

which arises during rotation of the flux-gate sensor in the residual field and during its biasing by the test alternating magnetic field, allows us to minimize all the measurement errors of the field components: graduation errors and sensibility variations (multiplicative error); zero shift and fluctuation (additional error). In the work a new test measurement algorithm is substantiated; an option of magnetometer structural block-diagram is considered; peculiarities of the measuring procedures and magnetometer functioning modes are analyzed. The proposed option of the magnetometer in combination with separate types of flux-gate sensors has high reliability, resistance to interferences, insignificant power consumption, relatively small weight and dimensions. The use of such an option of magnetometer as a precision null-indicator will allow us to measure accurately the geomagnetic field components, to carry out the works, connected with different geophysical investigations; with determination of the magnetic deviation, created by different movable objects. With its sufficient sensitivity and high precision of transformation, as well as a sharp directivity graph, the magnetometer option under consideration may be used also in the tracking systems, allowing orientation of different objects on the geomagnetic field.

Keywords: geomagnetic field, magnetometer, flux-gate sensor, measuring procedure, synchronous detector, in-phase and quadrature-phase components, electric signal, test algorithm

For citation:

Bryakin I. V. Magnetometer with a Test Algorithm of Functioning, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 49–56.

DOI: 10.17587/mau.18.49-56

References

1. **Logachev A. A., Zaharov V. P.** *Magnitorazvedka* (Geomagnetics), Leningrad, Nedra, 1979, 351 p. (in Russian).
2. **Gordin V. M.** *Ocherki po istorii geomagnitnyh izmerenij* (Sketches on history of geomagnetic measurements), Moscow, IFZ RAN, 2004, 162 p. (in Russian).
3. **Ljahovickij F. M., Hmelevskoj V. K.** *Inzhenernaja geofizika* (The engineering geophysics), Moscow, Nedra, 1989, 252 p. (in Russian).
4. **Lanza R., Meloni A.** *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, Berlin, Springer, 2006, 280 p.
5. **Zvezhinskij S. S.** *Magnitometricheskie ferrozondovye gradiometry dlja poiska vzryvoopasnyh predmetov* (Magnitometrichesky of flux-gate the gradiometers for search of explosive subjects), *Spektelnika i Svjaz'*, 2009, no. 1, pp. 16–29 (in Russian).
6. **Bugaj A. I., Linko Ju. R., Soborov A. N. i dr.** *Ferrozondovyy magnitometr* (The flux-gate magnetometer), A. S., no. 930176 (SSSR), 1982, Bjul. no. 19 (in Russian).
7. **Bratland T., Caruso M. J., Schneider R. A., Smith C. H.** New Perspective on Magnetic Field Sensing, *Sensors*, 1998, vol. 5, no. 12, pp. 4–46.
8. **Ripka P.** *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Norwood, United States, Artech House, 2001, 516 p.
9. **Bryakin I. V.** *Jelektromoduljacionnyj ferrozondovyy magnitometr* (electromodulation of flux-gate the magnetometer), *Trudy tre'ej Rossijskoj Konferencii s Mezhdunarodnym Uchastiem "Tehnicheskie i Programnyye Sredstva Sistem Upravlenija, Kontrolja i Izmerenija" (UKI-12)*, Moscow, IPU RAN, 2012, pp. 610–618.
10. **Bryakin I. V.** *Magnitometr dlja sistem orientacii ob'ektov po magnitnomu polju* (The Magnitometer for systems of orientation of the objects on a magnetic field), *Trudy "Chetvertoj Mezhdunarodnoj Konferencii po Problemam Upravlenija" (MKPU-IV)*, Moscow, IPU RAN, 2009, pp. 1944–1953.
11. **Muhametshin A. M.** *Podzemnaja vektornaja magnitometrija v rudnichnoj geologii* (A underground vector magnetometry in miner geology), Ekaterinburg, IGD UrO AN SSSR, 1997, 214 p.

УДК 681.516.3

DOI:10.17587/mau.18.56-63

С. Г. Герман-Галкин, д-р техн. наук, проф., ggsg@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики "ИТМО", Морская академия, г. Щецин,

Р. С. Гаврилов, канд. техн. наук, доц., roman_gavrilov85@mail.ru,

Ю. Н. Мустафаев, доц., mustafaev-spb@mail.ru,

Санкт-Петербургский Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова "Военмех"

Структурные и имитационные модели в модельно-ориентированном проектировании вентильного электропривода для опорно-поворотного устройства

Представлены результаты модельных исследований структурных и имитационных моделей вентильного электропривода опорно-поворотного устройства. Выделены этапы модельно-ориентированного проектирования (Model-Based Design, MBD) мехатронных систем в пакете MATLAB-Simulink. Рассмотрены алгоритмы генерации исполняемого кода для микроконтроллеров встраиваемых систем с помощью пакета MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: структурная модель, имитационная модель, MATLAB-Simulink, электропривод, модельно-ориентированное проектирование, генерация кода

Введение

Проблемы разработки современных систем управления приборным электроприводом непосредственно связаны с задачами моделирования реальных физических объектов, с проектированием систем

управления, с тестированием и созданием рабочих прототипов. Надежность функционирования таких систем тесно связана с их телеметрией, которая также требует решения целого ряда сложных задач — от разработки алгоритмов кодирования, модуляции и фильтрации до оптимизации каналов связи,

протоколов передачи данных и их программной реализации.

Все более жесткие требования к срокам проектирования, возрастающая сложность проектов и необходимость совместной работы различных групп проектировщиков и инженеров, письменная документация, связь между главным исполнителем и подрядчиками, сложная цепочка поставок и растущая разнообразность аппаратных и программных средств заставляют проектировщиков искать новые решения.

Наиболее эффективным из новых методов решения этих задач является модельно-ориентированное проектирование (Model-Based Design, MBD). Этот метод объединяет в единый рабочий процесс разные этапы разработки системы, такие как формирование технических требований, моделирование, разработка системы, отладка и тестирование. Модельно-ориентированное проектирование помогает координировать работу различных групп разработчиков и позволяет выявлять ошибки на ранних стадиях, значительно сокращая время разработки и повышая эффективность проектирования.

При таком подходе к разработке новых изделий вместо физических прототипов и текстовых спецификаций применяется исполняемая модель. Эта модель используется на всех этапах разработки системы или объекта, по ней разработчик проводит имитационное моделирование как всей системы целиком, так и ее отдельных компонентов. Конечным результатом MBD является автоматическая генерация исполняемого кода для управляющего контроллера.

Наиболее удобным инструментом для реализации модельно-ориентированного проектирования систем управления является среда MATLAB-Simulink. Имеющиеся в ее составе приложения и библиотеки, как встроенные, так и подключаемые, дают разработчикам уникальные возможности по исследованию, проектированию и отладке систем управления в режиме реального времени.

Основные этапы MBD систем приборного электропривода в среде MATLAB-Simulink включают:

- математическое описание, синтез и моделирование динамических систем с компонентами различной физической природы;
- автоматическое генерирование кода;
- непрерывное тестирование и верификацию;
- разработку спецификаций проектируемой системы.

В статье рассматривается решение *первых двух этапов* MBD применительно к разработке вентильного электропривода опорно-поворотного устройства (ВЭП ОПУ) для оптических комплексов специального назначения.

При разработке модели такой системы приходится разрешать противоречия между точностью модели и ее простотой. При этом необходимо выполнить требование адекватности, т.е. соответ-

ствия модели реальному объекту относительно выбранных для исследования системы свойств.

Стремление сделать модель максимально приближенной к реальному объекту повышает ее сложность и, как следствие, затраты на разработку и программную реализацию. В некоторых случаях модель может стать настолько сложной, что отладка ее будет просто невозможна. Таким образом, модель должна быть достаточно простой (без потери адекватности!). Собственно, искусство моделирования и состоит в том, чтобы построить модель, которая наиболее адекватна из всех простых и наиболее проста из всех адекватных. В связи со сказанным само построение модели становится задачей творческой, требующей от исследователя значительных знаний, опыта, а порой и интуиции. В основе построения модели системы лежит математическое описание ее отдельных блоков различной физической природы и их связей. Поэтому математика, отражающая физику процессов в системе, должна присутствовать, а представлением этой математики являются компьютерные модели в среде MATLAB-Simulink.

При этом сами компьютерные модели в зависимости от решаемой задачи разделяются на два уровня:

1. Структурный уровень, базирующийся на математическом описании и использующий структурные блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets);
2. Имитационный уровень, использующий масштабированные блоки пакета Sim Power System.

Свойства структурных и имитационных моделей для рассматриваемых систем:

- структурная модель — это компьютерная реализация математического описания системы электропривода. Это математическое описание в структурной модели может быть осуществлено с использованием метода А. А. Булгакова (метод "гладкой составляющей") [1];
- структурная модель не требует значительных вычислительных ресурсов;
- структурная модель, основанная на математическом описании, дает возможность оценить взаимосвязь переменных состояния в описываемой системе, оценить влияние параметров системы на ее динамику, использовать современные методы синтеза адаптивных и робастных регуляторов для придания системе заданных качеств;
- результаты моделирования, полученные на структурной модели, могут рассматриваться как некоторые эталонные для сравнения с результатами, которые впоследствии должны быть получены на имитационных моделях с различной степенью детализации и, тем самым, выбрать адекватную модель для последующего проектирования;
- электромагнитные и электромеханические процессы в структурной модели, учитывающие только "гладкие составляющие", не учитывают

пульсации токов и напряжений как в машине, так и в силовом преобразователе, а следовательно, не позволяют рассчитать динамические потери в элементах, дополнительные потери в машине и не позволяют исследовать вопросы совместимости машины и преобразователя, преобразователя с сетью;

- в структурной модели отсутствуют блоки, отвечающие за преобразование и ориентацию системы координат. Эти преобразования "спрятаны" в математическом описании;
- имитационные модели — это маскированные блоки устройств силовой электроники и электромеханики, помещенные в библиотеки пакета расширения Sim Power System.
- имитационная модель требует значительных вычислительных ресурсов, зависящих от степени детализации параметров моделей полупроводниковых элементов;
- имитационная модель позволяет учесть пульсации токов и напряжений как в машине, так и в силовом преобразователе, а следовательно, позволяет рассчитать динамические потери в элементах преобразователя, дополнительные потери в машине, исследовать вопросы совместимости машины и преобразователя, преобразователя с сетью;
- имитационная модель может служить основой для быстрого прототипирования всей системы;
- аналогичность результатов структурной и имитационной модели служит подтверждением адекватности разработанных моделей.

1. Функциональная схема ВЭП ОПУ

Функциональная схема рассматриваемого ВЭП ОПУ приведена на рис. 1.

Она включает три подсистемы: информационную, энергоэлектронную и электромеханическую. Электромеханическая подсистема содержит объект управления (ОУ) и электромеханический преобразователь (ЭМП) — электрическую машину. Энергоэлектронная подсистема включает силовой полупроводниковый преобразователь (СПП) и вторичный источник питания (ВИП). Информационная

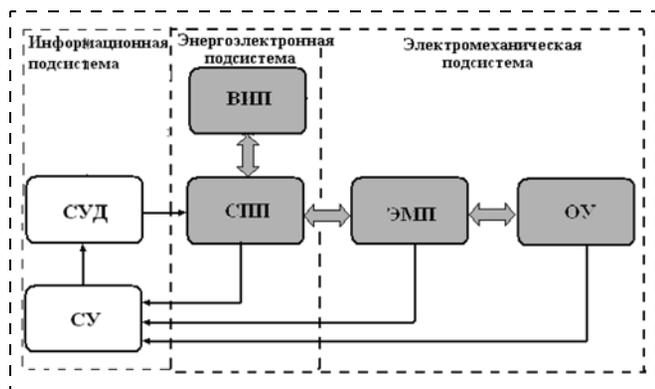


Рис. 1. Функциональная схема системы

подсистема содержит систему управления и диагностики (СУД) и блок сенсорных устройств (СУ).

Рассматриваемая система является нелинейной, импульсной с дискретно изменяющимися параметрами. При ее проектировании необходимо исследовать динамические, статические, энергетические, спектральные и ряд других характеристик. Поэтому ее анализ, а также синтез законов управления требует построения как структурных, так и имитационных моделей в среде MATLAB-Simulink.

2. Математическое описание электропривода для ОПУ, сравнение, выбор

Аналитическое исследование ВЭП ОПУ было осуществлено в работе [2], где рассчитаны электромагнитные и энергетические характеристики и даны рекомендации по синтезу структуры электропривода при его работе.

Рассматриваемые структуры электропривода показаны на рис. 2, они включают следующие блоки:

- синхронную магнитоэлектрическую машину (СМ);
- датчик положения ротора (ДПР);
- преобразователь координат (ПК);
- силовой полупроводниковый преобразователь (СПП);

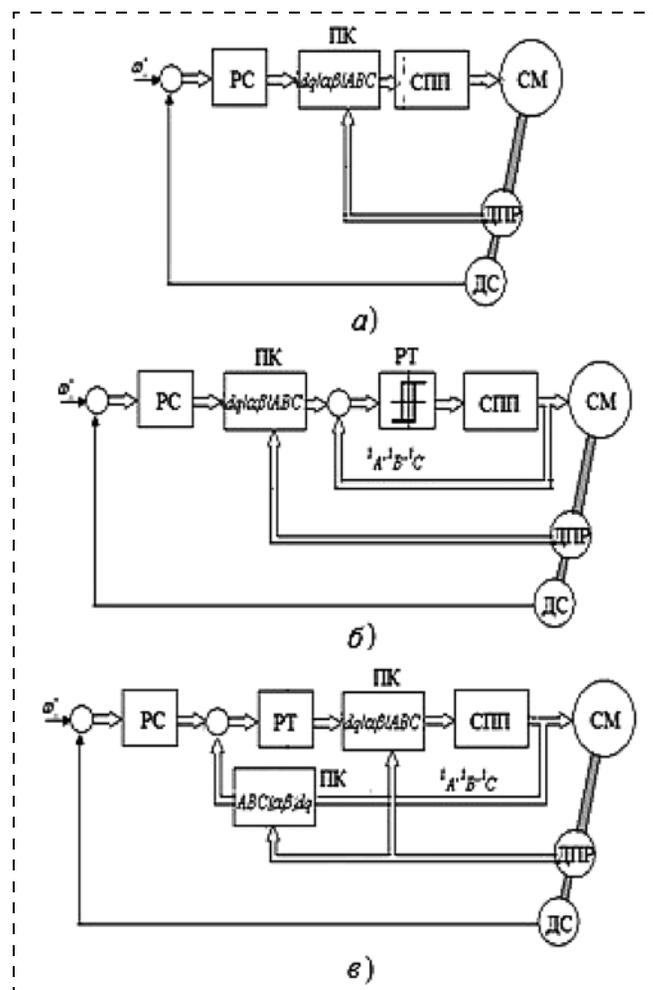


Рис. 2. Структурные схемы ВЭП

- датчик скорости (ДС);
- регулятор скорости (РС);
- регулятор тока (РТ, рис. 2, б, в).

В рассматриваемых системах широтно-импульсная модуляция реализуется в ПК и СПП, при этом амплитуда модулирующего сигнала определяется сигналом на входе ПК, а мгновенная фаза — углом поворота ротора (сигналом с ДПР). Таким образом, регулирование скорости осуществляется за счет изменения входного сигнала.

В качестве исполнительного двигателя в данной системе электропривода использован моментный двигатель RUSHServomotor RSM-P-36-550*50 ВТ. Параметры двигателя приведены ниже:

Номинальный момент, Н·м	670
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,92
Число пар полюсов	48
Сопrotивление обмотки якоря при температуре 20 °С, Ом	3,66
Индуктивность обмотки якорной цепи, Гн	0,0396
Постоянная по моменту, C _M , Н·м/А	61,15
Постоянная по ЭДС, C _E , В·с/рад.	43,73
Напряжение питания, В	600

В структуре, показанной на рис. 2, а, главному (скоростному) контуру с регулятором скорости (РС) подчинен обязательный для всех приводов с СМ контур синхронизации управления силовым полупроводниковым преобразователем (КСУСПП), содержащий датчик положения ротора (ДПР), преобразователь координат (ПК), силовой полупроводниковый преобразователь (СПП) и исполнительный синхронный двигатель (СМ).

В этой структуре КСУСПП описывается следующей системой уравнений [2]:

$$\begin{aligned}
 0 &= L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega L_q i_q; \\
 u_q &= L_d \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega L_d i_d + C_E \omega; \\
 M_e &= p \frac{m}{2} (C_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q); \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} (M_e - M_H); \\
 \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p \omega_m,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u_d, u_q, i_d, i_q — проекции напряжений и токов статора на оси d и q ; L_d, L_q — индуктивность обмотки статора по осям d и q ; R — сопротивления статорной обмотки; $\omega, \omega_m, M_e, M_H, \Theta_m$ — электрическая и механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала; C_M, C_E — конструктивные постоянные двигателя по моменту и противоЭДС; J — момент инерции ротора вместе с приведенным моментом инерции рабочего механизма; p — число пар полюсов; m — число фаз обмотки статора.

В структурах, показанных на рис. 2, б, в, добавляется контур тока с регулятором тока (РТ).

В структуре на рис. 2, б контур тока является внутренним по отношению к КСУСПП. В этом случае обратная связь по току реализуется в неподвижной системе координат и регулятор тока (РТ) выполняется релейным, обеспечивающим скользящее управление током на выходе СПП.

В структуре на рис. 2, в контур тока является внешним по отношению к КСУСПП. В этом случае управление током осуществляется во вращающейся системе координат, и регулятор тока синтезируется в соответствии с классической теорией синтеза линейных регуляторов. Реализация структур, представленной на рис. 2, в, предъявляет повышенные требования к программно-аппаратному обеспечению разработки. В связи с этим на первоначальном этапе исследовалась структура, показанная на рис. 2, б, так как в этой структуре контур тока реализуется как аналоговый.

В этой структуре КСУСПП описывается системой уравнений [2]

$$\begin{aligned}
 M_e &= p \frac{m}{2} C_M i_q; \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} (M_e - M_H); \\
 \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p \omega_m.
 \end{aligned} \tag{2}$$

3. Структурная модель механической части ОПУ

Металлоконструкция опорно-поворотного устройства (ОПУ) вместе с электроприводом представляют собой единую замкнутую динамическую систему. Элементы металлоконструкций ОПУ обладают значительной податливостью, движущиеся части — большими моментами инерции, при этом вся механическая система находится под воздействием внешних возмущений.

Таким образом, объект управления представляет собой сложную пространственную механическую систему с большим числом элементов и значительными моментами инерции по исполнительным осям (см. таблицу), общий вид которой представлен на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Наименование параметра	Значение параметра	
	Привод азимута	Привод угла места
Статический момент трения, Н·м, не более	30	30
Момент инерции объекта $J_{об}$, кг·м ²	3250	1600
Крутильная жесткость частей ОПУ С, Н·м/рад	18 000 000	34 000 000
Коэффициент демпфирования ОПУ μ , кг·м ² ·Гц ²	19 112	87 224

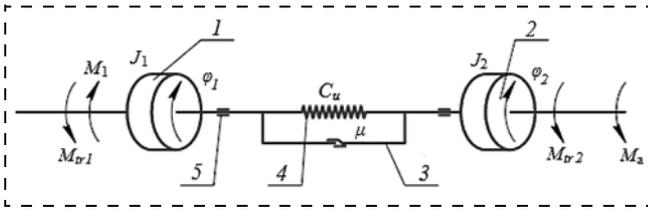


Рис. 4. Модель механической части привода наведения

Построение пространственной модели механической части ОПУ осуществляли в среде твердотельного моделирования, при этом полагали, что наиболее легкие элементы лишены массы и обладают только упругими свойствами, жесткие части конструкции считались абсолютно жесткими и наделенными только инерцией. С учетом этих допущений механические части приводов наведения исполнительных осей азимута (АЗ) и угла места (УМ) ОПУ были приведены к виду двухмассовой модели крутильных колебаний, представленной на рис. 4, где обозначено: 1 — ротор электродвигателя; 2 — исполнительный орган привода; 3 — демпфер с коэффициентом демпфирования μ ; 4 — пружина кручения с жесткостью C_u ; 5 — подшипник; J_1 — момент инерции ротора электродвигателя, включающий в себя часть момента инерции исполнительного органа привода наведения; J_2 — момент инерции исполнительного органа привода наведения за вычетом части, отнесенной к ротору электродвигателя; ϕ_1, ϕ_2 — углы поворота ротора электродвигателя и исполнительного органа; M_1 — электромагнитный момент двигателя; M_{tr1}, M_{tr2} — моменты сухого трения, приложенные соответственно к ротору электродвигателя и исполнительному органу привода наведения; M_a — момент внешнего возмущения.

Моменты сухого трения с учетом направлений, показанных на рис. 4, определяли по уравнениям:

$$\begin{aligned} M_{tr1} &= M_{tr1m} \text{sign} \dot{\phi}_1, \\ M_{tr2} &= M_{tr2m} \text{sign} \dot{\phi}_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_{tr1m} и M_{tr2m} — моменты сопротивления вращению, включающие в себя моменты трения и моменты сопротивления вращению гидро- и кабелепереходов.

Математическое описание электропривода ОПУ осуществляется во вращающейся со скоростью ω системе координат, продольная ось d которой совмещается с потокоцеплением возбуждения. Для привода осимутальной оси, собранного по структуре рис. 2, б, это описание может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} M_e &= p \frac{m}{2} C_M i_q; \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J_{дв} + J_{об}} (M_e - M_H); \\ M_e &= (J_{дв} - J_{об}) \frac{d\omega_m}{dt} + \mu(\omega_m - \omega_{ОПУ}) + c(\Theta_m - \Theta_{ОПУ}); \\ \frac{d\Theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m, \end{aligned} \quad (4)$$

где C_M — постоянная по моменту двигателя; μ — коэффициент демпфирования металлоконструкции ОПУ; c — крутильная жесткость; $J_{дв} + J_{об}$ — суммарный момент инерции ротора двигателя и объекта управления; $\omega_{ОПУ}, \Theta_{ОПУ}$ — механическая угловая скорость и угловое перемещение оси ОПУ.

Датчик положения в электроприводе устанавливается так, чтобы ток якоря двигателя был сдвинут на 90° эл. по отношению к потокоцеплению возбуждения, т.е. $i_q = I_q^*, i_d = 0$. Структурная модель электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ, составленная по уравнениям (4), представлена на рис. 5. Модель позволяет исследовать переходные режимы работы и определять динамические характеристики системы.

В модели выделены три блока: ПИ регулятор скорости, блок, в котором осуществляется преобразование системы координат и их ориентация (уравнения (2)), а также блок металлоконструкции ОПУ (уравнения (4)), в котором подсистема *Friction*, реализующая кусочно-линейный закон сил трения (уравнения (3)), имеет вид, представленный на рис. 6.

Графики переходных процессов в контуре скорости представлены на рис. 7.

Ввиду отсутствия ограничения на скорость нарастания тока (момента) двигателя можно наблюдать существенную разницу скоростей ротора двигателя и исполнительного органа в начальный момент подачи управляющего сигнала.

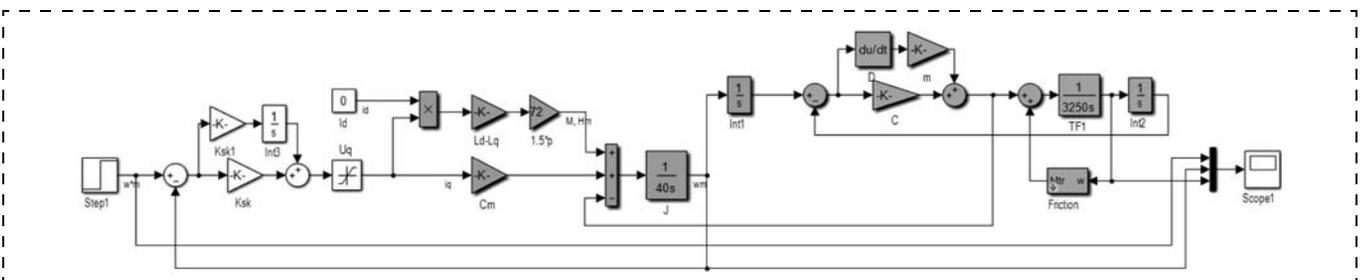


Рис. 5. Структурная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ

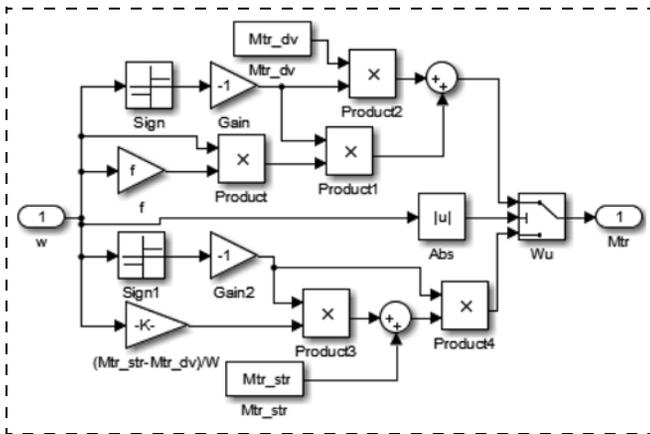


Рис. 6. Модель, реализующая кусочно-линейный закон сил трения в ОПУ

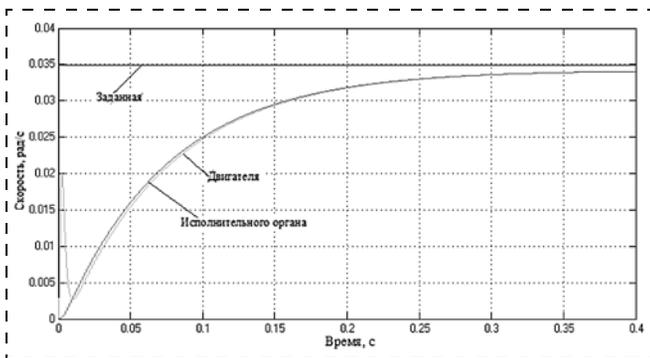


Рис. 7. Переходный процесс в контуре скорости (ступенчатое воздействие)

В структурной модели электропривода отдельно реализован только регулятор скорости. Преобразование системы координат и ее соответствующая ориентация "спрятаны" в самой модели.

Для того чтобы выделить блоки, отвечающие за вращение и ориентацию системы координат, и обеспечить в дальнейшем их программную реализацию в микропроцессоре, необходимо разработать имитационную модель.

4. Имитационная модель ВЭП ОПУ

Имитационная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ представлена на рис. 8. Основное отличие этой модели от структурной состоит в том, что в ней основные элементы системы управления (ДПР, СМ, ПК, РС, РТ, СПП, ВИП, см. рис. 2, б) представляют собой отдельные блоки. Эти блоки позволяют обеспечить их программную реализацию в микропроцессоре при модельно-ориентированном проектировании. Кроме того, имитационная модель учитывает электромагнитные процессы, протекающие в источнике питания, силовом инверторе и двигателе, при ШИМ управлении по-

следним. Это дает возможность инженеру провести исследование электромагнитных, энергетических характеристик привода, проанализировать спектральный состав токов и напряжений в каждом элементе электрической цепи и правильно подобрать необходимую элементную базу.

В подсистеме *Current Regulator* реализован релейный регулятор в контуре тока. В подсистеме *Coordinate Transformation* реализовано преобразование координат, в подсистеме *Speed Controller* реализован пропорционально-интегральный регулятор контура скорости.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что:

- при одинаковой настройке контура скорости характер переходного процесса в скоростной системе в структурной и имитационной модели совпадают. Следовательно, динамические характеристики привода можно определить по любой из представленных моделей;
- структурная модель работает значительно быстрее виртуальной, однако, учитывая производительность современных компьютеров, объем вычислений в процессе моделирования не является ограничением;
- поэтапное исследование системы, начинающееся с математического описания и заканчивающееся созданием имитационных моделей системы, является важной составляющей быстрого прототипирования систем управления.

Разработанная имитационная модель представляет собой стенд, на котором происходит отладка алгоритмов управления, исследование переходных и установившихся режимов работы, определение статических, динамических, энергетических и иных характеристик. Конечным результатом данного этапа является отработанный алгоритм управления.

Дальнейшим развитием метода быстрого прототипирования систем управления является генерация исполняемого кода для выбранного типа процесса (STMicroelectronics, Texas Instruments и др.). Предлагаемый разработчику набор программных средств дает возможность реализации алгоритма работы системы любой сложности, не требуя от

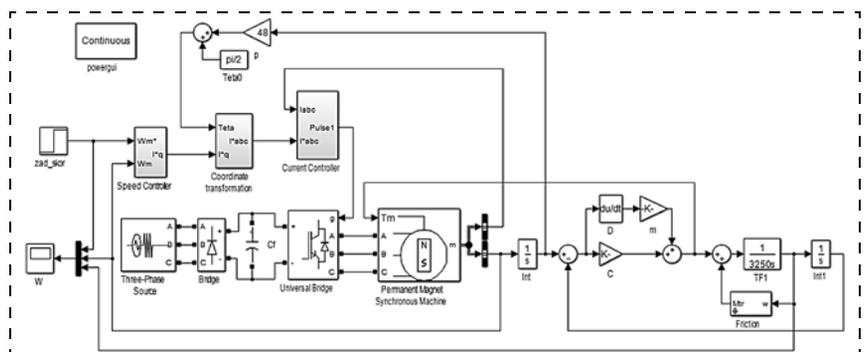


Рис. 8. Имитационная модель вентильного электропривода и металлоконструкции азимутальной оси ОПУ

инженера глубоких знаний в области программирования.

Средствами MATLAB-Simulink (Embedded Coder, Simulink Real-Time, Waijung и др.) генерируется и прошивается исполняемый код в управляющий

контроллер и проводится окончательная отладка программы управления. Преимуществом MATLAB является тот факт, что в него можно скачать и установить компиляторы для широкого спектра контроллеров. Следует учитывать тот факт, что просто генерация С кода из модели без привязки к контроллеру возможна только на 32-битной версии MATLAB, так как в 64-битной версии компилятор отсутствует.

На первом этапе MBD с помощью программы CubeMX создается образ контроллера, который используется в системе управления, проводится настройка всех используемых входов/выходов, АЦП, ЦАП, интерфейсов связи, таймеров, всего, что нужно в системе управления. На рис. 9 представлен образ контроллера STM32F103VGT6 для управления вентильным двигателем со встроенным энкодером.

В данном проекте для управления двигателем используются три АЦП для оцифровки сигналов с датчиков тока, два таймера: первый таймер используется для генерации шести ШИМ импульсов управления силовыми ключами преобразователей, второй таймер используется для обработки сигналов, поступающих от энкодера и USART2 для приема заданной скорости.

Во вкладке меню Project/Settings выбирается среда, для которой будет генерироваться проект, а также прописываются все пути к папке проекта (рис. 10).

На втором этапе модельно-ориентированного проектирования перестраивается модель системы управления (см. рис. 8) с помощью элементов библиотек *Simulink* и элементов Target Support Package — STM32 Adapter. Модель системы управления приводом представлена на рис. 11. На следующем этапе выполняется настройка компилятора (вкладка Code Generation окна Configuration Parameters).

Если в модели нет ошибок, то после успешной компиляции программа автоматически подключит все необходимые библиотеки и сгенерирует проект под выбранную среду разработки (в частности Keil).

При удачной компиляции программа сгенерирует исполняемый HEX файл, который можно загрузить в контроллер либо средствами Keil, либо

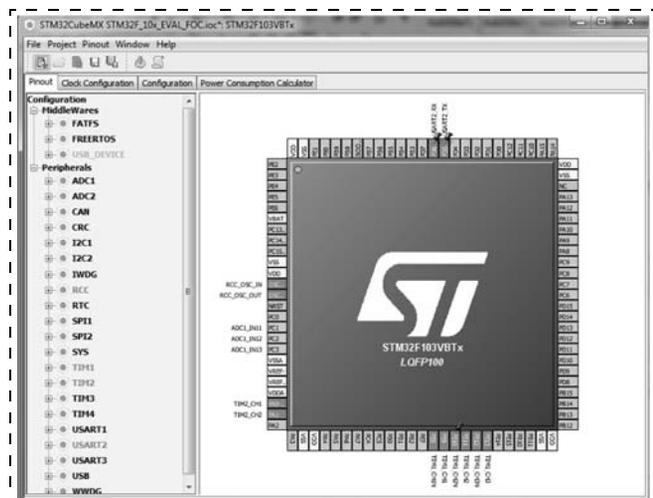


Рис. 9. Окно программы CubeMX с образом контроллера

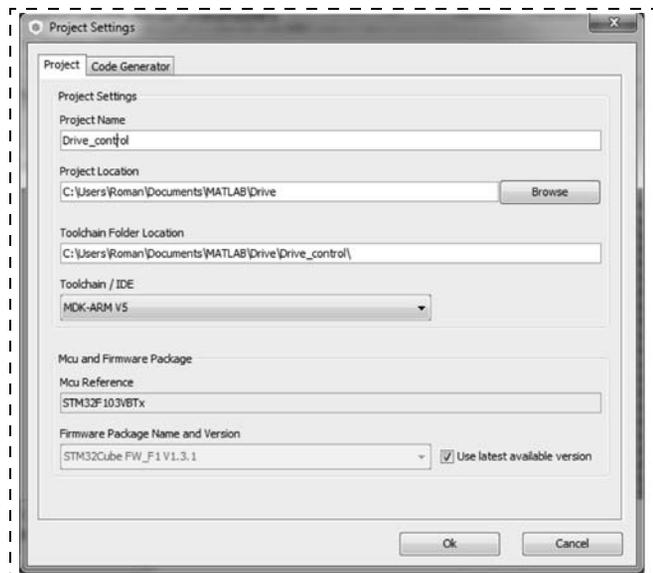


Рис. 10. Установка параметров проекта

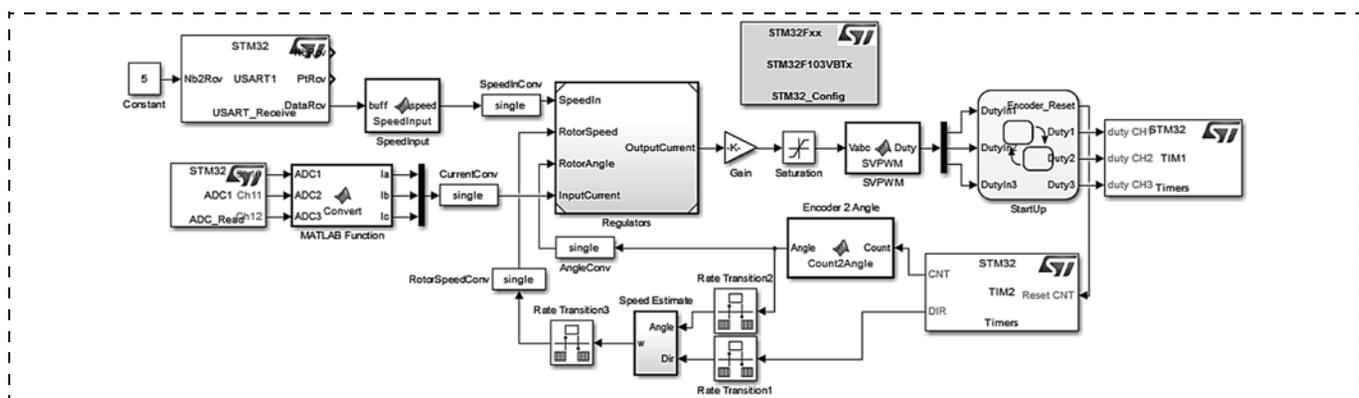


Рис. 11. Модель системы управления

с помощью программатора посредством утилиты STM32 ST-LINK. Таким образом, изложенный выше алгоритм коротко описывает процесс разработки системы управления с генерацией исполняемого кода для любого типа контроллера STM32.

Список литературы

1. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
2. Герман-Галкин С. Г., Гаврилов Р. С. Энергетические свойства моментного электропривода пространственной стабилизации опорно-поворотного устройства // Матер. Междунар. конф. "Экстремальная мехатроника и робототехника". Дзубга, 2009.

3. Диллабер Э., Кендрик Л., Джин В. Практические стратегии для перехода на модельно-ориентированное проектирование встроенных приложений // Компоненты и технологии. 2011. № 10.

4. Ефремов А. А., Зенков С. М. Модельно-ориентированное проектирование для решения задач автоматизации // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. "Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях". Москва, 4–8 апреля 2011 г.

5. Бартев В., Бартев А. Модельно-ориентированное проектирование генератора случайных чисел // Современная электроника. 2014. № 2.

6. URL: <http://microtechnics.ru>

Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device

S. G. German-Galkin, gsg@yandex.ru, R. S. Gavrilo, roman_gavrilo85@mail.ru,
Yu. N. Mustafayev, mustafaev-spb@mail.ru

Corresponding author: German-Galkin Sergei G., D. Sc., Prof., National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), 197101, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: gsg@yandex.ru

Received on May 05, 2016

Accepted on May 22, 2016

The article is devoted to the problems of development of the modern systems for control of the electric valve actuator of the rotary support device (RSD). It examines the tasks of modeling of real physical objects, including designing of the control systems, testing and development of the working prototypes. The most effective solution to the set tasks is the ModelBased Design — MBD. This method integrates into a single working process different stages of designing of the system, such as formulation of the technical requirements, modeling, development of the system, its debugging and testing. The most convenient instrument for realization of the model-oriented designing of the control system is MATLAB-Simulink environment. In this work on the example of two-coordinate RSD for the electric valve actuator of the azimuthal axis the first stages of MBD are considered in detail:

— Development of the structural models based on a mathematical description and using the structural blocks of Simulink package and its Blocksets;

— Development of the simulation models, using the masked blocks of SimScape package;

— Development of the executable code by means of MATLAB-Simulink for controllers of STM32F103 series.

Kits of program resources — MATLAB-Simulink, CubeMX, and Keil, the set of library modules — Target Support Package — STM32 Adapter, etc., offered to the developer, provide an opportunity for realization of the algorithm for operation of the systems of any complexity, which do not require engineers' deep knowledge in the area of programming. On the example of the developed system for control of the electric valve actuator of the azimuthal axis of RSD the algorithm for development of the executable code was presented, consisting of the following steps:

— Initialization of the controller (indication of the peripheral modules involved in the control system with their tuning) in CubeMX program;

— Programming of the algorithm for operation of the controller in MATLAB-Simulink environment with the use of different library modules, including the embedded and the pluggable ones;

— Generation of the executable code with its subsequent recording in the microcontroller.

Keywords: structural model, simulation model, MATLAB-Simulink, electric drive, model-oriented design, code generation

For citation:

German-Galkin S. G., Gavrilo R. S., Mustafayev Yu. N. Structural and Simulation Models in the Model-oriented Designing of the Electric Valve Actuator for a Rotary Support Device, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 56–63.

DOI: 10.17587/mau.18.56-63

References

1. Bulgakov A. A. *Novaya teoriya upravlyaemh vipryamateley* (The New theory of the guided rectifiers), Moscow, Nauka, 1970 (in Russian).

2. German-Galkin S. G., Gavrilo R. S. *Energeticheskie svoystva momentnogo elektroprivoda prostranstvennoy stabilizatsii oporno-povrotnogo ustroystva* (Power properties of the torque electric drive of the spatial stabilizing of supporting turning device), *Materials of the International conference "Extreme mechatronics and robotics"*, Dzhubga, 2009, pp. 215–219 (in Russian).

3. Dillaber E., Kendrick L., Jean V. *Prakticheskie strategii dlya perehoda na model'no-orientirovannoe proektirovanie vstroennih prilozheniy* (Practical strategies for passing to the model-oriented planning of built-in applications), *Componenty i Tehnologii*, 2011, no. 10 (in Russian).

4. Efremov A. A., Zenkov S. M. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie dlya resheniya zadach avtomatizatsii* (Model-Based Design for automation solutions) *Abstracts of the International scientific-practical conference "The advanced information technology, tools and automation systems and their implementation at Russian enterprises"*, Moscow, 2011, (in Russian).

5. Bartenev V., Bartenev A. *Model'no-orientirovannoe proektirovanie generatora sluchainykh chisel* (Model-Based Design of random number generator), *Sovremennaya Electronica*, 2014, no. 2 (in Russian).

6. Available at: <http://microtechnics.ru>