

Электротехника

УДК 681.3.06

ПОЗИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРОГРАММНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

В.А. Денисов, Р.Р. Мадышев, О.А. Бородин

Тольяттинский государственный университет
Россия, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Рассмотрены принцип построения, структура и синтез параметров позиционной системы электропривода с программной коррекцией, обеспечивающей высокое быстродействие при обработке заданного перемещения. Структура позиционной системы создана на основе вентильного двигателя и микропроцессорного модуля, обеспечивающего работу программной коррекции в реальном масштабе времени путем переключения обратных связей в функции изменения выходной координаты. Дан сравнительный анализ работы системы с программной коррекцией с системами, содержащими линейный и оптимальный регуляторы. Для получения максимального быстродействия параметры линейного регулятора оптимизированы полиномом Баттерворта, а параметры оптимального регулятора определены на основе принципа максимума, когда обработка заданного перемещения производится в два интервала при максимально допустимом моменте на валу вентильного двигателя.

Ключевые слова: позиционная система с программной коррекцией, системы электропривода с переменной структурой.

Исследованию максимального быстродействия позиционного электропривода посвящено значительное количество работ [1, 3, 5]. Следует отметить, что проблема максимального быстродействия решена в теории оптимального управления для систем, в которых приведенный к валу двигателя момент инерции и момент сопротивления предполагаются известными и постоянными. Однако большого практического применения такие системы не получили, что связано с отсутствием грубости получаемой системы управления к изменяющимся параметрам системы и нагрузки, которые в общем случае не являются постоянными величинами, а могут изменяться по достаточно сложным законам. Использование в алгоритме оптимального управления аналитического выражения поверхности переключения приводит к тому, что получаемая система управления является практически нереализуемой. Это объясняется тем, что аналитические выражения, описывающие поверхность переключения, получаются чрезвычайно сложными и алгоритмы, созданные на их основе, реализовать даже на современных быстродействующих микроконтроллерах не является простой задачей. В некоторых работах предлагается аппроксимировать сложные аналитические выражения

Владимир Андреевич Денисов, доцент.
Рамиль Равилович Мадышев, аспирант.
Олег Александрович Бородин, инженер.

удобными для технической реализации функциями. Однако и в этом случае проблема решения задачи оптимального управления остается.

Одним из путей, который позволяет решить задачу повышения быстродействия позиционных систем электропривода, является квазиоптимальный принцип, когда в канал управления позиционным электроприводом включается блок программной коррекции (БПК). Названная коррекция осуществляется программным изменением коэффициента обратной связи по скорости изменения выходной координаты, что позволяет формировать переходный процесс в системе за счет исключения в форсирующем сигнале переменной величины, пропорциональной ошибке регулирования [3, 4].

Позиционная система электропривода с БПК приведена на рис. 1. Объект управления позиционной системы представлен передаточной функцией вида

$$x(p) = \frac{K_0}{p(\tau p + 1)} u_y(p), \quad (1)$$

где x – координата перемещения объекта;

u_y – сигнал управления;

τ и K_0 – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи объекта.

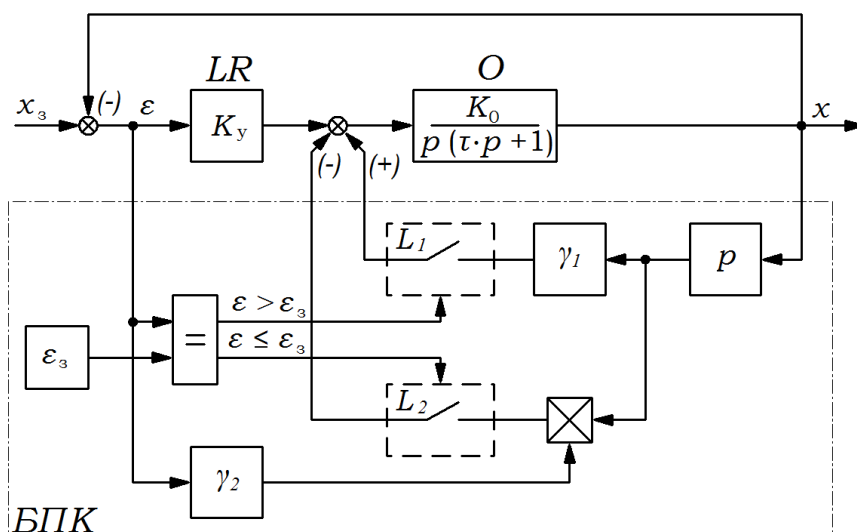


Рис. 1. Система электропривода с блоком программной коррекции (БПК)

Алгоритм позиционной системы с нелинейной коррекцией работает в реальном масштабе времени и обеспечивает отработку заданного перемещения в две фазы. В начальной фазе ошибка перемещения $\varepsilon = (x_3 - x)$ превышает заданную ошибку ε_3 , и в контур регулирования положения объекта через условный ключ L_1 вводится положительный сигнал по скорости $px(p)$ перемещения с критическим коэффициентом γ_1 . В результате замкнутая система переходит на границу устойчивости и движение объекта происходит с предельным ускорением.

Как только ошибка рассогласования достигнет расчетной величины, т. е. $\varepsilon \leq \varepsilon_3$, в действие вступает алгоритм второй фазы. В контур регулирования вме-

сто положительной обратной связи через условный ключ L_2 вводится отрицательная обратная связь по скорости перемещения с программируемым коэффициентом передачи γ_2 , что позволяет обеспечить эффективное торможение объекта и сформировать монотонный переходный процесс требуемого качества.

Найдем уравнение движения системы при действии главной отрицательной обратной связи и сигналов обратной связи, замыкаемых через условные ключи:

$$u_y(p) = K_y \varepsilon(p) \pm \gamma pX(p) = K_y X_3(p) - K_y X(p) \pm \gamma pX(p), \quad (2)$$

где ε – величина рассогласования; γ – коэффициент положительной или отрицательной обратной связи. Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получаем уравнение движения замкнутой системы.

$$p^2 X(p) + \frac{1}{\tau} (1 \pm K_0 \gamma) p \cdot X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p), \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{K_y K_0 \tau^{-1}}$ – собственная круговая частота системы регулирования;

K_y – коэффициент усиления регулятора системы.

На границе устойчивости уравнение движения (3) вырождается в уравнение консервативного звена

$$p^2 X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (4)$$

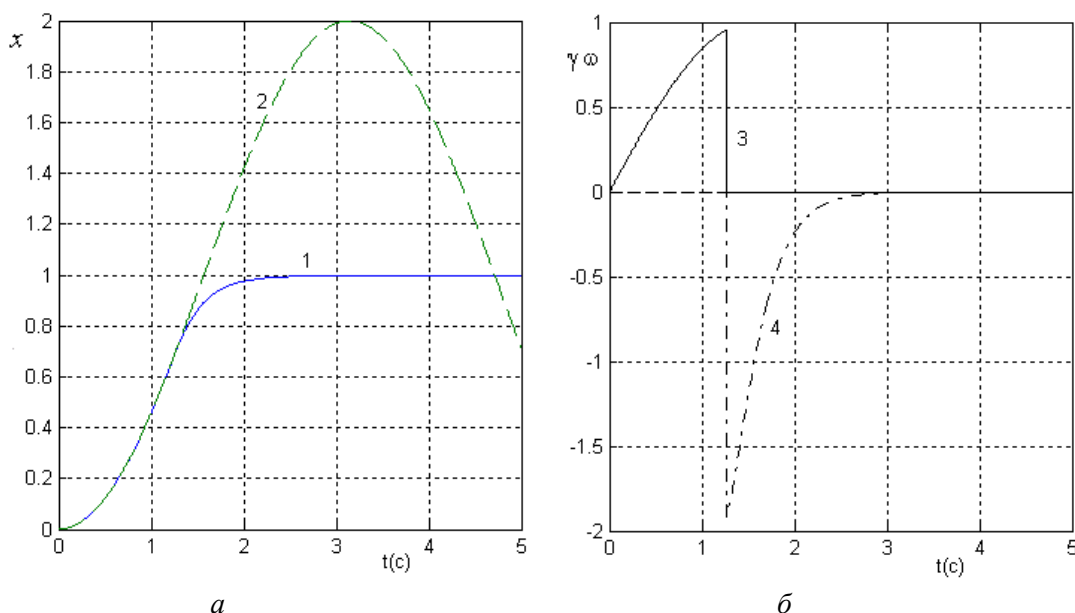


Рис. 2. Переходные характеристики (а) и сигналы тахометрической обратной связи (б)

Из сравнения уравнений (3) и (4) получаем $\gamma_1 = 1/K_0$, так как $1 - K_0 \gamma = 0$. При выполнении условия $\varepsilon \leq \varepsilon_3$ уравнение движения системы электропривода принимает вид

$$p^2 X(p) + \frac{1}{\tau}(1 + K_0 \gamma_2(\varepsilon))p \cdot X(p) + \omega_0^2 X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (5)$$

Переходная характеристика позиционной системы с программной коррекцией приведена на рис. 2а (кривая 1). Начальный участок характеристики совпадает с кривой 2, которая соответствует характеристике консервативного звена, т. е. движению на границе устойчивости системы.

Положительная тахометрическая обратная связь в системе действует, когда величина рассогласования $\varepsilon > \varepsilon_3$. В процессе ускоренного движения электропривода величина рассогласования ε уменьшается, и когда $\varepsilon < \varepsilon_3$, положительная обратная связь отключается. В действие вступает отрицательная обратная связь, что приводит к эффективному замедлению. Действие отрицательной обратной связи заканчивается, когда модуль величины рассогласования будет равен нулю.

Кривые, раскрывающие принцип действия положительной и отрицательной тахометрических обратных связей, изображены на рис. 2б. Здесь положительная обратная связь представлена кривой 3, отрицательная обратная связь – кривой 4.

Для проведения сравнительного анализа рассмотрены движение системы электропривода с программной коррекцией и движение системы электропривода с линейным регулятором. При этом параметры линейного регулятора оптимизированы полиномом Баттерворта, чтобы получить минимальное время переходного процесса [4].

Уравнение движения замкнутой позиционной системы с применением полинома Баттерворта

$$(p^2 + 1,41p\omega_0 p + 1)X(p) = \omega_0^2 X_3(p). \quad (6)$$

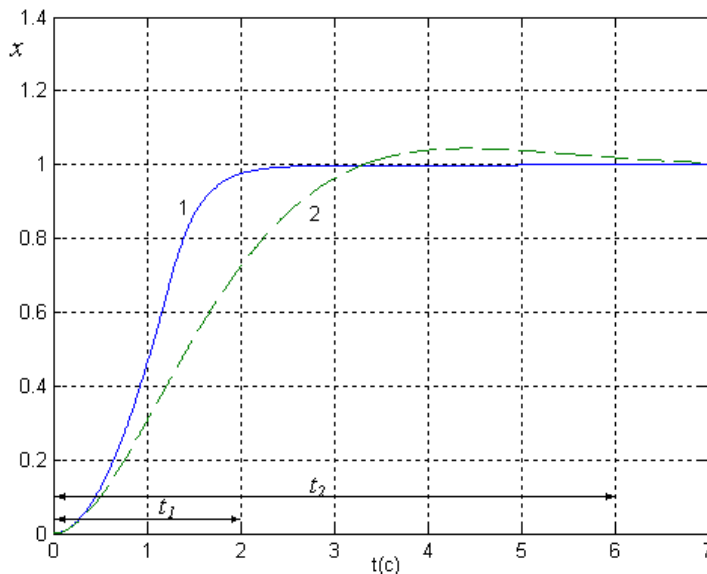


Рис. 3. Переходные характеристики системы электропривода с БПК (1) и системы электропривода с линейным регулятором Баттерворта (2)

Из сравнения приведенных характеристик (рис. 3) следует, что длительность переходного процесса системы с программой коррекции составляет 2 с, тогда как для системы с линейным регулятором она равна 6 с. Таким образом, применение структуры регулирования с программной коррекцией позволяет повысить быстродействие системы в три раза при отсутствии перерегулирования.

Для оценки возможности применения программной коррекции в быстродействующем электроприводе произведем сравнительный анализ работы позиционной системы с блоком программной коррекцией (БПК) и системы электропривода с оптимальным OR регулятором.

Силовая часть сравниваемых позиционных систем (рис. 4) содержит вентильный двигатель М, выполненный на базе синхронной машины с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов с управлением транзисторных ключей инвертора от датчика углового положения ротора. Вал ротора двигателя соединен с понижающим RM редуктором, который представлен в структурной схеме интегрирующим звеном.

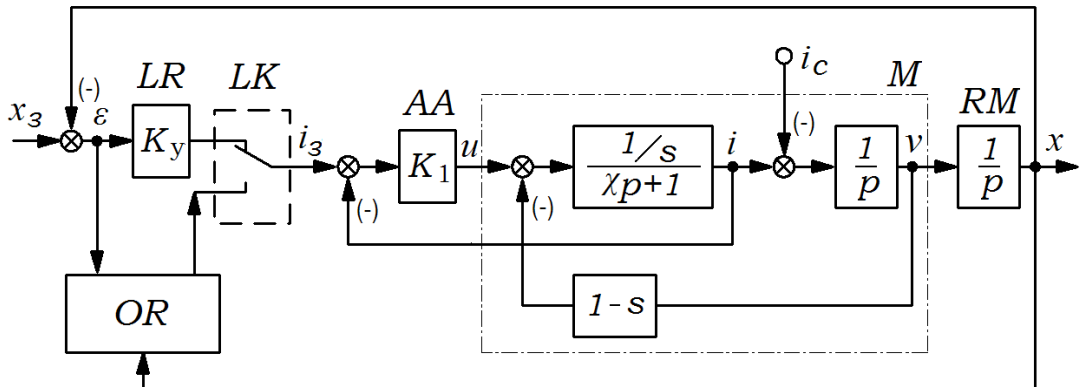


Рис. 4. Позиционная система электропривода с оптимальным регулятором

При математическом описании уравнения вентильного двигателя [3] запишем в относительных единицах

$$\left\{ \begin{array}{l} i = \frac{1}{(\chi p + 1)} [u - (1 - s)v]; \\ v = \frac{1}{p} (\mu - \mu_c); \\ x = \frac{1}{p} v, \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (7) \\ (8) \\ (9) \end{array}$$

где $i = i_{sq} / I_n$ – относительная величина тока двигателя;
 $u = u_{sq} / U_n$ – относительная величина напряжения статора;
 $v = \omega / \omega_n$ – относительная величина угловой скорости;
 $x = x_1 / x_3$ – относительная величина углового перемещения вала двигателя;

I_n, U_n, ω_n – соответственно номинальные значения тока, напряжения и скорости двигателя;

$s = (\omega_0 - \omega_n) / \omega_0 = r_a I_n / c_e \omega_0$ – скольжение;

ω_0 – угловая скорость холостого хода;

r_a – эквивалентное активное сопротивление статора;

$c_e = U_n / \omega_0, c_m = M_n / I_n$ – конструктивные коэффициенты двигателя;

$\mu = M / M_n$ – относительная величина вращающего момента двигателя;
 $\mu_c = M_c / M_n$ – относительная величина момента статической нагрузки;
 M_n, M_c – соответственно номинальные значения момента двигателя, перемещения и момента нагрузки;

$T_m = J_\Sigma \cdot \omega_n / M_n$ – механическая постоянная времени двигателя;

J_Σ – приведенный к валу двигателя момент инерции;

$\chi^* = T_a / T_m$ – относительная (безразмерная) постоянная времени;

T_a – электромагнитная постоянная времени двигателя;

$p = d / d\tau$ – оператор дифференцирования;

$\tau = t / T_m$ – относительное (безразмерное) время.

При использовании относительных единиц электромагнитный момент двигателя равен току якоря, т.е. $\mu = i$.

Введение в схему регулирования жесткой отрицательной обратной связи по току позволяет получить практически безынерционное протекание электромагнитных процессов в статорной цепи двигателя. Учитывая, что $K_1 \gg 1$, уравнение (7) для тока принимает вид

$$i = i_3 - (1-s) / K_1 v, \quad (10)$$

где i_3 – заданное значение тока;

K_1 – общий коэффициент передачи блока АА, включающий широтно-импульсный преобразователь и регулятор тока.

Для описания движения замкнутой позиционной системы требуется к приведенным уравнениям добавить уравнение ошибки ε (отклонения)

$$\varepsilon = x_3 - x. \quad (11)$$

Расчет параметров оптимального регулятора производится из условия обеспечения отработки заданного перемещения x_3 за наименьшее время при действии на валу момента нагрузки $M_c = \text{const}$ [2, 5]. На управление наложено ограничение по току: $-i_{\max} < i < i_{\max}$, где $i_{\max}$ – величина ограничения.

Оптимальное управление может быть представлено в виде

$$i = \begin{cases} i_{\max}, & \text{если } 1 \geq \varepsilon \geq \varepsilon_n; \\ -i_{\max}, & \text{если } \varepsilon_n > \varepsilon \geq 0, \end{cases} \quad (12)$$

где ε_n – ошибка в момент переключения.

Для реализации оптимального управления необходимо в начальный момент времени, когда $\varepsilon = 1$, создать на валу двигателя максимально допустимый момент, ток $i_{\max}$. Затем при достижении ошибки $\varepsilon = \varepsilon_n$ создать на валу двигателя максимально допустимый момент обратного знака ($-i_{\max}$) и после окончания переходного процесса осуществить переключение в режим работы с линейным регулятором положения.

Результаты моделирования переходных процессов в рассматриваемых системах представлены на рис. 5. Осциллограммы работы системы с оптимальным регулятором (ОР) показаны штриховой линией (1), а системы с блоком (БПК) программной коррекции показаны сплошной линией (2). Отработка заданного перемещения системы с ОР осуществляется в два интервала, т. е. за одно пере-

ключение. График изменения скорости вращения имеет характерный треугольный вид, а изменение тока приближено к прямоугольному виду (рис. 5в). Осциллограммы изменения скорости и тока в системе с БПК изменяются медленнее, причем момент переключения обратной связи происходит позднее. В результате этого отработка перемещения в позиционной системе с БПК происходит на 7 % с большим временем. Оба процесса протекают монотонно без перерегулирования.

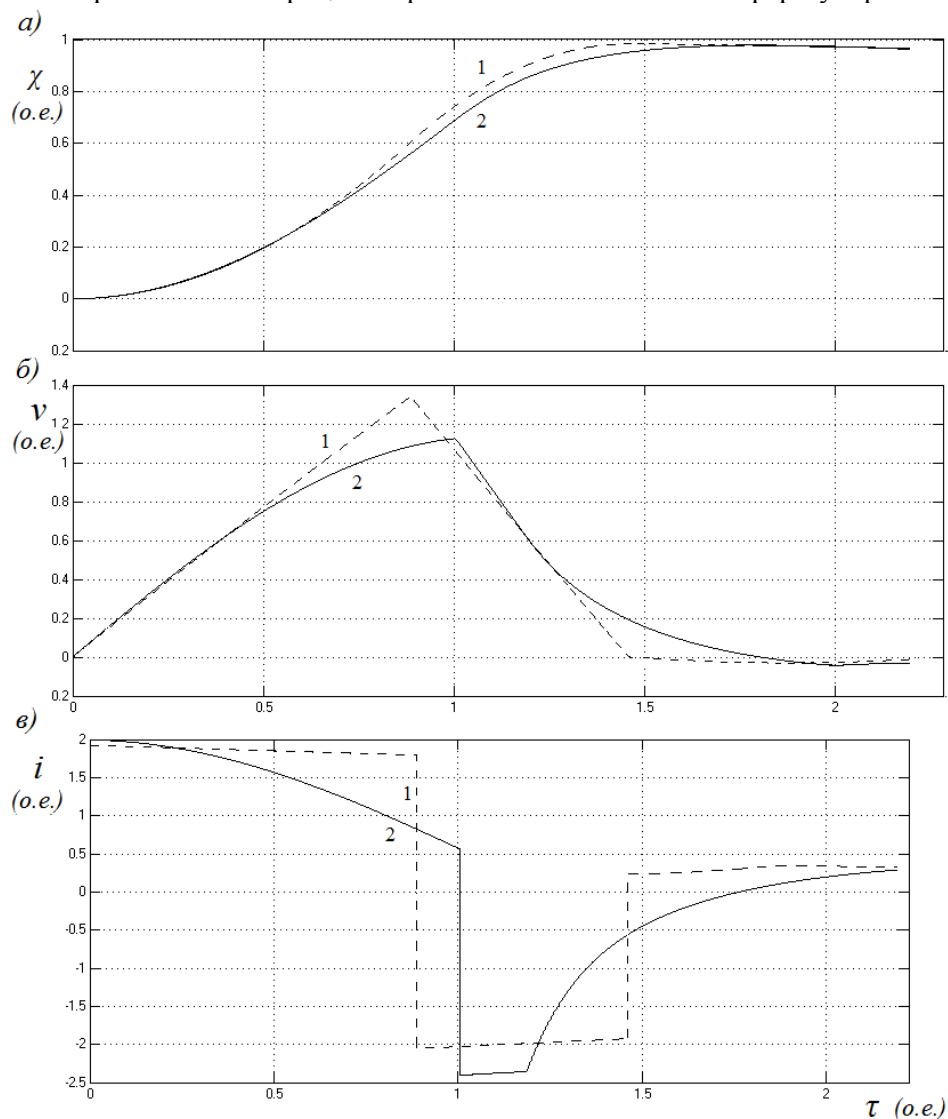


Рис. 5. Осциллограммы работы систем с оптимальным регулятором (ОР) и системы с блоком (БПК) программной коррекции

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- позиционная система с БПК относится к квазиоптимальным системам, она способна обеспечить высокое быстродействие отработки заданных перемещений при сравнительно простой структуре системы управления;
- высокое быстродействие переходного процесса при отсутствии перерегулирования обеспечивается в позиционной системе действием БПК, работающим

не во времени, а через текущие значения координат и независимо от того, в какой момент времени они имеют место в процессе отработки перемещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высшая школа, 1989. – 264 с.
2. Денисов В.А. Системы позиционного электропривода с переменной структурой управления. – М.: Спутник+, 2013. – 122 с.
3. Денисов В.А. Синтез системы электропривода с переменной структурой // Электромеханика, электротехнологии, электротехн. компоненты: тр. XI Международ. конф. ЭЭЭ. – М.: МЭИ (ТУ), 2006. – Ч. 2. – С. 180–182.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.
5. Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч. 1 – 368 с.; Ч. 2 – 504 с.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.

POSITIONAL ELECTRIC DRIVE SYSTEM WITH PROGRAMMATIC CORRECTION

V.A. Denisov, R.E. Madyshev, O.A. Borodin

Togliatti State University
146 st. Belarus, Togliatti, 445667, Russian Federation

The principles of design, structure and synthesis of positional parameters of the electric drive system with software correction, providing high performance by working out at given movement are considered. Structure positioning system is made on the basis of valve engine and microprocessor module providing work of software correction in real time by switching feedbacks in the function of changing the output coordinate. A comparative analysis of systems with software correction with systems containing linear and optimal regulators is given. To obtain maximum performance parameters of the linear regulator optimized by polynomial Butterworth, and the parameters of the optimal regulator are determined on the basis of the maximum principle when working out of a given movement is made in two intervals at the highest possible torque on a valve engine shaft.

Keywords: *positioning electric drive system with programmatic correction, electric drive system with variable structure.*

Vladimir A. Denisov (Ph.D.(Techn)), Associate Professor.
Ramil R. Madyshev, Postgraduate student.
Oleg A. Borodin, Engineer.

УДК 621.311

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТАРИФА НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВЫШАЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЗА ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**А.В. Кузнецов¹, И.В. Аргентова²**¹ Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32² ОАО «Ульяновскэнерго»
Россия, 432028, г. Ульяновск, пр. 50-летия ВЛКСМ, 23А

E-mail: kav2@ulstu.ru, argentum926@yandex.ru

Рассмотрены предложения по уточнению методики расчета тарифа на передачу электроэнергии, которые позволяют ликвидировать правовой барьер по взиманию платы за передачу реактивной мощности сверх установленных предельных значений в виде надбавок или повышающих коэффициентов к тарифу. Предложено новое решение, при котором из тарифа, рассчитанного по существующей методике, исключается стоимость потерь, связанных с передачей реактивной мощности сверх установленных предельных значений. Это решение позволит на практике оказывать стимулирующее воздействие на потребителей в части участия в регулировании режима реактивной мощности. Внедрение уточненной методики расчета тарифа на передачу электроэнергии в практику позволит урегулировать противоречивые взаимоотношения между потребителем и сетевой организацией в части применения повышающих коэффициентов к тарифу за превышение предельного значения соотношения реактивной и активной мощности в соответствии с «Методическими указаниями по расчету повышающего (понижающего) коэффициента к тарифам на услуги по передаче в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения)».

Ключевые слова: *потребитель электроэнергии, сетевая организация, система электроснабжения, реактивная мощность, передача электроэнергии, коэффициент реактивной мощности, тариф.*

Известным способом повышения экономичности энергетических систем является снижение потерь электроэнергии при ее передаче и преобразовании. Достаточно эффективное мероприятие снижения потерь электроэнергии – это компенсация реактивной мощности (КРМ), т. е. установка компенсирующих устройств (КУ) в электрических сетях потребителя и сетевой организации (ЭСО). КРМ снижает потери электроэнергии при ее передаче на участке сети от места установки КУ до источника питания. С этой точки зрения установка КУ желательна в непосредственной близости от электрических приемников, потребляю-

Анатолий Викторович Кузнецов (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электро-снабжение».

Инна Владимировна Аргентова, начальник ОП.

щих реактивную мощность, т. е. в сети потребителя. При этом потери снижаются как в сети потребителя, так и в сети ЭСО. Снижение потерь в сети потребителя положительно сказывается на потреблении потребителем электроэнергии, объем которой регистрируется коммерческими приборами учета, устанавливаемыми, как правило, на границе балансовой принадлежности сети ЭСО. Объем же снижения потребления в сети ЭСО при этом остается неопределенным для потребителя.

Устанавливая КУ, потребитель за счет своих средств снижает потери в ЭСО, т. е. оказывает ей услугу, размер которой должен быть вполне определен и соответственно возмещен в той или иной форме. С учетом этого между потребителем и ЭСО возникают взаимные обязательства, связанные с оплатой этой услуги. Размер оплаты этой услуги должен соответствовать стоимости потерь, обусловленных передачей реактивной мощности сверх установленных предельных значений. Определению размера услуги и форме ее оплаты посвящено немало работ [1], создавались и внедрялись в практику нормативные правовые документы.

В качестве формы оплаты услуги всегда предполагалась надбавка или повышающий коэффициент к тарифу на электроэнергию. Размер надбавки предполагает стоимость части потерь электроэнергии в ЭСО, которые имеют место при передаче потребителю реактивной мощности сверх установленных значений. При КРМ в своей сети потребитель имеет возможность избавиться от надбавки или, другими словами, получить плату за оказанную услугу по КРМ. Таким образом, надбавка является формализованным способом оплаты услуги за КРМ потребителю со стороны ЭСО и экономическим стимулом для установки и эксплуатации КУ.

Экономические стимулы для потребителей электроэнергии в части соблюдения ими установленных значений коэффициентов реактивной мощности применялись в нашей стране с 30-х годов прошлого столетия. С 1946 по 1974 годы действовали правила обеспечения реактивной мощностью потребителей электроэнергии для действующих электроустановок. Рекомендованное значение коэффициента мощности было установлено в пределах от 0,9–0,92 для электроустановок 6–10 кВ. С 1974 по 1981 годы действовала методика применения скидок и надбавок за коэффициент мощности для обеспечения рациональных режимов потребления реактивной мощности электроустановками [2]. В 1982 году вводятся в действие «Правила пользования электрической и тепловой энергией», где предусматривалось применение скидок и надбавок к тарифу за электрическую энергию за компенсацию реактивной мощности в электроустановках потребителей. Скидки и надбавки считались от заданного энергоснабжающей организацией оптимального значения. С 1991 по 2001 годы действовали «Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии» и «Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях». Производился расчет экономических значений реактивной мощности и энергии, и в случае превышения этих значений потребитель оплачивал ЭСО надбавку, пропорциональную потребленной реактивной мощности.

В дальнейшем «Правила...» были отменены как несоответствующие действующему законодательству. После отмены «Правил применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии» приказом Минэнерго от 28 декабря 2000 года № 167 и практически до настоящего времени никакой правовой основы для оплаты потреби-

тению услуг по КРМ, а следовательно, и оптимизации коэффициента реактивной мощности энергосистема не имела. Очевидно, что в такой ситуации многие потребители электроэнергии отключили имевшиеся у них компенсирующие устройства, а некоторые вовсе их демонтировали. Контроль и управление процессом потеряны.

В настоящее время Постановление Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» предусматривает обязанность потребителя соблюдать установленные значения соотношения потребления активной и реактивной мощности. Величины соотношений активной и реактивной мощности определены Приказом Минпромэнерго от 22 февраля 2007 года № 49. Данный порядок утверждает предельные значения коэффициента реактивной мощности $tg \varphi_{пред}$ для потребителей с присоединенной мощностью 150 кВт и выше (кроме населения и приравненных к населению). Приказом ФСТ №219-э/6 от 31.08.2010 утверждены «Методические указания по расчету повышающего (понижающего) коэффициента к тарифам на услуги по передаче в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения)». Согласно данной методике при нарушении установленных норм потребителем, имеющим границу раздела балансовой принадлежности по единой национальной (общероссийской) электрической сети (110 кВ, 220 кВ и выше), применяется надбавка в виде повышающего коэффициента к тарифу на передачу электрической энергии.

Тариф на передачу, к которому применяется надбавка, является регулируемым. Значение этого тарифа определяется на основе таких нормативных документов, как «Основы ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике» [3], «Методические указания по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую энергию на розничном рынке», «Методика расчета норматива технологических потерь электроэнергии (НТПЭ)» [4]. Он включает в себя затраты на содержание электрических сетей ЭСО, а также стоимость электроэнергии, потерянной в электрической сети при ее передаче в соответствии с нормативом, рассчитанным по методике расчета НТПЭ.

Анализ показывает, что в действующей методике расчета НТПЭ для расчета потерь при формировании регулируемого тарифа на передачу наряду с другими параметрами используются фактические значения передаваемой реактивной мощности. Это значит, что в случаях, когда фактические значения Q_{ϕ} реактивной мощности превышают установленные предельные $Q_{пред}$, потери, рассчитанные по методике расчета НТПЭ, включают в себя потери, связанные с передачей сверхпредельных значений реактивной мощности. Значит, оплата услуги по КРМ в соответствии с действующими нормативами включена в тариф, к которому применяется надбавка. Таким образом, услуга оплачивается дважды, что порождает правовое несоответствие и нежелание потребителя заниматься КРМ. Необходимо изменить методику расчета НТПЭ в случае использования расчета для регулируемого тарифа на передачу электроэнергии.

Предложения по изменению методики расчета НТПЭ применительно к рас-

чету регулируемого тарифа на передачу электроэнергии опубликованы в [5]. В [5] показано, что для того, чтобы в утверждаемый тариф на передачу электроэнергии потери, связанные с передачей сверхпределных значений, не были включены, необходимо использовать при расчетах НТПЭ при $Q_\phi > Q_{пред}$ вместо фактических значений реактивной мощности Q_ϕ установленные предельные значения реактивной мощности $Q_{пред}$. В этом случае оплата потерь, связанных с передачей реактивной мощности до предельных значений, будет включена в тариф, а оплата потерь, связанных с передачей сверхпределных значений, может производиться в виде надбавки. Суть изменений методики расчета НТПЭ сводится к корректировке формул для расчета нагрузочных потерь $\Delta W_{нагр}$.

Предлагается использовать коэффициент приведения потерь для ветвей схемы сети. Новое значение потерь в ветвях схемы при использовании $tg \varphi_{пред}$ вместо $tg \varphi_\phi$ в каждой ветви схемы снизится при этом в $K = \frac{(1 + tg^2 \varphi_{пред})}{(1 + tg^2 \varphi_\phi)}$ раз. Указанное соотношение является коэффициентом приведения потерь при фактическом значении реактивной мощности к ее значению при $tg \varphi_{пред}$. Этот коэффициент получен из соотношения

$$\frac{\Delta W_{пред}}{\Delta W_\phi} = \frac{I_{пред}^2}{I_\phi^2} = \frac{(1 + tg^2 \varphi_{пред})}{(1 + tg^2 \varphi_\phi)} = K, \quad (1)$$

где $\Delta W_{пред}$, $I_{пред}$ – потери электроэнергии и ток при значении реактивной мощности, соответствующем $tg \varphi_{пред}$;

ΔW_ϕ , I_ϕ – потери электроэнергии и ток при фактическом значении реактивной мощности.

По мнению авторов статьи [5], потери, рассчитанные с использованием коэффициента приведения K , уменьшатся на величину, соответствующую передаче по сети сверхпределных значений реактивной мощности. Однако авторы не учли, что в общем случае в сложной сети не у всех потребителей $tg \varphi_\phi > tg \varphi_{пред}$. У части потребителей может быть $tg \varphi_\phi < tg \varphi_{пред}$. Эти потребители не обязаны увеличивать мощность своих КУ. Если несколько таких потребителей питаются через одну магистральную ветвь, то в этой ветви вполне может быть $tg \varphi_\phi < tg \varphi_{пред}$. В соответствии же с предложенным решением в [5] к таким ветвям применяется коэффициент приведения (1), который предполагает снижение фактического $tg \varphi_\phi$ до значения предельного $tg \varphi_{пред}$. На самом же деле фактический $tg \varphi_\phi$ в ветви уже ниже $tg \varphi_{пред}$. А если по этой же ветви питается хотя бы один потребитель, у которого предполагается КРМ, то после КРМ значение $tg \varphi_\phi$ изменится на новое более низкое значение $tg \varphi_{нов}$. Коэффициент приведения K не учитывает этого. Он предполагает снижение $tg \varphi_\phi$ только до $tg \varphi_{пред}$,

не ниже. Результаты расчета становятся неточными. Новое значение потерь, рассчитанное с учетом коэффициента приведения K , получается завышенным.

Предложенные в [5] выражения для расчета потерь применимы только для частного случая, когда у всех потребителей $tg \varphi_{\phi} > tg \varphi_{nped}$. В общем случае это не так. Чтобы получить выражения для расчета потерь в общем случае, предлагается рассмотреть более подробно электрическую схему сетевой организации. В общем случае она может быть достаточно сложной и включать в себя определенное число нагрузок потребителей, определенное количество ветвей и узлов. Каждая ветвь питает определенное число нагрузок. В одной части нагрузок может быть $tg \varphi_{\phi} > tg \varphi_{nped}$, эти нагрузки требуют КРМ. В другой части нагрузок, наоборот, $tg \varphi_{\phi} \leq tg \varphi_{nped}$ – в этих нагрузках не требуется КРМ. В питающей эти нагрузки ветви после КРМ происходит изменение потока реактивной мощности за счет нагрузок, требующих КРМ. Нагрузки, не требующие КРМ, изменения потока реактивной мощности в ветви не вызывают.

Изменение потоков реактивной мощности в каждой i -той ветви, питающей одну нагрузку ($k=1$) или несколько нагрузок ($k=1,2,\dots,f_i$), при КРМ вызывает изменения значений в них $tg \varphi_{\phi,i}$ на новые значения. Если предположить, что изменения происходят в фиксированном интервале времени $\Delta t_{i,j}$, в течение которого токовую нагрузку $I_{i,j}$ i -го элемента сети с сопротивлением R_i принимают неизменной, где j – номер интервала времени, то

$$tg \varphi_{нов,i,j} = \frac{\sum_1^{f_i} Q_{i,j,k} - \sum_1^{f_i} P_{i,j,k} (tg \varphi_{i,j,k} - tg \varphi_{Q,i,j,k})}{\sum_1^{f_i} P_{i,j,k}} = tg \varphi_{\phi,i,j} - \frac{\sum_1^{f_i} P_{i,j,k} (tg \varphi_{\phi,i,j,k} - tg \varphi_{Q,i,j,k})}{\sum_1^{f_i} P_{i,j,k}}, \quad (2)$$

или

$$tg \varphi_{нов,i,j} = tg \varphi_{\phi,i,j} - \frac{\sum_1^{f_i} \frac{I_{i,j,k}}{\sqrt{1 + tg \varphi_{\phi,i,j,k}^2}} (tg \varphi_{\phi,i,j,k} - tg \varphi_{Q,i,j,k})}{\sum_1^{f_i} \frac{I_{i,j,k}}{\sqrt{1 + tg \varphi_{\phi,i,j,k}^2}}}, \quad (3)$$

где

$$tg \varphi_{Q,i,j,k} = \begin{cases} tg \varphi_{nped,i,j,k}, & \text{если } tg \varphi_{\phi,i,j,k} > tg \varphi_{nped,i,j,k} \\ tg \varphi_{\phi,i,j,k}, & \text{если } tg \varphi_{\phi,i,j,k} \leq tg \varphi_{nped,i,j,k} \end{cases}. \quad (4)$$

В выражениях (2), (3), (4):

$\sum_1^{f_i} P_{i,j,k}, \sum_1^{f_i} Q_{i,j,k}$ – сумма активных и реактивных мощностей потреби-

телей, получающих питание через рассматриваемую i -тую ветвь в j -том интер-

вале времени $\Delta t_{i,j}$;

f_i – число потребителей, получающих питание по рассматриваемой i -той ветви в j -том интервале времени $\Delta t_{i,j}$;

$I_{i,j,k}$ – значение полного тока в ответвлении к потребителю с номером k в j -том интервале времени $\Delta t_{i,j}$;

$tg \varphi_{\phi,i,j,k}, tg \varphi_{пред,i,j,k}$ – фактическое и предельное значение коэффициента реактивной мощности каждой нагрузки с номером k , получающей питание через i -тую ветвь в j -том интервале времени $\Delta t_{i,j}$;

$tg \varphi_{\phi,i,j}$ – фактическое значение коэффициента реактивной мощности в i -той ветви в j -том интервале времени $\Delta t_{i,j}$;

$tg \varphi_{Q,i,j,k}$ – промежуточная переменная.

Значение $tg \varphi_{Q,i,j,k}$ показывает, необходима в нагрузке КРМ или нет. Переменная принимает значение $tg \varphi_{Q,i,j,k} = tg \varphi_{пред,i,j,k}$, если КРМ предусмотрена, и значение $tg \varphi_{Q,i,j,k} = tg \varphi_{\phi,i,j,k}$, если КРМ не предусмотрена. В последнем случае изменения коэффициента реактивной мощности нагрузки не происходит. Этот потребитель не вносит изменений в значение $tg \varphi_{нов,i,j}$. Значение $tg \varphi_{пред,i,j,k}$ в соответствии с [6] не зависит от номера ветви и интервала времени. Оно определяется напряжением сети, к которой присоединен потребитель, поэтому можно считать, что $tg \varphi_{пред,i,j,k} = tg \varphi_{пред}(0,5; 0,4; 0,35$ по уровням напряжения соответственно 110, 35-10, 0,4 кВ).

Чтобы определить значение $tg \varphi_{нов,i,j}$, необходимо для каждой i -той ветви схемы выделить нагрузки, питание которых осуществляется по рассматриваемой ветви, их число f_i и параметры каждой k -той из них для использования в (2), (3), (4). С учетом сказанного в действующей методике расчета НТПЭ при использовании метода оперативных расчетов вместо формулы

$$\Delta W_{нагр} = 3 \sum_1^n R_i \sum_1^m I_{i,j}^2 \Delta t_{i,j} \quad (5)$$

предлагается использовать выражение

$$\Delta W_{нагр,нов} = 3 \sum_1^n R_i \sum_1^m \frac{(1 + tg^2 \varphi_{нов,i,j})}{(1 + tg^2 \varphi_{\phi,i,j})} I_{i,j}^2 \Delta t_{i,j} = 3 \sum_1^n R_i \sum_1^m K_{i,j} I_{i,j}^2 \Delta t_{i,j}. \quad (6)$$

При этом в (6) $K_{i,j}$ – коэффициент приведения потерь:

$$K_{i,j} = \frac{(1 + tg^2 \varphi_{нов,i,j})}{(1 + tg^2 \varphi_{\phi,i,j})}, \quad (7)$$

где $tg \varphi_{нов,i,j}$ вычисляется по (2), (3), (4).

В выражении (6):

n – число ветвей схемы сети;

$\Delta t_{i,j}$ – интервал времени, в течение которого токовую нагрузку $I_{i,j}$ i -го элемента сети с сопротивлением R_i принимают неизменной;

m – число интервалов времени.

Выражение (5) отличается от (6) использованием коэффициента приведения $K_{i,j}$. Нетрудно убедиться, что в частном случае, который рассмотрен в [5], когда все нагрузки требуют КРМ, $tg \varphi_{нов,i,j}$ принимает значение, равное $tg \varphi_{нов,i,j} = tg \varphi_{пред,i,j}$. Коэффициент приведения (7) и предложенный в [5] (1) становятся равными друг другу. Новые выражения (2), (3), (4), (6), (7) для расчета потерь применимы для схем сетей любой сложности и конфигурации, в том числе в частном случае, рассмотренном в [5].

Предложенные изменения методики расчета нормативных технологических потерь сетевой организации применительно к расчету регулируемого тарифа на передачу электрической энергии исключают противоречия с действующим законодательством. Расчетные технологические потери электроэнергии не будут включать в себя потери, связанные с передачей сверхпределных значений реактивной мощности. Стоимость этих потерь не будет включена в регулируемый тариф. Тогда с правовой точки зрения не будет противозаконным взимать плату за услугу по передаче сверхпределных значений реактивной мощности с потребителей в форме повышающего коэффициента. Использование повышающих коэффициентов к тарифу на передачу на практике будет оказывать стимулирующее воздействие на потребителей в части участия в регулировании режима реактивной мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железко Ю.С. Потери электрической энергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.: ил.
2. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.
3. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Приказ № 326 Минэнерго РФ от 30.12.2008 (<http://consultant.ru>).
4. О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике (вместе с «Основными принципами ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике», «Правилами государственного регулирования (пересмотра, применения цен (тарифов) в электроэнергетике»). Постановление Правительства РФ от 29 декабря 2011 г. № 1178. (<http://consultant.ru>).
5. Кузнецов А.В., Аргентова И.В. Правовые аспекты применения повышающих коэффициентов к тарифам за потребление реактивной энергии // Промышленная энергетика. – 2013. – № 7. – С. 17–20.
6. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения). Приказ № 49 Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 (<http://consultant.ru>).

Статья поступила в редакцию 6 мая 2014 г.

UPDATING OF THE ELECTRIC POWER TRANSMISSION TARIFF CALCULATION METHOD DUE TO USE OF THE MULTIPLYING COEFFICIENTS TO REACTIVE POWER CONSUMPTION

A.V. Kuznetsov¹, I.V. Argentova²

¹ Ulyanovsk State Technical University
32, Severnyi Venets St., Ulyanovsk, 432027, Russian Federation

² Engineer, Head of subdivision of Ulyanovskenergo OJSC
23A, 50 let VLKSM Avenue, Ulyanovsk, 432028, Russian Federation

The aspects improving the design procedure of electric power transmission charge are considered. They allow to eliminate legal barriers concerning extra charge or increasing factors to charge for volt-amperes reactive transmission of excessive limit values. The new method assumes that the charge calculated by means of the existing approach excludes the cost of losses related to volt-amperes reactive transmission of excessive limit values. In practice this method makes possible to influence the consumers positively and regulate the volt-amperes reactive conditions. The improved design procedure of electric power charge regulates inconsistent relations between consumers and net organization concerning increasing factors to charge for exceed limit values of volt-amperes reactive and active power. It is done in accordance with "The recommended guidelines to the design procedure of increasing (decreasing) factors to transmission charges depending on consumption correlation of volt-amperes reactive and active power for power receivers (groups of power receivers) applied to determine the obligations of parties for service agreement on electric power transmission by means of the joint domestic (the Russian Federation) electric network (energy supply agreements)".

Keywords: consumer of electric power, grid operator, electric power supply system, volt-amperes reactive, electric power transmission, factor of volt-amperes reactive, charge.

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Методом численного моделирования электромагнитных и тепловых полей определены наиболее нагретые участки радиального электромагнитного подшипника и предложены рекомендации по снижению их температуры до допустимого уровня. Приведены картины температурных полей для подшипников в бескорпусном исполнении и подшипников с алюминиевым корпусом и ребрами охлаждения. Для подшипников, имеющих корпус, определены размеры и количество ребер охлаждения, обеспечивающие заданный перегрев наиболее нагретой части обмотки.

Ключевые слова: радиальный электромагнитный подшипник, вихревые токи, температурное поле.

Электромагнитные подшипники (ЭМП) в устройствах подвеса быстроходных роторов обладают кроме известных преимуществ и рядом недостатков, основным из которых является большая масса и габариты по сравнению с традиционными подшипниками скольжения и качения [1].

Снижение объема и массы ЭМП при заданной грузоподъемности возможно лишь за счет увеличения магнитной индукции в зазоре и плотности тока в обмотках, что приводит к увеличению нагрева активных частей подшипника. Поэтому определение допустимых значений тепловых нагрузок – актуальная задача совершенствования ЭМП.

Для решения этой задачи необходимо:

- выявить все источники тепла и определить объемные мощности тепловыделения в активных элементах ЭМП;
- разработать геометрическую модель ЭМП и задать ее физические свойства;
- при принятых допущениях рассчитать температурное поле машины и определить наиболее нагретые точки;
- предложить конкретные меры, если это необходимо, для снижения нагрева обмоток.

Допущения, принятые в исследовании:

- ЭМП представлен двумерной геометрической моделью;
- нагрев лобовых частей обмотки учитывается традиционными интегральными методами [1];
- параметры теплоотвода постоянны и изотропны (коэффициент теплопроводности $\lambda_x = \lambda_y = const$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = const$).

Математическая модель ЭМП представляет собой плоскопараллельное описание радиального подшипника с разбиением на расчетные блоки с заданными

Юрий Александрович Макаричев (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное оборудование».

Юрий Николаевич Иванников, магистрант.

физическими свойствами и сетку конечных элементов. Геометрия расчетной области кроме изображения поперечного сечения подшипника включает и область воздушного пространства вокруг статора. Свойства магнитопроводов статора и ротора, выполненных из электротехнической стали, задаются кривыми намагничивания. Для воздуха, обмотки и изоляции задается относительная магнитная проницаемость $\mu=1$. Источниками поля служат токи в обмотках, которые задаются средней плотностью тока в пазах статора. Для границы расчетной области воздушного пространства вокруг подшипника задаем значения магнитного потенциала $A_0 = 0$, что соответствует условию отсутствия внешних магнитных полей. Данное свойство определяет внешние граничные условия электромагнитной задачи.

При решении тепловой задачи физические свойства стальных участков и воздуха внутри машины задавались соответствующими коэффициентами теплопроводности и коэффициентами теплоотдачи, свойства обмотки – через коэффициент эквивалентной теплопроводности, учитывающий толщину изоляции, пропитку и коэффициент заполнения медью [4]. Наружный воздух моделировался постоянным коэффициентом теплоотдачи $\alpha = 16 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$ без учета обдува и конвекции, что соответствует наиболее тяжелому режиму охлаждения корпуса.

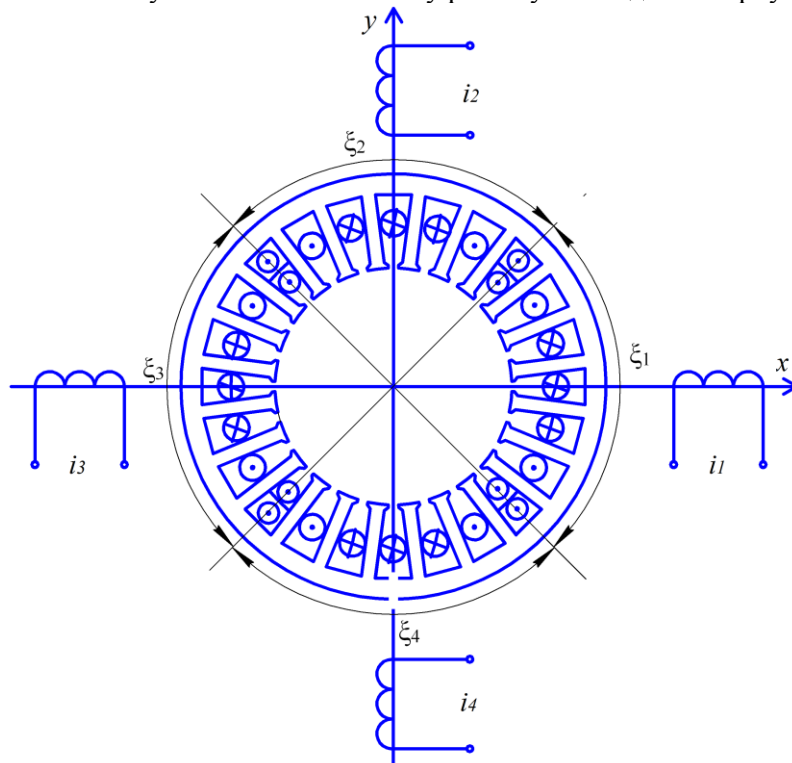


Рис. 1. Геометрическая модель радиального ЭМП:
 ξ_1 , ξ_2 , ξ_3 и ξ_4 – токовые зоны подшипника

Задача решалась для установившегося режима (стационарная задача) с фиксированной температурой на границе области расчета 313 К ($+40 \text{ }^\circ\text{C}$), соответствующей требованиям технического задания.

Плоскопараллельная геометрическая модель (рис. 1) сформирована для радиального ЭМП со следующими номинальными параметрами:

- номинальная грузоподъемность $F = 120 \text{ Н}$;

- номинальная частота вращения $n = 1500$, об/мин;
- число полюсов $2p = 8$;
- номинальное напряжение питающей сети $U = 24$, В;
- число зубцов статора $Z_1 = 24$.

Внутренними источниками тепла радиального ЭМП служат электрические потери в обмотках и потери от вихревых токов, наводимых в сердечнике ротора при его вращении в магнитном поле.

Расчет электрических потерь в обмотке Δp_{y0} проводился исходя из предположения, что основная механическая нагрузка радиального ЭМП – вес ротора. При этом наиболее нагруженной является токовая зона ξ_2 (ток $i_2 = i_{\max}$) – вертикальная ось модели.

Плотности тока в остальных токовых зонах соответственно принимались: $j_2 = j_{\max}$, $j_1 = j_3 = 0,5j_{\max}$, $j_4 = 0,15j_{\max}$.



Рис. 2. Кривая магнитного потенциала на поверхности ротора

Такому распределению токовых нагрузок соответствует несинусоидальная кривая магнитного поля в зазоре. Задача исследования – рассчитать значения магнитного поля в зазоре, например в виде разложения в ряд Фурье кривой магнитного потенциала $A_0 = f(x)$. Данная задача относится к расчету магнитного поля переменных токов и была решена методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде *Elcut*. Результаты решения представлены на рис. 2 и в табл. 1 в виде амплитуд и фаз наиболее значимых гармоник кривой магнитного потенциала в зазоре ЭМП. Величины амплитуд гармоник более высокого порядка, чем выбранные в табл. 1, не превышают 3 %, поэтому исключены из анализа.

Так как глубина проникновения вихревых токов во вращающемся роторе при относительно высоких частотах перемагничивания (в рассматриваемом при-

мере $f_{\text{пер}} \frac{p \cdot n}{60} = \frac{4 \cdot 1500}{60} = 100$, Гц) составляет величину, не превышающую нескольких миллиметров, то и выделение тепла от вихревых потерь происходит только в поверхностном слое. Для уточнения толщины этого слоя был проведен расчет тепловыделения в роторе при питании обмотки статора синусоидальным током частотой 100 Гц. Результаты расчета представлены на графике (рис. 3). Глубина слоя, в котором выделяется 98 % тепла, составила 0,6 мм.

Таблица 1

**Параметры основных гармоник разложения кривой магнитного потенциала
в воздушном зазоре ЭМП**

№ гармоники	Амплитуда $\times 10^{-4}$	Фаза
1	6,96	8
2	3,19	-74,4
3	3,7	-154,9
5	3,05	36,5
7	3,9	-126,1
8	4,95	151,4
10	0,9531	167,3
15	0,803	115,8
24	0,961	-85,1

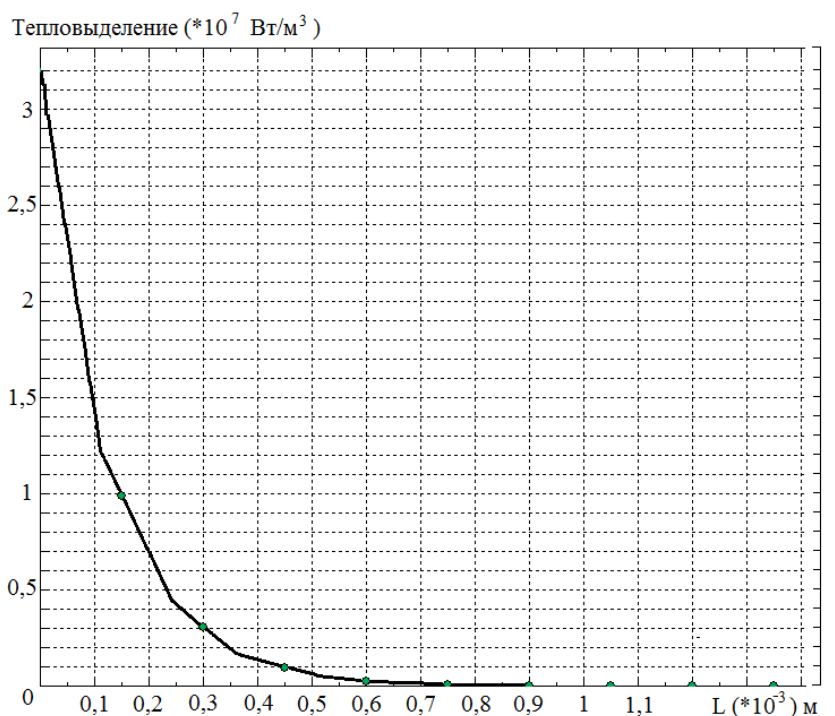


Рис. 3. Глубина проникновения теплового потока

Для уточнения картины тепловыделения в поверхностном слое ротора при несинусоидальном поле в зазоре зададим магнитный потенциал на поверхности ротора уравнением (1), где амплитуды и фазы A_0 соответствует полученным ранее в электромагнитном расчете (см. табл. 1):

$$\begin{aligned}
 A_0 = & [11,9 + 6,96 \cdot \sin(628 \cdot t + 8) + 3,19 \cdot \sin(2 \cdot 628 \cdot t - 74,4) + \\
 & + 3,7 \cdot \sin(3 \cdot 628 \cdot t - 154,9) + 3,05 \cdot \sin(5 \cdot 628 \cdot t - 36,5) + \\
 & + 3,9 \cdot \sin(7 \cdot 628 \cdot t - 126,1) + 4,95 \cdot \sin(8 \cdot 628 \cdot t + 151,4) + \\
 & + 0,9531 \cdot \sin(10 \cdot 628 \cdot t + 167,3) + 0,803 \cdot \sin(15 \cdot 628 \cdot t + 115,8) + \\
 & + 0,961 \cdot \sin(24 \cdot 628 \cdot t - 85,1)] \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

Расчет температурного поля проводился для частоты вращения $n = 1500 \text{ об/мин}$. В результате расчета МКЭ в программной среде *Elcut* была получена картина температурного поля, представленная на рис. 4. На диаграмме (рис. 5) показана кривая распределения температуры по оси y ЭМП. Сечение проходит по наиболее нагретому пазу. Температура наиболее нагретой точки составила 408 К (перегрев относительно температуры окружающей среды $T_{oc} = 40^\circ \text{C}$ составил $\Delta T = 95^\circ \text{C}$).

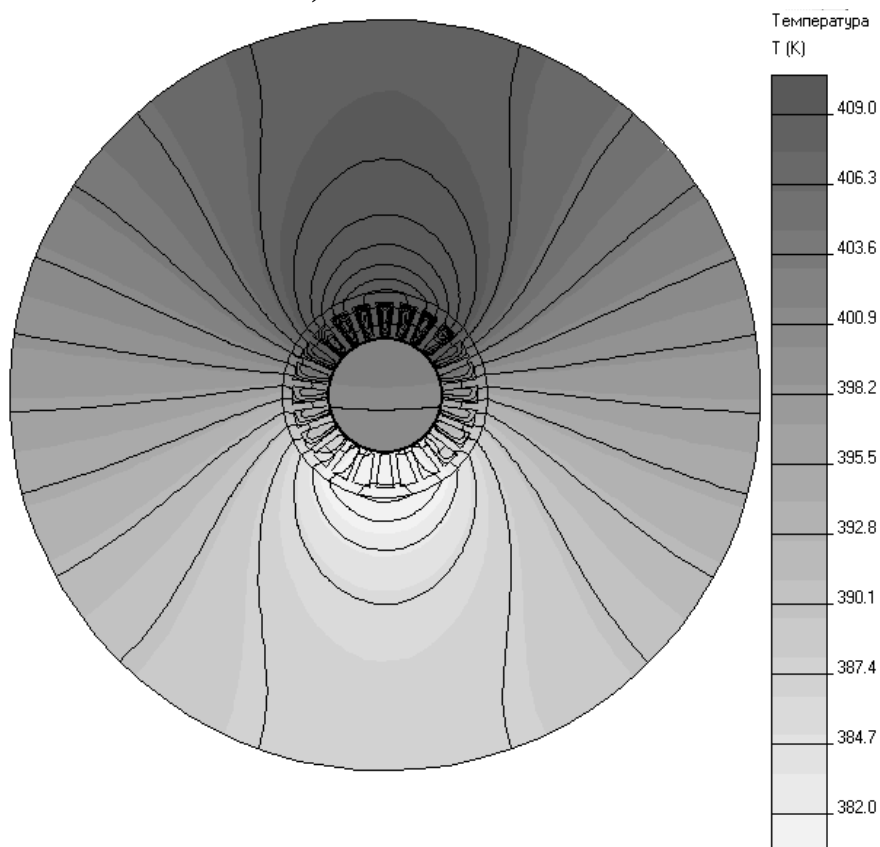


Рис. 4. Картина температурного поля РЭМП при несинусоидальном магнитном поле в зазоре

Для класса изоляции B допустимая рабочая температура составляет 130°C (403 К). Следовательно, если не снижать значения электромагнитных нагрузок, то для обеспечения допустимого перегрева необходимо принимать конструктивные меры для увеличения интенсивности теплоотвода. К таким мерам в первую очередь относится применение корпуса из материала с высокой теплопроводностью и теплоотдающей способностью. В электрических машинах для этих целей применяют гладкий или оребренный алюминиевый корпус.

Результаты расчета теплового поля для ЭМП с алюминиевым корпусом различной толщины и конструкции представлены в табл. 2.

На рис. 6 показано температурное поле машины с алюминиевым корпусом толщиной $\Delta_{Al} = 2 \text{ мм}$, 18 ребрами охлаждения высотой 5 мм и шириной 2 мм.

Были проведены расчеты для различных корпусов, как гладких, так и с ребрами охлаждения (см. табл. 2).

Температура (К)

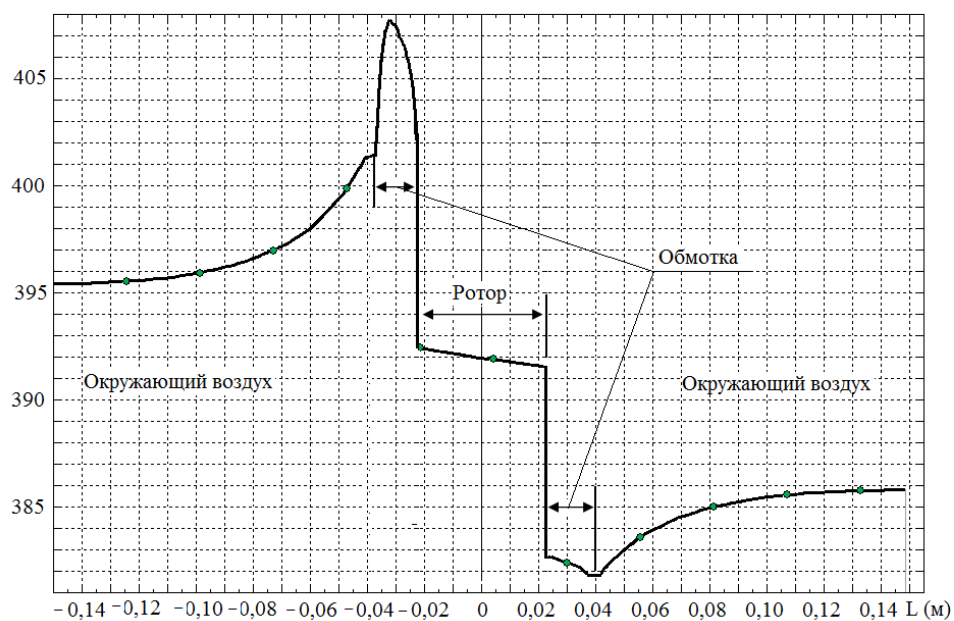


Рис. 5. Распределение температуры по сечению РЭМП

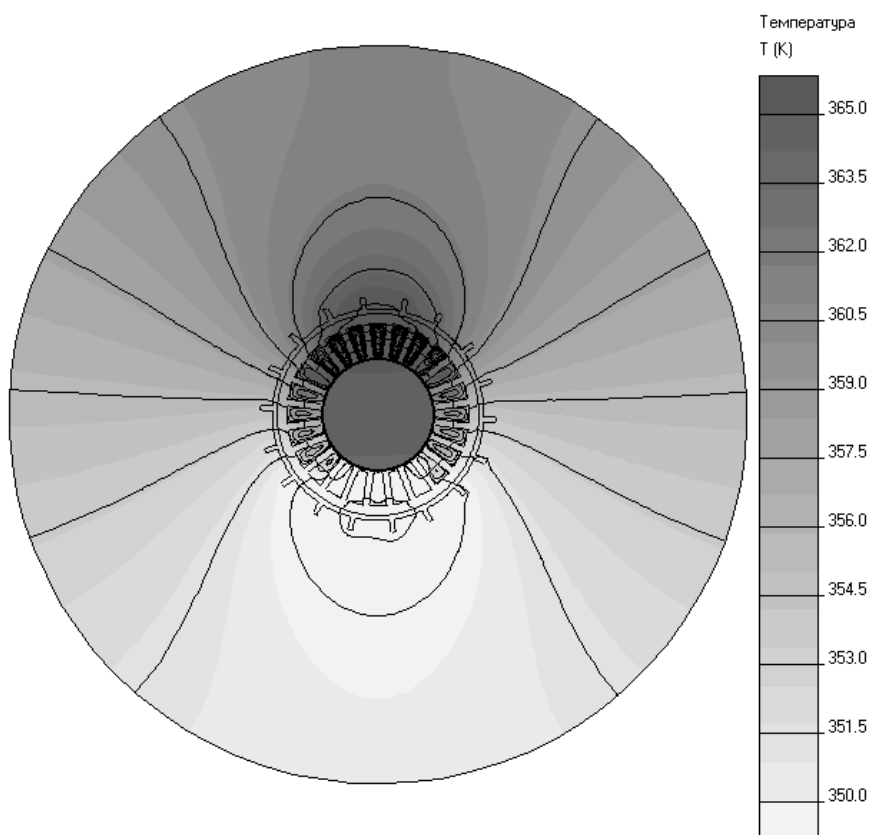


Рис. 6. Тепловое поле ЭМП с алюминиевым корпусом и ребрами охлаждения

Температура наиболее нагретых точек ротора и обмотки статора

№ варианта	Толщина стенки корпуса	Высота ребра, мм	Толщина ребра, мм	Т ротора, К	Т обмотки, К
0	0	0	0	392,5	408
1	2	0	0	380,8	389,5
2	3	0	0	379,2	387,1
3	2	5	2	354,1	362,9
4	2	7	2	349,3	358
5	2	5	1	354,2	362,5

Выводы:

В результате математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в радиальном электромагнитном подшипнике при статическом нагружении опоры, установлено:

- наиболее нагруженным по перегреву является центральный паз второй токовой зоны (ось y);
- глубина зоны выделения тепла от действия вихревых токов в сердечнике ротора составляет 0,6 мм;
- для снижения перегрева обмотки статора в наиболее нагретой зоне до допустимого уровня необходимо применять гладкий или оребренный корпус из алюминиевых сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. – 206 с.
2. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.: ил.
3. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
4. Борисенко А.И., Костилов О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.

TEMPERATURE FIELDS MODELING OF THE RADIAL ELECTROMAGNETIC BEARING

Yu. A. Makarichev, Yu. N. Ivannikov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The most heated areas of the radial magnetic bearings identified by numerical simulation of the electromagnetic and thermal fields, recommendations to reduce them to an acceptable level were presented. Pictures of temperature fields for bearings in the plug-in system, with aluminum body and cooling fins were given. The size and the number of cooling fins for bearings with a body are defined.

Keywords: *the radial electromagnetic bearing, vortex currents, temperature field.*

*Yu. A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yu. N. Ivannikov, Graduate student.*