

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОВОРОТА АНТЕННЫ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ

**В.А. Денисов, М.Э. Жангиров**

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14  
E-mail: V.Denisov@tltsu.ru

*Рассматриваются принципы построения и расчет параметров позиционной системы электропривода с переменной структурой, содержащей оптимальный и модальный регуляторы, что обеспечивает высокое быстродействие при обработке заданного перемещения и устойчивость при действии возмущения по моменту сопротивления.*

**Ключевые слова:** позиционная система с переменной структурой, электропривод поворота антенны, оптимальный и модальный регуляторы.

В системах спутникового телевидения для позиционного перемещения антенн широко используются электромеханические приводы с линейным двигателем (Actuator), а также с двигателем вращательного движения (H-H motor). При обработке заданного угла поворота антенны целесообразно обеспечивать аperiодический вид траектории движения за минимально возможное время, что позволит уменьшить время ожидания при переключении телеканалов.

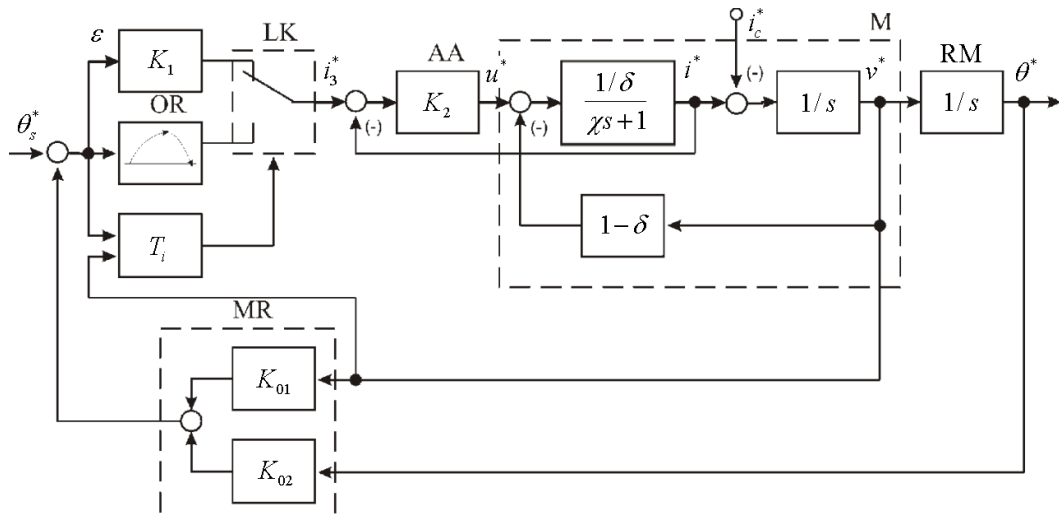


Рис. 1. Системы электропривода с переменной структурой канала управления

Традиционный подход к решению данной задачи заключается в построении трехконтурной системы с подчиненным регулированием параметров. Однако наличие в силовой цепи электропривода близких по величине постоянных времени не

*Владимир Андреевич Денисов (к.т.н., доц.), доцент каф. электрооборудования автомобилей и электромеханики.*

*Марат Эдуардович Жангиров, аспирант.*

позволяет достичь высокого быстродействия при аperiodическом характере кривой переходного процесса [1]. В связи с этим более эффективным средством решения такой задачи является применение системы электропривода с переменной структурой канала управления (рис. 1).

Использование в схеме оптимального ОР регулятора и идентификатора  $T_i$  позволяет достичь требуемого быстродействия и получить аperiodический характер переходного процесса, а подключение модального MR регулятора дает возможность устранить колебания системы и адекватно реагировать на внешние возмущения. Переключение канала регулирования с OR на MR осуществляется через логический LK ключ после окончания отработки заданного угла  $\theta_s^*$  поворота антенны.

Силовая часть системы электропривода содержит вентильный двигатель М, выполненный на базе синхронной машины с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов и управлением транзисторных ключей инвертора от датчика углового положения ротора. Вал ротора двигателя соединен с понижающим редуктором RM антенны, представленным в структурной схеме интегрирующим звеном.

При математическом описании уравнения вентильного двигателя [2] запишем в относительных единицах

$$\frac{di^*}{d\tau^*} = \frac{1}{\delta\chi^*} u^* - \frac{1-\delta}{\delta\chi^*} v^* - \frac{1}{\chi^*} i^*; \quad (1)$$

$$\frac{dv^*}{d\tau^*} = \mu^* - \mu_c^*; \quad (2)$$

$$\frac{d\theta^*}{d\tau^*} = v^*, \quad (3)$$

где  $i^* = i / I_n$  – относительная величина тока двигателя;

$u^* = u / U_n$  – относительная величина напряжения статора;

$v^* = \omega / \omega_n$  – относительная величина угловой скорости;

$I_n, U_n, \omega_n$  – соответственно номинальные значения тока, напряжения и скорости двигателя;

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

$\omega_0$  – 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;

$\theta^* = \theta / \theta_n$  – относительная величина углового перемещения вала двигателя;

$M_n, \theta_n, M_c$  – соответственно номинальные значения момента двигателя, перемещения и момента нагрузки;

$\tau^* = t / T_m$  – относительное (безразмерное) время;

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

$J_\Sigma$  – приведенный к валу двигателя момент инерции;

$\chi^* = T_a / T_m$  – относительная (безразмерная) постоянная времени и  $T_a$  – электромагнитная постоянная времени двигателя.

При использовании относительных единиц электромагнитный момент двигателя равен току якоря, т. е.  $\mu^* = i^*$ . Наличие в схеме жесткой отрицательной обратной связи по току, безынерционного широтно-импульсного преобразователя и регулятора АА тока с общим коэффициентом  $K_2$  передачи позволяет получить практически безынерционное протекание электромагнитных процессов в статорной цепи двигателя. Учитывая, что  $K_2 \gg 1$ , уравнение для тока имеет вид

$$i^* = i_s^* - (1 - \delta) / K_2 \cdot v^*, \quad (4)$$

где  $i_s^*$  – заданное значение тока.

Для описания движения замкнутой позиционной системы требуется к уравнению двигателя добавить уравнение ошибки  $\varepsilon$  (отклонения)

$$\varepsilon = \theta_s^* - \theta^*. \quad (5)$$

Расчет параметров оптимального регулятора производится на основании постановки и решения задачи поворота антенны на некоторый угол  $\theta_s^*$  за наименьшее время при действии на валу момента нагрузки  $M_c = const$ . На управление наложено ограничение по току (вращающему моменту):  $-i_{\max}^* < i^* < i_{\max}^*$ , где  $i_{\max}^*$  – величина ограничения.

Требуется найти такое управление, при котором объект переводится из начального состояния  $\theta^*(0) = 0, v^*(0) = 0$  в конечное состояние  $\theta^*(\tau_k^*) = \theta_s^*, v^*(\tau_k^*) = 0$  за минимальное время  $\tau_k^* = T_{\min}^*$ . Здесь  $\tau_k^*$  – время перемещения антенны.

Для решения задачи используем принцип максимума Л.С. Понтрягина [3]. Для этого составляем гамильтониан:

$$H = v^* \cdot \psi_1 + (i^* - i_c^*) \psi_2, \quad (6)$$

где  $\psi_1, \psi_2$  – сопряженные переменные, которые непрерывны, кроме точек разрыва допустимого управления  $i^*$ , имеют непрерывные производные.

Составляем уравнения для сопряженных переменных:

$$\frac{d\psi_1}{d\tau^*} = \frac{\partial H}{\partial \theta^*} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{d\psi_2}{d\tau^*} = \frac{\partial H}{\partial v^*} = -\psi_1 + \frac{\partial(i^* - i_c^*)}{\partial v^*} \psi_2 = -\psi_1. \quad (8)$$

Таким образом,

$$\frac{d\psi_1}{d\tau^*} = 0; \frac{d\psi_2}{d\tau^*} = -\psi_1 \cdot \psi_1 = c_1 \text{ и } \psi_2 = -c_1 \cdot \tau^* + c_2, \quad (9)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – постоянные интегрирования.

Конкретизируем выражение гамильтониана

$$H = v^* \psi_1 + (i^* - i_c^*) \psi_2 = c_1 v^* + (i^* - i_c^*) (-c_1 \tau^* + c_2). \quad (10)$$

Функция  $H$  принимает положительное максимальное значение при  $i^* = i_{\max}^*$ , когда  $\psi_2 = -c_1 \tau^* + c_2 > 0$ , и при  $i^* = -i_{\max}^*$ , когда  $\psi_2 = -c_1 \tau^* + c_2 < 0$ . Поскольку линейная функция  $\psi_2$  меняет знак на отрезке времени  $0 \leq \tau^* \leq \tau_k^*$  не более одного

раза, то оптимальное быстроедействие системы будет достигнуто при законе управления

$$i^* = i_{\max}^* \cdot \text{sign} \psi_2 = i_{\max}^* \cdot \text{sign}(-c_1 \tau^* + c_2). \quad (11)$$

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  $\varepsilon_n$  – ошибка в момент переключения.

Значения  $\varepsilon_n$  и  $\tau_k^*$  определяются исходя из граничных условий  $\theta^*(\tau_k^*) = \theta_s^*$  и  $v^*(\tau_k^*) = 0$  с использованием уравнений (2) и (3).

Время перемещения, равное времени переходного процесса, определяется как

$$\tau_k^* = 2 \cdot \sqrt{\frac{i_{\max}^* \cdot \theta_s^*}{(i_{\max}^*)^2 - (i_c^*)^2}}. \quad (13)$$

Относительная ошибка переключения

$$\varepsilon_n = 1 - (i_{\max}^* - i_c^*) \frac{(i_{\max}^* + i_c^*)^2 \cdot (\tau_k^*)^2}{8(i_{\max}^*)^2 \cdot \theta_s^*}. \quad (14)$$

В соответствии с приведенными уравнениями для реализации оптимального управления необходимо в начальный момент времени, когда  $\varepsilon = 1$ , создать на валу двигателя максимально допустимый момент  $i_{\max}^*$ . Затем, при достижении ошибки  $\varepsilon = \varepsilon_n$ , создать на валу двигателя максимально допустимый момент обратного знака ( $-i_{\max}^*$ ) и после окончания переходного процесса  $\tau_k^* = t_k / T_M$  осуществить переключение в режим работы с модальным регулятором положения.

Для определения параметров модального регулятора составляем уравнение разомкнутой позиционной системы путем решения уравнений (2, 3 и 4) относительно выходной переменной  $\theta^*$ :

$$s^2 \cdot \theta^* = i_s^* - (1 - \delta) / K_2 \cdot v^*. \quad (16)$$

Затем составляем уравнение замыкания, используя для этого отрицательные обратные связи по состоянию объекта:

$$i_s^* = K_1 \cdot (\theta_s^* - k_{01} v^* - k_{02} \theta^*) = K_1 \theta_s^* - K_1 k_{01} s \theta^* - K_1 k_{02} \theta^*, \quad (17)$$

где  $K_1$ ,  $k_{01}$  и  $k_{02}$  – соответственно коэффициент усиления регулятора, коэффициент обратной связи по угловой скорости и коэффициент обратной связи по углу поворота.

Подставляя уравнение (17) в уравнение (16), получаем уравнение замкнутой системы при подключении модального регулятора

$$\theta^* \cdot D(s) = K_1 \theta_s^*, \quad (18)$$

где  $D(s) = s^2 + ((1 - \delta) / K_2 + K_1 k_{01})s + K_1 k_{02}$  – характеристический полином замкнутой системы.

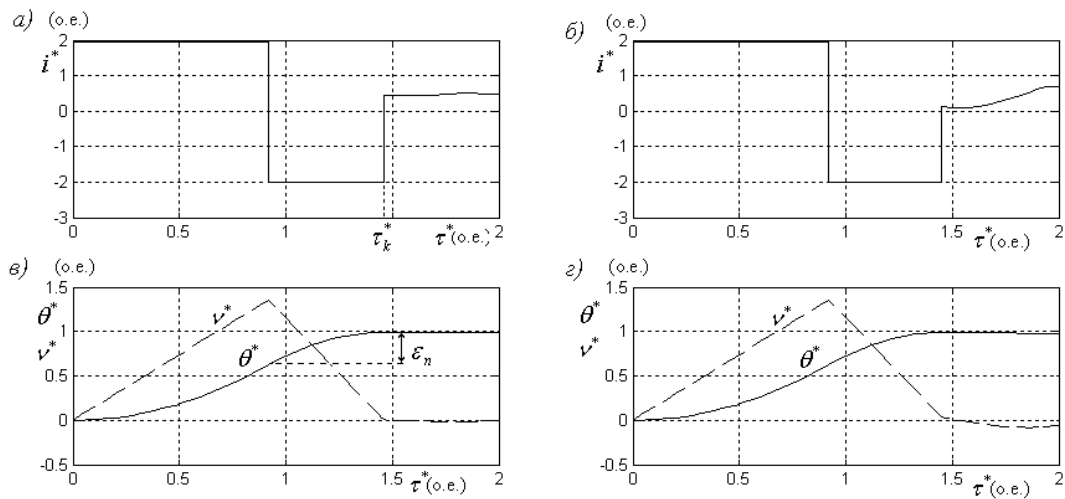


Рис. 2. Переходные процессы в системе с переменной структурой:  
*a, в* – с оптимальным и модальным регуляторами; *б, з* – без модального регулятора

Для обеспечения аperiodической кривой переходного процесса необходимо разместить полюса замкнутой системы с модальным регулятором в соответствии с полиномом Ньютона [4]

$$H(s) = s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2, \quad (19)$$

где  $\omega_0$  – частота собственных колебаний системы.

Приравнявая выражения соответствующих коэффициентов полинома (19) и полинома в уравнении (18), получаем выражения для определения коэффициентов  $k_{01}$  и  $k_{02}$  модального регулятора:

$$(1 - \delta) / K_2 + K_1 \cdot k_{01} = 2\omega_0; \quad K_1 \cdot k_{02} = \omega_0^2. \quad (20)$$

Для выполнения условия (5) при расчете принято  $k_{02} = 1$ . Результаты моделирования переходных процессов в рассматриваемой системе с переменной структурой канала управления представлены на рис. 2. Из осциллограмм (рис. 2 *a, в*) видно, что оптимальное движение антенны осуществляется в два интервала, т. е. за одно переключение. В начале движения на входе идентификатора  $T_i$  ошибка  $\varepsilon = 1$  и  $v^* = 0$ , в результате логический ЛК ключ переводится в нижнее положение. Момент переключения момента ОР происходит, когда ошибка  $\varepsilon$  регулирования достигает значения  $\varepsilon_n = 0,375$  (см. рис. 2, *в*). График изменения скорости вращения имеет характерный треугольный вид. Окончание оптимального перемещения определяется значением  $\tau_k^* = 1,46$  (см. рис. 2, *a*). При этом на входе идентификатора  $T_i$  ошибка  $\varepsilon = 0$  и  $v^* = 0$  логический ЛК ключ переводится в верхнее положение, т. е. регулятор ОР отключается и подключается регулятор MR. При отсутствии в позиционной системе MR регулятора наблюдаются колебания и нестабильность работы (см. рис. 2 *б, з*).

Таким образом, разработанная схема позиционного электропривода с переменной структурой управления обеспечивает аperiodический характер переходного процесса перемещения антенны с заданным высоким быстродействием при сохранении устойчивости при действии возмущения по моменту сопротивления. Кроме того, получены аналитические выражения, позволяющие определять координаты и па-

раметры системы в момент изменения ее структуры, что является основой методики расчета регуляторов и траектории движения позиционной системы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковчин С.А., Муафак Ф.М. Проблемы синтеза современных электромеханических систем. – Тр. V Международной (16 Всероссийской) конф. по автоматизир. эл. приводу. – СПб, 2007. – С. 48-51.
2. Денисов В.А. Электропривод переменного тока с частотным управлением: Учеб. пособие / В.А. Денисов. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 156 с.
3. Теория автоматического управления / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч.1. – 368 с.; Ч. 2. – 504 с.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Езупова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 616 с.

*Статья поступила в редакцию 10 января 2012 г.*

## SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE OF ROTATION OF ANTENNA WITH VARIABLE STRUCTURE OF CONTROL CHANNEL

***V.A. Denisov, M.E. Zhangirov***

Tolyatti State University  
14, Belarus st., Tolyatti, 445667

*The principles of the construction and calculation of the parameters of the positional system of the electric drive with the variable structure are considered in the paper. The variable structure contains optimal and modal regulators. It provides the high speed of the operation working out the given movement and stability applying the action of the disturbance at the moment of resistance.*

***Keywords:*** *item system with variable structure, the electric drive of turn of the aerial, optimum and modal regulators.*

---

*Vladimir A. Denisov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Marat E. Zhangirov, Postgraduate student.*