ISSN 0136-3360

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

5

2014

Известия высших учебных заведений

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И УЧЕБНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель – **Министерство образования и науки Российской Федерации**

Соучредитель – издатель – **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова**

№ 5, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Высоцкий В.Е., Макаричев Ю.А. Самарская научно-педагогическая школа электромеханики в год 100-летия СамГТУ 5

Данилушкин В.А., Пименов Д.Н., Ошкин Я.М. Расчет параметров системы «трехфазный индуктор вращающегося магнитного поля – металлический цилиндр» 10

Проценко А.Н. Задача индукционной закалки сферических поверхностей 14

Верещагин В.Е., Верещагина С.С. Структура системы автоматизированного проектирования вентильных электрических машин с экспертной подсистемой 17

Трошин В.В., Сергеев В.А. Особенности проектирования и расчета автомобильных вентильных генераторных установок 22

Высоцкий В.Е., Синицин А.П., Пенетов В.С., Юзефпольская Е.С. Линейные магнитокоммутационные генераторы для систем электропитания автономных объектов 26

Николаев П.А., Петровский С.В. Электромагнитная совместимость автомобильного генератора напряжения 32

Овсянников В.Н. Расчет и анализ магнитного поля моментных двигателей с ограниченным углом поворота ротора 35

Киреев К.В. Реостатная коммутация в аппаратах с жидкометаллическим контактом 40

Галян Э.Т. Потери и момент двигателя постоянного тока с вентильно-механической коммутацией 44

Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е., Макаров Д.В. Энергоэффективные электрические машины с компактными лобовыми частями обмоток 47

Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Беляева И.С. Математическая модель осевого электромагнитного подшипника с учетом вихревых токов 52

Мигунов А.Л., Кауров С.Ю., Тулупов П.В. Имитационное моделирование мехатронных систем с бесконтактными двигателями постоянного тока 57

Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок 63

Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мигачев А.В. Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения 68

Стариков А.В., Джабасова Д.Н. Следящий электропривод с асинхронным исполнительным двигателем 72

Данилушкин А.И., Мостовой А.П. Оптимальное пространственное управление распределением мощности по длине двухчастотного индукционного нагревателя 76

Лысов В.Е., Хоренко М.В. Электропривод поворотного стола 80

Яковлев В.Ф. Выбор аккумуляторных батарей для автомобильных пусковых устройств 84

Воронин А.А., Добросотских А.С., Кулаков П.А. Построение математической модели сопротивления контактного перехода болтового соединения 87

Клочкова Н.Н., Обухова А.В. Методика оптимального проектирования индукционного нагревателя 91

Абакумов А.М., Раидин Д.Г. Исследование показателя качества управления в системе активной виброзащиты с магнитореологическим демпфером 94

Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В., Кубарьков И.Д. Использование мультиагентов для управления активно-адаптивными электрическими сетями 98

Котенев В.И., Осипов В.С., Кочетков В.В. Обобщенная математическая модель узла нагрузки для управления параметрами режимов в системе электроснабжения 103

Гольдштейн В.Г., Инаходова Л.М., Казанцев А.А. О проблемах энергосбережения и повышения энергоэффективности при применении современных силовых трансформаторов 107

Гольдштейн В.Г., Ведерников А.С., Шишков Е.М., Шишков М.А. О необходимости совершенствования программного обеспечения анализа установившихся режимов электрических сетей 112

Коломийцев Ю.Н. Локальные генерирующие источники в системах распределенного и централизованного энергоснабжения 118

Безменова Н.В., Аверьянова К.С. Обеспечение электромагнитной совместимости по магнитным полям промышленной частоты в комплектных распределительных устройствах 6 (10) кВ 122

Памяти Фёдора Николаевича Рассказова (1949 –2009) 126

УДК 621.313

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С БЕСКОНТАКТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.Л. Мигунов, С.Ю. Кауров, П.В. Тулупов

Рассмотрены вопросы имитационного моделирования работы мехатронных систем с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ). В качестве примера проведено моделирование электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора (ИСГ). За базовую электрическую машину ИСГ взята синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ). В режиме пуска СМПМ с системой управления представляет собой БДПТ. Рассмотрено моделирование ИСГ в режиме пуска двигателя внутреннего сгорания в среде Matlab Simulink с использованием пакета Sim Power System. Модель ИСГ представлена двухконтурной системой автоматического регулирования. При синтезе регулятора скорости вращения произведено упрощение математического описания БДПТ, заменяя его эквивалентным двигателем постоянного тока. Предложено использование в схеме моделирования блока PWM Generator, осуществляющего широтно-импульсное регулирование напряжения питания инвертора. Показано, что для проведения моделирования работы ИСГ с использованием блока PWM Generator требуется как нормирование сигнала на входе блока PWM Generator, так и денормирование сигнала на его выходе.

Ключевые слова: имитационное моделирование, синхронная машина с возбуждением от постоянных магнитов, бесконтактный двигатель постоянного тока.

В МЕХАТРОННЫХ системах с синхронными двигателями широкое применение находят синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ) [1, 2]. На базе этих машин строятся подсистемы, которые называются вентильными двигателями (ВД) и бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ). Бесконтактный двигатель постоянного тока представляет собой устройство, в котором СМПМ с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре включена в замкнутую систему с использованием датчика положения ротора (ДПР) и трехфазного инвертора, выполняющего роль полупроводникового коммутатора (ПК).

Полная система уравнений динамики БДПТ описывает электромагнитные и электромеханические процессы. Математическое описание электромагнитной части зависит от характера распределения поля в зазоре [3] и для БДПТ приведено в [1, 2].

Наиболее эффективным средством моделирования мехатронных систем с СМПМ является использование имитационных (виртуальных) моделей системы *Matlab* с широко развитыми расширениями *Toolboxes* и среды *Simulink* с библиотекой *Sim Power System* [3]. Как отмечается в работах [3, 4], имитационное моделирование мехатронных систем на базе СМПМ позволяет адекватно рассчитывать электромагнитные и электромеханические характеристики систем с ВД в статических и динамических режимах работы. Известный пример моделирования одноконтурной скоростной системы с БДПТ [3] обладает существенным недостатком – отсутствием реализации в модели широтно-импульсного регулятора (ШИР) в системе регулирования, что затрудняет исследования распространенных мехатронных одноконтурных и двухконтурных систем с БДПТ, построенных по принципу подчиненного регулирования, в которых используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

Авторами реализована и исследована схема имитационного моделирования мехатронной системы с БДПТ с использованием блока управления инвертора (*PWM Generator*), осуществляющего ШИМ. В качестве примера моделирования с использованием блока *PWM Generator* рассматривается моделирование работы интегрированного стартер-генератора (ИСГ) в режиме пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Интегрированный стартер-генератор, как подразумевается в названии статьи, совмещает обычный стартер и генератор переменного тока в од-

ной электрической машине [5]. В качестве базовой электрической машины ИСГ используется СМПМ, которая в режиме пуска представляет собой БДПТ [6]. Проведенный сравнительный анализ [7] показывает, что наиболее эффективным магнитным материалом для использования в ИСГ на базе СМПМ являются магниты на основе РЗМ, несмотря на их относительно высокую стоимость, по сравнению с магнитами на основе сплавов Fe-Ni-Co и ферритов.

Имитационная модель ИСГ в режиме пуска ДВС представлена на рис. 1. Модель содержит силовую, управляющую и измерительную части, модель нагрузки ИСГ. Каждый блок модели имеет окно настройки основных параметров. Система управления и соответствующая ей схема имитационного моделирования ИСГ построены как двухконтурная система автоматического регулирования с использованием ШИР (блока *PWM Generator*).

подводимого к статору с использованием ШИР. В блоке *Subsystem* реализован алгоритм управления транзисторами инвертора с углом переключения, равным 120 эл. град. Спецификой данного способа управления является то, что используется ШИР для ключей инвертора двух фаз, подключенных в данный момент времени к источнику питания [3].

Особенность работы схемы моделирования (см. рис. 1) заключается в необходимости приведения сигнала на входе блока *PWM Generator* к допустимому диапазону входных сигналов, изменяющихся от -1 до +1 (рис. 2). Для получения заданного диапазона осуществляют нормирование сигналов на входе блока *PWM Generator* к диапазону 0÷2 В при помощи усилителя *Gain*1 с коэффициентом $K<1$ (см. рис. 1). Затем за счет смещения входного сигнала, осуществляемого блоком *Constant*1, переходят к работе по характеристике рис. 2.

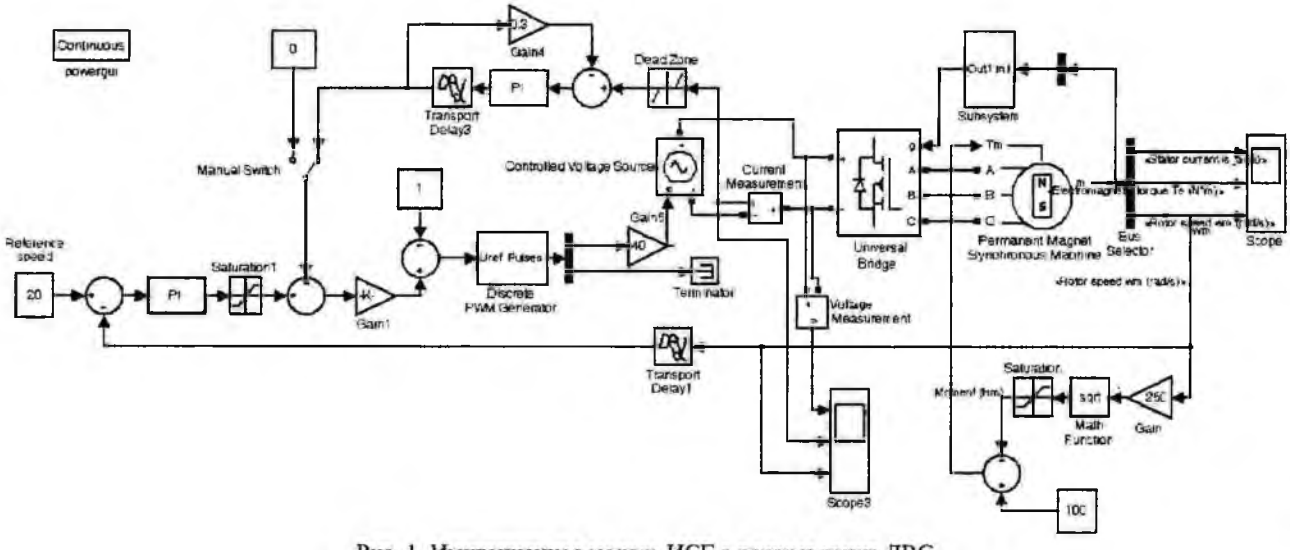

Рис. 1. Имитационная модель ИСГ в режиме пуска ДВС

Первый (внутренний) контур регулирования тока содержит в цепи инвертора датчик тока (*Current Measurement*), а в обратной связи устройство токоограничения УТО (блок *Deal Zone*), которое осуществляет нелинейную отрицательную обратную связь по току. В этой системе трехфазный инвертор (*Universal Bridge*) выполняет роль коммутатора. Задающим сигналом для первого контура является сигнал с выхода регулятора угловой скорости вращения ротора (РС). При работе контура по току последний ограничивается на заданном уровне за счёт уменьшения напряжения питания инвертора.

Вторым (внешним по отношению к контуру тока) является контур регулирования угловой скорости вращения. Он содержит РС (*PI*) и включен в контур с обратной связью по угловой скорости. Регулирование тока БДПТ осуществляется с помощью регулирования напряжения,

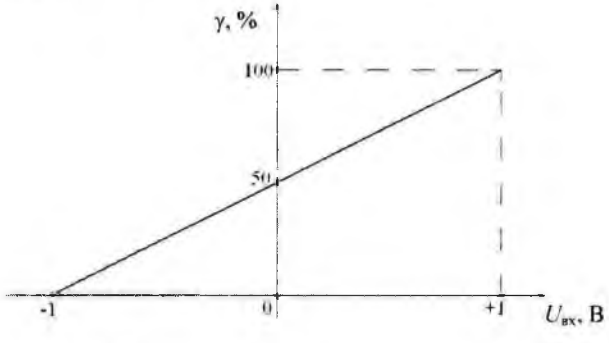

Рис. 2. Зависимость коэффициента заполнения γ от величины входного сигнала блока *PWM Generator*

Выходной сигнал блока *PWM Generator* представляет собой периодические прямоугольные импульсы амплитудой 1 В, частотой f = = 1080 Гц, коэффициент заполнения $\gamma = t_и/T$ которых пропорционален входному напряжению блока *PWM Generator* (рис. 2). Для получения

сигнала ШИР, который управляет работой источника питания, необходимо денормирование (усиление) выходного сигнала блока *PWM Generator* до уровня напряжения питаний ИСГ ($U_{пит}$), осуществляемое в модели блоком *Gain*5.

Структурная схема имитационной модели ИСГ приведена на рис. 3.

Приведенная структурная схема ИСГ соответствует структуре с нелинейной обратной связью по току. Нелинейность в модели, осуществляемая с помощью УТО, приводит к разделению области электромеханической характеристики на две зоны [8]. На первом этапе пуска $I_и \geq I_{и\ доп}$ (где $I_{и\ доп}$ – допустимый ток инвертора) действует нелинейная обратная связь по току, которая ограничивает пусковой ток ИСГ. На втором этапе $I_и < I_{и\ доп}$ действует только обратная связь по угловой скорости, обеспечивая требуемое нарастание скорости вращения ИСГ. Работа внутреннего контура осуществляется в первоначальный момент включения ИСГ, при этом $I_и > I_{и\ доп}$. Дальнейшая работа ИСГ, заключающаяся в увеличении угловой скорости, осуществляется под управлением внешнего контура, при этом $I_и < I_{и\ доп}$. БДПТ управляется от силового регулятора, представленного звеном $W_{ср} = K_{ср}$. Силовой регулятор, осуществляющий широтно-импульсное регулирование питающего напряжения ИСГ, управляется от РС, на вход которого подается разность сигналов управления и обратной связи по угловой скорости. Для целей регулирования при математическом описании БДПТ используют модель двигателя постоянного тока (ДПТ) [3]. Передаточная функция ИСГ по управляющему воздействию имеет вид [3]

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_s(s)} = \frac{\frac{1}{\kappa_E}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)},$$

где T_1, T_2 – постоянные времени, $T_1 \approx T_э$ – электромагнитная постоянная времени; $T_2 \approx T_м$ – электромеханическая постоянная времени; κ_E – конструктивная постоянная двигателя [3, 6].

Поскольку $T_2 >> T_1$, целесообразно использовать в качестве регулятора скорости ПИ-регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени объекта регулирования – ДВС [8, 9]. Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_р(s) = \frac{(T_2 s+1)K_р}{T_2 s} = K_р + \frac{K_р}{T_2 s} = K_П + \frac{K_И}{s}.$$

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{раз}(s) = W_р(s)W(s)K_{ср}K_{ос} = \frac{K_{ср}K_р K_{ос}}{T_2 s(T_1 s+1)\kappa_E}.$$

Известно [8], что оптимум по модулю в такой системе достигается при выполнении условия

$$\frac{T_2 \kappa_E}{K_{ср}K_р K_{ос}} = 2T_1.$$

Из последнего выражения находятся коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора:

$$K_П = K_р = \frac{T_2 \kappa_E}{2T_1 K_{ср}K_{ос}}; \quad K_И = \frac{K_р}{T_2}.$$

Приведем результаты моделирования работы ИСГ со следующими параметрами: $R_S = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом; $L_S = 160 \cdot 10^{-6}$ Гн; $U_{пит} = 40$ В; $\Phi_0 = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ Вб; $J = 5$ кг·м^2; $p = 6$; $\kappa_0 w_a = 10$; $M_{н0} = 100$ Н·м; $\kappa_E = 6{,}6 \cdot 10^{-2}$ Вб; $T_1 = 0{,}039$ с; $T_2 = 2{,}96$ с.

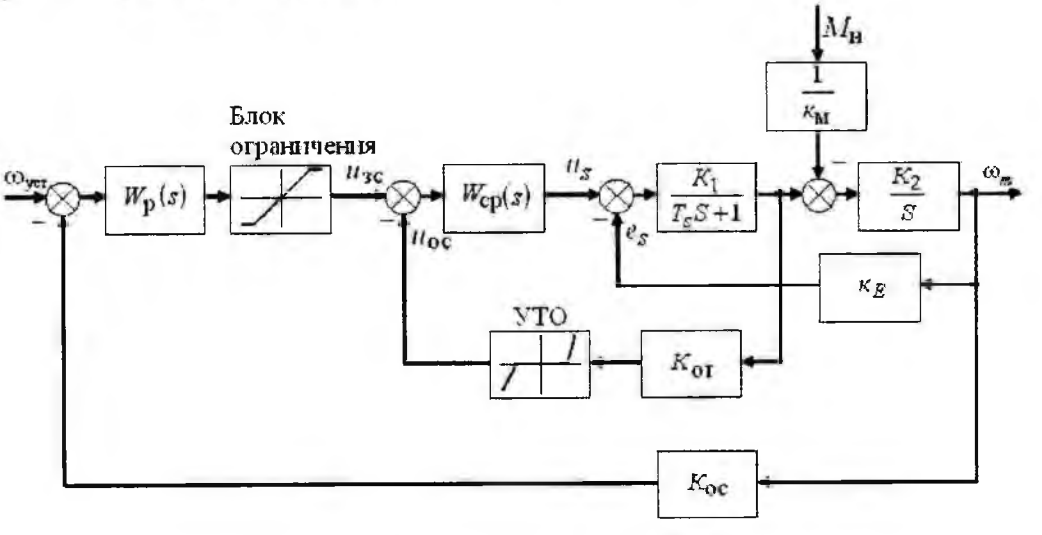

Рис. 3. Структурная схема модели ИСГ

При $K_{ср}=1$; $K_{ос}=1$ параметры регулятора будут равны $K_П=2{,}44$; $K_И=0{,}82$ с$^{-1}$.

Переходные процессы для момента и скорости вращения в замкнутой двухконтурной системе с ограничением пускового тока БДПТ приведены на рис. 4, *а*. Переходные процессы для момента и скорости вращения в замкнутой одноконтурной системе без ограничения пускового тока приведены на рис. 4, *б*. Экспериментальные данные работы ИСГ в режиме пуска приведены на рис. 5.

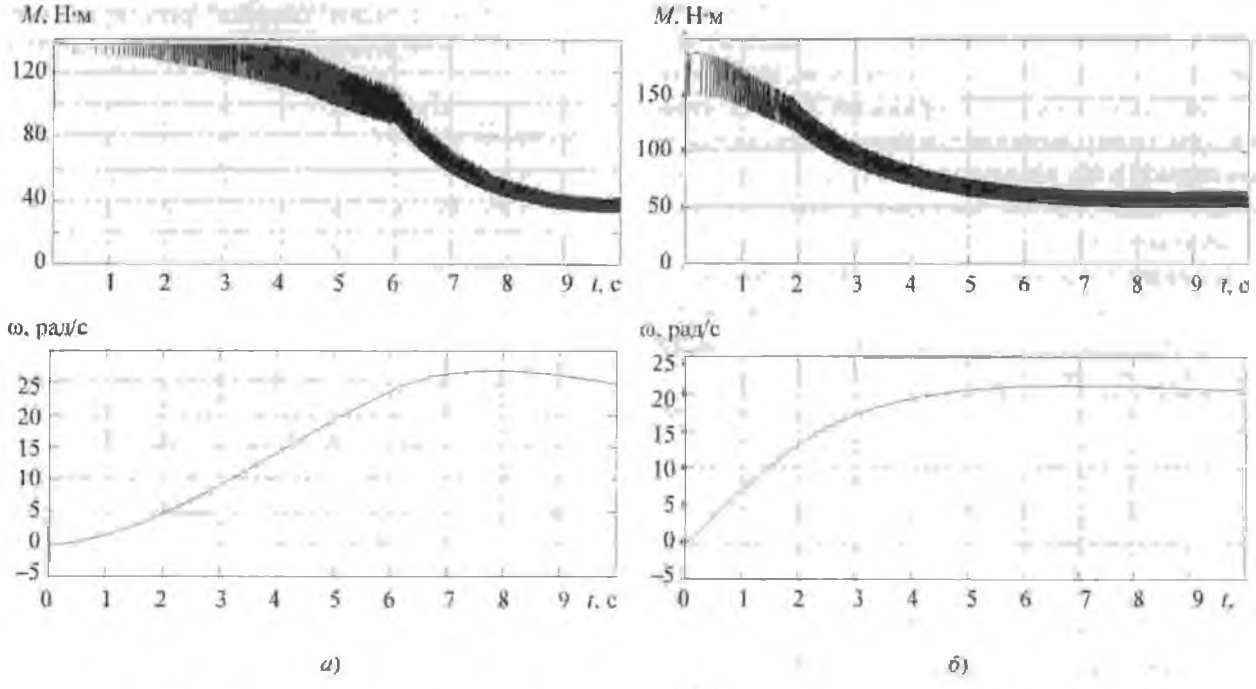

Рис. 4. Результаты моделирования работы ИСГ с ограничением (*а*) и без ограничения (*б*) пускового тока: момент и скорость вращения БДПТ

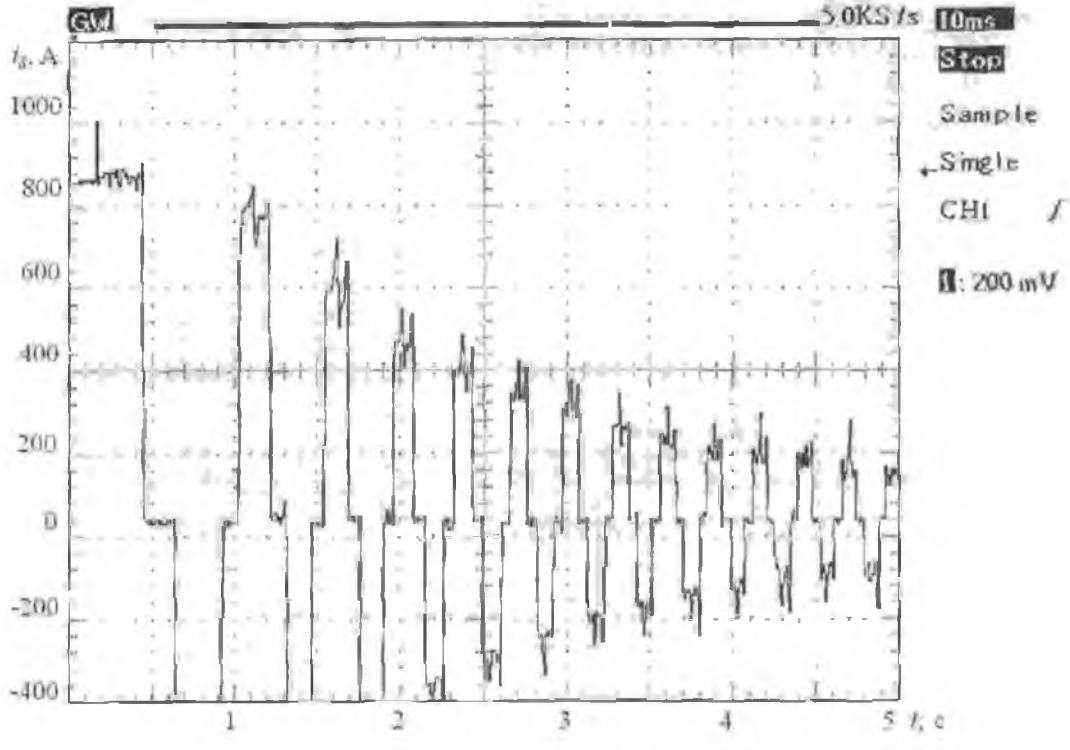

Рис. 5. Экспериментальные данные работы ИСГ в режиме пуска

Результаты моделирования и сравнения с экспериментами позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование блока *PWM Generator* в модели, осуществляющего широтно-импульсное регулирование в системе управления инвертора, позволяет адекватно рассчитывать электромагнитные, электромеханические характеристики системы с БДПТ в динамическом режиме работы, построенные по принципу подчиненного регулирования.

2. Требование ограничения токов, протекающих в инверторе и в фазах СМПМ, обуславливает построение системы управления ИСГ в режиме запуска ДВС как двухконтурной скоростной системы автоматического регулирования. Использование отрицательной обратной связи по току в контуре тока приводит к снижению напряжения питания инвертора и тем самым к ограничению тока и момента при пуске ДВС.

3. В результате использования двухконтурной замкнутой системы для ИСГ в режиме пуска достигнуто значительное (в 1,4 раза) снижение пускового тока без заметного увеличения времени пуска ДВС (10 %).

Таким образом, имитационное моделирование позволяет адекватно рассчитывать электромагнитные характеристики и динамику работы ИСГ в режиме пуска ДВС при различных моделях нагрузки. Меняя конструктивные параметры модели СМПМ, можно быстро и эффективно решать задачи рационального проектирования ИСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007. 340 с.

2. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2006. 336 с.

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

4. Высоцкий В.Е., Воронин С.М., Горшков Р.Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя // Вестник ИГЭУ. 2011. Вып. 1. С. 54 – 57.

5. Анисимов В.М., Трошин В.В. Стартер-генераторные установки для легковых автомобилей// Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2009. № 2 (24). С. 215 – 217.

6. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Моделирование работы электропусковой системы автомобиля на базе интегрированного стартер-генератора // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 1. С. 49 – 57.

7. Мигунов А.Л., Кауров С.Ю. Анализ и выбор перспективных постоянных магнитов для магнитных систем стартер-генераторных установок легковых автомобилей // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 1. С. 30 – 33.

8. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: учебник для студентов вузов. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 496 с.

9. Пат. 2453034 РФ. Устройство управления асинхронным стартер-генераторном / Кауров С.Ю., Макаровский Л.Я., Мигунов А.Л., Репин А.С., Умывалкин С.В. № 2010130518/07. Заявл. от 20.07.10; опубл. 10.06.12, Бюл. № 16.

Мигунов Александр Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета. Тел. (846) 242-11-78.

Кауров Сергей Юрьевич – ассистент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета. Тел. (846) 242-11-78. E-mail: serkau@rambler.ru

Тулупов Павел Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Самарского государственного технического университета. Тел. (846) 242-11-78.

Поступила в редакцию ***9 июня 2014 г.***

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika.
(Russian Electromechanics. Universities' News)
2014, no. 5, pp. 57-62

SIMULATION MODELLING OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH CONTACTLESS DC MOTOR

A.L. Migunov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor department «Electromechanics and Automobile Electrical Equipment», Samara State Technical University. Ph. (846) 242-11-78.

S.Ju. Kaurov, Assistant department «Electromechanics and Automobile Electrical Equipment», Samara State Technical University. Ph. (846) 242-11-78. E-mail: serkau@rambler.ru

P.V. Tulupov, Candidate of Technical Sciences, Associate professor department «Electromechanics and Automobile Electrical Equipment», Samara State Technical University. Ph. (846) 242-11-78.

The article considers issues on simulation modeling of mechatronic systems operation with contactless DC motors. As an example, simulation modelling of an electric car triggering system based on an integrated starter-generator (ISG) has been done. For the basic ISG electric machine has been taken a synchronous machine with excitation from permanent magnets (SMPM). In the triggering mode SMPM with management system represents a contactless DC motor. The simulation modeling of ISG in the triggering mode of the internal combustion engine in the Matlab-Simulink using the simulation package Sim Power System has been considered. The ISG model is presented by two-planimetric systems of automatic control. During the speed controller synthesis the contactless DC motor mathematical description has been simplified, and replaced with its equivalent DC motor. The author suggested using in the modeling diagram PWM Generator block carrying out pulse-width pressure regulation of the inverter supply. It is shown, that for the ISG simulation modelling using the PWM Generator block it is required both rationing signal on an input of PWM Generator block and denormalization of the output signal.

Key words: simulation modelling, synchronous machine with excitation from permanent magnets, contactless DC motor.

REFERENCES

1. Vysotskiy V.E., Zubkov Yu.V., Tulupov P.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimal'noe pro-ektirovanie ventil'nykh elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling and optimal design of inverter-fed electric cars]. Moscow.: Energoatomizdat, 2007, 340 p.

2. Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove. Kurs lektsiy* [Inverter-fed electric motors and the drive based on them. Course of lectures]. Saint-Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2006, 336 p

3. German-Galkin S.G. *Matlab&Simulink. Proektirovanie mekhanotronnykh sistem na PK* [Matlab&Simulink. Mechatronic systems design on your PC]. St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008, 368 p.

4. Vysotskiy V.E., Voronin S.M., Gorshkov R.G. *Imitatsionnoe modelirovanie elektromagnitnykh i elektromekhanicheskikh protsessov ventil'nogo dvigatelya* [Simulation modeling of electromagnetic and electromechanical processes of the inverter-fed motor]. *Vestnik IGEU.* 2011, Vyp. 1, pp. 54 – 57. [In Russ.]

5. Anisimov V.M., Troshin V.V. Starter-generatornye ustanovki dlya legkovykh avtomobiley [Starter-generator sets for light-duty cars]. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 2 (24). pp. 215 – 217. [In Russ.]

6. Migunov A.L., Kaurov S.Yu. Modelirovanie raboty elektropuskovoy sistemy avtomobilya na baze integrirovannogo starter-generatora [Simulation of the electric triggering car system based on an integrated starter-generator]. *Vestnik transporta Povolzh'ya*, 2013, no. 1, pp. 49 – 57. [In Russ.]

7. Migunov A.L., Kaurov S.Yu. Analiz i vybor perspektivnykh postoyannykh magnitov dlya magnitnykh sistem starter-generatornykh ustanovok legkovykh avto-mobiley [Analysis and selection of prospective permanent magnets for magnetic systems of starter-generator units of light-duty vehicles]. *Vestnik transporta Povolzh'ya*, 2013, no. 1, pp. 30 – 33. [In Russ.]

8. Kovchin S.A., Sabinin Yu.A. *Teoriya elektroprivoda: uchebnik dlya studentov vuzov* [The theory of the electric drive: manual for the university students]. St. Petersburg, Energoatomizdat. 2000. 496 p.

9. Kaurov S.Yu., Makarovskiy L.Ya., Migunov A.L., Repin A.S., Umyvalkin S.V. Ustroystvo upravleniya asin-khronnym starter-generatornom [Asynchronous starter-generator controller]. Pat. 2453034 RF, no. 2010130518/07. Zayavl. ot 20.07.10; opubl. 10.06.12. Byul. № 16.

Received ***9 June 2014***

УДК 621.92

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОВОРОТНОГО СТОЛА

В.Е. Лысов, М.В. Хоренко

Рассматривается электропривод поворотного стола, выполненного в виде мехатронного модуля. Предлагаемая конструкция поворотного стола полностью исключает люфт в кинематической цепи передачи движения от электродвигателя к планшайбе, что способствует синтезу системы автоматического управления положением планшайбы с высокими динамическими показателями качества. Однако предлагаемая конструкция в процессе выполнения технологических движений выделяет теплоту в обмотках статора, что приводит к температурным деформациям планшайбы, что недопустимо для поворотных столов особо высокой точности. В этой связи заявленная точность воспроизведения заданной траектории движения и позиционирования планшайбы обеспечивается компенсацией термодеформаций путем введения дополнительной системы автоматического управления охлаждения исполнительного электродвигателя. Приводятся экспериментальные данные о величине тепловых деформаций. Представлена структурная схема системы автоматического управления компенсации термодеформаций, ее модель и результаты моделирования.

Ключевые слова: электропривод, поворотный стол, планшайба, мехатронный модуль, термодеформации.

ПРОБЛЕМА повышения точности, производительности при обработки изделий на прецизионных поворотных столах за счет постоянного совершенства электроприводов, простоты алгоритмов управления является актуальной и своевременной задачей.

Традиционные конструкции поворотных столов включают червячный редуктор, осуществляющий связь между планшайбой и исполнительным электродвигателем. Редуктор имеет технологический люфт, предназначенный для компенсации термодеформаций между червяком и червячным колесом и составляет в прецизионных конструкциях до 15 угловых секунд. В этой связи для достижения высокой точности позиционирования необходимо обеспечить односторонний подход к заданной координате, а при обработке сложных по конфигурации профилей деталей необходимо вести процесс на пониженной скорости подачи. Для реализации этих требований необходимы сложные алгоритмы управления электроприводом.

В этой связи предлагается новое решение в разработке прецизионных поворотных столов в виде мехатронного модуля [1, 2]. Разработка таких столов позволяет достичь точности позиционирования в пределах возможностей современных датчиков положения – 1 мкм и углового положения – 1 угловой секунды. Функциональная схема мехатронного модуля показана на рис. 1. Конструкция модуля принципиально исключает люфт и базируется на использовании систем электроприводов с синхронным электродвигателем, например, серии *RSM*-36 [2]. Однако для достижения предъявленных требований необходимо компенсировать тепловые деформации, возникающие за счет нагрева электродвигателя.

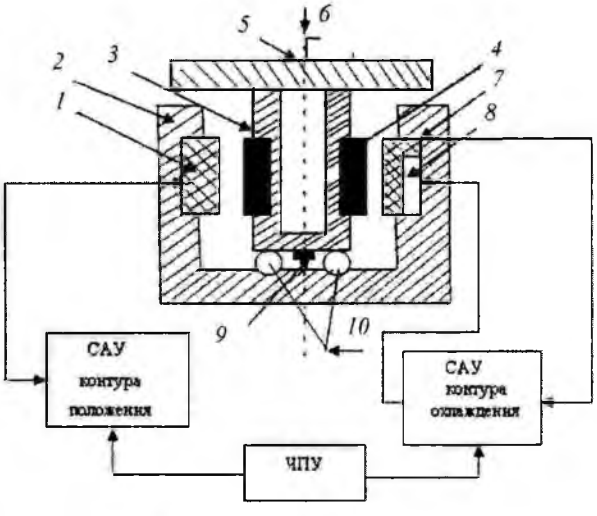

Рис. 1. Функциональная схема мехатронного модуля: *1* – статорная обмотка; *2* – статор электродвигателя; *3* – ротор; *4* – постоянные магниты ротора; *5* – планшайба; *6* – деталь; *7* – датчик температуры; *8* – вход охлаждающей жидкости в радиатор статора; *9* – датчик положения ротора; *10* – подшипники ротора; ЧПУ – числовое программное управление мехатронным модулем

В процессе обработки детали, расположенной на поверхности планшайбы, ток статора изменяется в соответствии с нагрузочной диаграммой, а в режиме удержания заданной координаты электродвигатель работает на упор. Это обстоятельство приводит к тому, что статор электродвигателя нагревается. На основании исследования термических процессов [3] была получена передаточная функция, связывающая температуру нагрева статора электродвигателя τ с током в его цепи I:

$$W(p)_{\text{нагр}}=\frac{\tau(p)}{I(p)}=\frac{K_I}{T_{\text{нагр}}p+1},$$

где K_I – отношение превышения температуры статора к его току; $T_{\text{нагр}}$ – постоянная времени нагрева статора.

Наибольшее количество теплоты передается ротору путем конвекции и теплопроводности через воздушный зазор между ротором и статором, а планшайба нагревается за счет теплопроводности ротора. Передаточная функция, характеризующая процесс нагрева ротора, представляется апериодическим звеном

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

где $\tau_{\text{план}}$, $K_{\text{план}}$ – превышение температуры планшайбы относительно окружающей среды и коэффициент передачи, учитывающий снижение температуры планшайбы относительно статора исполнительного двигателя, соответственно. Экспериментально полученные соотношения составляют: $K_{\text{план}} = 0{,}8 - 0{,}9\ K_{\text{нагр}}$, $\tau_{\text{план}} = (1{,}1 - 1{,}2)T_{\text{нагр}}$.

Нагрев планшайбы вызывает нагрев детали, закрепленной на ней. Процесс нагрева детали зависит от её формы, материала и объема. Значение передаточной функции, связывающей изменение геометрических параметров детали, например, линейного изменения размера Z от температуры планшайбы $T_{\text{план}}$, получено экспериментальным путем и представляется в виде апериодического звена:

$$W_{\text{дет}}(p)=\frac{Z(p)}{\tau(p)}=\frac{K_{\text{дет}}}{T_{\text{дет}}p+1}.$$

В процессе эксперимента было принято, что ток статора определялся нагрузкой $I = 0{,}7I_{\text{ном}}$, которая соответствует реальному значению при обработке детали в длительном режиме. Замеры температуры поверхности статора и поверхности планшайбы осуществлялись с помощью тепловизора *FLIR*-200 с погрешностью измерения 0,1 %. При нагревании статора заданным током температура поверхности планшайбы имела перепад 0,5 – 1,7 °С, то есть нагрев планшайбы осуществлялся неравномерно. Участок с наибольшим превышением температуры находится на оси ротора. Это свидетельствует о том, что передача теплоты от статора осуществляется через ротор. В мехатронном модуле планшайба крепится непосредственно к валу электродвигателя. Превышение температуры в месте крепления приводит к «вспучиванию» поверхности стола и его деформации от центра к периферии в пределах 4 – 5 мкм. Плоскость детали относительно оси инструмента имеет угол 8 – 10 угловых секунд.

Полученные результаты указывают на необходимость стабилизации температуры планшайбы за счет охлаждения статора электродвигателя. Требования к точности обработки на прецизионных столах, соответствующих классу С, допускают стабилизацию температуры на поверхности планшайбы в пределах ±1 °С от температуры окружающей среды.

Таким образом, электропривод прецизионного поворотного стола должен иметь две взаимосвязанные системы автоматического управления – традиционную САУ поворотом стола в виде системы подчиненного управления положением и новую САУ стабилизации температуры планшайбы за счет управления процессом охлаждения статора электродвигателя охлаждающей жидкостью. Структурная схема контура охлаждения представлена на рис. 2.

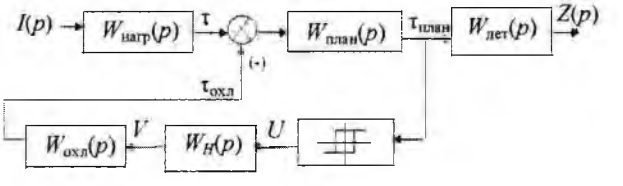

Рис. 2. Структурная схема контура стабилизации температуры планшайбы

Здесь наряду с рассмотренными выше передаточными функциями вводятся дополнительно передаточная функция насоса, прокачивающего охлаждающую жидкость через радиатор статора, и передаточная функция, характеризующая процесс охлаждения статора двигателя соответственно:

$$W_H(p)=\frac{V(p)}{U(p)}=\frac{K_H}{T_H p+1};$$

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

где K_H, T_H, $K_{\text{охл}}$, $T_{\text{охл}}$ – коэффициент передачи насоса, постоянная времени насоса, коэффици-

ент передачи, характеризующий процесс охлаждения статора, постоянная времени процесса охлаждения соответственно; V – объем прокачиваемой жидкости; U – напряжение, подводимое к электродвигателю насоса; $\tau_{охл}$ – снижение температуры планшайбы под действием охлаждения статора; $Q_{охл}$ – количество теплоты, отводимое от статора при его охлаждении.

Контур стабилизации температуры построен как релейная система. Это объясняется большими постоянными времени процессов нагрева и охлаждения статора и планшайбы поворотного стола. Релейный элемент подключает насос, который прогоняет охлаждающую жидкость через радиатор статора и стабилизирует температуру в диапазоне ±1 °С. Следует отметить, что температура охлаждающей жидкости не должна быть ниже одного градуса температуры окружающей среды. Это требование диктуется недопустимостью образования конденсата. Структурная схема контура стабилизации температуры представлена на рис. 2.

Исследование работы контура стабилизации температуры планшайбы проводилось путем компьютерного моделирования в среде *Simulink* программы *MatLab*. При моделировании использовались следующие значения передаточных функций, полученных расчетным и экспериментальным путем для стола марки СК36 – 1202:

$$W(p)_{нагр}=\frac{\tau(p)}{I(p)}=\frac{8}{120p+1};$$

$$Q_{охл}(p)=\frac{\tau_{охл}(p)}{Q_{охл}(p)}=\frac{16}{100p+1};$$

$$W_H(p)=\frac{V(p)}{U(p)}=\frac{0{,}013}{0{,}3p+1};$$

$$W_{план}(p)=\frac{\tau(p)}{\tau_{план}}=\frac{0{,}85}{120p+1};$$

$$W_{дет}(p)=\frac{Z(p)}{\tau(p)}=\frac{2{,}2}{20p+1}.$$

Насос имел производительность $V = 5$ л/мин; начальная температура жидкости – 19 °С.

На рис. 3 показана осциллограмма стабилизации температуры планшайбы в диапазоне ±1 °С от значения температуры окружающей среды.

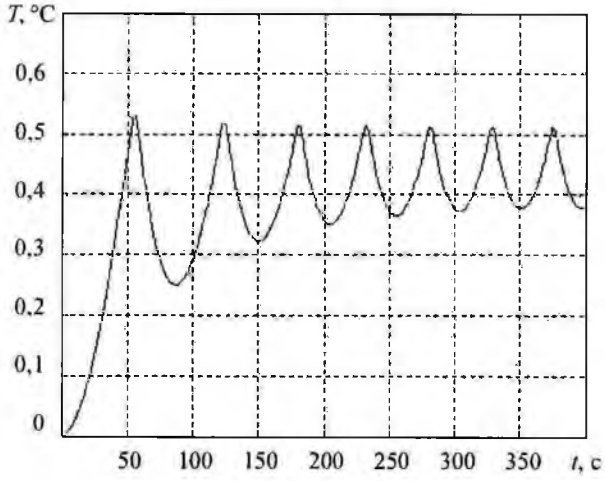

Рис. 3. Процесс стабилизации температуры планшайбы

Анализ результатов моделирования указывает на возможность получения высоких динамических и статических показателей качества, отвечающих требованиям прецизионной обработки изделий класса С.

ВЫВОДЫ

1. Для реализации электропривода прецизионного поворотного стола необходимо ввести дополнительную систему стабилизации температуры планшайбы.

2. Применение поворотного стола в виде мехатронного модуля существенно упрощает алгоритм управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В., Кулешов В.С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5 – 10.

2. Лысов В.Е., Хоренко М.В. Система автоматического управления мехатронным модулем прецизионного поворотного стола // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7(135). С. 40 – 44.

3. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоиздат, 2001.

Лысов Владимир Ефимович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» Самарского государственного технического университета. E-mail: 67lysov@mail.ru

Хоренко Михаил Владимирович – главный инженер ООО «Провили», завод ООО филиал «Провили – Самара».

Поступила в редакцию *9 июня 2014 г.*

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika.
(Russian Electromechanics. Universities' News)
2014, no. 5, pp. 80-83

ROTARY TABLE ELECTRIC DRIVE

V.E. Lysov, Doctor of Technical Sciences, Professor, department «Electric Drive and Industrial Automation», Samara State Technical University. E-mail:lysov@mail.ru

M.V. Khorenko, Chef Engeneer of Provimi-Samara.

The paper deals with the electric drive of the rotary table made in the form of the mechatronic module. The offered design of a rotary table completely excludes backlash in a kinematic chain drive transmission from the electric motor to the faceplate that promotes synthesis of the automatic control system of the faceplate with high dynamic rates of quality. However in the course of performance the offered design allocates heat in stator windings that leads to temperature deformations of the faceplate that is inadmissible for rotary tables of especially high precision. In this regard the declared fidelity of the predetermined path of movement and positioning of the faceplate is provided with compensation of thermodeformations by introduction of an additional automatic control system of the executive electric motor cooling. The paper reveals experimental data on the size of thermal deformations. It provides the block diagram of automatic control system of thermodeformations removal, its model and results of modeling.

Key words: tric drive, rotary table, faceplate, mechatronic module, thermodeformations.

REFERENCES

1. Poduraev Yu.V..Kuleshov V.S. Printsipy postroeniya i sovremennye tendentsii razvitiya mekhatronnykh system [Principles of construction and modern trends of development of mechatronic systems]. *Mekhatronika*, 2000, no. 1, pp. 5 – 10. [In Russ.]

2. Lysov V.E.. Khorenko M.V. Sistema avtomaticheskogo upravleniya mekhatronnym modulem pretsizionnogo povorotnogo stola [Automatic control system of precision rotary table's mechatronic module]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2012, no. 7 (135), pp. 40 – 44. [In Russ.]

3. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, Energoizdat. 2001. 704 p.

Received ***9 June 2014***