

УДК 621.316

М.В. Загирняк, В.В. Прус, Б.И. Невзлин

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ И КРИТЕРИИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Проаналізовано існуючі теоретичні й експериментальні залежності між енергетичними, електромагнітними та масогабаритними параметрами електричних апаратів. Обґрунтовано вибір узагальненого лінійного розміру. Отримано залежності енергетичних та електромагнітних параметрів електричних апаратів від лінійного розміру та виконана їх експериментальна перевірка. Розроблено критерії раціонального вибору електричних апаратів і їх серій, проведена оцінка їх практичного застосування.*

*Проанализированы существующие теоретические и экспериментальные зависимости между энергетическими, электромагнитными и массогабаритными параметрами электрических аппаратов. Обоснован выбор обобщенного линейного размера. Получены зависимости энергетических и электромагнитных параметров электрических аппаратов от линейного размера и выполнена их экспериментальная проверка. Разработаны критерии рационального выбора электрических аппаратов и их серий, проведена оценка их практического применения.*

### ВВЕДЕНИЕ

Многообразие электрических аппаратов (ЭА) [1-3] вызывает определенные затруднения в выработке единого подхода к оценке их свойств, прежде всего энергетических и массогабаритных. В то же время такой подход необходим для сравнительной оценки как аппаратов одного типа, изготавливаемых различными производителями, так и технического уровня (уровня качества проектирования) различных серий аппаратов между собой.

Целью работы является исследование взаимосвязи энергетических и электромагнитных параметров электрических аппаратов с их массогабаритными характеристиками, обоснование критериев рационального выбора электрических аппаратов и их серий.

### ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МАССОГАБАРИТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Проведенный для ряда ЭА анализ зависимостей между массогабаритными и энергетическими параметрами показал следующее. Грузоподъемные электромагниты постоянного тока [3] обладают неоднозначной и иногда нелинейной зависимостью как грузоподъемности, так и номинальной мощности от массы и, следовательно, линейного размера. При этом, если номинальная мощность может как опережать, так и отставать по степени увеличения от массы, то возрастание грузоподъемности – основного полезного параметра электромагнита, значительно отстает от роста общей массы и массы катушки.

Анализ массогабаритных и энергетических параметров ряда электромагнитных реле [4] показал, что зависимость между массой и рабочей мощностью реле является не только нелинейной, но и неоднозначной. Зачастую однотипное реле меньшей массы и габаритов имеет большую рабочую мощность.

В итоге был сделан вывод, что для однозначного описания габаритных характеристик ЭА необходимо определить, по аналогии с электрическими машинами (ЭМ) [5], условный геометрический размер. Так как габариты выражаются обычно в единицах длины, то и

условный геометрический размер необходимо определять как обобщенный линейный размер.

Следует отметить, что если в ЭМ, как правило, электромагнитная мощность незначительно отличается от полезной и, само собой разумеется, что машина с большей электромагнитной мощностью и более полезна – может производить большую работу, то в ЭА совсем не очевидно, что аппарат с большей номинальной или рабочей мощностью более эффективен. Это обусловлено тем, что в ЭА электромагнитная энергия часто не используется непосредственно как таковая, а определяет другие функции: эффективность коммутации; измерение определенных, не всегда электромагнитных параметров и т.д. И если в грузоподъемных электромагнитах связь между номинальной мощностью и грузоподъемностью представляется очевидной, хотя и нелинейной, то уже в электромагнитных реле полезными факторами являются значения пропускаемых через контакты токов и различных напряжений. Последние весьма опосредованно связаны с рабочей мощностью реле через усилия нажатия контактов, зазоры между контактами, ход якоря и т.п. В некоторых других видах ЭА, например, датчиках, связь между мощностью и полезным фактором еще менее очевидна.

Таким образом, для каждого вида ЭА необходимо, кроме условного геометрического размера, выделить одну или несколько полезных функций, для выполнения которых и предназначен аппарат, а затем искать взаимосвязь между геометрическими (массогабаритными) и непосредственно связанными с функцией ЭА энергетическими параметрами, что позволит сравнивать аппараты и их серии между собой и рационально выбирать их.

### ЗАВИСИМОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Как было показано на примере электрических машин и трансформаторов [5-6], правильный выбор обобщенного линейного размера и определение взаи-

© М.В. Загирняк, В.В. Прус, Б.И. Невзлин

мосвязей с ним основных энергетических и электромагнитных свойств является основой для обобщающих зависимостей паспортных и массогабаритных параметров, поскольку базируется непосредственно на положениях теории подобия.

*Формулирование обобщенного линейного размера для электрических аппаратов*

Выбор обобщенного линейного размера (ОЛР) осуществлялся на основе следующих предпосылок:

1. Для удобства использования ОЛР должен иметь размерность длины.
2. Исходными данными для получения ОЛР должны быть лишь доступные паспортные данные ЭА.
3. Для простоты использования ОЛР должен рассчитываться по относительно несложным формулам без дополнительных коэффициентов.

Исходя из этого, было предложено в качестве ОЛР принять среднее геометрическое трех габаритных размеров ЭА (длины  $a$ , ширины  $b$  и высоты  $h$ ):  $\ell = \sqrt[3]{abh}$ ;  $\ell_b = \sqrt[3]{a_b b_b h_b}$ , где  $\ell, \ell_b$  – соответственно ОЛР расчетного ЭА серии и ЭА, принятого в серии за базовый;  $a_b, b_b, h_b$  – соответственно длина, ширина и высота ЭА, принятого в серии за базовый.

За базовый может приниматься один из аппаратов серии: минимальной, средней или максимальной мощности.

В соответствии с полученными в [5] для ЭМ результатами, было сделано предположение, что зависимости активной мощности  $P_1$ , полной мощности  $S$ , массы  $m$ , напряжения  $U$ , силы  $F_t$  тяги, суммарных  $\Delta P_s$  потерь и коэффициента  $\gamma$  потерь мощности ЭА от ОЛР имеют вид

$$P_1 = k_{P1} \ell^{n_{P1}}; \quad (1)$$

$$S = k_S \ell^{n_S}; \quad (2)$$

$$m = k_m \ell^{n_m}; \quad (3)$$

$$U = k_U \ell^{n_U}; \quad (4)$$

$$F_t = k_{Ft} \ell^{n_{Ft}}; \quad (5)$$

$$\Delta P_s = k_{\Delta P} \ell^{n_{\Delta P}}; \quad (6)$$

$$\gamma = k_\gamma \ell^{n_\gamma}, \quad (7)$$

где  $k_p, k_S, k_m, k_u, k_{Ft}, k_{\Delta P}, k_\gamma$  – коэффициенты;  $n_p, n_S, n_m, n_u, n_{Ft}, n_{\Delta P}, n_\gamma$  – соответствующие показатели степени.

Расчет показателей степени в зависимостях (1) – (7) мощности, массы, напряжения, силы тяги, потерь и коэффициента потерь мощности от ОЛР и мощности в зависимости от массы был проведен по следующим формулам:

$$n_P = \ln(P/P_b) / \ln(\ell/\ell_b); \quad n_S = \ln(S/S_b) / \ln(\ell/\ell_b);$$

$$n_m = \ln(m/m_b) / \ln(\ell/\ell_b); \quad n_u = \ln(U/U_b) / \ln(\ell/\ell_b);$$

$$n_{Ft} = \ln(F_t / F_{tb}) / \ln(\ell/\ell_b); \quad n_{\Delta P} = \ln(\Delta P / \Delta P_{sb}) / \ln(\ell/\ell_b);$$

$$n_\gamma = \ln(\gamma/\gamma_b) / \ln(\ell/\ell_b),$$

где  $P_b, S_b, m_b, U_b, F_{tb}, \Delta P_{sb}, \gamma_b$  – соответственно мощность, полная мощность, масса, напряжение, сила тяги, потери и коэффициент потерь мощности ЭА, принятого в серии за базовый.

*Зависимость электрических характеристик от линейного размера*

В подавляющем большинстве ЭА способ охлаждения – естественная конвекция и от размеров (и мощности) аппарата не зависит. Допустимая температура перегрева определяется температурным индексом изоляции проводника, следовательно, также не зависит от  $\ell$ , если конструкторы не применяют в больших аппаратах изоляционные материалы с более термостойкой изоляцией. Это позволяет предположить неизменность способа охлаждения и независимость от  $\ell$  температуры перегрева проводников. Тогда можно считать тепловой поток  $Q$  на единицу площади постоянным, то есть принять его пропорциональным квадрату ОЛР  $\ell^2$ .

Из  $Q \sim \ell^2$  следует, что электрические потери в стационарном режиме также должны быть пропорциональны  $\ell^2$ :  $\Delta P_{Cu} \sim \ell^2$ . В то же время  $\Delta P_{Cu} = I^2 R_w = J^2 \rho_s^2 \ell_c / s_c = J^2 \rho_s \ell_c$ , где  $J$  – плотность тока;  $R_w$  – сопротивление обмотки;  $\rho$  – удельное сопротивление материала обмотки;  $s_c$  – площадь поперечного сечения катушки;  $\ell_c$  – длина проводника. Переходя к пропорциональности линейного размера, получаем  $\ell^2 \sim J^2 \ell^3$ . Считая  $\rho$  не зависящим от  $\ell$ , так как температура проводника неизменна, получим  $J \sim \ell^{-0.5}$ . Данный вывод совпадает с результатами, представленными в [5]. Аналогично, теплопроводность пропорциональна квадрату линейного размера. При  $\Delta P_{Cu} \sim \ell^2$  плотность тока не зависит от линейного размера.

В работе [5] установлено, что для геометрически подобных электромагнитных преобразователей энергии выполнение условия  $\Delta\theta = \text{const}$ , где  $\Delta\theta$  – превышение температуры проводника с током, определяет зависимость

$$J = k_J \ell^{-0.5}, \quad (8)$$

где  $k_J$  – коэффициент пропорциональности.

Для контактов в месте контактирования важными являются две температуры – размягчения  $\theta_1$  и плавления  $\theta_2$ . Для надежной работы контактов необходимо, чтобы их температура не превосходила  $\theta_1$ , то есть при постоянной температуре  $\theta_0$  окружающей среды  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0 = \text{const}$ . Согласно [7]  $\Delta\theta = I^2 \rho / (\lambda \Pi_s q)$ , где  $\rho$  – удельное сопротивление материала контактов,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности. Считая значения  $\rho$  и  $\lambda$  постоянными, периметр  $\Pi_s \sim \ell$ ; площадь сечения контактов  $q \sim \ell^2$ , получаем  $I^2 / \ell^3 = \text{const}$ , откуда, с учетом  $J \sim I / \ell^2$  находим  $I^2 \ell / \ell^4 = J^2 \ell = \text{const}$ . Следовательно, условием постоянства  $\Delta\theta$  является зависимость (8).

Если считать мощность  $P_{cp}$  в точке контакта пропорциональной  $\ell^2$ , тогда  $\Delta\theta = \text{const}$ , так как поверхность охлаждения тоже пропорциональна  $\ell^2$ :  $P_{cp} \sim I^2 R_c \sim S / (2r_c)$ , где  $R_c$  – сопротивление стягивания;  $r_c$  – радиус площадки контактирования. С учетом известной зависимости [8]:

$$r_c \sim \sqrt{F_{cp}}, \quad (9)$$

где  $F_{cp}$  – сила контактного нажатия, выполнение условия (8) возможно при

$$r_c \sim \ell \Rightarrow F_{cp} \sim \ell^2, \quad (10)$$

следовательно, сила нажатия контактов должна быть пропорциональна ОЛР в квадрате.

При этом необходимо отметить следующее:

1. Радиус площадки контактирования при изменении ОЛР остается пропорциональным радиусу подводящего проводника, что подтверждает выполнение принципа геометрического подобия.

2. Поскольку  $F_{cp} \sim \ell^2$ , то мощность аппарата (катушки реле, контактора) также пропорциональна  $\ell^2$ , что дает большой запас при увеличении ОЛР или накладывает жесткие ограничения при уменьшении ОЛР.

Если же поставить задачу поддержания неизменной плотности тока

$$J = \text{const}, \quad (11)$$

то нужно иметь в виду, что для выполнения (11) совместно с  $\Delta\vartheta = \text{const}$  (чтобы не изменять интенсивность охлаждения) необходимо выполнение следующих соотношений:

$$P_{cp} \sim S/(2r_c) \sim \ell^2 \Rightarrow I^2/r_c \Rightarrow \ell^2 \sim J^2 \ell^4/r_c \Rightarrow r_c \sim \ell^2 \Rightarrow F_{cp} \sim \ell^4. \quad (12)$$

Следовательно, при условии (11) сила нажатия и мощность аппарата пропорциональны четвертой степени ОЛР, что соответствует аналогичной зависимости для мощности в ЭМ. Однако следует иметь в виду, что соотношение (9) принято для одноточечного контакта при его пластической деформации. Если контакт многоточечный, то в соответствии с  $r_c \sim P_{cp}^{(0,7\dots1)}$  [7] в (10) получаем

$$F_{cp} \sim \ell^{(1\dots1,4)}, \quad (13)$$

а в (12)

$$F_{cp} \sim \ell. \quad (14)$$

В случае упругой деформации материала контакта [8] зависимость (9) имеет вид  $r_c \sim \sqrt[3]{F_{cp}}$ , а выражения (10) и (12) соответственно  $F_{cp} \sim \ell^3, F_{cp} \sim \ell^6$ .

С учетом (13) и (14) можно указать диапазон изменения показателя степени зависимости силы нажатия контактов от ОЛР для условий (8) и (11) соответственно  $F_{cp} \sim \ell^{(1\dots3)}, F_{cp} \sim \ell^{(2\dots6)}$ .

*Электродинамические силы между проводниками и контактами*

Электродинамические силы, возникающие между участками одного проводника и между двумя различными проводниками, вследствие взаимодействия проводника с током и магнитного поля определяются в соответствии с [9]:  $F_{pr} = k_4 i^2$ ;  $F_{in} = k_5 i_1 i_2$ , где  $k_4, k_5$  – коэффициенты пропорциональности;  $i$  – сила тока в проводнике;  $i_1, i_2$  – сила тока в двух взаимодействующих проводниках.

Переходя с использованием площадей сечения  $S_{wir}, S_{wir1}, S_{wir2}$  соответствующих проводников к плотностям токов, получаем  $F_{pr} = k_4 J^2 S_{wir}^2$ ;

$F_{in} = k_5 J_1 S_{wir1} J_2 S_{wir2}$ , а, учитывая пропорциональность площади сечения проводников квадрату ОЛР:  $F_{pr} \sim k_4 J^2 \ell^4$ ;  $F_{in} \sim k_5 J_1 J_2 \ell^4$ . Считая, что сила действия ограничивается пределом  $\sigma_t$  прочности, то  $F_{max} = k_6 \sigma_t S_{wir} \sim k_6 \sigma_t \ell^2$ , где  $k_6$  – коэффициент пропорциональности. Если считать  $\sigma_t = \text{const}$  и  $F_{pr} = F_{in} = F_{max}$ , то в первом случае  $k_4 J^2 \ell^4 = k_6 \sigma_t \ell^2$  и  $J \sim \sqrt{k_6/k_4}/\ell$ , а во втором случае  $k_5 J_1 J_2 \ell^4 = k_6 \sigma_t \ell^2$  и  $J_1 J_2 \sim (k_6/k_5)/\ell^2$ . Следовательно, в обоих случаях плотность тока обратно пропорциональна ОЛР.

Если на проводник (перемычку) действует момент  $M = i^2 r_c k_7 \sim J^2 \ell^4 \ell k_7 = J^2 \ell^5 k_7$ , где  $k_7$  – коэффициент пропорциональности, и в тоже время предельный момент  $M_{max} \sim \sigma_t S_{wir} / \ell \sim k_8 \sigma_t \ell^3$ , где  $k_8$  – коэффициент пропорциональности, то  $k_8 \sigma_t \ell^3 = J^2 \ell^5 k_7$  и  $J \sim 1/\ell$ .

Как было показано в [6], в мощных трансформаторах высокого напряжения на ОЛР влияют конструктивные факторы, мощность и напряжение. Однако основным является влияние мощности. Это объясняется значительными габаритами, определяемыми мощностью в силу того, что силовые трансформаторы высокого напряжения имеют большую мощность, и необходимые воздушные промежутки в значительной мере обеспечиваются за счет больших габаритов.

В отличие от трансформаторов, в ЭА высокого напряжения габариты определяются не столько мощностью, сколько необходимостью создания изоляционных промежутков для предотвращения возникновения процесса пробоя. Длина изоляционного промежутка определяется пробивным напряжением  $U_{dc}$ , которое при атмосферном давлении и промежутках порядка миллиметров и более определяется как [10]:  $U_{dc} = a_0 I_{in} + b_0 \sqrt{I_{in}}$ , где  $a_0, b_0$  – коэффициенты;  $I_{in}$  – длина изоляционного промежутка. Учитывая, что для воздуха  $a_0/b_0 \approx 4$ , можно для промежутков порядка десятков сантиметров с погрешностью, не превышающей 1,5 %, считать зависимость пробивного напряжения от изоляционного промежутка линейной.

*Зависимость энергетических параметров от линейного размера*

В отличие от ЭМ [5], для ЭА определяемые энергетические параметры напрямую связаны с работой, развиваемой рабочим органом, и различными ее составляющими. Так, качество ЭА тягового типа напрямую определяется значением развиваемого усилия и затрачиваемой на это работой. Кроме этого, важными энергетическими параметрами всех типов ЭА являются КПД и плотность тока в обмотке, определяющие соответственно их эффективность и тепловые режимы работы.

Представляет интерес взаимосвязь силы тяги электромагнита и ОЛР для геометрически подобных

электромагнитов (ГПЭ). По аналогии с геометрически подобными ЭМ [11], геометрически подобными электромагнитами можно назвать такие электромагниты, в которых все размеры при изменении ОЛР изменяются в одинаковое число раз. Предварительно в качестве ОЛР  $\ell$  для ГПЭ можно принять корень кубический из габаритного объема ГПЭ  $\ell = \sqrt[3]{abh}$ , где  $a$  – длина;  $b$  – ширина;  $h$  – высота ГПЭ.

Согласно [7], сила  $F_t$  тяги электромагнита при ненасыщенной магнитной цепи может быть найдена как  $F_t = B_p^2 s_{nm} / 2\mu_0$ , где  $B_p$  – магнитная индукция в полюсе;  $s_{nm}$  – площадь поперечного сечения, нормального к направлению магнитного потока;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума. Считая площадь пропорциональной квадрату ОЛР и выразив магнитную индукцию через напряженность  $H$  магнитного поля в воздушном зазоре между полюсом и якорем ГПЭ, получаем

$$F_t \sim 0,5 \mu_0 H^2 \ell^2. \quad (15)$$

При этом для упрощения было принято, что поле в воздушном зазоре между полюсом и якорем равномерное и для него

$$H = IW / l_\delta, \quad (16)$$

где  $I$  – ток в обмотке ГПЭ,  $W$  – число витков обмотки ГПЭ,  $l_\delta$  – длина воздушного зазора между полюсом и якорем.

Погрешность, вызываемая предположением о равномерности поля в зазоре между полюсом и якорем, невелика в силу, как правило, небольшого значения отношения длины воздушного зазора к поперечному линейному размеру полюса. Переходя к плотности  $J$  тока в проводнике обмотки с площадью  $s_{wir}$  поперечного сечения находим из (15) с учетом (16):  $F \sim 0,5 \mu_0 J^2 s_{wir}^2 \ell^2 / \delta^2$ . Полагая  $W$  независимым от ОЛР,  $\delta$  пропорциональным ОЛР, а  $s_{wir}$  пропорциональной квадрату ОЛР, получаем

$$F_t \sim J^2 \ell^4 \ell^2 / \ell^2 = J^2 \ell^4. \quad (17)$$

Согласно [5] для геометрически подобных ЭМ, если основываться на постоянстве температуры перегрева обмоток, плотность тока обратно пропорциональна корню квадратному из ОЛР. Поскольку обмотки ГПЭ принципиально не отличаются от обмоток ЭМ, то можно считать, что для них также справедливо (8). Из (17) с учетом (8) получаем

$$F_t \sim \ell^3. \quad (18)$$

Таким образом, сила тяги электромагнита пропорциональна кубу ОЛР, если плотность тока в обмотке обратно пропорциональна корню квадратному из ОЛР.

Если же считать, как в [11], плотность тока не зависящей от ОЛР, то сила тяги ГПЭ пропорциональна четвертой степени ОЛР, т.е. из  $J = \text{const}$  следует

$$F_t \sim \ell^4. \quad (19)$$

Однако для выполнения (19) необходимо с увеличением ОЛР интенсифицировать охлаждение обмотки, так как ее площадь охлаждения пропорциональна  $\ell^2$ , а тепловой поток на единицу площади, как

это показано в [5], пропорционален  $\ell$ . Следовательно, с ростом ОЛР для поддержания постоянной температуры перегрева обмотки необходимо увеличивать коэффициент теплоотдачи.

Для выбора между зависимостями (18) и (19) рассмотрим влияние ОЛР на силу  $F_s$ , необходимую для изгиба плоской пружины, на которой находится электрический контакт. Электромагнит и пружина с контактом являются частями электромагнитного реле. Согласно [12], сила прогиба плоской пружины может быть представлена в виде  $F_s = b_{sp} h_{sp}^2 \sigma_c / (6 l_F)$ , где  $b_{sp}$ ,  $h_{sp}$  – ширина и толщина пружины;  $l_F$  – расстояние от точки заземления до точки приложения силы;  $\sigma_c$  – напряжение изгиба в пружине.

Поскольку  $b_{sp}$ ,  $h_{sp}$  и  $l_F$  являются линейными размерами и, следовательно, могут считаться пропорциональными ОЛР, а напряжение изгиба, очевидно, не зависит от ОЛР, то можно считать, что  $F_s \sim \ell \ell^2 / \ell = \ell^2$ . Следовательно, сила, необходимая для прогиба плоской пружины на единичное расстояние, пропорциональна квадрату ОЛР. Однако, если расстояние, на которое необходимо произвести прогиб пружины, должно быть пропорционально ОЛР (например, при изменении всех размеров электромагнитного реле, в том числе и провала контактов, в соответствии с изменением ОЛР), то становится очевидным, что необходимая для этого сила  $F'_s$  должна быть получена путем умножения  $F_s$  на  $\ell$ :

$$F'_s = F_s \ell \sim \ell^3. \quad (20)$$

Таким образом, если электромагнитное реле в целом подчиняется принципу геометрического подобия, то сила тяги ГПЭ, найденная по (18) имеет тот же вид, что и сила, необходимая для привода контактной системы реле (20). Следовательно, в этом случае сила тяги, являясь достаточной для одного реле из ряда геометрически подобных аппаратов, будет необходимой и достаточной для всех остальных реле из этого ряда. Поэтому зависимость (18) является наиболее естественной для ГПЭ, плотность тока зависит от ОЛР по (8) и в интенсификации охлаждения ГПЭ при росте линейных размеров нет необходимости.

*Связь работы электромагнита с его линейным размером*

Поскольку можно считать силу  $F_t \sim B^2 s_p$  [7], где  $B$  – магнитная индукция;  $s_p$  – площадь полюса, то при  $J = \text{const}$  и геометрическом подобии МДС пропорциональна  $\ell^2$ , а воздушный зазор –  $\ell$ . Тогда, если магнитная цепь не насыщена,  $H \sim \ell^2 / \ell \sim \ell$ , а индукция  $B \sim \ell$  и  $F_t \sim \ell^2 \ell^2 \sim \ell^4$ .

Если из постоянства температуры нагрева  $J \sim \ell^{-0,5}$ , то тогда МДС пропорциональна  $\ell^{1,5}$ , а воздушный зазор пропорционален линейному размеру и напряженность  $H \sim \ell^{1,5} / \ell \sim \ell^{0,5}$ , откуда  $B \sim \ell^{0,5}$ ,  $F_t \sim \ell \ell^2 \sim \ell^3$ .

При неизменности магнитной индукции  $F_t \sim \ell^2$ .

В первом случае произведенная электромагнитом при включении работа  $A = F_i \delta \sim \ell^4 \ell \sim \ell^5$ , во втором  $A = F_i \delta \sim \ell^3 \ell \sim \ell^4$ , в третьем  $A = F_i \delta \sim \ell^2 \ell \sim \ell^3$ .

Мощность  $P = F_i v \sim \ell^{2...4} \ell = \ell^{3...5}$  (здесь  $v$  – линейная скорость якоря). В ЭМ же мощность пропорциональна  $\ell^{(3,5...4)}$  [5].

*Зависимость КПД электрических аппаратов от линейного размера*

В теории и практике ЭМ, как и в других областях техники, одним из важнейших параметров считается коэффициент полезного действия (КПД). Этот параметр наряду с такими определяющими факторами, как тип, мощность и частота вращения ЭМ, приводят во всех справочных и паспортных данных и выносят на таблички, размещаемые на корпусе соответствующего устройства. В то же время для ЭА, в том числе коммутационных, КПД не считается важнейшим параметром. Возможно, это имеет место по двум причинам.

Во-первых, само понятие КПД для ЭА не определено. Если для ЭМ это отношение полезной мощности, т.е. мощности, отдаваемой в нагрузку, к потребленной мощности, то для ЭА, например, коммутационных, это скорее отношение мощности, пропущенной на коммутируемое устройство, к мощности, полученной от одного или нескольких источников, обычно из сети. Пропущенная мощность не всегда может считаться полезной, т.к. прежде чем совершить работу она может пройти ещё несколько преобразований, в том числе и по виду энергии.

Во-вторых, для коммутационных ЭА КПД, определенный как отношение мощности, пропущенной к последующим электротехническим устройствам, например, ЭМ, к мощности, потребленной ЭА, как правило, весьма близок к 100 %.

Так, например КПД магнитного пускателя ПМЕ-100, включенного на номинальное напряжение  $U_n$  и ток  $I_n$  составляет [13]:

$$\eta = 1 - \Delta P_s / (U_n I_n) = 1 - (P_n + 2R_c I_n^2) / (U_n I) = 1 - (3,6 + 2 \cdot 0,04 \cdot 1,5^2) / (500 \cdot 1,5) = 0,99496 \Rightarrow 99,496 \%$$

где  $\Delta P_s$  – суммарные потери мощности в пускателе;  $P_n$  – номинальная мощность обмотки,  $P_n = 3,6$  Вт;  $R_c$  – переходное сопротивление контакта пускателя ПМЕ-100 при длительном прохождении номинального тока.

Аналогично такими же высокими будут КПД других пускателей, предохранителей и прочих (других есть) видов ЭА, отличаясь друг от друга только в третьем знаке. Естественно, такими КПД пользоваться достаточно неудобно.

В связи с этим было предложено для рассматриваемых ЭА применять параметр "коэффициент  $\gamma$  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, поскольку они различаются незначительно. Определим коэффициент потерь мощности через коэффициент  $\eta$  полезного действия. Поскольку  $\eta = P_2 / P_1$ , где  $P_2$  – полезная мощность,  $P_1$  – потребляемая мощность, тогда

$$\gamma = P_1 - P_2 / P_1 = 1 - \eta = P_1 / P_1 - P_2 / P_1 = \Delta P_s / P_1,$$

где  $\Delta P_s$  – мощность потерь.

Для реле переменного тока  $\gamma = \Delta S / S_1$ . Мощность потерь реле переменного тока  $\Delta S = UI \approx EI = 4,44 W f \Phi_m I = 4,44 W f B_m S_{st} J s_{win}$ , где  $S$  – полная мощность;  $E$  – ЭДС катушки;  $f$  – частота тока;  $\Phi_m$ ,  $B_m$  – амплитуда магнитного потока и индукции;  $S_{st}$ ,  $s_{win}$  – площадь стали и меди обмотки. Принимая  $W f B_m J = \text{const}$ , а  $s_{st} \sim \ell^2$  и  $s_{win} \sim \ell^2$ , получаем, что  $\Delta S \sim \ell^4$ . Следовательно, потери мощности в катушке реле пропорциональны четвертой степени ОЛР в отличие от ЭМ, где потери пропорциональны третьей степени.

Рассмотрим мощность, пропускаемую реле, которую можно принять потребляемой. Полагая напряжение между контактами реле пропорциональным ОЛР, а ток, протекающий по контактам, пропорциональным сечению контактов, то есть квадрату ОЛР, при неизменности плотности тока, получаем, что полная мощность, пропускаемая реле,  $S_1 \sim \ell^3$ . Таким образом,  $\gamma = \Delta S / S_1 \sim \ell^4 / \ell^3 = \ell$ .

*Зависимость плотности энергии поля от линейного размера*

В соответствии с теорией электромагнитного поля [14], плотность энергии частных случаев общего поля – магнитного и электрического составляет соответственно:  $w_m = BH/2$ ;  $w_{el} = DE/2$ , где  $B$  и  $H$  – индукция и напряженность магнитного поля;  $D$  и  $E$  – индукция и напряженность электрического поля. Таким образом, энергия ограниченного объема поля очевидно пропорциональна этому объему, и, следовательно, кубу ОЛР при постоянстве параметров поля:

$$W_{vm} \sim BH\ell^3; W_{vel} \sim DE\ell^3. \quad (21)$$

Как было показано в [5], для ЭМ, основанных на использовании магнитного поля, преобразование энергии в которых происходит в воздушном зазоре, мощность, а, следовательно, и энергия в единицу времени, пропорциональна четвертой степени ОЛР. В [5] показано, что степень зависимости мощности от ОЛР может изменяться в пределах 3,5...5 для электрических машин различных габаритов, причем с увеличением мощности показатель степени имеет тенденцию к понижению.

Рассмотрим, какой вид принимает выражение (21) безотносительно к конструкции преобразователя энергии.

В индуктивных машинах с электромагнитным возбуждением для создания магнитного поля необходим индуктор, представляющий собой катушку или проводник с током. Представляется очевидным, что напряженность магнитного поля пропорциональна току индуктора (числу ампер-витков), отнесенному к ОЛР. Если плотность тока в индукторе постоянна, то с учетом  $I = JS \sim J\ell^2$  получаем:  $H \sim I/\ell \sim J\ell^2/\ell = J\ell$ . В этом случае возможны два варианта зависимости магнитной индукции от  $H$ : линейная зависимость и нелинейная зависимость вплоть до насыщения. В первом случае формула (21) преобразуется к виду

$$W_{vm} \sim BH\ell^3 = \mu_0 H^2 \ell^3 \sim J^2 \ell^2 \ell^3 = J^2 \ell^5, \quad (22)$$

во втором случае, считая стальные участки магнито-провода насыщенными и  $B = \text{const}$  получим

$$W_{vm} \sim BH\ell^3 \sim J^2\ell\ell^3 = J^2\ell^4. \quad (23)$$

В [5] показано, что для выполнения условия постоянства температуры перегрева обмоток и неизменности вида и интенсивности их охлаждения, т.е. постоянства теплоотдачи с поверхности проводников, плотность тока должна быть обратно пропорциональна корню квадратному из ОЛР. При этом выражения (22) и (23) принимают соответственно вид

$$W_{vm} \sim J^2\ell^5 \sim (1/\ell)\ell^5 = \ell^4,$$

$$W_{vm} \sim J^2\ell^4 \sim (1/\sqrt{\ell})\ell^4 = \ell^{3,5}.$$

Для анализа зависимости энергии поля от ОЛР в емкостных преобразователях, т.е. основанных на использовании электрического поля, запишем выражение (21) с учетом  $D = \epsilon\epsilon_0 E$ ,  $U = E\ell$ , откуда

$$W_{vel} \sim \epsilon\epsilon_0 E^2 \ell^3 = \epsilon\epsilon_0 U^2 \ell, \quad (24)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

В соответствии с изложенным и существующей градацией напряжения на низкое и высокое можно отметить следующее: в электромагнитных устройствах низкого напряжения, так же как и в электромагнитной технике сверхвысокого напряжения, ОЛР можно считать зависящим не от конкретного напряжения, а от его класса. В этом случае зависимость энергии поля от ОЛР носит линейный характер (24), а зависимость энергии и мощности от ОЛР электромагнитной техники высокого напряжения подчиняется кубическому закону.

*Зависимость температуры контактов и силы контактного нажатия от обобщенного линейного размера*

В соответствии с теорией нагрева контактов [15], максимальное превышение температуры в месте контактирования проводников определяется как  $\Delta\vartheta_m = \rho I^2 / (k_{\Delta\vartheta} \Pi_s q) + R_c I^2 / (2\sqrt{\lambda k_{\Delta\vartheta} \Pi_s q})$ , где  $R_c$  – переходное сопротивление контактов;  $k_{\Delta\vartheta}$  – температурный коэффициент;  $\Pi_s$  – периметр сечения проводника;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Учитывая, что  $I = JS \sim (\ell^2 / \ell^{0,5}) = \ell^{1,5}$ ,  $\Pi_s \sim \ell$ ,  $s_c \sim \ell^2$ ,  $R = \rho \ell / s_c^2 \sim 1/\ell$ , получаем

$$\Delta\vartheta_m \sim k_{\Delta\vartheta 1} \ell^3 / (\ell \ell^2) + k_{\Delta\vartheta 2} \left( \frac{1}{\ell} \ell^3 \right) / \left( \sqrt{\ell \ell^2} \right) = k_{\Delta\vartheta 1} + k_{\Delta\vartheta 2} \ell^{0,5},$$

где  $k_{\Delta\vartheta 1}$ ,  $k_{\Delta\vartheta 2}$  – коэффициенты пропорциональности.

Следовательно, максимальная температура контактов в месте контактирования растет медленнее, чем прямо пропорционально ОЛР. Таким образом, при расчете конструкций контактов необходимо обеспечить меры по отводу тепла при увеличении их габаритов или уменьшать плотность тока с большим показателем степени, чем 0,5. Скажем, при  $J \sim \ell^{-0,63}$ :

$$I = J s_{wir} \sim \ell^2 / \ell^{0,63} = \ell^{1,37}$$

и

$$\Delta\vartheta_m \sim k_{\Delta\vartheta 1} \ell^{2,74} / (\ell \ell^2) + k_{\Delta\vartheta 2} \ell^{2,74} / (\ell \sqrt{\ell \ell^2}) =$$

$$= k_{\Delta\vartheta 1} 1/\ell^{-0,26} + k_{\Delta\vartheta 2} \ell^{0,24}.$$

Сила контактного нажатия определяется по [15]:

$$F_{cp} = \pi \sigma \left\{ 4n_a \left[ \theta \left( \frac{\rho I^2}{k_{\Delta\vartheta} p q} \right) + \frac{R_c I^2}{2\sqrt{\lambda k_{\Delta\vartheta} p q}} \right] \right\},$$

где  $\sigma$  – сопротивление контактного материала смятию;  $n_a$  – число площадок контактирования. Отсюда, переходя к пропорциональности ОЛР, получаем:

- при  $J \sim \ell^{-0,5}$ ,  $F_{cp} \sim 1 / (\Delta\vartheta k_{Fc1} + k_{Fc2} \ell^{0,5})$ ,
- при  $J \sim \ell^{-1}$ ,  $F_{cp} \sim 1 / \left( \Delta\vartheta k_{Fc1} \frac{1}{\ell^{0,26}} + k_{Fc2} \ell^{0,24} \right)$ ,

где  $k_{Fc1}$ ,  $k_{Fc2}$  – коэффициенты пропорциональности.

Следовательно, при рассмотренных зависимостях  $J$  от ОЛР сила нажатия контактов остается практически неизменной при росте ОЛР. При токах короткого замыкания в сотни и тысячи ампер в контактах начинают заметно проявляться механические силы, которые практически не ощутимы при малых токах. При протекании тока короткого замыкания по проводнику в зоне контакта, развивается электромагнитное давление, сжимающее проводник [15]:  $p_{em} = 2 \cdot 10^{-7} I^2 / 3\pi r_0^2$ , где  $r_0$  – радиус проводника в точке контакта. Переходя к пропорциональности ОЛР, получаем при  $J \sim \ell^{-0,5}$ :  $p_{em} \sim \ell^3 / \ell^2 = \ell$ , таким образом, давление возрастает прямо пропорционально ОЛР.

Сила электромагнитного сжатия вызывает появление усилия, совпадающего с осью проводника. Чтобы компенсировать возникающие в контактах силы отталкивания, увеличивающиеся с ростом размеров ЭА, начиная с некоторого габарита, необходимо применение электродинамических компенсаторов этих сил.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАВИСИМОСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Для проверки и уточнения полученных выше зависимостей был проведен ряд численных экспериментальных исследований. В ходе экспериментов массогабаритные, электромагнитные и энергетические характеристики ЭА определялись из паспортных данных, чертежей и других источников, а также путем измерений без использования теоретических предположений [16]. Экспериментальным материалом была охвачена максимально широкая шкала мощностей: от 50 мВт до 4 МВА и типов ЭА, как низкого так и высокого напряжения. Рассматривались наиболее широко используемые в промышленности типы ЭА: разъединители внутренней установки, разъединители наружной установки, масляные многообъемные выключатели, электромагнитные реле, предохранители, автоматические выключатели. Основным критерием выбора модели являлась ее распространенность, как следствие, значительная проходная мощность всех ЭА дан-

ной модели, и, таким образом, возможные существенные потери мощности в данных ЭА. Для различных ЭА, в зависимости от выполняемой функции, исследовались соответственно зависимости основных функциональных параметров (проходной мощности, потерь мощности, напряжения, силы тяги, коэффициента потерь мощности) от обобщенного линейного размера (ОЛР).

*Проверка зависимостей энергетических параметров от обобщенного линейного размера*

На основании паспортных данных *разъединителей внутренней установки* [17] и зависимостей их характеристик от массогабаритных параметров [16] были определены значения величин, характеризующих зависимость проходной мощности от ОЛР. Для расчета ОЛР в соответствии с [16] были выбраны габаритные размеры из паспортных данных, доступные без непосредственных замеров. Расчетный показатель  $n_S$  степени был получен как среднее арифметическое значений показателей степени зависимости проходной мощности  $S$  от ОЛР  $n_{Smin}$ ,  $n_{Sav}$ ,  $n_{Smax}$  при базовом разъединителе соответственно минимальной (4000 кВА), средней (20000 кВА) и максимальной (250000 кВА) мощности.

При дальнейшем анализе поведения  $n_S$  (рис. 1) использовалась его аппроксимация зависимостью вида

$$n_S = n_{Sc} + \frac{n_{Sv}}{(\ell/\ell_b)^{k_9}}, \quad (25)$$

где  $n_{Sc}$  – постоянная составляющая;  $n_{Sv}$  – коэффициент;  $k_9$  – показатель степени.

Для данных на рис. 1 постоянная составляющая  $n_{Sc} = 2,97$  при  $k_9 = 1,5$ ; коэффициент  $n_{Sv} = -1,08$ , коэффициент корреляции  $k_\sigma = 0,882$ ; при этом критерий Фишера

$$F_0 < F_{cr} \quad (1,34 < 4,28),$$

где  $F_{cr}$  – критическое значение критерия Фишера для приведенных данных [18].

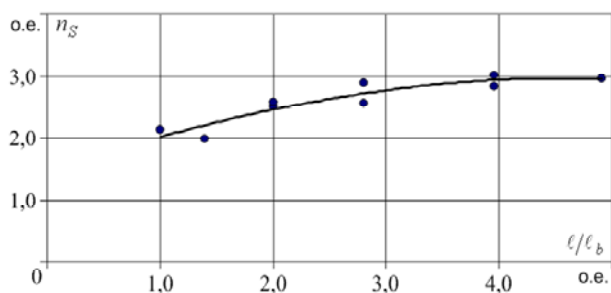


Рис. 1. Зависимость показателя  $n_S$  степени от относительного ОЛР для разъединителей внутренней установки

Таким образом, теоретическая модель подтверждается экспериментально. Показатель  $n_S$  степени зависимости проходной мощности разъединителей внутренней установки от ОЛР при росте последнего стремится к 2,97, что лишь на 1 % отличается от теоретического значения 3,00.

*Автоматические выключатели торговой марки Lexic фирмы Legrand серии DPX* на максимальный ток от 125 до 1600 А оснащаются магнитотермическими или электронными расцепителями в стационарном исполнении. На основании паспортных данных авто-

матов [19] и зависимостей их характеристик от массогабаритных параметров [16] были определены значения величин, характеризующих зависимость проходной мощности от ОЛР. Расчеты были проведены аналогично представленным для разъединителей внутренней установки при базовом автомате соответственно минимальной (62500 кВА), средней (276000 кВА) и максимальной (1104000 кВА) мощности. При аппроксимации зависимости показателя  $n_S$  степени от ОЛР  $\ell$  зависимостью вида (25), ее постоянная составляющая  $n_{Sc} = 3,57$  при  $p = 3$  (рис. 2); коэффициент  $n_{Sv} = -0,90$ , коэффициент корреляции  $k_\sigma = 0,850$ .

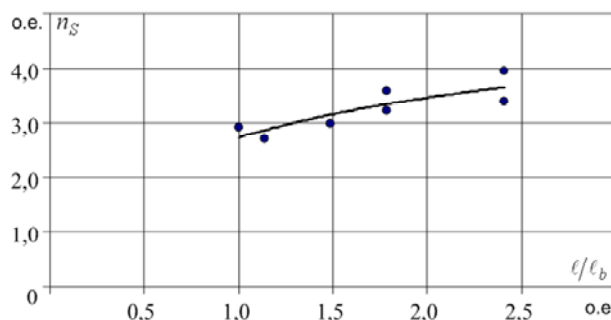


Рис. 2. Зависимость показателя  $n_S$  степени от относительного ОЛР для автоматических выключателей торговой марки Lexic фирмы Legrand серии DPX

Таким образом, показатель степени зависимости проходной мощности автоматических выключателей торговой марки Lexic фирмы Legrand серии DPX от ОЛР при росте последнего стремится к 3,57, что на 19 % отличается от теоретического значения 3.

Более близкие к теоретическим результаты были получены для *автоматических выключателей фирмы ABB SACE серий Isotax S и Tmax T*, выполняемых на максимальный ток от 125 до 1600 А в литых корпусах с микропроцессорным управлением [19], а также многофункциональных *автоматических выключателей фирмы Moeller серии LZM* такого же токового диапазона с микропроцессорным расцепителем.

Для них постоянная составляющая в зависимости (25) составила соответственно  $n_{Sc} = 2,87$ ; 2,70; 2,84 при  $k_9 = 3$ ; коэффициент  $n_{Sv} = 0,43$ ; 0,31; 0,56. Показатель  $n_S$  степени зависимости проходной мощности от ОЛР при соответствующем изменении последнего стремится к значениям 2,87; 2,7; 2,84, что на 4,3, 10 и 5,3 %, соответственно, отличается от теоретического значения 3.

Аналогичным образом была доказана адекватность полученных теоретических соотношений для разъединителей наружной установки и электромагнитных нейтральных одностабильных реле серии РЭС.

*Проверка зависимостей электромагнитных параметров от обобщенного линейного размера.*

На основании паспортных данных *отделителей* [17] и зависимостей их характеристик от массогабаритных параметров [16] были определены значения величин, характеризующих зависимость напряжения  $U$  от ОЛР. Расчетный показатель  $n_u$  степени был получен как среднее арифметическое значений показателей степени зависимости проходной мощности  $U$  от ОЛР  $n_{umin}$ ,  $n_{uav}$ ,  $n_{umax}$  при базовом отделителе

соответственно минимального (35 кВ), среднего (110 кВ) и максимального (220 кВА) напряжения.

При дальнейшем анализе поведения  $n_u$  (рис. 3) использовалась его аппроксимация зависимостью вида

$$n_u = n_{uc} + \frac{n_{uv}}{(\ell/\ell_b)^{k_{13}}}, \quad (26)$$

где  $n_{uc}$  – постоянная составляющая;  $n_{uv}$  – коэффициент;  $k_{13}$  – показатель степени.

При этом ее постоянная составляющая  $n_{uc} = 1,08$  при  $k_{13} = -1$ ; коэффициент  $n_{uv} = 0,223$ , коэффициент корреляции  $k_{\sigma} = 0,771$  и критерий Фишера

$$F_0 < F_{cr} (1,68 < 6,39),$$

где  $F_{cr}$  – критическое значение критерия Фишера для приведенных данных [18].

Таким образом, теоретическая модель подтверждается экспериментально. Показатель  $n_u$  степени зависимости напряжения отделителей от ОЛР при уменьшении последнего стремится к 1,08, что на 8 % отличается от теоретического значения 1,00.

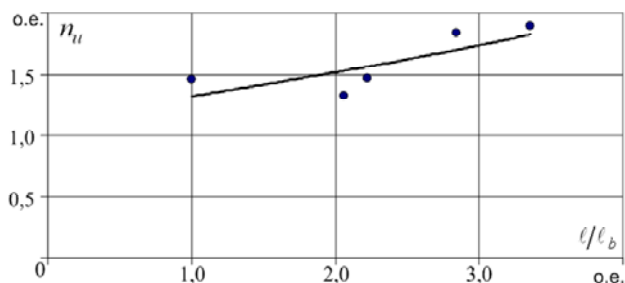


Рис. 3. Зависимость показателя  $n_u$  степени от относительного ОЛР для отделителей

### РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ИХ СЕРИЙ

Целью рационального выбора ЭА представляется выбор аппарата, для которого при прочих равных условиях является минимальной сумма затрат на приобретение ЭА, платы за занимаемую площадь для крупных ЭА и стоимости потерь мощности за определенный период работы.

Величинами, необходимыми для сравнения аппаратов из двух различных серий являются [16, 19]:

1. Пропускаемая полная мощность  $S$  и показатель  $n_S$  степени в формуле (2), отражающей изменение этой мощности в зависимости от ОЛР  $\ell$ .

2. Коэффициент  $\gamma$  потерь мощности (КПМ), который представляет собой расход энергии на выполнение функций ЭА и определяется как отношение мощности потерь в ЭА к мощности на его входе или к пропускаемой мощности, поскольку они различаются незначительно [16], а также показатель  $n_\gamma$  степени в формуле (7), отражающей изменение КПМ в зависимости от ОЛР  $\ell$ .

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

$$S_{mr} = S/m,$$

где  $S$  – пропускаемая через ЭА полная мощность;  $m$  – масса ЭА и показатель

$$n_{Sm} = n_S - n_m;$$

$n_m$  – показатель степени в (3), характеризующий изменение массы ЭА в зависимости от ОЛР.

С целью получения аналитического выражения для критерия рационального выбора ЭА, учитывающего приведенные выше величины, был выполнен расчет их весовых показателей.

Весовым показателем потерь мощности является коэффициент  $k_{p1}$  пропорциональности в формуле (1), отражающей зависимость мощности  $P_1$  от ОЛР  $\ell$ , поскольку эта мощность (электроэнергия) теряется безвозвратно – обращается в тепло в катушке, на повышенных сопротивлениях контактов (сопротивлениях стягивания, переходных сопротивлениях, зонах повышенных температур из-за разогрева контактов), в предохранителях на повышенных сопротивлениях из-за сужения проводников, дополнительных сопротивлениях тепловых реле и т.д.

Весовой показатель  $k_{Sw}$  пропускаемой мощности был определен как произведение усредненного коэффициента  $\eta_a$  полезного действия (КПД) устройств на их усредненный коэффициент мощности

$$k_{Sw} = \eta_a \cos \varphi_a.$$

В цепях постоянного тока  $\cos \varphi_a = 1$ , поэтому  $k_{Sw}$  должен быть выше, чем в цепях переменного тока. Но, если скоррелировать его значения с изменением КПД  $\eta_{IM}$  асинхронных двигателей (АД) и  $\eta_{DCM}$  двигателей постоянного тока (ДПТ) одинаковой мощности по группам мощностей (табл. 1), можно увидеть, что для двигателей мощностью до 20 кВт, суммарное энергопотребление которых составляет около 75 % электроэнергии, используемой двигательной нагрузкой, различие в значениях  $k_{Sw}$ , определяемых по данным столбцов 4 и 5 табл. 1, незначительно. При этом для двигателей в диапазоне мощностей 1-5 кВт, суммарное энергопотребление которых превышает 40 % от общего энергопотребления двигательной нагрузки, указанные значения практически совпадают. Для АД и ДПТ больших мощностей различие  $k_{Sw}$  также невелико. Следовательно, при нагрузках любого рода значение  $k_{Sw}$  можно принять таким, как для АД.

Таблица 1

Показатели двигателей

$P_n$ , кВт	$\eta_{IM}$	$\cos \varphi_{IM}$	$\eta_{IM} \cos \varphi_{IM}$	$\eta_{DCM}$
0,75	0,77	0,87	0,67	0,7
4	0,86	0,89	0,77	0,77
15	0,88	0,91	0,80	0,86
110	0,93	0,90	0,84	0,89
160	0,94	0,91	0,86	0,90

С учетом этого, было рассчитано средневзвешенное значение  $k_{Swa}$  показателя  $k_{Sw}$

$$k_{Swa} = \sum_{i=1}^5 k_{Swa} Q_{Si} = 0,7925 \approx 0,8,$$

где  $k_{Swa}$  – коэффициент  $k_{Sw}$  для двигателей определенного диапазона мощностей (табл. 1);  $Q_{Si}$  – доля электроэнергии, потребляемой двигателями этого диапазона мощностей.

Весовой показатель  $k_{Sm}$  удельной по массе мощности может быть найден как обозначаемое  $C_{ms}$  отно-



шение усредненной стоимости удельной массы на 1 кВт пропускаемой мощности к общей стоимости  $C_{es}$  электроэнергии, пропущенной ЭА за время  $T$  его работы без капитального ремонта (предположительно 10 лет).

Усредненную стоимость  $C_{ms}$  удельной массы необходимо определять как отношение стоимости  $C$  ЭА, например, контактора или реле, в современных ценах к пропускаемой мощности  $C_{ms} = C/S$ .

Таким образом,

$$k_{Sm} = \frac{C_{ms}}{C_{es}} = \frac{C}{STC_e},$$

где  $C_e$  – стоимость электроэнергии.

Расчеты, проведенные для однополюсного автоматического выключателя типа С25 на напряжение 250 В, ток 25 А дали значение  $k_{Sm} = 0,268 \cdot 10^{-4}$ .

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

$$k_{rs} = \gamma/k_S + k_{Sm} \rightarrow \min. \quad (27)$$

Первое слагаемое в (27) представляет потери мощности в ЭА с учетом весового показателя безотносительно ко времени работы ЭА, поскольку потери в ЭА существуют всегда, когда он работает (пропускает мощность в нагрузку).

Второе слагаемое связано с определенными временными рамками – 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.

*Критерий рационального выбора серий электрических аппаратов*

По аналогии с предложенным в [6] для электрических машин, с целью нахождения критерия рационального выбора серий ЭА был введен генеральный показатель

$$n_g = 0,8n_S - n_{p1} - k_{Sm}n_m, \quad (28)$$

где  $n_{p1}$  – показатель степени в формуле (1), отражающей изменение мощности ЭА в зависимости от ОЛР.

Несмотря на то, что в этом показателе третье слагаемое значительно (на несколько порядков) меньше первых двух, оно может иметь решающее значение в случае, когда первые два слагаемых близки, что достаточно часто встречается при сравнительной оценке ЭА и их серий.

При сравнении генеральных показателей двух серий, имеющих различные границы диапазонов изменения мощности, потерь и массы, это различие необходимо учесть соответственно следующими показателями:

$$n_{S0} = \frac{\ln \frac{S_{bg1}S_{sm2}}{S_{sm1}S_{bg2}}}{\ln \frac{\ell_{bg1}\ell_{sm2}}{\ell_{sm1}\ell_{bg2}}}; \quad n_{p0} = \frac{\ln \frac{P_{bg1}P_{sm2}}{P_{sm1}P_{bg2}}}{\ln \frac{\ell_{bg1}\ell_{sm2}}{\ell_{sm1}\ell_{bg2}}}; \quad n_{m0} = \frac{\ln \frac{M_{bg1}M_{sm2}}{M_{sm1}M_{bg2}}}{\ln \frac{\ell_{bg1}\ell_{sm2}}{\ell_{sm1}\ell_{bg2}}},$$

где индексы  $bg$  и  $sm$  относятся к наиболее и наименее мощному устройству в серии, соответственно; индекс 1 обозначает первую серию, а индекс 2 – вторую.

Тогда технико-экономический критерий рационального выбора первой серии ЭА относительно второй принимает вид

$$\begin{aligned} k_{te} &= n_{g1} - n_{g2} - 0,8n_{S0} - n_{p0} - k_{Sm}n_{m0} = \\ &= 0,8(n_{S1} - n_{S2} - n_{S0}) - n_{p1} + n_{p2} - n_{p0} - \\ &- k_{Sm}(n_{m1} - n_{m2} + n_{m0}). \end{aligned}$$

Если показатели  $n_{S1}$ ,  $n_{S2}$ ,  $n_{p1}$ ,  $n_{p2}$  различаются значительно, то ввиду малости показателя  $k_{Sm}$ , им можно пренебречь. В этом случае критерий рационального выбора упрощается, становится чисто техническим и после преобразований приобретает вид

$$\begin{aligned} k_t &\approx \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{bg1}}{S_{sm1}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{sm1}}{P_{bg1}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{bg1}}{\ell_{sm1}}} - \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{bg2}}{S_{sm2}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{sm2}}{P_{bg2}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{bg2}}{\ell_{sm2}}} + \\ &+ \frac{\ln \left[ \left( \frac{S_{bg1}S_{sm2}}{S_{sm1}S_{bg2}} \right)^{0,8} \left( \frac{P_{sm1}P_{bg2}}{P_{bg1}P_{sm2}} \right) \right]}{\ln \frac{\ell_{bg1}\ell_{sm2}}{\ell_{sm1}\ell_{bg2}}}. \end{aligned}$$

В случае, когда определение коэффициента потерь мощности затруднительно или вообще невозможно ввиду отсутствия паспортных технических параметров ЭА, возможно использование частичного критерия рационального выбора, т.е. его оценки только по пропускаемой мощности

$$k_t \approx \frac{\ln \frac{S_{bg1}}{S_{sm1}}}{\ln \frac{\ell_{bg1}}{\ell_{sm1}}} - \frac{\ln \frac{S_{bg2}}{S_{sm2}}}{\ln \frac{\ell_{bg2}}{\ell_{sm2}}} + \frac{\ln \frac{S_{bg1}S_{sm2}}{S_{sm1}S_{bg2}}}{\ln \frac{\ell_{bg1}\ell_{sm2}}{\ell_{sm1}\ell_{bg2}}}.$$

*Оценка применимости критериев рационального выбора электрических аппаратов и их серий*

Для приведенного выше автоматического выключателя типа С25, считая переходное сопротивление контактов  $R_c = 1$  мОм, было получено

$$\gamma = \frac{R_c I^2}{S} = \frac{0,001 \cdot 25^2}{6250} = 10^{-4},$$

откуда согласно (27)

$$k_{rs} = \frac{10^{-4}}{0,8} + 0,268 \cdot 10^{-4} = 1,52 \cdot 10^{-4}.$$

Для сравнения был рассчитан показатель  $k_{rs}$  автоматического выключателя типа А-3161, обладающего теми же техническими данными, но произведенного 40 лет назад. Поскольку стоимости аппаратов сравнивать сложно, можно принять их пропорциональными массам и, следовательно, объемам, т.к. конструкции контактных систем значительных изменений не претерпели.

В соответствии с этим для автомата типа А-3161 было получено значение  $k_{Sm} = 0,8 \cdot 10^{-4}$ . Поскольку значения  $\gamma$  для нового и старого аппаратов можно считать практически одинаковыми, то для более старого автомата (А-3161)

$$k_{rs} = \frac{10^{-4}}{0,8} + 0,8 \cdot 10^{-4} = 2,05 \cdot 10^{-4}.$$

Так как лучшим считается аппарат, имеющий минимальный критерий  $k_{rs}$ , то логично, что новый автомат значительно превосходит старый по технико-экономическим показателям.

При оценке серий анализируемые показатели (параметры) автоматических выключателей фирмы ABB SACE серий Isomax S и Tmax T, фирмы General Electric серии Spectra, фирмы Legrand серии DPX и фирмы Moeller серии LZM были сведены в табл. 2, составленную с учетом [19].

Для всех этих аппаратов  $kSm = 0,152 \cdot 10^{-4}$ , что показывает их относительно большую эффективность по сравнению с рассмотренными выше.

Таблица 2

Данные к расчету генерального показателя для автоматических выключателей разных серий и производителей

Серия	$\ell$ , мм	$n_s$	$n_m$	$n_g$
$S = 276$ кВА				
Isomax S	144,5	3,00	1,20	2,400
Tmax T	143,3	3,46	1,15	2,374
Spectra	152,9	3,02	1,01	2,416
DPX	156,3	3,59	1,00	2,872
LZM	142,5	2,52	1,12	2,031
$S = 434,7$ кВА				
Isomax S	144,5	2,95	1,07	2,360
Tmax T	143,3	2,79	1,05	2,241
Spectra	152,9	3,22	1,07	2,578
DPX	156,3	3,22	0,98	2,572
LZM	142,5	3,10	1,09	2,331

Если при расчетах в качестве базового ЭА серии принять аппарат наибольшей мощности, то более предпочтительной серией ЭА будет та, у которой быстрее, по сравнению с другими, уменьшаются размеры при одинаковом изменении (уменьшении) мощности. При этом значение  $n_s$ , соответственно, тоже будет меньшим, и, наоборот, величины  $n_p$  и  $n_m$  должны быть большими, что согласно (28) отражено в критерии минимального значения показателя  $n_g$ .

Из табл. 2 видно, что минимальные значения показателя  $n_g$  соответствуют серии автоматических выключателей фирмы ABB SACE серий Isomax S и Tmax T.

Это действительно лучшие серии по следующим показателям:

- последние по времени разработки серии из сравниваемых;
- наличие электронного расцепителя;
- модульность и простота конструкции;
- минимальные габариты и масса.

Следующими по эффективности являются автоматические выключатели серии LZM фирмы Moeller. Полученное для них лучшее значение  $n_g$  для пропускной мощности  $S = 276$  кВА ошибочно и объясняется наличием в каталоге одного габарита для разных коммутируемых токов, что привело к получению аномально низкого расчетного значения коэффициента  $n_s$  (как есть по данным, можем вообще убрать абзац).

Таким образом, даже не имея информации о конструкции ЭА, можно на основании разработанного критерия выбирать как единичный ЭА, так и серию ЭА, используя только паспортные данные – габариты и массу.

## ВЫВОДЫ

1. Для решения проблемы рационального выбора существующих ЭА была сформулирована задача установления связи между энергетическими и массогабаритными параметрами ЭА, обосновывающая необходимость определения обобщенного линейного размера.

2. Доказано, что кроме обобщенного геометрического размера, для каждого вида ЭА следует выделять ряд основных выполняемых функций, которые должны учитываться при определении взаимосвязи между геометрическими (массогабаритными) и энергетическими параметрами. Это позволяет более обоснованно сравнивать серии аппаратов при их выборе.

3. Сформулирована и решена задача определения взаимосвязи габаритных размеров, массы и энергетических показателей с обобщенным линейным размером для основных типов ЭА.

4. Проведенные исследования полученных зависимостей энергетических параметров ЭА от обобщенного линейного размера позволили подтвердить адекватность выдвинутых теоретических положений и обосновать критерии рационального выбора ЭА и их серий.

5. Применение предложенных критериев рационального выбора подтвердило их эффективность, как для выбора отдельных электрических аппаратов, так и их серий, и позволяет сравнивать технико-экономический уровень рассматриваемых электрических аппаратов на основании минимального набора паспортных данных – габаритов и массы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: Навчальний посібник. – Харків: Вид-во "Точка", 2012. – 340 с.
- Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под редакцией Ю.К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Информэлектро, 2001. – 420 с.
- Южный В.Э. Грузоподъемные электромагниты и их ремонт. – М.: Энергия, 1974. – 72 с.
- Игловский И.Г., Владимиров Г.В. Справочник по электромагнитным реле. – Л.: Энергия, 1975. – 480 с.
- Загирняк М.В., Прус В.В., Невзлин Б.И. Оценка электрических машин и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С. 32–40.
- Загирняк М.В., Прус В.В., Невзлин Б.И. Оценка трансформаторов и их серий с использованием функциональных зависимостей параметров от обобщенного линейного размера // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №4. – С. 36-40.
- Чунихин А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- Буль Б.К., Буткевич Г.В., Годжелло А.Г. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Буткевича Г.В., Учебное пособие – М.: Высшая школа, 1970.
- Чунихин А.А. Электрические аппараты (общий курс). Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.

10. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Разевица. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
11. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 839 с.
12. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. Учебн. пособ. для студентов эл.-техн. вузов. – М.: Энергия, 1971. – 475 с.
13. Загирняк М.В., Невзлин Б.И., Зайдан М. О целесообразности введения параметра "коэффициент потерь мощности" в теории и практике электрических аппаратов // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2003. – №4. – С. 124-126.
14. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т.2. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
15. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.
16. Загирняк М.В., Невзлин Б.И., Дьяченко Ю.Ю. Функциональная взаимосвязь массогабаритных и энергетических параметров электрических аппаратов. Часть 2. Получение зависимостей энергетических и электромагнитных параметров от линейных размеров электрических аппаратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №2. – С. 33-41.
17. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М. Бортник и др.; под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 544 с.
18. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
19. Загирняк М.В., Невзлин Б.И., Дьяченко Ю.Ю. Функциональная взаимосвязь массогабаритных и энергетических параметров электрических аппаратов. Часть 3. Экспериментальная проверка энергетических и электромагнитных параметров от линейных размеров электрических аппаратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №5. – С. 38-46.

**REFERENCES:** 1. Klymenko B.V. *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: Navchalnyi posibnyk.* Kharkiv, Tochka Publ., 2012. 340 p. 2. *Elektricheskie i elektronnyie apparaty: Uchebnik dlya vuzov. Pod red. Yu.K. Rozanova. 2<sup>nd</sup> izd., ispr. i dop.* Moscow, Informelektro Publ., 2001. 420 p. 3. Yuzhnyiy V.E. *Gruzopod'emnyie elektromagnityi i ih remont.* Moscow, Energiya Publ., 1974. 72 p. 4. Igllovskiy I.G., Vladimirov G.V. *Spravochnik po elektromagnitnyim rele.* Leningrad, Energiya Publ., 1975. 480 p. 5. Zagirnyak M.V., Prus V.V., Nevzlin B.I. Estimation of electric machines and their series using parameter functional dependences on the generalized linear size. *Technical electrodynamics*, 2013, no.5, pp. 32-40. 6. Zagirnyak M.V., Prus V.V., Nevzlin B.I. Estimation of transformers and their series using functional dependences of parameters on the generalized linear size. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.4, pp. 36-40. 7. Chunihin A.A. *Elektricheskie apparaty: Obschiiy kurs. Uchebnik dlya vuzov. 3<sup>rd</sup> izd., pererab. i dop.* Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 8. Bul' B.K., Butkevich G.V., Godzhello A.G. *Osnovyi teorii elektricheskikh apparatov. Pod red. Butkevicha G.V. Uchebnoe posobie.* Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 9. Chunihin A.A. *Elektricheskie apparaty (obschiiy kurs). Uchebnik dlya energeticheskikh i elektrotehnicheskikh institutov i fakultetov. Izd. 2<sup>nd</sup>, pererab. i dop.* Moscow, Energiya Publ., 1975. 10. *Tehnika vyisokikh napryazheniy. Uchebnik dlya studentov elektrotehnicheskikh i elektroenergeticheskikh spetsialnostey vuzov. Pod obschey red. D.V. Razeviga. Izd. 2<sup>nd</sup>, pererab. i dop.* Moscow, Energiya Publ., 1976. 488 p. 11. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny.* Moscow, Energiya Publ., 1974. 839 p. 12. Saharov P.V. *Proektirovanie elektricheskikh apparatov. Uchebn. posob. dlya studentov el.-tehn. vuzov.* Moscow, Energiya Publ., 1971. 475 p. 13. Zagirnyak M.V., Nevzlin B.I., Zaydan M. O tselesoobraznosti vvedeniya parametra "koeffitsient poter moschnosti" v teorii i praktike elektricheskikh apparatov. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2003, no.4, pp. 124-126. 14. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki in*

*2 volumes. Vol.2. 3<sup>rd</sup> izd., pererab. i dop.* Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. 15. Taev I.S. *Elektricheskie apparaty. Obschaya teoriya.* Moscow, Energiya Publ., 1977. 272 p. 16. Zagirnyak M.V., Nevzlin B.I., Dyachenko Yu.Yu. *Funktsionalnaya vzaimosvyaz massogabaritnyih i energeticheskikh parametrov elektricheskikh apparatov. Part 2. Poluchenie zavisimostey energeticheskikh i elektromagnitnyih parametrov ot lineynyih razmerov elektricheskikh apparatov. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2009, no.2, pp. 33-41. 17. Adonev N.M., Afanasev V.V., Bortnik I.M. and others. Pod red. Afanaseva V.V. *Spravochnik po elektricheskim apparatam vyisokogo napryazheniya.* Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1987. 544 p. 18. Ivobotenko B.A., Ilinskiy N.F., Kopylov I.P. *Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike.* Moscow, Energiya Publ., 1975. 184 p. 19. Zagirnyak M.V., Nevzlin B.I., Dyachenko Yu.Yu. *Funktsionalnaya vzaimosvyaz massogabaritnyih i energeticheskikh parametrov elektricheskikh apparatov. Part 3. Eksperimentalnaya proverka energeticheskikh i elektromagnitnyih parametrov ot lineynyih razmerov elektricheskikh apparatov. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2009, no.5, pp. 38-46.

*Postynula (received) 28.02.2014*

*Загирняк Михаил Васильевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Прус Вячеслав Вячеславович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Невзлин Борис Исаакович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup>Кременчугский национальный университет  
имени Михаила Остроградского,  
39600, Полтавская обл., Кременчуг, ул. Первомайская, 20,  
тел/phone +38 05366 36219, e-mail: mzagim@kdu.edu.ua*

*M.V. Zagirnyak<sup>1</sup>, V.V. Prus<sup>1</sup>, B.I. Nevzlin<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University  
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine  
**Functional correlation of parameters and criteria  
of rational choice for electric device.***

The existing theoretical and experimental dependences between power, electromagnetic and mass-overall dimension parameters of electric device have been analyzed. The choice of the generalized linear size has been substantiated. Electric device power and electromagnetic parameter dependences on linear size have been obtained and experimentally verified. Criteria of rational choice of electric device and their series have been developed, estimation of their applicability to comparison of electric device and their series made.

**Key words – electric device, generalized linear size, rational choice.**