

## ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ

*В.Е. Лысов, М.В. Хоренко*

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

*Рассматриваются процессы нагрева и охлаждения прецизионного поворотного стола, выполненного в виде мехатронного модуля, заявленная точность воспроизведения заданной траектории движения и позиционирования которого обеспечивается исключением термодформаций путем включения дополнительной системы автоматического охлаждения исполнительного электродвигателя.*

**Ключевые слова:** система автоматического управления, поворотный стол, мехатронный модуль, термодформация, планшайба.

Новые требования по точности позиционирования и динамическим показателям качества, предъявляемые к прецизионным поворотным столам, не оставляют возможности использования редукторных конструкций.

Одно из решений этой проблемы – использование мехатронного модуля поворотного стола, который позволяет существенно увеличить статическую точность и динамические показатели качества управления поворотным столом и представляет собой объект автоматического управления процессом движения и позиционирования планшайбы.

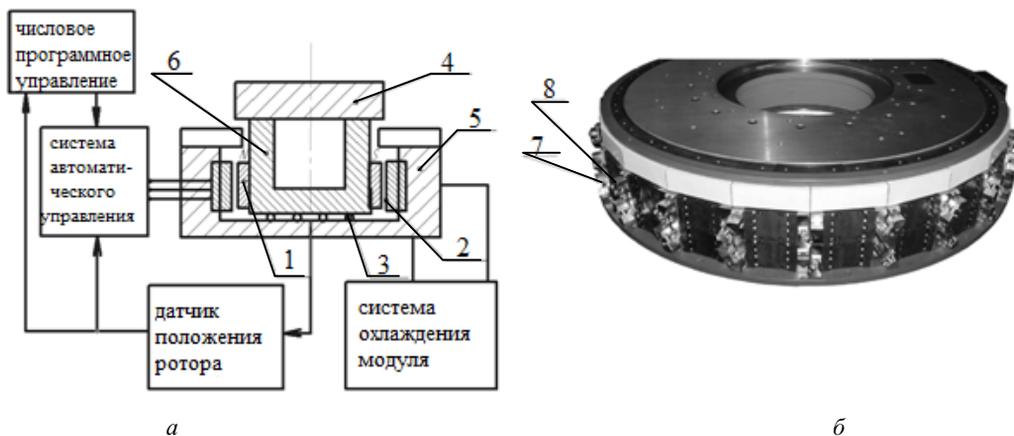


Рис. 1. Мехатронный модуль:

*а* – функциональная схема; *б* – общий вид двигателя RSM-36;

1 – постоянные магниты ротора; 2 – статорные обмотки; 3 – подшипники ротора; 4 – планшайба стола; 5 – корпус модуля с рубашкой жидкостного охлаждения статорных обмоток; 6 – ротор; 7 – кабель присоединения статора к частотному преобразователю;

8 – разъем подвода охлаждающей жидкости

*Владимир Ефимович Лысов (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».*

*Михаил Владимирович Хоренко, аспирант.*

На рис. 1, а представлена функциональная схема мехатронного модуля с использованием синхронного поворотного двигателя серии RSM-36 (рис. 1, б).

В процессе обработки детали на мехатронном модуле ток статора изменяется в соответствии с нагрузочной диаграммой, а в режиме позиционирования (работа двигателя «на упор») изменение тока статора имеет стохастический характер, что приводит к колебаниям температуры статорных обмоток и всего модуля в целом. Изменение температуры приводит к изменению геометрических размеров стола и детали, снижая точность обработки.

Для целей стабилизации температурного режима синхронного электродвигателя возникает необходимость синтезировать систему автоматического управления стабилизации температуры.

Рассмотрим тепловые процессы, протекающие в мехатронном модуле. Нагревание обмоток происходит в результате воздействия кратковременного теплового источника постоянной силы (тепловой импульс – нагревание провода, в котором прошел токовый импульс, в результате чего проводу сообщается некоторый мгновенный тепловой импульс).

Уравнение теплопроводности для действия импульса тока в обмотках статора приводного двигателя модуля, работающего в режиме удержания координаты:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \nabla^2 T(r, \tau), \quad (1)$$

$$\text{где } \nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}.$$

Так как провод уложен в пазы статора с определенным шагом и геометрия пазов статора определена, то частное решение этого уравнения на внутренней поверхности статора примет вид [3]

$$T(r, \tau) = \frac{b}{2\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n \mu_n}{J_1^2(\mu_n)} J_0\left(\mu_n \frac{r_1}{R}\right) J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 F_0). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что температура внутренней поверхности статора изменяется во времени по апериодическому закону и постоянная времени зависит от геометрической формы и размеров статора двигателя. Из закона теплового баланса следует, что энергия, полученная от обмоток статора, приведет к нагреванию самого статора и создаст тепловой поток с его поверхности.

Тепловой поток через воздушный зазор проходит к ротору и планшайбе с учетом передачи тепла воздухом (процесс тепломассопереноса в газах). Перенос тепла во взаимосвязи с переносом массы рассматривается в термодинамике необратимых процессов [3]. Поток какой-либо субстанции обусловлен действием всех термодинамических сил  $X_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ):

$$j_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n). \quad (3)$$

Формула (3) является системой линейных уравнений Онзагера и представляет собой основное соотношение термодинамики необратимых процессов. Величины  $L_{ik}$  называются кинетическими коэффициентами, между которыми имеет место соотношение взаимности

$$L_{ik} = L_{ki}.$$

Термодинамические силы  $X_i$  и потоки  $j_i$  должны удовлетворять основной формуле термодинамики необратимых процессов

$$T \frac{dS}{d\tau} = \sum_i j_i \cdot X_i,$$

где  $S$  – энтропия рассматриваемой системы.

Используя уравнение Гиббса

$$TdS = du + p dV - \sum \mu_k dM_k,$$

где  $u$  – внутренняя энергия,  $\mu_k$  – химический потенциал,  $V$  – объем,  $M$  – масса, и дифференциальные уравнения переноса энергии и массы, можно определить термодинамические силы  $X_i$ .

С учетом соотношения  $\sum_{k=1}^n j_k$  потоки энергии и массы  $i$ -го компонента соответственно равны:

$$j_u = L_{uu} \frac{1}{T} \nabla T - \sum_{k=1}^n L_{uk} \left[ T \nabla \left( \frac{\mu_k - \mu_n}{T} \right) - (F_k - F_n) \right],$$

$$j_{mi} = -L_{iu} \frac{1}{T} \nabla T - \sum_{k=1}^n L_{ik} \left[ T \nabla \left( \frac{\mu_k - \mu_n}{T} \right) - (F_k - F_n) \right],$$

где  $L_{uu}$ ,  $L_{uk}$ ,  $L_{iu}$ ,  $L_{ik}$  – кинетические коэффициенты Онзагера.

Между потоком энергии  $j_u$  и потоком тепла  $j_q$  существует связь в виде

$$j_q = j_u - \sum_{k=1}^n h_k \cdot j_k, \quad (4)$$

где  $h_k$  – удельная энтальпия  $i$ -го компонента.

Из выражения (4) можно оценить часть тепла, передаваемого от статора к планшайбе путем теплопроводности, а также потери тепла, связанные с естественной вентиляцией привода.

Распределение тепла по внутренней поверхности планшайбы неоднородно, т. к. имеются узлы стола, где теплопроводность выше, что приводит к деформации поверхности и, как следствие, потере точности.

Система стабилизации температуры мехатронного модуля представляет собой контур жидкостного охлаждения привода поворотного стола. В нее входят следующие структурные элементы:

- расширительный бак с теплоносителем;
- сетевой насос с регулируемой производительностью;
- радиатор привода поворотного стола;
- датчик температуры планшайбы мехатронного модуля;
- регулятор контура температуры.

В расширительном баке находится охлаждающая жидкость с температурой на один градус ниже температуры рабочей камеры станка [4]. Охлаждающая жидкость прокачивается через рубашку радиатора привода поворотного станка с помощью

насоса, позволяющего регулировать объем прокачки жидкости в зависимости от превышения температуры планшайбы (рис. 2).

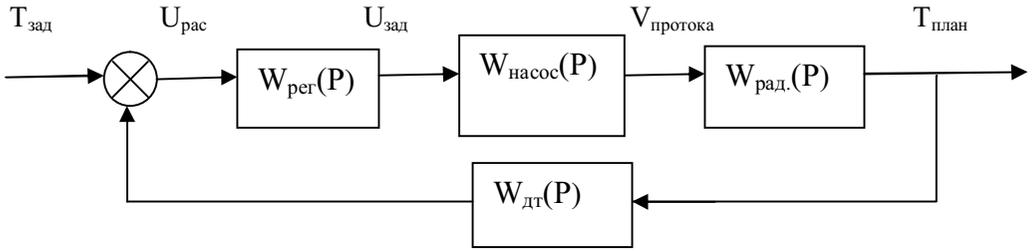


Рис. 2. Структура системы стабилизации температуры

Процесс нагрева планшайбы за счет передачи тепла от статора с учетом вентиляции в воздушном зазоре между статором и ротором также описывается аperiodическим звеном вида

$$W_{план}(p) = \frac{\tau(p)}{\tau_{план}(p)} = \frac{K_{план}}{T_{план}p + 1}, \quad (5)$$

где  $\tau_{план}$  – превышение температуры планшайбы относительно окружающей среды;  $K_{план}$  – коэффициент передачи, учитывающий снижение температуры планшайбы относительно статора исполнительного двигателя.

Нагрев планшайбы вызывает нагрев детали, установленной на ее поверхности, что ведет к снижению точности обработки. Процесс передачи тепла от планшайбы к детали имеет сложный характер и зависит от материала, формы, объема. Это не позволяет выдать обобщенное математическое описание. Экспериментальные исследования показали, что этот процесс также инерционный и описывается аperiodическим звеном

$$W_{дет}(p) = \frac{z(p)}{\tau_{план}(p)} = \frac{K_{дет}}{T_{дет}p + 1}. \quad (6)$$

Здесь  $z$  – геометрическое изменение размеров детали в зависимости от превышения температуры планшайбы  $\tau_{план}$ ;  $K_{дет}$  – коэффициент, учитывающий геометрическое изменение детали от превышения температуры, определяется в зависимости от формы и материала;  $T_{дет}$  – постоянная времени изменения размера детали.

Насос с асинхронным приводом в САУ стабилизации температуры планшайбы описывается аperiodическим звеном

$$W_{ад}(p) = \frac{Q_{охл}(p)}{U_c(p)} = \frac{K}{T_{ад}p + 1}, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент передачи насоса с учетом связи объема прокачиваемой жидкости с количеством отводимого тепла;  $T_{ад}$  – электромеханическая постоянная времени асинхронного двигателя.

Процесс охлаждения [1] в САУ стабилизации температуры планшайбы описывается аperiodическим звеном

$$W_{охл}(p) = \frac{\tau_{охл}(p)}{Q_{охл}(p)} = \frac{K_{охл}}{T_{охл}p + 1}, \quad (8)$$

где  $Q_{охл}$  – количество тепла, отводимого от статора исполнительного двигателя;  
 $K$  – коэффициент передачи, характеризующий охлаждение синхронного двигателя;  
 $T_{охл}$  – постоянная времени охлаждения синхронного двигателя;  
 $\tau_{охл}$  – снижение температуры планшайбы под действием охлаждающей жидкости.

Исследование САУ проводилось на модели в среде Matlab. Структурная схема модели представлена на рис. 3.

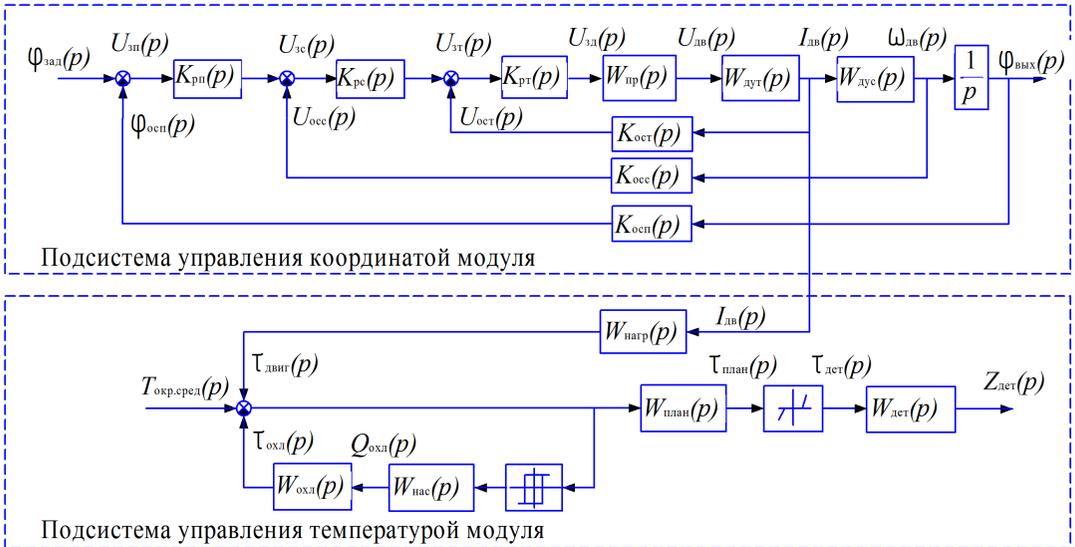


Рис. 3. Структурная схема САУ мехатронного модуля

Передаточные функции звеньев имеют следующие числовые значения:

$$W_{двиг}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{C_e \Phi}{R(T_3 p + 1)} = \frac{0,02}{0,00871 p + 1},$$

здесь  $T_3$  – электромагнитная постоянная двигателя;  $R$  – эквивалентное сопротивление статора;  $C_e \Phi$  – постоянный коэффициент;

$$W_c(p) = \frac{\omega(p)}{I(p)} = \frac{C_m \Phi}{Jp} = 0,76 \cdot \frac{1}{p},$$

здесь  $C_m \Phi$  – постоянный коэффициент;  $J = 0,12 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  – момент инерции ротора.

Передаточная функция силового преобразователя:

$$W_{пр}(p) = \frac{U(p)}{U_{pm}(p)} = \frac{1000}{0,01 p + 1}.$$

Передаточная функция процесса нагрева планшайбы:

$$W_{нагр}(p) = \frac{\tau(p)}{I(p)} = \frac{8}{120 p + 1}.$$

Передаточная функция процесса охлаждения:

$$W_{охл}(p) = \frac{\tau(p)}{Q(p)} = \frac{16}{100 p + 1}.$$

Насос представлен в виде звена с передаточной функцией

$$W_{нас}(p) = \frac{0,013}{0,3p + 1}$$

при расходе  $V =$  л/мин и начальной температуре охлаждающей жидкости  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  (разница температур охлаждающей жидкости и термokonстантного помещения не должна превышать  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  из условия, что в рабочей камере станка не должен выпадать конденсат).

Релейный элемент осуществляет подключение асинхронного двигателя к сети при достижении заданного значения превышения  $\tau$  температуры. Нелинейный элемент показывает процесс начала нагрева детали после превышения  $\tau$  значения окружающей среды в термokonстантном помещении. Процесс деформации представлен апериодическим звеном, полученным экспериментально.

На рис. 4 показана диаграмма стабилизации температуры на уровне  $20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  при отработке заданного значения  $\varphi_{зд} = 1000$  рад и действии  $I_{cm}$ , равного номинальному значению тока двигателя и осцилляций, связанных с частотой вращения фрезы  $n_{фр} = 600\text{ мин}^{-1}$ .

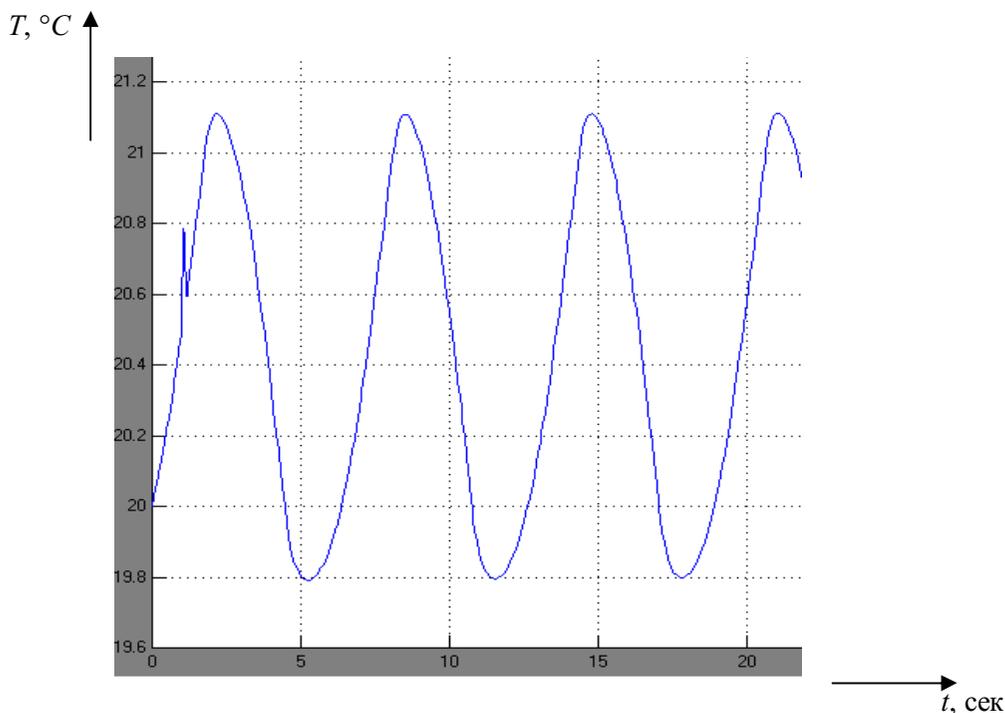


Рис. 4. Диаграмма стабилизации температуры статорных обмоток

Анализ результатов моделирования показывает, что при наличии САУ охлаждения планшайбы возможно добиться точности обработки изделий, соответствующих классу точности С.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоиздат, 2001.
2. Козьминых Д.В. Расчет мощности электроприводов с учетом старения изоляции. – Куйбышев, 1968.

3. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967.
4. Паспорт станка модели 3284сф4.

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2012 г.*

## **INITIALIZATION OF THE PROCESS OF HEATING AND COOLING MECHATRONIC MODULE**

***V.E. Lysov, M.V. Khorenko***

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

*The process of automatic control of precision rotary table made as a mechatronic module is investigated in this paper. The claimed accuracy of motion trajectory and positioning of the faceplate is provided by thermal movement exclusion and with the help of additional automatic cooling system of operating synchronous motor.*

***Keywords:*** *automatic control system, rotary table, mechatronic module, thermal movement, faceplate.*