

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Е. ВЫСОЦКИЙ, д-р техн. наук, С.М. ВОРОНИН, канд. техн. наук, Р.Г. ГОРШКОВ, асп.

Рассмотрены вопросы математического моделирования и исследования электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя, а также элементы динамического синтеза регуляторов электропривода в составе электромеханической системы.

Ключевые слова: вентильный двигатель, математическая модель, структурная схема, угол коммутации.

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL PROCESSES OF THYRATRON MOTOR

V.E. VYSOTSKY, Doctor of Engineering, S.M. VORONIN, Candidate of Engineering, R.G. GORSHKOV, Post Graduate Student

The authors consider the questions of mathematical simulation of electromagnetic and electromechanical processes researches of a thyatron motor. The article also describes the elements of dynamic synthesis of electric drive regulators with the electromechanical system.

Keywords: thyatron motor, mathematical model, block diagram, commutating angle.

Несмотря на промышленное освоение, многие вопросы моделирования и проектирования вентильных двигателей, а также электроприводов на их основе остаются малоизученными и требуют дополнительного анализа. Затруднения объясняются разнообразием схемных решений и отсутствием обобщенного инженерного метода расчета [2].

При имитационном моделировании динамических режимов вентильного двигателя были использованы следующие дифференциальные уравнения [1]:

- уравнения электрического равновесия для каждой фазы

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2}L \frac{dI_1}{dt} + I_1R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_{01}\Phi w_1\Omega \sin \vartheta = \\ & = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u); \\ & \frac{3}{2}L \frac{dI_2}{dt} + I_2R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_{01}\Phi w_1\Omega \sin\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) = \\ & = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin\left(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u - \frac{2}{3}\pi\right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2}L \frac{dI_3}{dt} + I_3R + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 pk_{01}\Phi w_1\Omega \sin\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) = \\ & = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_u \sin\left(\vartheta + \beta_0 \text{sign} U_u + \frac{2}{3}\pi\right); \end{aligned}$$

- уравнение электромагнитного момента

$$M = pk_{01}\Phi w_1 \left(I_1 \sin \vartheta + I_2 \sin\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) + I_3 \sin\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) \right); \quad (2)$$

- уравнение движения

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M + M_H; \quad (3)$$

- выражение для угла поворота в эл. радианах

$$\vartheta = \vartheta_0 + p \int_0^t \Omega dt, \quad (4)$$

где L – эквивалентная индуктивность фазы; I_1, I_2, I_3 – фазные токи; R – активное сопротивление фазы; p – число пар полюсов; k_{01} – коэффициент, учитывающий влияние взаимоиндукции соседних фаз; Φ – поток в зазоре на пару полюсов; w_1 – число витков фазы; Ω – частота вращения ротора; ϑ – угол поворота ротора; U_u – напряжение источника постоянного тока; β_0 – угол опережения коммутации; M – электромагнитный момент; M_H – момент нагрузки; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя; ϑ_0 – начальный угол поворота.

Моделирование проводилось в приложении Simulink программного пакета MatLab [3].

Силовой канал питания двигателя (рис. 1) состоит из следующих элементов: источника напряжения, неуправляемого выпрямителя, LC-фильтра, инвертора напряжения, блока измерения электрических величин. Коэффициент мощности измеряется с помощью блока измерения активной и реактивной мощностей.

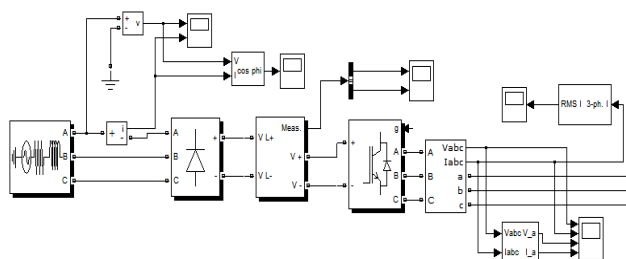


Рис. 1. Схема силового канала вентильного электропривода

Инвертор напряжения управляется широтно-импульсным модулятором (ШИМ) (рис. 2).

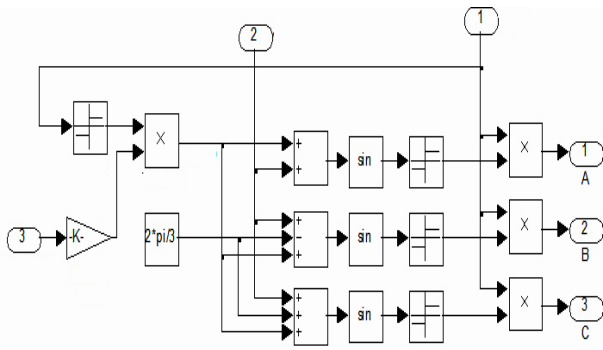


Рис. 2. Схема широтно-импульсного модулятора (подсистема PWM Generator controller)

Впоследствии произведено разделение полученной системы на электрическую и механическую части, в качестве выхода использован сигнал с вала двигателя. Это позволяет передавать сигнал как скорости, так и момента, используя один выходной порт, а также менять параметры механической нагрузки (момент нагрузки и момент инерции объекта управления) без изменения данных, относящихся к подсистеме двигателя. Общая схема вентильного двигателя представлена на рис. 3. Входами модели являются клеммы обмоток, величина начального угла поворота ротора, выходами – угол поворота ротора, частота вращения, электромагнитный момент, вал двигателя.

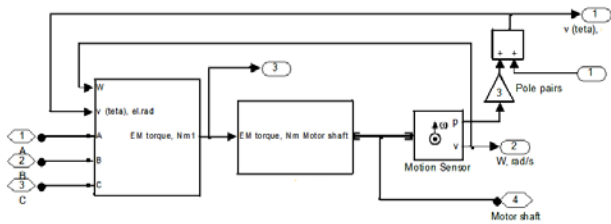


Рис. 3. Общая схема вентильного двигателя (подсистема PMSM)

Входами электрической части двигателя (рис. 4) являются: клеммы статорных обмоток двигателя, порт сигнала частоты вращения ротора, порт сигнала угла поворота ротора. Выходом электрической части является порт сигнала электромагнитного момента. Возникающая при работе двигателя противоЭДС задается при помощи управляемых источников напряжения.

Сигналы на источники напряжения подаются с блоков математических операций, соединения которых соответствует частям системы уравнений (1), описывающих возникающие противоЭДС. Токвые сигналы для расчета электромагнитного момента поступают с датчиков тока, установленных в цепях обмоток двигателя.

Входом механической части двигателя является порт сигнала электромагнитного момента с электрической части двигателя, выходом – порт, соответствующий моменту на валу двигателя. К валу двигателя подключен датчик угла

поворота ротора в геометрических радианах и частоты вращения. Текущий угол поворота суммируется с начальным углом поворота, заданным константой.

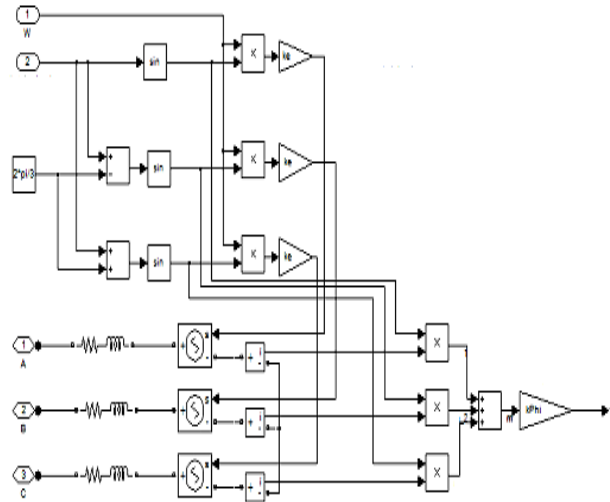


Рис. 4. Схема электрической части двигателя

Система управления содержит элементы, формирующие контур управления скоростью. В системе управления осуществляется управление напряжением и углом опережения коммутации. Угол опережения коммутации задается при помощи блока ступенчатого воздействия. Далее сигнал угла опережения коммутации поступает на подсистему Control System.

Для стабилизации скорости применен комбинированный регулятор на основе нечеткой логики. Регулятор состоит из параллельно соединенных П-регулятора и фаззи-регулятора. П-регулятор служит для создания основного управляющего сигнала ШИМ. Для согласования величин выходных сигналов П- и фаззи-регуляторов на выходе П-регулятора установлен блок ограничения с нижним и верхним пределами соответственно 0,2 и 0,6 (значения были определены в процессе корректировки модели).

Высокие динамические показатели электромеханической системы в составе привода на основе преобразователя частоты могут быть достигнуты на основе принципов подчиненного регулирования выходных координат [2]. Причем система управления может быть реализована как на аналоговой, так и на цифровой элементной базе.

Передаточные функции элементов электромеханической системы определяются согласно уравнениям (1)–(3), для расчета регуляторов используются положения динамического синтеза систем подчиненного регулирования.

Структурная схема имитационной модели, представлена на рис. 5 [4], где k_n – коэффициент передачи силового преобразователя; k_d – коэффициент передачи двигателя; $k_{o.c.}$ – коэффициент обратной связи по скорости; $k_{o.t.}$ – коэффициент обратной связи по току; R – сопротивление обмотки статора; T_s – электромагнитная постоянная

времени; T_n – постоянная времени силового преобразователя; T_m – электромеханическая постоянная времени; J – приведенный к валу двигателя момент инерции, определяемый по выражению $J = J_\delta + J_H$.

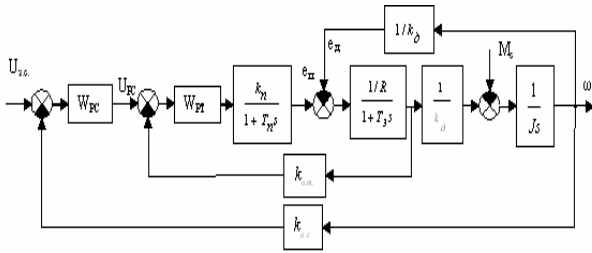


Рис. 5. Структурная схема электропривода

Настройка контура тока осуществляется на технический оптимум. Передаточная функция разомкнутого контура тока определяется соотношением

$$W_{0к.т.}(s) = W_{PT}(s) \frac{k_m T_m s}{(T_n s + 1)(T_m T_\delta s^2 + T_m s + 1)},$$

где $k_m = \frac{k_n k_{o.m.}}{R}$, $T_m = k_\delta^2 R J$.

Пренебрегая обратной связью по ЭДС, передаточная функция разомкнутого контура тока принимает вид

$$W_{0к.т.}(s) = W_{PT}(s) \frac{k_m T_m s}{(T_n s + 1)(T_\delta s + 1)}.$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура тока определяется как

$$W_{0онм}(s) = \frac{1}{2T_n s (T_n s + 1)}.$$

Передаточная функция регулятора тока имеет вид

$$W_{PT}(s) = \frac{T_\delta s + 1}{2T_n k_m s}.$$

Настройка контура скорости осуществляется на технический оптимум. Передаточная функция разомкнутого контура скорости определяется по формуле

$$W_{0к.с.}(s) = W_{PC}(s) \frac{1/k_{o.m.}}{D_T(s)} \cdot \frac{k_{o.c.}}{k_\delta J s},$$

где $D_T(s) = 2T_n s (T_n s + 1) + 1$.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура скорости имеет вид

$$W_{0онм.с.}(s) = \frac{1}{4T_n s D_T(s)}.$$

Передаточная функция регулятора скорости рассчитывается как

$$W_{PC}(s) = \frac{1}{4T_n s D_T(s)} \cdot \frac{D_T(s)}{1/k_{o.m.}} \cdot \frac{k_\delta J s}{k_{o.c.}} = \frac{k_{o.m.} J k_\delta}{4T_n k_{o.c.}} = k_{PC}.$$

В целях моделирования разгона привода до заданной скорости и удержания ее в установившемся режиме с данными параметрами системы необходимо изменение угла опережения коммутации β_0 . Расчетным путем определено значение $\beta_0 = 40^\circ$ для разгона и $\beta_0 = 8^\circ$ для установившегося режима. Такое изменение угла коммутации позволяет увеличить момент на высоких скоростях, а также снизить ток двигателя в установившемся режиме.

Анализ графиков математически рассчитанных переходных процессов (рис. 6) показывает, что скорость достигает заданного значения, а электромагнитный момент становится равным моменту нагрузки на валу двигателя.

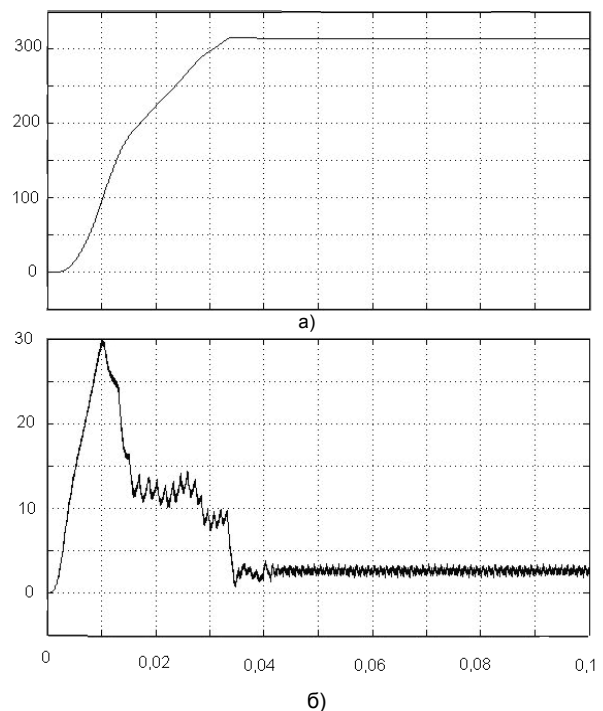


Рис. 6. Рассчитанные по математической модели переходные процессы изменения: а – скорости; б – момента

Результаты моделирования оценивались при работе экспериментальной установки на базе синхронного сервопривода фирмы SEW-EURODRIVE. Анализ переходных характеристик скорости и момента изготовленного экспериментального стенда (рис. 7) позволяет сделать вывод об адекватности математической модели.

Комбинированный регулятор скорости был реализован на базе фаззи-контроллера, подключенного к управляемому преобразователю через интерфейс RS-485.

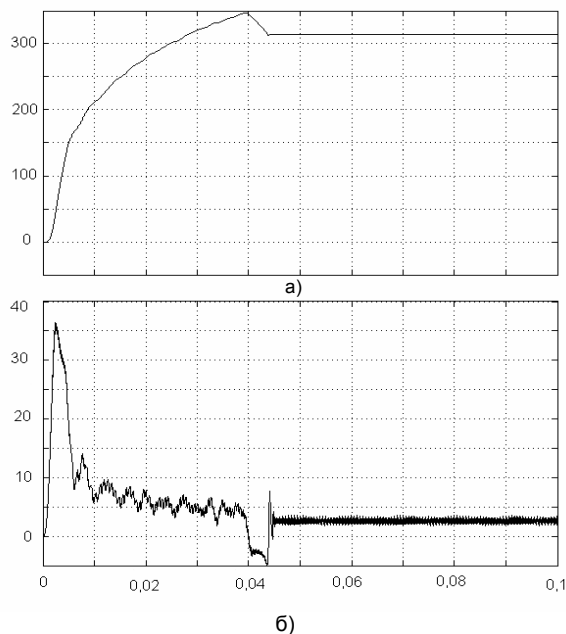


Рис. 7. Переходные процессы изменения скорости (а) и момента (б), определенные на экспериментальном стенде

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет осуществлять имита-

ционное моделирование вентильного электродвигателя и адекватно рассчитывать электромагнитные и электромеханические характеристики системы с вентильными электродвигателями в статических и динамических режимах работы. Расхождения расчетных скорости и момента с экспериментальными данными соответствуют погрешности 5–7 %, общепринятой для инженерных расчетов.

Список литературы

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): Курс лекций. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006.
2. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. – СПб.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1994.

Высоцкий Виталий Евгеньевич,
Самарский государственный технический университет,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники,
e-mail: vitalyvysotsky@mail.ru

Воронин Станислав Михайлович,
филиала Самарского государственного технического университета (г. Сызрань),
кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и промышленной автоматизации,
телефон: 8-960-814-39-48.

Горшков Роман Геннадьевич,
филиала Самарского государственного технического университета (г. Сызрань),
старший преподаватель кафедры электромеханики и промышленной автоматизации, аспирант,
e-mail: roman0806@mail.ru