

УДК 621.3

А.Ю. Смирнов, А.А. Кралин, А.Ю. Зимин, Т.Н. Уснунц-Кригер

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены технические решения в части электромеханических устройств, направленные на повышение эффективности работы устройств для вертикального перемещения регулирующих органов ядерных реакторов. Показано, что весьма удачные решения в части разработки таких устройств могут быть созданы в результате изменения ставших традиционными конструктивных схем бесконтактных синхронных машин с учётом особенностей привода.

Ключевые слова: электропривод для вертикального перемещения, регулирующий орган, шаговый двигатель, генератор, ёмкостная нагрузка, обмотка.

Непрерывное возрастание требований к безопасности эксплуатации объектов ядерной энергетики диктует жёсткие требования к качеству всего комплекса входящего в эти объекты электротехнического оборудования. Одной из важнейших единиц такого оборудования, являются устройства для вертикального перемещения и позиционирования в заданном положении регулирующих органов (РО), поглощающих тепловые нейтроны.

Привод осуществляется посредством бесконтактной синхронной машины, которая получает питание в виде импульсов напряжения или тока, т.е. используется в качестве шагового двигателя [1].

Дополнительным требованием, предъявляемым к работе рассматриваемых приводов, является необходимость работы в генераторном режиме при полном обесточивании, для плавного опускания регулирующего органа вниз, в результате совместного действия генераторного момента и момента от веса РО. Для ограничения скорости опускания РО применяют шаговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Полость ротора таких двигателей герметично отделена от статора с обмоткой посредством толстостенной герметизирующей трубы (рис. 2).

По технологическим причинам и условиям компоновки привода число пазов статора машины с герметизирующей трубой должно быть минимальным. Анализируя конструкции переменного-полюсных магнитоэлектрических машин с возбуждением со стороны ротора, можно рекомендовать магнитную систему индуктора с составным звездообразным магнитопроводом. Она содержит радиально намагниченные магниты с чередующейся полярностью полюсов.

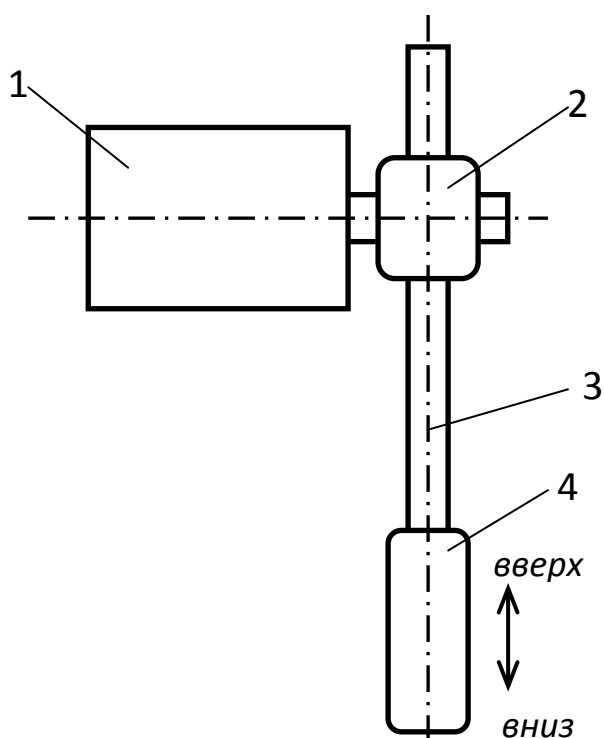


Рис. 1. Электропривод для вертикального перемещения РО (схема конструкции):

1 – шаговый двигатель; 2 – редуктор; 3 – зубчатая рейка; 4 – регулирующий орган

По технологическим причинам и условиям компоновки привода число пазов статора машины с герметизирующей трубой должно быть минимальным. Анализируя конструкции переменного-полюсных магнитоэлектрических машин с возбуждением со стороны ротора, можно рекомендовать магнитную систему индуктора с составным звездообразным магнитопроводом. Она содержит радиально намагниченные магниты с чередующейся полярностью полюсов.

Для сокращения длины вылета лобовых частей и общей осевой длины двигателя и привода сосредоточенные катушки с шагом $y=1$ укладывают в открытые пазы статора. При таком решении наложение реактивной составляющей момента искажает форму угловой характеристики двигателя. Особенно сильно это искажение проявляется при наличии магнитомягких полюсных наконечников на роторе, где велика доля поперечного потока.

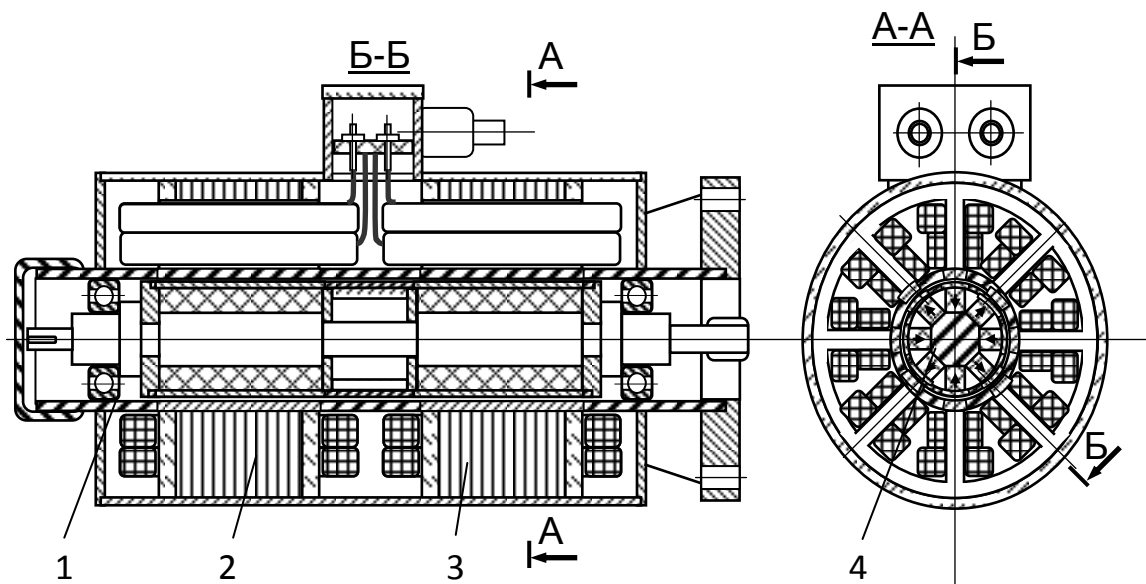


Рис. 2. Герметичный шаговый двигатель с постоянными магнитами на роторе:
 1 – герметизирующая труба; 2, 3 – статоры с многофазной обмоткой;
 4 – ротор

Для подавления гармоник высших порядков и реактивных моментов, обусловленных зубчатостью статора, воздушный зазор следует увеличивать по сравнению с прочими аналогами, а компенсацию падения магнитного напряжения, обусловленного этим увеличением, осуществлять применением высококоэрцитивных постоянных магнитов на основе сплавов РЗМ, ферритов бария или стронция.

При использовании ферритов, коэрцитивная сила по индукции H_{CB} которых обычно находится в пределах 200-300 кА/м, в машинах с зубчатым статором следует выбирать зазор δ не менее $1/10 - 1/15$ зубцового деления статора t_z . Влияние повышенного магнитного сопротивления зазора при этом в значительной мере сглаживается магнитным сопротивлением собственно постоянных магнитов, весьма большим в упомянутых группах магнитотвёрдых материалов.

Эти магниты обладают прямолинейной характеристикой размагничивания в области второго квадранта. Максимум их удельной магнитной энергии приходится на середину прямой магнитного возврата, которая совпадает с характеристикой размагничивания, поэтому индукцию в зазоре целесообразно предварительно выбрать, исходя из соотношения

$$B_{\delta} = K_{\text{пм}} \frac{B_r}{2}, \quad (1)$$

где B_r – паспортное значение остаточной индукции магнитотвёрдого материала, $K_{\text{пм}}$ – коэффициент, определяемый отношением площади магнитов к площади полюсных наконечников ротора у зазора: для ротора (индуктора) с составным звездообразным магнитопроводом без полюсных наконечников $K_{\text{пм}}=1$.

Фазы обмотки якоря двигателя по рис. 1 распределены по двум статорам 2 и 3 с угловым смещением статоров или магнитов ротора внутри каждого из них на половину полюсного деления. Но возможно и размещение всех фаз на одном из них, например, на статоре 2. Тогда оставшийся статор может быть использован в качестве отдельного генератора, обеспечивающего заданную скорость опускания РО. Для поддержания заданной скорости к обмотке генератора подключается емкостная нагрузка (рис. 3). На низкочастотном участке характеристики электромагнитного момента генератора ток и электромагнитный момент линейно возрастают с ростом частоты вращения под влиянием роста ЭДС, реактивный ток в цепи является индуктивным. На более высоких частотах сказывается влияние компенсации поля реакции якоря конденсаторами, и момент возрастает более интенсивно, вплоть до максимума, при котором наступает резонанс напряжений. Этот участок характеристики является рабочим. На нём электромагнитный момент уравнивает момент от веса регулирующего органа и последний опускается равномерно.

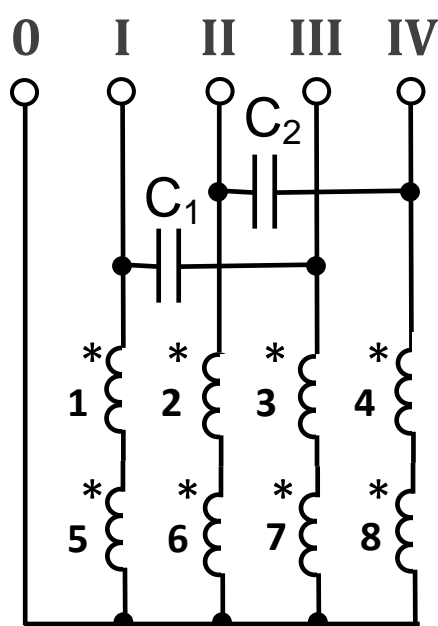


Рис. 3. Схема подключения емкостной нагрузки к фазам обмотки магнитоэлектрического двигателя

коэффициент полюсного перекрытия, λ – отношение диаметра ротора к аксиальной длине зазора, $K_{обv}$ – обмоточный коэффициент для рабочей гармоники, w_1 – число витков фазы обмотки якоря.

Зависимость (3) вытекает из уравнения для ЭДС фазы обмотки

$$E_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} v f w_1 K_{обv} \Phi_m, \quad (4)$$

Φ_m – полный поток возбуждения (на один полюс магнитной системы ротора),

$$\Phi_m = K_{пм} \frac{B_r}{2} \frac{\pi D^2 \lambda \alpha_\delta}{2p}. \quad (5)$$

Манипулируя отношением λ , можно определиться с базисными размерами с учётом возможных ограничений. Такими ограничениями являются приемлемое соотношение моментов инерции шагового двигателя и привода, а также условие размещения магнитов, обеспечивающих необходимую линейную нагрузку A внутри окружности ротора с диаметром D .

При дальнейшем разгоне ротора реактивный ток в цепи становится ёмкостным, характеристика переходит на ниспадающую ветвь вследствие роста ёмкостного сопротивления. Эта ветвь соответствует неустойчивой работе: в теоретически возможном случае преодоления максимума электромагнитного момента под действием какого-либо случайного импульса нагрузки происходит неуправляемый разгон ротора. Чтобы этого не произошло машина, как и любая другая в синхронном приводе, должна обладать достаточной кратностью максимального момента.

При проектировании генераторов с ёмкостной стабилизацией фазное напряжение и ЭДС можно приравнять

$$E_0 = U_{ном}. \quad (2)$$

Тогда диаметр ротора и число витков в фазе окажутся связанными между собой зависимостью

$$D^2 = \frac{p U_{ном}}{1,1 \pi K_{пм} \alpha_\delta \lambda v f K_{обv} w_1 B_r}, \quad (3)$$

где v – номер рабочей гармоники, а её не обязательно является первая гармоника, ей может быть третья, зубцовая или другая высшая, p – число пар полюсов индуктора, f – частота сети, α_δ – расчётный коэффициент

Во избежание размагничивания линейная нагрузка должна несколько превышать таковую со стороны статора при максимально возможном токе якоря в условиях воздействия эксплуатационных перегрузок по току

$$A = \frac{2pH_{CB}l_m K_{зм}}{\pi D} = \frac{2mw_1 I_{\max}}{\pi(D+2\delta)}, \quad (6)$$

где H_{CB} – коэрцитивная сила магнитотвёрдого материала по индукции, l_m – общая длина магнитов с полюсными наконечниками (если они присутствуют) в направлении одной силовой линии поля возбуждения, p – число пар полюсов, образованных магнитами индуктора на роторе ($p=v p_1$); I_{\max} – амплитуда максимального тока фазы обмотки якоря при протекании форсированных токов (в двигателе) или тока ударного короткого замыкания (в генераторе), $K_{зм}$ – коэффициент запаса МДС магнитов индуктора, принимаемый для обеспечения их устойчивости к размагничиванию меньшим единицы на 5-10%.

По найденной амплитуде потока взаимной индукции фазы с полем постоянных магнитов и её индуктивному сопротивлению $X_1 = \omega L_1$ определяются амплитуда и действующее значение ЭДС фазы

$$E_m = 2\pi w_k K_{об} \Phi_{ам} \cdot l_\delta, \dot{E} = E_m / \sqrt{2};$$

а затем – амплитуда и фаза тока. В соответствии со схемой замещения, состоящей из последовательно соединённых индуктивного сопротивления фазы, её активного сопротивления, и сопротивления нагрузки, которую для поддержания тока делают ёмкостной, можно выразить ток фазы, представленный амплитудой

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (X_1 - X_C)^2}}$$

и угловым аргументом коэффициента мощности

$$\varphi = \arctg \frac{X_1 - X_C}{R}$$

и падения напряжения на индуктивном сопротивлении фазы $j\dot{I}_a X_1$.

Все эти параметры можно определить по упрощённой векторной диаграмме (рис. 4), отложив сначала отрезок AB , равный модулю ЭДС в вертикальном направлении, в соответствующем масштабе.

После этого нетрудно определить индуктивные параметры машины и нагрузки при каждой конкретной частоте вращения ротора

$$X_H = R_H \operatorname{tg}(\varphi),$$

$$\beta = \arccos \frac{R + R_H}{\sqrt{(X_H + X_q)^2 + (R + R_H)^2}},$$

$$R_1 = R + \frac{X_d + X_q}{2} \cos(2\beta),$$

$$X_1 = 0,5(X_d + X_q) + 0,5(X_d - X_q) \cos(2\beta),$$

и электромагнитный момент

$$\frac{P}{\Omega} = m R_H I^2.$$

Здесь R_H и X_H – активная и реактивная составляющие нагрузки, соответственно; $\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности, X_d и X_q – индуктивное сопротивление фазы обмотки

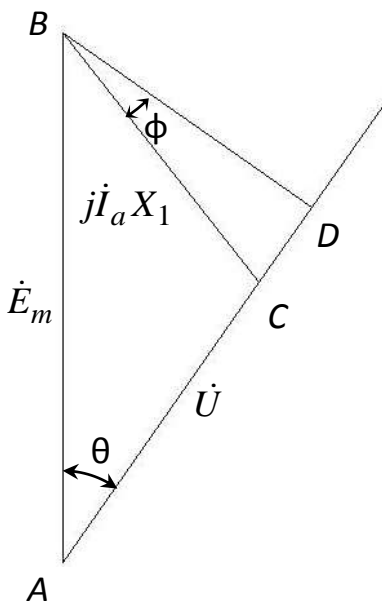


Рис. 4. Упрощённая векторная диаграмма

якоря по продольной и поперечной, R_1 и X_1 – активная и индуктивная составляющие полного (главного) сопротивления якоря, β – угол (фазовый сдвиг) между током и ЭДС, I – действующее значение тока в фазе обмотки якоря, m – число фаз обмотки, P – активная мощность.

Генератор может быть совмещён с датчиком скорости. Для этого одна, а лучше две фазы его обмотки подключается ко входу компаратора (по одному на каждую фазу). Компаратор преобразует ЭДС в последовательность импульсов, которые затем подаются на счётчик импульсов, которые суммируются или вычитаются, в зависимости от сдвига фаз сигнала двух смежных фаз с ранее сосчитанными импульсами, определяя тем самым текущее положение ротора и РО.

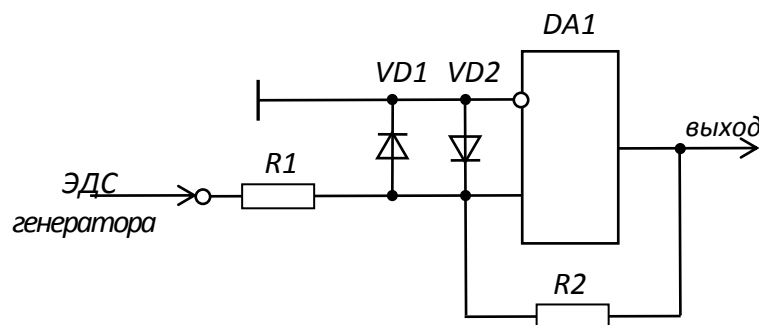


Рис. 5. Схема компаратора для определения углового положения ротора и РО путем интегрирования сигнала по частоте вращения

Для обработки сигнала датчика во вторичном преобразователе применён компаратор на операционном усилителе (рис. 5). Напряжение с генератора от минус 100 до плюс 100 В подаётся на гасящий резистор $R1$ поступает на прямой вход операционного усилителя $DA1$, на котором с помощью диодов $VD1$ и $VD2$ в зависимости от угла поворота ротора формируется последовательность положительных и отрицательных полуволн напряжения относительно инверсного входа усилителя $DA1$ напряжением ± 1 В. Компаратор преобразует входные напряжения $DA1$ в последовательность знакопеременных импульсов, несущих информацию об угле поворота ротора генератора и, следовательно, о величине перемещения РО.

Интересная возможность создать дополнительный запас электромагнитного момента синхронной машины на перемещение и торможение РО при движении регулирующего органа в нужных направлениях обеспечивается за счёт использования многофазной машины с асимметричным ротором [2].

Машина с асимметричным ротором содержит на статоре многофазную обмотку (рис.6), состоящую из двух параллельных ветвей в каждой фазе и имеющую по окружности статора два полюса разной полярности. Шаг витков обмотки статора по пазам составляет половину полюсного деления.

Выводы фаз обмотки через зажимы A_1-X_1 , B_1-Y_1 , C_1-Z_1 подключены к источнику переменного напряжения или тока (не показан). Фазы обмотки сопряжены между собой в звезду и подсоединены к зажимам A_1 , B_1 , C_1 соответствующих фаз. Допускается также соединение в многоугольник, или независимое включение фаз в разные электрические цепи.

Обмотка снабжена также выводами точек, эквипотенциальных относительно напряжения сети, соединёнными с зажимами A_2-X_2 , B_2-Y_2 , C_2-Z_2 в соответствующих фазах, предназначенными для подключения конденсаторов.

Магнитоэлектрический индуктор 6 установлен на валу 2 ротора синхронной машины 1 с угловым смещением осей полюсов относительно осей зубцов зубчатого магнитопровода 7 на угол γ , не превышающий одной четвертой части полюсного деления, в направлении

действия момента (M_{PO}) от веса регулирующего органа, приложенного к валу 2 синхронной машины.

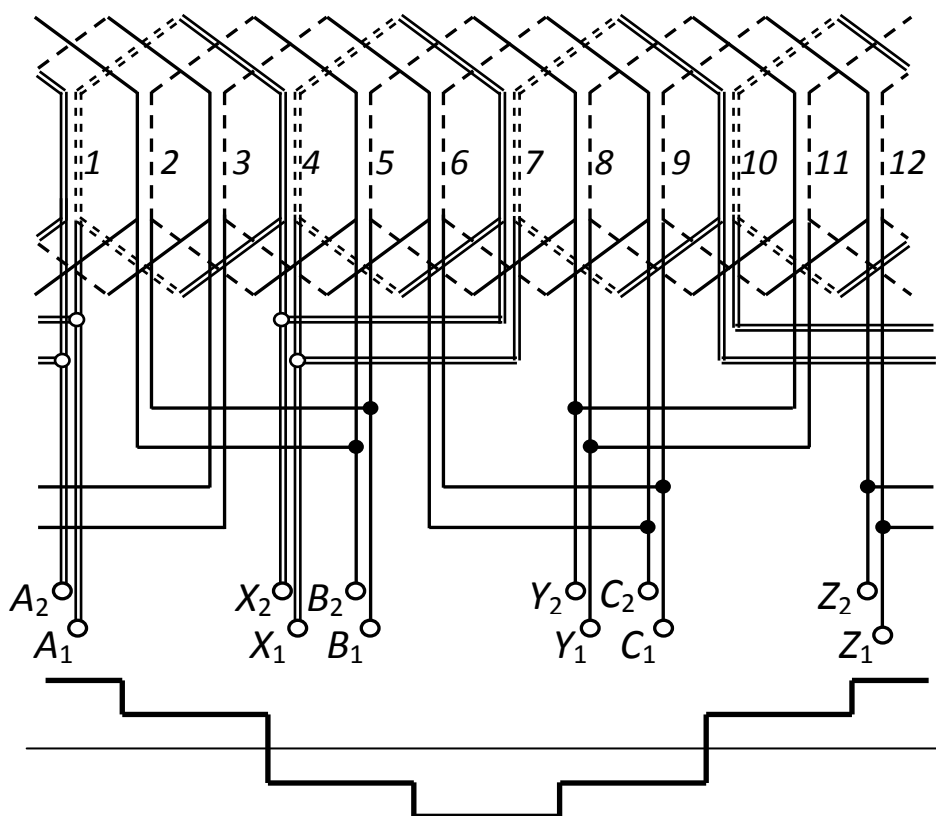


Рис. 6. Обмотка двигателя – генератора с асимметричным ротором

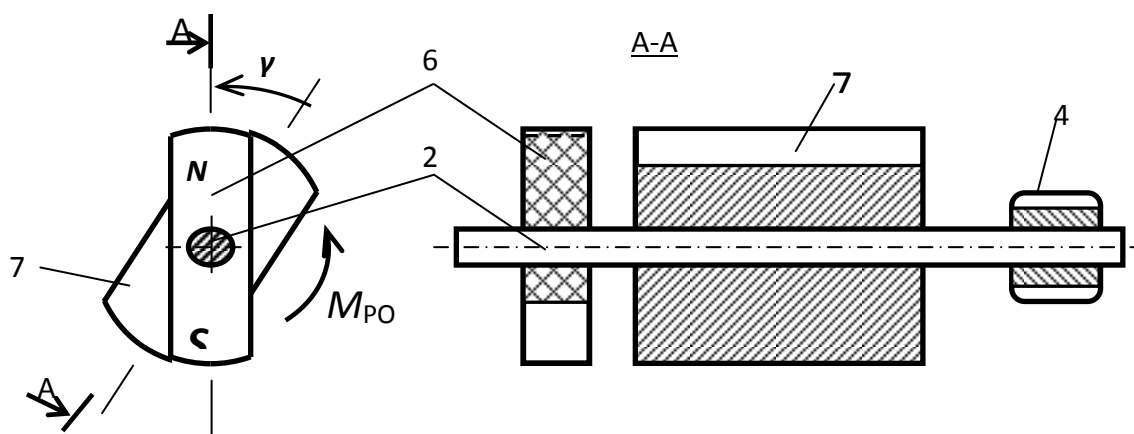


Рис. 7. Асимметричный ротор двигателя – генератора для перемещения РО

При подключении обмотки статора синхронной машины к сети многофазного напряжения или тока на зажимы A_1-X_1 , B_1-Y_1 , C_1-Z_1 многофазной обмотки статора синхронной машины в ней возникает магнитное поле, приводящее вал 2 ротора во вращение в результате взаимодействия силовых линий этого поля с зубчатым магнитопроводом 7 и с магнитоэлектрическим индуктором 6. В результате вращения постоянными магнитами магнитоэлектрического индуктора в фазах обмотки статора будет наводиться ЭДС. В силу разного углового положения осей полюсов магнитоэлектрического индуктора 6 относительно осей зубцов зубчатого магнитопровода 7, фазовый угол ЭДС, наводимой при вращении ротора синхронной машины 1 в одном направлении, будет отличен от фазового угла ЭДС, наводимой при вращении его в противоположном направлении. Различие фазового угла ЭДС влечёт за со-

бой различие углов нагрузки тока статора, а значит мощности и момента синхронной машины при вращении в разных направлениях по угловым характеристикам.

Алгебраическое сложение момента от действия разных пакетов по их угловым характеристикам приводит к увеличению амплитуды электромагнитного момента при вращении ротора в одном направлении и к уменьшению амплитуды, при вращении ротора в противоположном направлении.

В частности, если угловой сдвиг осей полюсов магнитоэлектрического индуктора b относительно осей зубцов зубчатого магнитопровода 7 выполнен в направлении действия момента от веса регулирующего органа (M_{PO}), то при работе в двигательном режиме синхронная машина развивает больший вращающий электромагнитный момент в направлении против приложенного внешнего момента, т.е. на подъём регулирующего органа (рис. 4, нижняя полувольтная характеристика). Тем самым обеспечивается увеличение её перегрузочной способности (кратности максимального электромагнитного момента) при вращении ротора в направлении на подъём регулирующего органа. За счёт этого обеспечивается более надёжная работа электропривода при перемещении регулирующего органа вверх, в случаях кратковременного увеличения нагрузки на валу двигателя по каким-либо причинам.

При принудительном опускании регулирующего органа (обмотка статора двигателя - генератора остаётся подключенной к источнику) электромагнитный момент при работе её в двигательном режиме снижается, однако это снижение компенсируется моментом от веса регулирующего органа, направленным в сторону электромагнитного момента двигателя.

Максимальное значение угла смещения осей полюсов активного пакета относительно осей зубцов зубчатого магнитопровода, при котором обеспечивается наибольшая разница электромагнитного момента двигателя при движении вверх и вниз составляет $\frac{1}{4}$ часть полюсного деления активного пакета.

При обесточивании обмотки статора синхронная машина переходит в генераторный режим, направление фазового угла меняется на противоположное, в результате чего изменяется и распределение электромагнитного момента по квадрантам угловой характеристики: в квадранте угловой характеристики, соответствующем генераторному режиму - в направлении перемещения регулирующего органа вниз, кратность максимального момента возрастает (рис. 5, верхняя полувольтная характеристика). Это обеспечивает более эффективное ограничение скорости опускания регулирующего органа до установившегося значения.

Шаг катушек обмотки якоря по пазам рассмотренной синхронной машины (рис. 6) составляет половину полюсного деления, но может быть использована обмотка с чётным числом пазов на полюс и фазу q с любым шагом, меньшим диаметральным. Чем меньше укорочение шага, тем более эффективно, с большим моментом синхронная машина будет работать в двигательном режиме, и менее эффективно - в генераторном режиме при обесточивании сети.

Выбирая обмотку якоря с соответствующим шагом, можно получить дополнительный эффект за счёт оптимального сочетания уровней максимального момента синхронной машины, развиваемого ею в двигательном и генераторном режимах её работы, приведения в соответствие заданной скорости опускания регулирующего органа и его массы.

Такая машина может быть выполнена с любым числом пазов на полюс и фазу, начиная с $q=0,5$, как с электромагнитной редуцией скорости вращения ротора, так и без неё.

Например, машина с четырёхфазной ($m=4$) двухполюсной, $2p_1=2$, обмоткой статора при $q=0,5$ также как и прототип содержит 8 зубцов на статоре и может быть укомплектована как двухполюсным индуктором, в этом случае ротор вращается со скоростью поля, так и шестиполюсным. В последнем случае ротор вращается со скоростью в Z раз меньшей, чем частота вращения поля, обеспечивая электромагнитную редуцию.

Вывод

Совершенствование электропривода для вертикального перемещения РО в значительной мере обеспечивается применением нестандартных электромеханических преобразователей, отличающихся от ставших традиционными бесконтактных синхронных машин различного типа [3] более широкими функциональными возможностями и более приспособленными к особенностям нагрузки при движении в направлениях на подъем и на опускание РО.

Библиографический список

1. **Смирнов, А.Ю.** Вопросы проектирования двигателей для синхронного привода систем автоматики ядерных энергетических установок / А.Ю.Смирнов, Т.Н. Усунц-Кригер // Электротехника. 2013. №9. С. 34–39.
2. **Смирнов, А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учебное пособие для вузов / А.Ю. Смирнов. – М.: Изд-во Форум, – 2015. – 192 с.
3. **Смирнов, А.Ю.** Вопросы классификации бесконтактных синхронных машин // Электротехника. 2012. №2. С. 50–56.

*Дата поступления
в редакцию 15.12.2014*

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Reviewed technical solutions in Electromechanical devices, and is aimed at enhancing the efficiency of the device for the vertical displacement-tion regulators of nuclear reactors. It is shown that a very good solution in terms of the development of such devices can be created by changing the traditional design concepts contactless synchronous machines taking into account special features of the drive.

Key words: electric Drive for vertical movement regulating the or-Gan, a stepper motor, a generator, a capacitive load, the winding.