

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, РЕАКТОРОВ И ДРОССЕЛЕЙ

Ставинский А.А., д.т.н., проф., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А.

Украинский государственный морской технический университет им. адмирала Макарова  
Украина, 54025, Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9, Институт автоматики и электротехники  
тел. (0512) 39-94-53, E-mail: ph@udmtu.aip.mk.ua

*Розглянуто особливості, засоби удосконалення та показники порівняльного аналізу варіантів конструкторсько-технологічних рішень просторових електромагнітних систем статичних індукційних пристроїв.*

*Рассмотрены особенности, способы усовершенствования и показатели сопоставительного анализа вариантов конструкторско-технологических решений пространственных электромагнитных систем статических индукционных устройств.*

Основным типом электромагнитной системы (ЭМС) трехфазных статических индукционных устройств (СИУ) является асимметричная планарная с шихтованными магнитопроводами [1,2]. Такие магнитопроводы содержат стержни и ярма прямоугольного сечения (ЭМС малой мощности и начальных габаритов средней мощности) или вписываемого в окружность ступенчатого сечения из пакетов электротехнической стали (ЭТС) различной ширины (ЭМС средней и большой мощности). Названные ЭМС и магнитопроводы по показателям удельной материалоемкости, а также трудоемкости производства не удовлетворяют современным требованиям. Дальнейшее усовершенствование трехфазных трансформаторов, реакторов и дросселей возможно на основе пространственных магнитных симметричных ЭМС (СЭМС) [2-5]. Также, согласно [1-6], снижение технологических материалоемкости и трудоемкости производства достигается изготовлением магнитопроводов способом навивки из ленты или рулона ЭТС.

Пространственные ЭМС отличаются, согласно классификации [5], типом конструкции и технологии изготовления магнитопроводов. Тип конструкции определяется направлением магнитного потока (радиальное, аксиальное) и формой сечения (прямоугольник, окружность...) стержней, наличием и количеством технологических стыков, а также способом соединения стержней (треугольник, звезда). По типу технологии СЭМС подразделяются на шихтованные, шихтованно-прессованные, витые и комбинированные.

На рис.1 представлены варианты конструкции с радиальным потоком стержней – исходная (1889 год) по типу цилиндрических магнитопроводов асинхронных машин (рис.1, а), а также с витыми ярмами и шихтованными из изогнутых листов стали стержнями (рис.1, б).

Некоторые варианты СЭМС с аксиальным направлением потока стержней соответственно представлены: на рис.2, а и б – замкнутые треугольником мощностью до 6300 кВ.А (витые ярма и шихтованные из эвольвентно изогнутых листов ЭТС стержни) и мощностью до 630 кВ.А (с горячей деформационной прессовкой витых контуров ЭТС) [2]; на рис.2, в – с соединенными звездой ярмовыми участками из витых

разрезных элементов мощностью до 100 кВ.А (упомянута в [6]).

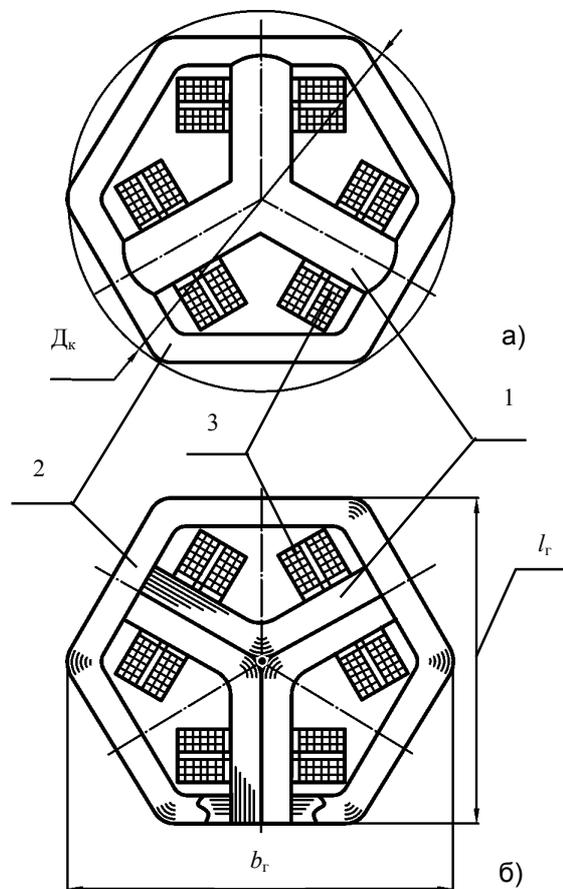


Рис.1. Варианты схемы поперечного сечения пространственной электромагнитной системы с радиальным потоком стержней, а также шихтованным (а) и комбинированным (б) магнитопроводами:

1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

При наличии вариантов и комбинаций более чем 110-летнего развития конструкторско - технологических решений СИУ, насколько известно, отсутствует количественно-качественный сравнительный анализ различных СЭМС.

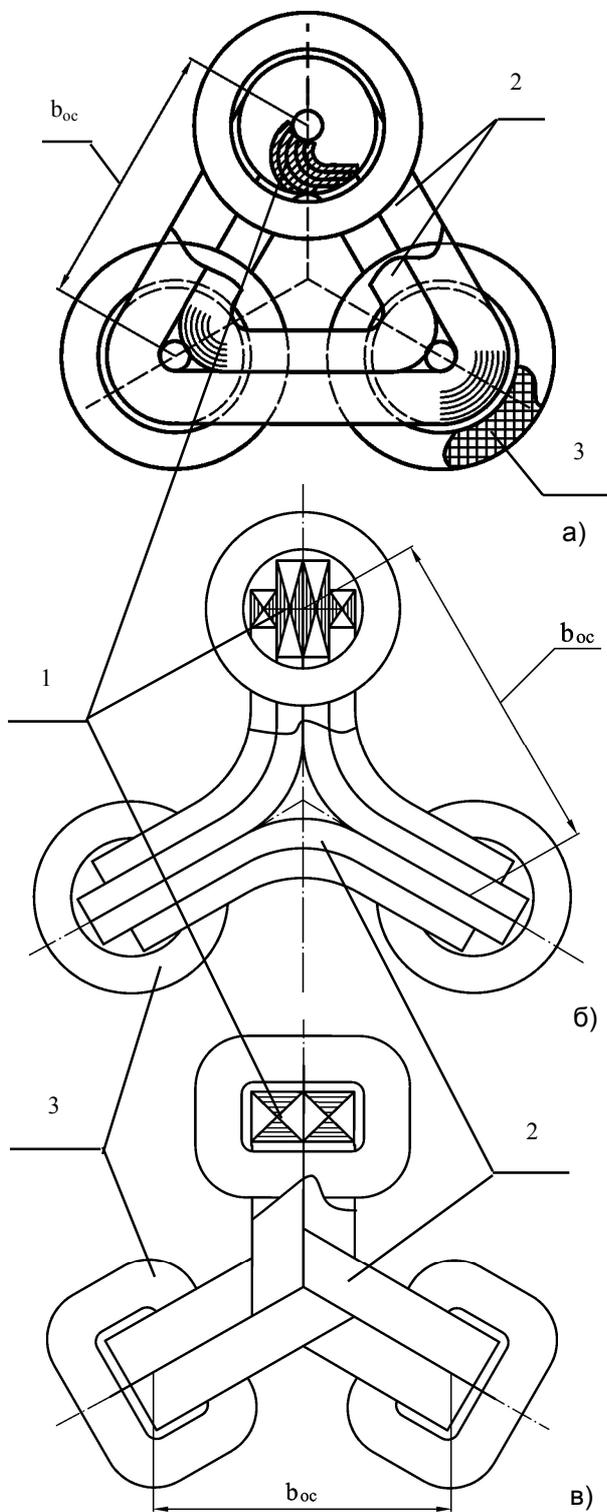


Рис.2. Варианты схем пространственной электромагнитной системы с аксиальным потоком стержней и комбинированным (а), витым трехконтурным (б), а также витым разрезным (в) магнитопроводами:  
1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Настоящая работа направлена на решение задачи определения показателей оценки технического уровня вариантов СЭМС с целью возможности их структурной оптимизации.

Представляется, что сопоставление СЭМС может быть выполнено на основе двух групп показателей и

признаков (основных и вспомогательных). Первая группа может состоять из количественных величин, определяющих технические характеристики [7]. Второй группе должны соответствовать характерные особенности и признаки технического уровня, определяющие трудоемкость изготовления, ток холостого хода, добавочные потери, а также функциональные возможности [3].

Величины первой группы можно определить, руководствуясь [7], на основе комплексного показателя качества

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i m_i, \quad (1)$$

где  $q_i$  - относительный показатель, определяемый отношением однотипных  $i$ -х параметров из номенклатуры  $n$  основных показателей функциональной и технической эффективности новой разработки и условно базового аналога сравниваемых устройств электромеханики (УЭМ);  $m_i$  - коэффициент весомости  $i$ -го параметра, установленный экспертным методом, причем для  $n$  показателей качества  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ .

В соответствии с [7], основными для СЭМС являются показатели объема и габаритных размеров, удельной материалоемкости и стоимости, коэффициента полезного действия (КПД), а также уровня отходов ЭТС.

Первый показатель  $q_1$  сравнения базового (индекс б) и сравниваемого вариантов можно определить на основе коэффициента  $K_{ко}$  использования геометрического объема [5] указанных вариантов:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= K_{коб}/K_{ко}; \\ K_{ко} &= \Pi_{ас}/\Pi_{ко}; \\ K'_{ко} &= \Pi_{ас}/\Pi_{гр}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\Pi_{ас}$  - площадь активных сечений (ограниченная контурами периферийных поверхностей магнитопровода и обмоток);  $\Pi_{ко}$  - площадь, ограниченная контурной окружностью диаметром  $D_k$  (рис.1, а);  $\Pi_{гр}$  - площадь контура габаритных размеров  $b_{гр}$  и  $l_{гр}$  (рис.1,б).

Вариант коэффициента (2) определяется особенностями объекта установки ( $K_{ко}$  - в цилиндрическом корпусе;  $K'_{ко}$  - в прямоугольном блоке системы электрооборудования). Указанный коэффициент является наиболее важным показателем ЭМС СИУ электротехнических комплексов транспортных средств, особенно морских подводных и авиационно-космических.

Общим недостатком всех вариантов СЭМС с прямоугольным и приближающимся к окружности сечением стержней, является невысокое значение коэффициента  $K_{ко}$  ( $K'_{ко}$ ).

Величина  $K_{ко}$  ( $K'_{ко}$ ) и компактность СЭМС мо-

гут быть повышены способом уменьшения межосевого расстояния  $b_{oc}$  (рис.2 – рис.3) геометрических центров сечений стержней на основе нетрадиционных конфигураций стержней, ярем и катушек обмотки (рис.3), обеспечивающих параллельность стенок обмоточных окон [5]. На рис.3, а и б представлены варианты СЭМС с шестигранным внутренним контуром витого ярма для СИУ малой и средней мощности. Стержни могут быть выполнены из витой разрезной заготовки с трехгранной образующей (рис.3, а), а также из разрезных или сплюснутых витых концентрических заготовок (рис.3, б). Рис.3, в и г характеризует СЭМС для СИУ мощностью до 10000 кВ.А с трехгранными внутренними контурами витых ярем и стержнями из витых элементов трехгранной формы, а также из идентичных прямоугольных пластин (листов) ЭТС образованных поперечным разделением ленты (рулона) ЭТС.

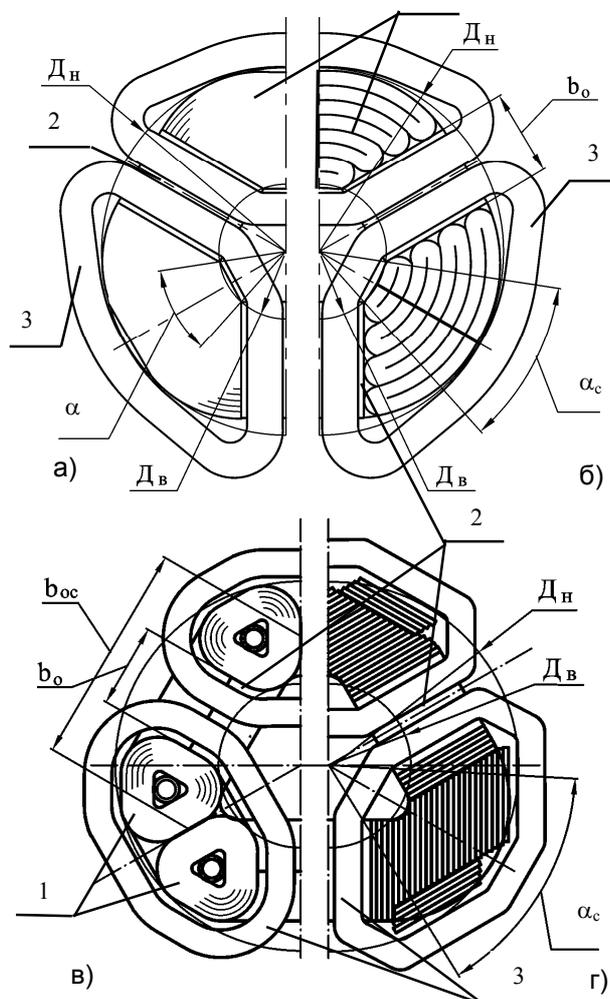


Рис.3. Варианты схемы пространственной электромагнитной системы с параллельными стенками обмоточных окон и витыми (а - в) и комбинированным (г) магнитопроводами: 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – катушка обмотки

Второй, третий и четвертый показатели ( $q_2, q_3, q_4$ ) можно определить на основе частных критериев оптимизации СИУ (соответственно минимумов массы, стоимости и потерь) при наличии математических моделей (ММ) с идентичными для всех

вариантов СЭМС управляемыми переменными (УП). Указанные критерии, как правило, определяются при проектных ограничениях, соответствующих конкретным требованиям (например, напряжение короткого замыкания  $U_k$  или ток холостого хода соответственно силового или измерительного трансформатора). Поскольку каждая из возможных принципиальных схем СЭМС может быть реализована с различным числом стыков на фазу, величина тока холостого хода при определении количественных показателей структурной оптимизации может не учитываться. Наличие стыков должно приниматься во внимание при выборе базового варианта на стадии параметрической оптимизации конкретного СИУ. Согласно, например [1], активная и реактивная ( $U_{ка}$  и  $U_{кр}$ ) составляющие  $U_k$  зависят от электромагнитной мощности трансформатора  $S$ , частоты сети  $f$  и соотношения электромагнитных нагрузок (плотности тока обмоток  $\Delta$  и индукции стержня  $B_c$ ):

$$\left. \begin{aligned} U_{ка} &\equiv \sqrt[4]{\Delta^3} / \left( \sqrt[4]{S} \sqrt[4]{f^3 B_c^3} \right); \\ U_{кр} &\equiv b'_o \Delta / B_c, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $b'_o$  - составляющая, определяемая размерами катушек и изоляционного промежутка в пределах половины ширины  $b_o$  обмоточного окна (рис.3).

Из соотношений (3) следует, что зависящие от УП и определяющие  $q_2, q_3, q_4$  целевые функции ММ СИУ не должны содержать исходных данных, технических требований (номинальной мощности  $S_n$ , номинального изменения напряжения  $\Delta U \dots$ ) и электромагнитных нагрузок.

Следует также отметить, что сравнительный анализ отличающихся конструкцией и пространственной формой элементов активной части (АЧ) УЭМ одинакового назначения, принято выполнять при соблюдении принципа электромагнитной эквивалентности [8]. Этому принципу соответствуют идентичности мощности, электромагнитных нагрузок, коэффициентов заполнения и применяемых материалов сравниваемых УЭМ. Обозначенным выше требованиям к исходным данным, УП и целевым функциям удовлетворяют ММ трансформаторов [9,10].

В указанных моделях целевыми функциями оптимизации СЭМС являются относительные коэффициенты изменения массы  $K_m$ , стоимости  $K_c$  и суммарных потерь  $K_p$  АЧ. В качестве УП приняты: отношение  $\lambda_o$  высоты  $h_o$  и ширины  $b_o$  обмоточного окна, отношение «а» диаметров расчетных контурных окружностей с диаметрами  $D_n$  и  $D_b$ , а также центральный угол стержня  $\alpha_c$  (рис.3):

$$\lambda_o = h_o / b_o ; a = D_n / D_b .$$

При этом реальные целевые функции (массы  $m_A$ , стоимости  $c_A$  и суммы потерь  $P_\Sigma$ ) связаны с соответствующими относительными коэффициентами зависимостями, содержащими характеристики мате-

риалов и коэффициент исходных данных и электромагнитных нагрузок  $K_{и}$ . Например, масса АЧ трансформатора с каждым из известных вариантов СЭМС определяется выражением [9,10]:

$$m_A = \gamma_c K_{3M} \left( \sqrt[4]{K_{и}/K_{30} K_{3M}} \right)^3 K_M ;$$

$$K_{и} = \frac{S_H}{6,66 f B_c} \left[ \frac{K_{U1}}{\Delta_1 \eta \cos \phi_1} + \frac{K_{U2}}{\Delta_2} \right] ;$$

$$K_M = K_{MM}(\lambda_o, a, \alpha_c) + \gamma_o K_{30} K_{MO}(\lambda_o, a, \alpha_c) / \gamma_c ,$$

где  $\gamma_c$  и  $\gamma_o$  - плотности ЭТС и меди (алюминия) обмотки;  $K_{3M}$  и  $K_{30}$  - коэффициенты заполнения магнитопровода сталью и обмоточного окна медью (алюминием);  $K_{U1(2)}$  - коэффициенты, учитывающие изменение  $\Delta U$ ;  $\Delta_{1(2)}$  - плотность тока первичной (вторичной) обмотки;  $\eta$  и  $\cos \phi_1$  - КПД и энергетический коэффициент трансформатора;  $K_{MM}(\lambda_o, a, \alpha_c)$  и  $K_{MO}(\lambda_o, a, \alpha_c)$  - индивидуальные для каждой из СЭМС коэффициенты изменения масс магнитопровода и обмотки.

Согласно [10], наихудшими показателями материалоемкости и стоимости характеризуется радиальная СЭМС (рис.1).

Для всех аксиальных СЭМС типа (рис.2-рис.3) зависимости  $m_A$ ,  $c_A$  и  $P_{\Sigma}$  от  $\lambda_o$  и  $a$  являются универсальными функциями, а  $\alpha_c$  ограничивается конструктивно и технологически [9,10]. Поэтому показатели  $q_i$  определяются значениями экстремумов  $K_M$ ,  $K_c$  и  $K_{п}$  базового и исследуемых вариантов при условно и практически идентичных в зонах экстремумов (минимумов) указанных функций предварительно принятых энергетических показателей  $\eta$  и  $\cos \phi_1$ :

$$q_2 = \frac{K_{M\text{эб}}}{K_{M\text{э}}}; \quad q_3 = \frac{K_{c\text{эб}}}{K_{c\text{э}}}; \quad q_4 = \frac{K_{п\text{эб}}}{K_{п\text{э}}}.$$

Уровень отходов ЭТС определяется коэффициентом

$$q_5 = K_{\text{этсб}} / K_{\text{этс}},$$

где  $K_{\text{этсб}}$  и  $K_{\text{этс}}$  - коэффициенты отношения массы использованной стали и массы непропитанного магнитопровода базового и сравниваемого вариантов.

Во вторую вспомогательную группу особенностей и признаков следует включить: число стыков на фазу; особенности расположения (наличие совпадения) слоев стали стержней и ярем в плоскостях стыков; наличие и число пересекающихся плоскостей стыков различных фаз; количество составных элементов магнитопровода и наличие среди них идентичных, количество единиц технологической оснастки, а также необходимость использования сложного технологического оборудования (например, штамповочного).

Относительные целевые функции также могут быть использованы для двухэтапной параметрической оптимизации СИУ. На первом этапе определяются экстремальные значения  $\lambda_{o\text{э}}$  и  $a_{\text{э}}$ , которые соответствуют оптимальным соотношениям размеров при заданном критерии оптимизации. На втором этапе при

фиксированных  $\lambda_{o\text{э}}$ ,  $a_{\text{э}}$ , и  $\alpha_c$  оптимизируются электромагнитные нагрузки при заданных проектных ограничениях.

## ВЫВОДЫ

1. Сопоставительный анализ вариантов СЭМС может быть выполнен на основе пяти количественных относительных показателей СИУ  $q_{(i=1...5)}$  и по меньшей мере шести признаков технического уровня конструкции и технологии производства магнитопроводов.

2. Универсальными, то есть независимыми от конкретных соотношений электромагнитных нагрузок и пригодными для определения показателей  $q_i$  исходя из оптимальных геометрических соотношений каждой из существующих СЭМС СИУ, являются относительные целевые функции в виде коэффициентов изменения массы, стоимости и суммы потерь, а также УП геометрической оптимизации:  $\lambda_o$ ,  $a$ ,  $\alpha_c$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности. – Л.: Судпромгиз, 1961. – 368 с.
- [2] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 544 с..
- [3] Дорожко Л.И., Либкинд М.С. Реакторы с поперечным подмагничиванием. – М.: Энергия, 1977. – 176 с.
- [4] Орлов Е.Г. Главная задача отраслевой науки – эффективность производства и энергосбережение// Электротехника. – 1990. - №1. – с.4-6.
- [5] Плахтырь О.О. Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов// Электротехника і електромеханіка. – 2002. - №3. – с.64-65.
- [6] Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами/ Пентегов И.В., Рымар С.В., Лавренюк А.В. и др. – вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. - №14. – с.86-87.
- [7] Руководящий документ РД 16538-89. Машины электрические малой мощности. Оценка уровня качества. – М.: ВНИИ стандартэлектро, 1989.
- [8] Паластин Л.М. Электрические машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
- [9] Ставинский А.А., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А. Зависимости массо-стоимостных показателей трехфазных пространственных трансформаторов с ромбическими катушками обмоток от геометрических соотношений активной части// Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвід. наук.-техн. зб. – 2002. Вип.58. – с.85-91.
- [10] Ставинский А.А., Плахтырь О.О. Сравнительный анализ материалоемкости вариантов трехфазных пространственных электромагнитных систем// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. - №2(19), том 1. – с.53-56.

Поступила 30.09.2003