

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов, Д.А. Кудряшов

## РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Опытное конструкторское бюро машиностроения  
им. И.И. Африкантова

В статье рассмотрены технические решения, позволяющие обеспечить одновременную индикацию и силовое воздействие в синхронном приводе, предназначенном для перемещения регулирующих органов ядерного реактора. Привод включает в себя преобразователь частоты и шаговый двигатель, осуществляющий силовое воздействие на регулирующий орган и одновременное перемещение подвижного элемента устройства контроля движения. В качестве устройства контроля движения рассмотрены синхронные генераторы и датчики индуктивного типа, как наиболее надёжные и позволяющие работать в широком диапазоне температур. Проведен анализ датчиков насыщения и датчиков электродвижущей силы (ЭДС), последние из которых осуществляют силовое воздействие на подвижную часть привода с целью стабилизации скорости движения. Для определения положения ротора посредством датчика ЭДС использован компаратор, вырабатывающий импульсы напряжения на входе сумматора. Компаратор позволяет определить перемещение, пройденное от некоторого базового уровня путём подсчёта количества поступивших импульсов. Выполнено исследование работы устройства контроля движения в составе привода исследована на сеточной модели. Расчёты проведены для режима полного обесточивания. Установлено, что по окончании переходного процесса разгона ротора момент от веса подвижных масс уравновешивается электромагнитным моментом устройства контроля движения и нагрузка опускается равномерно. Это позволяет исключить воздействие избыточных ударных нагрузок в конце хода регулирующего органа.

**Ключевые слова:** генераторная характеристика, датчик положения, постоянный магнит, регулирующий орган, шаговый привод, электропривод.

### 1. Введение

Одним из требований, предъявляемых к электроприводам регулирующих органов судовых энергетических реакторов, является обеспечение абсолютной безопасности при эксплуатации. Для гарантии надежного и безотказного функционирования устройств регулирования мощности реактора важно решить задачу по обеспечению одновременной индикации и силовому воздействию на регулирующие органы ядерного реактора, а

также сохранить выполнение данных функций при полном исчезновении электропитания.

Исполнительный механизм (ИМ) системы управления и защиты (СУЗ) состоит из привода СУЗ, рабочего органа и соединительных элементов и предназначен для изменения реактивности ядерного реактора. Синхронный привод с частотным управлением включает в себя формирователь импульсов и шаговый двигатель (ШД). Ротор ШД вращает входной вал преобразователя движения, который перемещает регулирующий орган (РО). Одновременно с преобразователем движения ШД перемещает подвижный элемент устройства контроля движения (УКД) [1].

## II. Постановка задачи исследования

Одной из важных функций УКД является контроль скорости опускания при обесточивании привода. Это реализуется при помощи электромагнитного тормоза, совмещенного с ШД в одной машине [2, 3], или отдельного устройства, установленного с двигателем на общем валу [4]. Необходимость устройства контроля скорости опускания обусловлена неравномерностью изменения реактивности при перемещении РО вглубь ядерного реактора. По мере погружения в активную зону эффективность РО возрастает, и его дальнейший разгон целесообразно ограничить, вплоть до перехода к равномерному движению в конце хода [5]. Таким образом, ускорение, а, следовательно, и закон изменения электромагнитного момента, развиваемого устройством контроля скорости опускания РО, должен соответствовать зависимости эффективности регулирующего стержня от глубины погружения в активную зону (рис. 1, а).

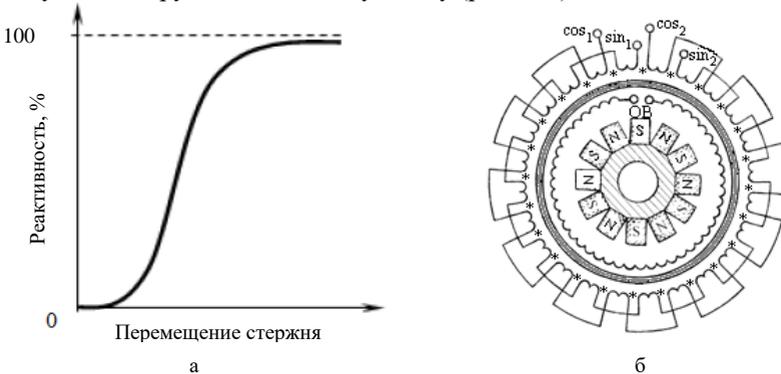


Рис. 1. Зависимость изменения реактивности при движении РО (а); конструкция датчика насыщения (б)

Такой закон обеспечивается переводом шагового двигателя или отдельного УКД в генераторный режим, с торможением на емкостную

нагрузку. Как в разомкнутом, так и в замкнутом электроприводе необходим контроль за фактическим перемещением подвижной части ИМ в заданное положение, поскольку в замкнутом приводе возможно перерегулирование, а в разомкнутом – неполное перемещение из-за пропуска шагов под влиянием случайных бросков нагрузки.

### III. Материалы и методы

Конструкции применяемых датчиков могут быть различными и должны выбираться, исходя из заданного типа и компоновки реакторной установки. Наибольшее распространение получили датчики индуктивного типа как наиболее надежные, долговечные и приспособленные к работе в широком диапазоне температур и частот [5, 6]. Удачным решением в электроприводе с передачей движения через большие воздушные промежутки между статором и ротором является использование индуктивных датчиков с постоянными магнитами. В зависимости от использования эффекта от воз действия поля постоянных магнитов различают датчики насыщения и датчики ЭДС (тахогенераторы) [7, 8].

На кольцеобразный сердечник датчика насыщения (рис. 1, б) намотаны катушки обмотки возбуждения и нескольких, по числу фаз двигателя, сигнальных обмоток. Поворот магнита вместе с ротором на одно полюсное деление изменяет состояние насыщающихся структур сердечника и обеспечивает смену максимума и минимума напряжения, наведенного в фазах синусной и косинусной обмоток.

Датчик ЭДС представляет собой магнитоэлектрический генератор, снабженный компаратором [7]. Напряжение с генератора подается на гасящий резистор  $R1$ , поступает на прямой вход операционного усилителя  $DA1$ . На этом входе с помощью диодов  $VD1$  и  $VD2$  в зависимости от угла поворота ротора формируется последовательность положительных и отрицательных полуволн напряжения относительно инверсного входа операционного усилителя  $DA1$  (рис. 2, а). Компаратор преобразует входные напряжения  $DA1$  в последовательность знакопеременных импульсов. По количеству импульсов определяются текущий угол поворота ротора генератора и величина перемещения подвижной части исполнительного механизма.

### IV. Математическая модель

В ходе работы было установлено, что количество импульсов, подаваемых на вход компаратора, не зависит от того, подключена ли к его фазам другая электрическая нагрузка или нет. Следовательно, одну или несколько фаз датчика ЭДС можно замкнуть на внешнюю цепь для создания тормозного электромагнитного момента. Это позволит изменить частоту баланса между вращающим моментом и уравнивающим его результирующим моментом нагрузки:

$$M_{\text{дв}} = - \left[ \sum M_{\text{нагр}} + M_{\text{ген}}(\omega) \right], \quad (1)$$

где  $M_{\text{дв}}$  – вращающий момент электродвигателя;  $\sum M_{\text{нагр}}$  – суммарный момент нагрузки;  $M_{\text{ген}}(\omega)$  – электромагнитный момент датчика.

При емкостной нагрузке стабилизация частоты вращения имеет место на восходящих ветвях характеристик (рис 2, б). Из пяти приведенных генераторных характеристик на данном рисунке, первая соответствует наибольшему емкостному сопротивлению.

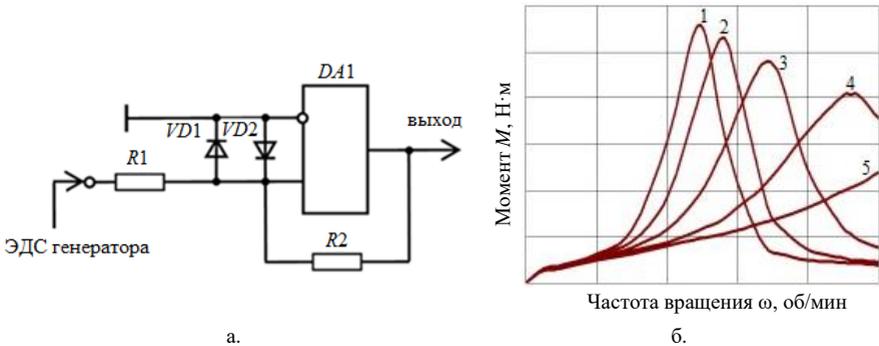


Рис. 2. Схема компаратора для определения положения ротора и подвижной части исполнительного механизма (а); генераторные характеристики при различной емкостной нагрузке (б)

Увеличивая емкость, можно сдвигать положение максимума момента по генераторной характеристике вниз от исходного. Вследствие увеличения добротности резонансных контуров с увеличением емкости конденсаторов, имеет место рост максимума момента. Таким образом, датчик-генератор способен выполнять не только функцию индикации положения, но и стабилизировать скорость движения заданной величиной, т.е. является устройством контроля движения, обеспечивающим силовое воздействие на подвижную часть ИМ.

В соответствии со схемой замещения, состоящей из последовательно соединенных индуктивного сопротивления фазы, ее активного сопротивления и сопротивления нагрузки, которую для поддержания тока делают емкостной, можно выразить ток фазы, представленный амплитудой:

$$I = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (X_l - X_c)^2}}. \quad (2)$$

Рассчитанный ток подставляется в уравнение электромагнитного момента:

$$M = \frac{m \cdot R \cdot I^2}{\omega}, \quad (3)$$

где  $m$  – число фаз обмотки генератора;  $\omega$  – частота вращения ротора.

Частота максимума момента по генераторной характеристике определяется частотой резонанса напряжений:

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\delta} \cdot C}}, \quad (4)$$

где  $L$  – индуктивность рассеяния фазы обмотки;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $C$  – емкость подключенного к обмотке конденсатора.

### V. Результаты исследования

Испытания устройства в составе шагового привода (рис. 3) проводились на цифровой модели путем численного интегрирования уравнения движения (1). Вращающий электромагнитный момент двигателя на каждом шаге интегрирования определялся по его сеточной модели [9, 10].

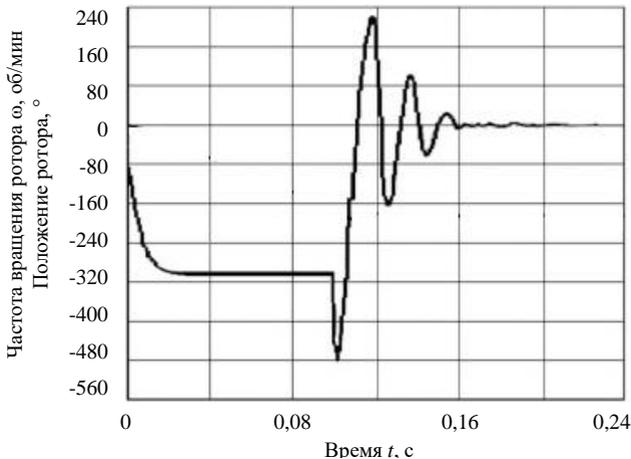


Рис. 3. Оциллограммы движения обесточенного привода

При обесточенном двигателе ( $0 < t < 0,1$  с) ротор первоначально разгоняется под действием потенциальной нагрузки, перемещаемой посредством привода. По истечении около 0,03 с. момент от веса подвижных

масс уравнивается электромагнитным моментом устройства контроля движения, и нагрузка опускается равномерно.

#### VI. Заключение

Датчики ЭДС, представляющие собой магнитоэлектрический генератор, способны выполнять как функцию индикации положения регулирующих органов ядерного реактора, так и стабилизации скорости движения заданной величиной.

Данный электропривод можно использовать для сохранения способности выполнения наиболее важных функций при полном исчезновении питания на транспорте и в системах автоматики с жесткими требованиями к функции самохода.

© Смирнов А.Ю., 2018

© Кудряшов Д.А., 2018

#### Библиографический список

- [1] Смирнов А.Ю. Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс). – М.: Форум, 2015. – 192 с.
- [2] Смирнов А.Ю., Кудряшов Д.А. Совершенствование электромеханических устройств управления скоростью перемещения регулирующего органа исполнительных механизмов системы управления и защиты ядерных реакторов // Известия вузов. Электромеханика. 2016. №5 (547). С. 25-30.
- [3] Смирнов А.Ю. Совершенствование индукторной машины для исполнительных механизмов вертикального перемещения // Электротехника. 2003. №10. С.10-15.
- [4] Бамдас А.М., Леонтьев А.И., Титов Е.Г., Юрченко А.И. Исполнительные электродвигатели и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1971. – 237 с.
- [5] Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок В.А. Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. – 272 с.
- [6] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [7] Смирнов А.Ю., Шаров А.В. Электропривод с бесконтактными синхронными двигателями. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2017. – 193 с.
- [8] Арменский Е.В., Фалк Г.Б. Электрические микромашины. М.: Высшая школа, 1985. – 231с.
- [9] Smirnov A.Yu. Grid models intended for investigating electric drives based on induction motors // Russian Electrical Engineering. 2009. № 2. P. 86-90.
- [10] Смирнов А.Ю. Электромеханика. Основы теории и вычислительный анализ электрических машин. Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 290 с.

**A.Yu. Smirnov, D.A. Kudryashov**

## **EXPANSION OF APPLICATION FIELD OF ELECTRIC DRIVE OF NUCLEAR REACTORS REGULATORY BODIES**

Afrikantov Experimental Design Bureau  
for Mechanical Engineering

**Abstract.** The article considers technical solutions that allow simultaneous indication and force influence in a synchronous drive designed to move the regulatory bodies of a nuclear reactor. The drive includes a frequency converter and a stepper motor that acts on the regulating body and simultaneously moves the movable element of the motion control device. Synchronous generators and inductive-type sensors are considered as a motion control device, as the most reliable and allow working in a wide range of temperatures. The saturation sensors and electromagnetic fields (EMF) sensors are analyzed, the latter of which allow for the power action on the moving part of the drive in order to stabilize the speed of movement. A comparator is used to determine the position of the rotor using an EMF sensor that generates voltage pulses at the input of the adder. Comparator allows determining the movement traveled from a certain base level by counting the number of pulses received. The work of the motion control device in the drive structure was investigated on a grid model. Calculations were carried out for the mode of full blackout. It is shown that, at the end of the transient process of accelerating the rotor, the moment from the weight of the mobile masses is balanced by the electromagnetic moment of the motion control device, and the load is lowered uniformly. This makes it possible to exclude the effect of excessive shock loads at the end of the movement of the regulatory bodies.

**Keywords:** electric drive, generator characteristics, permanent magnet, position sensor, regulatory body, step drive.

### **References**

- [1] A.Yu. Smirnov, Inductor machines. Design and computational analysis (special course). Moscow: Forum, 2015.
- [2] A.Yu. Smirnov and D.A. Kudryashov. Enhancement of electromechanical devices of the rate control of the lowering adjusting gear of the actuators of the system control and protection of nuclear reactors // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*. no. 5 (547), pp. 25-30, 2016.
- [3] A.Yu. Smirnov. Perfection of an inductor machine for vertical movement actuators // *Electrotechnika*, no. 10, pp. 10-15, 2003.
- [4] A.M. Bamdas, A.I. Leontiev, E.G. Titov and A.I. Yurchenko, Executive electric motors and automation elements of servo drives of nuclear reactors. Moscow: Atomizdat, 1971.

- 
- [5] I.Ya. Emelyanov, V.V. Voskoboynikov and V.A. Butter. Fundamentals of designing control mechanisms for nuclear reactors. Moscow: Atomizdat, 1978.
  - [6] A.V. Ivanov-Smolensky. Electric machines: a textbook for high schools. Moscow: Energia, 1980.
  - [7] A.Yu. Smirnov and A.V. Sharov. Electric drive with contactless synchronous motors. N. Novgorod: NNSTU, 2017.
  - [8] E.V. Armensky and G.B. Falk. Electric micro machines. Moscow: Higher School, 1985.
  - [9] A.Yu. Smirnov. Grid models intended for investigating electric drives based on induction motors // Russian Electrical Engineering. vol. 80, no. 2, pp. 86-90, 2009.
  - [10] A.Yu. Smirnov. Electromechanics. Fundamentals of the theory and computational analysis of electrical machines. N. Novgorod: NNSTU, 2014.