
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62-83:621.313:621.039

EDN УТАНАЕ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ АВАРИЙНОЙ
ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ****А.Ю. Смирнов**

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a_yu_smirnov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
*Нижегород, Россия***Д.А. Ульянов**

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: danil15ulyanov@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижегород, Россия***П.Г. Стасюк**

ORCID: 0009-0009-6353-920X e-mail: work.el.nn@yandex.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
*Нижегород, Россия***Т.Н. Уснунц-Кригер**

ORCID: 0009-0003-1789-8769 e-mail: usnuntskriger@mail.ru

Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»
Выкса, Россия

Сопоставлены возможные конструкции бесконтактных двигателей в приводе для перемещения в верхнее положение стержней аварийной защиты ядерного реактора. Индукторные двигатели с электромагнитным возбуждением обеспечивают наибольшую отдачу по моменту при кратковременном увеличении (форсировке) тока. Рассмотрены особенности проектирования индукторных двигателей с электромагнитным возбуждением со стороны статора для кратковременного режима работы. Во избежание глубокого насыщения магнитной цепи, приводящего к непродуктивному возрастанию потребляемой мощности и дополнительному нагреву, предлагается сначала сформировать геометрию магнитной цепи статора в положении ротора, при котором потокосцепление фазы принимает максимальное значение,

затем рассчитывать характеристику намагничивания ферромагнитных участков магнитной цепи. Выбор значения рабочего магнитного потока вблизи за участком насыщения этой характеристики позволяет однозначно определить размер зазора между статором и ротором двигателя и его моментные и энергетические характеристики. Методика распространяется на индукторные двигатели с электромагнитным возбуждением, где требуется кратно форсировать вращающий электромагнитный момент за счет весьма кратковременного режима работы.

Ключевые слова: индукторный двигатель, привод аварийной защиты (ядерного реактора), ротор, синхронный привод, статор, электромагнитное возбуждение, электромагнитные нагрузки.

Для цитирования: Смирнов А.Ю., Ульянов Д.А., Стасюк П.Г., Уснунц-Кригер Т.Н. Проектирование индукторных двигателей для привода механизмов аварийной защиты ядерных реакторов // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 4-20. EDN УТАНАЕ

DESIGN OF INDUCTOR MOTORS FOR DRIVING EMERGENCY PROTECTION MECHANISMS OF NUCLEAR REACTORS

A.Yu. Smirnov

ORCID: 0000-0002-2391-0942 e-mail: a_yu_smirnov@mail.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
JSC «Afrikantov OKBM»
Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ulyanov

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: daniil5ulyanov@gmail.com
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

P.G. Stasyuk

ORCID: 0009-0009-6353-920X e-mail: work.el.nn@yandex.ru
JSC «Afrikantov OKBM»
Nizhny Novgorod, Russia

T.N. Usnunts-Kruger

ORCID: 0009-0003-1789-8769 e-mail: usnuntskriger@mail.ru
Vyksa Branch of the National University of Science and Technology «MISiS»
Vyksa, Russia

Abstract. The paper presents the design of brushless motors for driving emergency protection mechanism of nuclear reactor. Inductor synchronous motors with electromagnetic excitation provide the highest torque reaction with a short-term increase (forcing) of current. Design features of short duration operation of the inductor motors with electromagnetic excitation from stator are considered. A design methodology is proposed to avoid a magnetic circuit deep saturation, which leads to an unproductive increase in power losses and additional heating. First, the geometry of the stator magnetic circuit is formed in the rotor position at which the phase flux linkage takes on its maximum value, then the magnetization curve of the ferromagnetic sections of the magnetic circuit is calculated. The choice of the working magnetic flux point near the saturation section allows to determine the size of the air gap between the stator and the rotor of the motor, and its torque and energy characteristics. Methodology applicable to inductor motors with electromagnetic excitation, where it is necessary to repeatedly increase the rotating torque due to a very short-term operating mode.

Keywords: inductor motor, emergency drive (of nuclear reactor), rotor, synchronous drive, stator, electromagnetic excitation, electromagnetic loads.

For citation: A.Yu. Smirnov, D.A. Ulyanov, P.G. Stasyuk and T.N. Usnunts-Kriger, "Design of inductor motors for driving emergency protection mechanisms of nuclear reactors", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-20, 2024. EDN YTAHAЕ

I. Введение

Важнейшей сферой применения индукторных двигателей являются электроприводы систем управления и защиты ядерных энергетических установок, где они используются в качестве шаговых двигателей в механизмах регулирования и компенсации реактивности [1], также возможно применение этих двигателей в приводах аварийной защиты (АЗ) (рис. 1).

Принцип действия большинства приводов АЗ основан на преобразовании энергии автономных источников, не использующих энергию основной сети электроснабжения. В качестве таковых могут быть применены устройства пассивной безопасности, аккумулирующие потенциальную энергию сжатой пружины или энергию силы веса стержня-поглотителя, внедряемого в активную зону реактора: [2] – нормирующий документ; [3, 4] – конструкция и описание работы. Для приведения их в действие используются отдельные двигатели, входящие в состав привода АЗ. При поступлении сигнала аварийной защиты электромагнит обесточивается, обеспечивая перемещения рейки со стержнем-поглотителем вниз под действием своего веса.

В отличие от осуществляющих непрерывное перемещение и позиционирование регулирующих органов (РО) в промежуточных положениях двигателей привода регулирующих стержней и компенсирующих групп,

двигатели для привода АЗ в обычном режиме находятся в обесточенном состоянии. За время жизненного цикла реактора они эксплуатируются (включаются) ограниченное количество раз. Вместе с тем, в течение каждого запуска двигатель привода АЗ должен быть способен не только заранее передать энергию устройствам пассивной безопасности, но и обеспечить быстрое принудительное перемещение РО в положение останова, в крайне неблагоприятном случае, если по каким-либо причинам это положение в течение заданного промежутка времени достигнуто не будет.

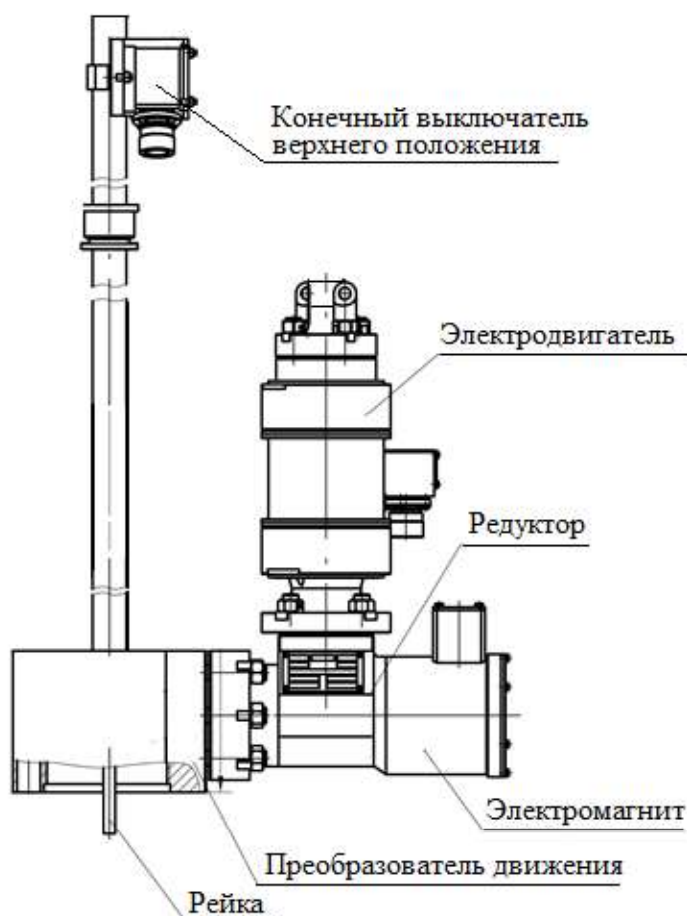


Рис. 1. Конструктивная схема привода АЗ

Fig. 1. Design diagram of the emergency protection drive

Учитывая изложенные требования, отличительными особенностями работы двигателей в приводах АЗ ядерных энергетических установок являются:

- весьма кратковременный режим работы с продолжительным нахождением в обесточенном состоянии;
- очень высокая перегрузочная способность по моменту;
- высокая отдача по моменту в ответ на увеличение тока;
- предельная надежность.

В силу последних двух факторов нецелесообразно использовать машины с постоянными магнитами. Характеристики постоянных магнитов подвержены фактору старения в условиях многолетней эксплуатации, а воздействие тепловых полей является основной причиной размагничивания. В то же время, при всех достоинствах машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами на основе самария и неодима, обладающих самыми высокими удельными моментными характеристиками, они не позволяют существенно поднять момент в случае эксплуатационной необходимости в силу низкой удельной магнитной проводимости указанных материалов.

Высокая перегрузочная способность по моменту, очевидно, обеспечивается проектированием в больших габаритах, чем это требуется только в номинальных режимах, причем для кратковременного режима электромагнитные и тепловые нагрузки, принимаемые и допускаемые при проектировании, могут быть повышены, обеспечивая снижение габаритов и массы двигателя и привода. Ограничивающим фактором здесь является насыщение, а не плотность тока в обмотках. Иначе говоря, сечение двигателя для работы с большим запасом по моменту в кратковременном режиме работы должно быть значительно более «железным», чем «медным». В связи с этим, можно отметить преимущество бесконтактного синхронного (индукторного) двигателя с электромагнитным возбуждением перед асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Последние получили применение в приводах АЗ и эксплуатируются достаточно продолжительное время. Однако параметры асинхронных двигателей при ограничении сечения стержней не позволяют передать приемлемый момент без смещения его максимума в область нулевых и отрицательных частот вращения ротора, по механической характеристике.

Итак, наиболее перспективным вариантом двигателя для привода механизма АЗ ядерных энергетических установок является индукторная машина с электромагнитным возбуждением, с минимальным количеством электрических контуров, для повышения надежности. Известны индукторные двигатели, возбуждение и силовое питание которых осуществляется от единственной многофазной обмотки, как в разноименно-полусном, так и в

одноименно-полюсном исполнении: [5] – классификация, [6] – проектирование, [7] – анализ. В первых поток замыкается исключительно в плоскости поперечного сечения машины, в радиально-тангенциальном направлении. Во вторых поток замыкается в радиально-осевом направлении. Анализ распределения потока в обеих машинах при работе с форсированными токами показывает преимущество первых, так как замыкание потока в осевом направлении неизбежно создает участки глубокого насыщения в роторе одноименно-полюсной машины, ограничивающие ее рабочий магнитный поток и удельный вращающий момент.

Таким образом, для кратковременного режима работы в составе привода АЗ обосновано применение разноименно-полюсного индукторного двигателя с единственной многофазной обмоткой на явно выраженных полюсах-зубцах статора [5-7]. Его возбуждение осуществляется обтеканием фаз нереверсивным (выпрямленным) током, от преобразователя, собранного, например, по схеме асимметричного моста [8]. Достоинством схемы являются простота, надежность, широкие возможности для регулирования тока.

II. Методика проектирования

Для машины, работающей в кратковременном режиме, любые ограничения по габаритным размерам учитываются изменением (увеличением) линейной токовой нагрузки и плотности тока в весьма широких пределах, допустимых по условиям нагрева. При этом важно, чтобы повышенные электромагнитные нагрузки были продуктивными, т.е. не приводили бы к слишком глубокому насыщению, вызывающему чрезмерный рост потерь и ограничивающему удельные моментные характеристики. В аналогичных методиках проектирования [6-7] этот ограничивающий фактор не учитывается.

Поэтому в известном фундаментальном равенстве, представляющем собой баланс механических и электромагнитных нагрузок двигателя [5, 9, 10]:

$$\frac{D^2 \lambda}{M} = \frac{1}{K_1 B_\delta A_1}, \quad (1)$$

уровень средней индукции в зазоре B_δ завышен быть не может и предварительно выбирается из хорошо известных в практике электромашиностроения пределов, тогда как линейная токовая нагрузка A_1 подлежит определению, с целью достижения приемлемых базовых размеров: диаметра ротора D и осевой длины пакета L при потребном электромагнитном моменте M . В разомкнутом (шаговом) приводе диаметр D может быть выбран,

исходя из условия получения оптимального соотношения моментов инерции ротора двигателя и подвижных частей привода в диапазоне от 2:1 до 1:1 [11].

При выбранном уровне линейной токовой нагрузки наружный диаметр статора двигателя является функцией плотности тока. Здесь K_1 – конструктивный коэффициент, определяемый формой кривой индукции в зазоре, коэффициентом полюсного перекрытия и обмоточным коэффициентом каждой из машин. Также могут существовать ограничения на габаритные размеры двигателя, преодолеть которые возможно исключительно за счет дальнейшего увеличения плотности тока в обмотке для формирования компактного ее сечения.

Для исключения формирования участков локального насыщения (при изготовлении всего пакета статора из одного и того же материала) ширину зубцов статора b_{zc} , а также и зубцов ротора b_{zp} , следует принять равной ширине полюсных наконечников $b_{пн}$. Она определяется коэффициентом полюсного перекрытия, так, что:

$$b_{zc} = b_{пн} = \frac{\alpha_\delta \pi D}{Z_1}, \quad (2)$$

где α_δ – коэффициент полюсного перекрытия, принимаемый в пределах $\alpha_\delta = 0,45-0,49$ длины зубцового деления статора τ вдоль окружности зазора.

Число зубцов на статоре Z_1 определяется концептуальной схемой привода и машины, числом ее фаз, количеством устойчивых положений ротора на оборот при импульсном питании, некоторыми другими техническими требованиями, но чаще всего оно равно удвоенному числу фаз, так что полюса с катушками одной фазы занимают диаметрально противоположные фазные зоны.

При известной ширине зубцов можно однозначно рассчитать кривую намагничивания ферромагнитных участков магнитной цепи статора (на один зубец) и выбрать на ней точку наибольшей индукции B_{Fe_max} , соответствующую максимальной проводимости воздушного зазора. При этом, во избежание непродуктивного нагрева обмоток при форсировании тока, в качестве максимальной индукции B_{Fe_max} целесообразно выбрать значение, при котором амплитуда магнитного потока не более, чем на 5-10 % превышает поток, соответствующий индукции насыщения, за «коленом» общей кривой намагничивания [12]. Для большинства магнитомягких материалов подходит значение в пределах $B_{Fe_max} = 1,1-1,2$ Тл.

Магнитодвижущая сила (МДС) катушек, которая зависит от назначенной линейной токовой нагрузки A_1 ,

$$F_k = \frac{A_1 \cdot \pi D}{Z_1}, \quad (3)$$

является квадратичной функцией или линейной функцией высоты зубцов, в случае прямоугольной формы сечения катушек. При известном диаметре расточки высота зубцов и пазов составит:

$$h_z = h_n = \frac{2A_1}{\pi D(1 - \alpha_\delta)k_{\text{зап}}j} + h_{\text{пн}}, \quad (4)$$

где $h_{\text{пн}}$ – высота (радиальный размер) полюсного наконечника, $k_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения обмоточного пространства медью проводов.

С учетом пазового рассеяния, учитываемого соответствующей проводимостью $\Lambda_{\text{сп}}$, которая однозначно определяется по известной из (2)-(4) геометрии пазов, значения индукции указанных участков связываются между собой через уравнение, записанное по первому закону Кирхгофа для узла на поверхности полюсного наконечника, в функции удельного, на единицу осевой длины машины, магнитного потока:

$$B_\delta b_z \lambda D = B_{Fe_max} b_{zc} \lambda D - \Lambda_{\text{сп}} F_k, \quad (5)$$

здесь $\Lambda_{\text{сп}}$ – удельная, на единицу осевой длины, проводимость пазового рассеяния является функцией средней ширины паза статора:

$$\Lambda_{\text{сп}} = \mu_0 \frac{Z_1 h_n}{\pi(D + h_n) - Z_1 b_{zc}}. \quad (6)$$

После сравнения с первоначально принятым значением и его корректировки при необходимости, вычисляются магнитная проводимость зазора между статором и ротором и его размер в радиальном направлении.

Пренебрегая падением магнитного напряжения в роторе или введя для его учета небольшой поправочный коэффициент, можно вычислить наибольшую магнитную проводимость воздушного зазора, которая должна иметь место при совпадении осей явно выраженных полюсов фазы обмотки и зубцов ротора:

$$\Lambda_{\delta \max} = \frac{\pi D^2 \lambda \alpha_\delta B_{Fe_max}}{A_1}. \quad (7)$$

Приравнивая ее величину к очевидному значению:

$$\Lambda_{\delta_{\max}} = \frac{\mu_0 \pi D^2 \lambda \alpha_{\delta}}{\delta}, \quad (8)$$

можно определить величину зазора δ , при которой и индукция в зазоре B_{δ} , и максимальная индукция в магнитопроводе $B_{Fe_{\max}}$ принимают ранее выбранные предварительные значения.

Исходя из электрических потерь, массы обмоточных проводов и теплоемкости меди, можно дать предварительную оценку времени, в течение которого двигатель должен переместить РО в рабочее положение механизма АЗ, до недопустимого перегрева изоляции проводов, в предположении, что процесс тепловыделения является равномерным во времени:

$$t = \frac{(T_{\text{из}} - T_0)C}{mP_m}, \quad (9)$$

где $T_{\text{из}}$ – класс нагревостойкости изоляции применяемого обмоточного провода по ГОСТ 8865-93 (или МЭК 85-84), m – число фаз обмотки двигателя, P_m – потери в меди одной фазы обмотки.

III. Имитационное моделирование

Для такого чрезвычайно ответственного механизма, как привод аварийной защиты ядерного реактора, его работоспособность должна быть проверена с использованием методов численного моделирования. В модели привода двигатель представлен сеточной моделью (рис. 2), сгенерированной в среде *ANSYS/Emag* с использованием встроенного пакета *APDL*. По ней на каждом шаге интегрирования уравнения движения привода вычисляется электромагнитный момент двигателя M_{Σ} . Он является периодической функцией тока и углового положения ротора.

Электромеханическая часть привода состоит из четырехфазного двигателя (рис. 3, *а*) и инвертора, собранного по схеме асимметричного моста (рис. 3, *б*). Каждая фаза двигателя образована двумя катушками, расположенными на одной паре диаметрально противоположных полюсов, и подключена к отдельному инвертору. Достоинства инвертора, собранного по схеме асимметричного моста (рис. 3, *б*) – простота и надежность, широкие возможности для регулировки выходного тока, помехозащищенность. В блоке управления БУ сигнал датчика тока на каждом цикле опроса сравнивается с требуемым значением, в зависимости от результатов сравнения формируется длительность включенного состояния транзисторов *VT1* и

$VT2$, которые открываются и закрываются синфазно. Для исключения выбега, влекущего за собой повышенные динамические нагрузки механизма, привод выполнен разомкнутым, без управления по углу поворота ротора, где индукторный двигатель используется в качестве шагового, обеспечивающего строго дозированное дискретное перемещение ротора в соответствии с поданным количеством импульсов тока.

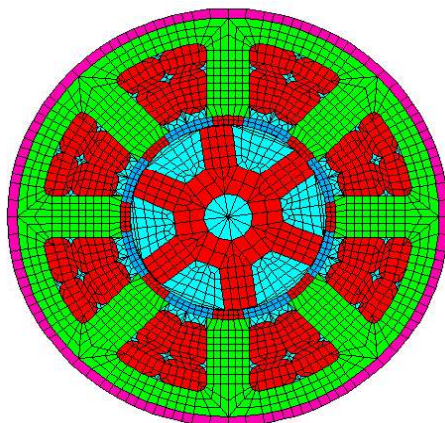


Рис. 2. Сеточная модель индукторного двигателя

Fig. 2. Grid model of an inductor motor

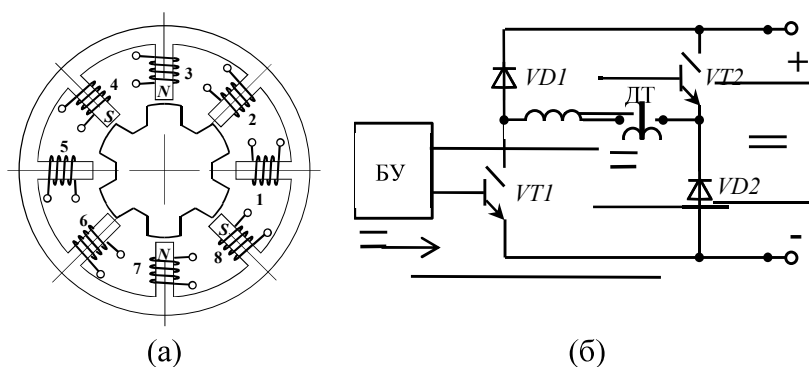


Рис. 3. Схема расположения катушек четырехфазного индукторного двигателя (а) и подключение его фаз к инвертору, собранному по схеме асимметричного моста, по одному в каждую фазу (б)

Fig. 3. Four phases inductor motor's coil's displacement scheme (a) and inductor motor connection to asymmetrical bridge inverter, by one at every phase (b)

Данная структура привода получила применение, прежде всего, в механизмах привода регулирующих и компенсирующих групп. При этом подбор формы импульса тока близкой к треугольной («выпуклый» треугольник) обеспечивает практически равномерное движение регулирующего органа не только в установившихся режимах, но и при пуске и останове, реализуемых путем изменения частоты следования управляющих импульсов тока, вплоть до полного ее обнуления в режиме удержания регулирующего органа в неподвижном состоянии. Благодаря минимизации динамических нагрузок и стрессов в механических передачах, данная система разомкнутого привода показала высокую эксплуатационную надежность на объектах ядерной энергетики, обеспечивая наработку весьма длительного ресурса непрерывной работы. Схема привода является традиционной, проверенной годами эксплуатации на объектах. Новизной обладает исключительно двигатель, спроектированный по изложенной последовательности, геометрические соотношения которого позволяют осуществлять значительную форсировку момента за счет многократного увеличения тока при кратковременном включении.

Электромагнитный момент двигателя воспринимает механическую нагрузку, которая содержит три составляющих: потенциальную от веса РО, M_G ; трения, $M_{тр}$, являющуюся ступенчатой функцией направления движения; и упругой деформации пружины $M_{упр}$. Дисбаланс электромагнитного момента и составляющих нагрузки уравнивается динамической нагрузкой, пропорциональной угловому ускорению:

$$J\ddot{\theta} = M_s - M_G - M_{тр} \operatorname{sign}(\dot{\theta}) - M_{упр}(x), \quad (10)$$

где J – суммарный момент двигателя и подвижных частей привода на его валу.

Последняя составляющая нагрузки, так же, как и от трения в механизме, является нелинейной, поскольку действует только на начальном участке подъема РО, когда его положение X по высоте не превышает длину хода тормозящей пружины $l_{пр}$ ($X < l_{пр}$),

$$M_{упр}(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \geq l_{пр} \\ kx, & \text{при } x \leq l_{пр} \end{cases}, \quad (11)$$

где k – конструктивная постоянная, определяемая параметрами преобразователя вращательного движения в поступательное (узел 4 на рис. 1).

Осциллограммы движения ротора и изменения температуры, полученные при интегрировании (10) с учетом (11) и сеточной модели двигателя, представлены на рис 4.

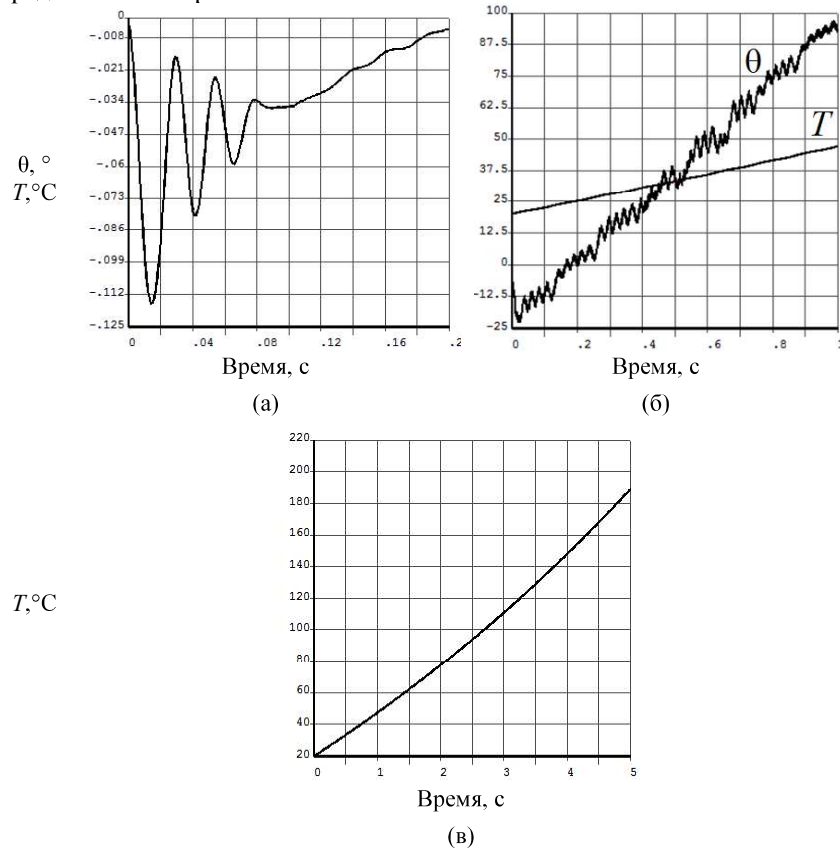


Рис. 4. Осциллограммы при пуске привода: угла поворота ротора θ (а), угла поворота θ и температуры двигателя T (б) и температуры двигателя T (в)

Fig. 4. Oscillograms during drive start-up: rotor rotation angle θ (a), rotation angle θ and engine temperature T (b) and engine temperature T (в)

При неблагоприятных начальных условиях пуска по углу ротор первоначально получает отрицательный импульс в сторону падения РО (рис. 4, а), действие которого затем нейтрализуется в результате переходных колебаний. На более длительном временном промежутке (рис. 4, б) прослеживается линейное нарастание температуры и угла, с небольшими, благодаря

треугольной форме импульсов тока, возмущениями, отслеживающими колебания ротора вокруг синхронной скорости. На более длительном интервале проявляется ускоренное нарастание температуры обмотки, вследствие роста электрической потерь под влиянием увеличивающегося сопротивления меди проводов (рис. 4, в). Завершить процесс интенсивного нарастания температуры возможно только по достижении регулирующим органом конечного положения, отключением двигателя после срабатывания стопорного устройства или подачи питания на удерживающий электромагнит. Движение с максимальной скоростью, близкой к частоте приемистости двигателя, позволяет облегчить тепловой режим, сделать его наиболее благоприятным по нагреву и ресурсу изоляции.

Частота приемистости, вблизи до которой двигатель обеспечивает перемещение РО в составе разомкнутого (шагового) привода с наибольшей скоростью, определяется параметрами двигателя и привода [6, 8, 13]:

$$\Omega_{\text{пр}} = \cos\left(\frac{\pi}{2m}\right) \sqrt{\frac{mM_{\text{ср}}}{2Z_2 J}} \frac{60}{\pi}, \quad (12)$$

где Z_2 – число зубцов на роторе.

В соответствии с изложенной последовательностью расчетных процедур проведена глубокая модернизация универсального двигателя механизма вертикального перемещения и позиционирования регулирующего органа, изначально предназначенного для работы в длительном режиме, в механизмах приводов различного назначения: регулирующих и компенсирующих, стержней [14], совмещенных с функциями АЗ. Основные размеры и масса активных частей этого двигателя представлены в табл. 1, левая колонка.

Из результатов можно сделать заключение, что после модернизации, за счет форсирования тока для подъема груза в приводе АЗ при том же вращающем моменте и на том же диаметре расточки статора, габариты и массу двигателя удалось значительно сократить (табл. 1, правая колонка значений) по сравнению с базовым вариантом (левая колонка значений). Это отразилось в двукратном уменьшении машинной постоянной и расширении диапазона рабочих скоростей, верхняя граница которого определяется частотой приемистости. При этом в новом образце снизился КПД на этой частоте (34,9 % против 38,7 %) за счет больших потерь в меди, однако для машин, эксплуатируемых с весьма кратковременной продолжительностью включения, это снижение не является определяющим фактором.

Таблица 1.
Основные размеры и масса двигателей

Table 1.
The main dimensions and weight of the motors

Наименование параметра	Значение по вариантам	
	1	2
Потребный момент нагрузки на валу, Н·м	3,92	
Диаметр расточки статора, мм	55	
Линейная нагрузка, А/м	18000	
Осевая длина пакета статора, мм	156	87
Наружный диаметр статора, мм	120	121
Воздушный зазор, мм	0,25	0,35
Масса меди обмоточных проводов, кг	1,44	0,354
Масса ферромагнитных материалов, кг	6,89	4,65
Удельная тепловая нагрузка от электрических потерь, А ² /м·мм ²	1474	3293
Длина статора с учетом вылета лобовых частей, мм	199	114
Машинная постоянная (Арнольда), м·с ² /кг	1,317·10 ⁻⁴	0,670·10 ⁻⁴
Частота приемистости (без привода), об/мин	670	703

IV. Выводы

Предложена методика проектирования индукторных двигателей с электромагнитным возбуждением, позволяющая формировать геометрию зубцовых зон статора и ротора с учетом глубокой кратковременной перегрузки по току, без чрезмерного насыщения магнитной цепи, приводящего к непродуктивному нагреву двигателя. Особенностью методики является выбор величины зазора между статором и ротором в строгом соответствии с состоянием ферромагнитных участков магнитной цепи, не допуская их чрезмерного насыщения в положении максимальной проводимости воздушного зазора.

В соответствии с изложенной методикой и ее рекомендациями по выбору геометрии зубцовой зоны статора и наибольшего значения индукции спроектирован и численно исследован индукторный двигатель с электромагнитным возбуждением от постоянной составляющей фазных токов, предназначенный для приведения в рабочее состояние – подъема регулирующего органа аварийной защиты ядерного реактора.

Изложенный подход может быть полезен при проектировании синхронных двигателей с электромагнитным возбуждением, предназначенных

для работы с кратковременной перегрузкой по току, обеспечивая минимизацию влияния реакции якоря на уровень электрических и магнитных потерь.

© Смирнов А.Ю., 2024

© Ульянов Д.А., 2024

© Стасюк П.Г., 2024

© Уснунц-Кригер Т.Н., 2024

Поступила в редакцию 16.10.2024

Принята к публикации 15.11.2024

Received 16.10.2024

Accepted 15.11.2024

Библиографический список

- [1] ГОСТ 17137-87. Системы контроля, управления и защиты ядерных реакторов. Термины и определения. Введ. 1988-01-01. М.: Стандартиформ, 2005. – 10 с.
- [2] НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. Введ. 2008-06-01. М.: Ростехнадзор, 2007. – 26 с.
- [3] Митенков Ф.М., Жучков И.И., Зайцев Б.И., Подтележников И.А. Исполнительные механизмы органов управления и защиты для натриевых реакторов на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1980. – 176 с.
- [4] Юркевич Г.П., Рабкин Ю.Е., Шапошников Л.А. Электроприводы регулирующих органов энергетических реакторов. Основы проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
- [5] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [6] Смирнов А.Ю. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. М.: Инфра-М, 2024. – 200 с.
- [7] Lipo T.A. Introduction to AC machine design. John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119352181
- [8] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ. М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [9] Purhonen J., Jokinen T., Hrabovokova V. Design of rotating electrical machines. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 512 p.
- [10] Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
- [11] Копылов И.П., Клоков Б.К. Справочник по электрическим машинам. Т. 2. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
- [12] Смирнов А.Ю., Александрова Е.Н., Зимин А.Ю. Уточнение моделей расчета момента при проектировании явнополусных индукторных двигателей // Электричество. 2020. № 11. С. 53-59. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59
- [13] Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К., Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. М.: Энергия, 1971. – 624 с.
- [14] Юркевич Г.П. Системы управления энергетическими реакторами. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2001. – 344 с.

References

- [1] Monitoring, control and protection systems of nuclear reactors. Terms and definitions, GOST 17137-87, Jan. 1988.
- [2] Rules of nuclear safety of reactor installations of nuclear power plants, NP-082-07, June 2008.
- [3] F.M. Mitenkov, I.I. Zhuchkov, B.I. Zaitsev and I.A. Podtelezchnikov, *Ispolnitel'nye mekhanizmy organov upravleniya i zashchity dlya natrievykh reaktorov na bystrykh nejtronah [Control and protection actuators for fast neutron sodium reactors]*. Moscow: Atomizdat, 1980 (in Russian).
- [4] G.P. Yurkevich, Yu.E. Rabkin and L.A. Shaposhnikov, *Elektroprivody reguliruyushchih organov energeticheskikh reaktorov. Osnovy proektirovaniya [Electric drives of control bodies of power reactors. Design principles]*. Moscow: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
- [5] A.V. Ivanov-Smolensky, *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [6] A.Y. Smirnov, *Elektroprivod s beskontaktnymi sinhronnymi dvigatelyami [Electric drive with contactless synchronous motors]*. Moscow: Infra-M, 2024 (in Russian).
- [7] T.A. Lipo, *Introduction to AC machine design*. John Wiley & Sons, 2017. DOI: 10.1002/9781119352181
- [8] A.Y. Smirnov, *Induktornye mashiny. Proektirovanie i vychislitel'nyj analiz [Inductor machines. Design and computational analysis]*. Moscow: Forum, 2015 (in Russian).
- [9] J. Purhonen, T. Jokinen and V. Hrabovokova, *Design of rotating electrical machines*. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [10] I.P. Kopylov, F.A. Goryainov and B.K. Klokov, *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electric machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [11] I.P. Kopylov and B.K. Klokov, *Spravochnik po elektricheskim mashinam [Handbook of electric machines]*. Vol. 2. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [12] A.Yu. Smirnov, E.N. Alexandrova and A.Yu. Zimin, "Refining the torque calculation models in designing salient-pole inductor motors", *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 53-59, July 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-11-53-59
- [13] B.A. Ivobotenko, V.P. Rubtsov, L.A. Sadovsky, V.K. Tsatsenkin and M.G. Chilikin, *Diskretnyj elektroprivod s shagovymi dvigatelyami [Discrete electric drive with stepper motors]*. Moscow: Energy, 1971 (in Russian).
- [14] G.P. Yurkevich, *Sistemy upravleniya energeticheskimi reaktorami [Power reactor control systems]*. Moscow: ELEKS-KM, 2001 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Смирнов Александр Юрьевич , доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.	Alexander Y. Smirnov , D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ульянов Данил Александрович, аспирант государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация. **Danil A. Ulyanov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Стасюк Павел Григорьевич, инженер-конструктор АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация. **Pavel G. Stasyuk**, design engineer of the JSC «Afrikantov OKBM», Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Уснунц-Кригер Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент Выксунского филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Нижегородская область, г. Выкса, р.п. Шиморское, Российская Федерация. **Tatyana N. Usnunts-Kriger**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Vyksa Branch of the National University of Science and Technology «MISiS», Nizhny Novgorod region, Vyksa, Shimorskoye, Russian Federation.