-73. (Rus)
2. *Goldberg O.D. i dr.* Electric machine design. – Moskva: MGOU, 2001. – 161 p. (Rus)
3. *Zagirnyak M.V., Nevzlin B.I., Al-Mashakbeh A.S.* The comparative evaluation of dependences of the power parameters on the height of rotation axis of general industrial and special application induction electric motors // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"* – 2000. – Part. 4. – Pp. 60 – 63. (Rus)
4. *Ivanov-Smolenskii A.V.* Electric machines. – Moskva: Energiia, 1980. – 928 p. (Rus)
5. *Kopylov I.P., Klokov B.K.* Handbook on electric machines. – Moskva: Energoatomizdat, 1988. (Rus)
6. *Kostenko M.P., Piotrovskii L.N.* Electric machines, 2<sup>nd</sup> edition. – Leningrad: Energiia, 1964. – Part 1, 548 p.; – Leningrad: Energiia, 1965. – Part 2, 704 p. (Rus)
7. *Nevzlin B.I.* Concerning the problem of electric machine influence on its parameters // *Vestnik Vostochno-ukrainskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 1997. – No. 2. – Pp. 170-173. (Rus)
8. *Nevzlin B.I., Zagirnyak M.V.* Extension of the limits of rotating electric machine power parameters dependences on generalized linear dimension. Part 1. Refinement of rotating electric machine power parameters dependences on generalized linear dimension // *Izvestiia VUZov. Elektromekhanika*. – 2002. – No. 3. – Pp. 10-17. (Rus)
9. *Nevzlin B.I., Zagirnyak M.V.* Extension of the limits of rotating electric machine power parameters dependences on generalized linear dimension. Part 2. Research of real interconnections of electric machines parameters with the generalized linear dimension // *Izvestiia VUZov. Elektromekhanika*. – 2002. – No. 5. (Rus)
10. *Nevzlin B.I., Zagirnyak M.V.* Extension of the limits of rotating electric machine power parameters dependences on generalized linear dimension. Part 3. Assessment of the error in generalized linear dimension determination and correspondence of theoretical statements to experimental data. Comparison of electric machines series as to optimality criteria // *Izvestiia VUZov. Elektromekhanika*. – 2003. – No.1. – Pp. 17-23. (Rus)
11. *Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goriainov F.A.* Electric machine design. – Moskva: Energiia, 1969. (Rus)

Надійшла 21.01.13

Received 21.01.13