

СЕКЦИЯ 1.
СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

DOI: 10.58168/AIARMTOES2025_7-12

УДК 681.5(075)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА
В ПРОГРАММЕ SIMINTECH
MATHEMATICAL MODEL OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM
OF A DC ELECTRIC MOTOR IN THE SIMINTECH PROGRAM

Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор

Аксенов И.И., к.т.н. доцент

Еремин М.Ю., к.т.н. доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет

имени императора Петра I»

г. Воронеж, Россия

dmafonichev@yandex.ru

Afonichev D.N., Doctor of Technical Sciences, Professor

Aksenov I.I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Eremin M.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University

named after Emperor Peter the Great»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Представлена математическая модель системы автоматического управления электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения в программе SimInTech. Модель включает систему дифференциальных уравнений рабочего процесса электродвигателя и блок пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, вырабатывающего управляющий сигнал. Модель может быть использована для исследования режимов работы электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения без регулятора и с регулятором угловой скорости.

Summary: A mathematical model of an automatic control system for a DC electric motor of independent excitation in the SimInTech program is presented. The model includes a system of differential equations for the operating process of an electric motor and a proportional-integral-differential regulator unit that generates a control signal. The model can be used to study the operating modes of a DC electric motor of independent excitation without a regulator and with an angular velocity regulator.

Ключевые слова: электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, угловая скорость, момент, ток якоря, управление, регулятор, математическая модель.

Keywords: electric motor of direct current of independent excitation, angular velocity, moment, armature current, control, regulator, mathematical model.

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения используются для привода различных устройств и являются самыми массовыми электрическими машинами постоянного тока [1]. Поэтому разработка адекватных математических моделей систем автоматического управления такими электроприводами является актуальной задачей. Для построения математической модели системы автоматического регулирования угловой скорости ротора электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения в программе SimInTech запишем физические законы, определяющие рабочий процесс такого электродвигателя.

Второй закон Кирхгофа для силовой цепи якоря имеет вид [1, 2]

$$U = E + U_L + U_R, \quad (1)$$

где U – напряжение источника питания цепи якоря, В; E – электродвижущая сила (ЭДС) обмотки якоря, В; U_L – падение напряжения на индуктивности обмотки якоря, В; U_R – падение напряжения на активном сопротивлении цепи якоря, В.

$$E = CF\omega; U_L = L \frac{dI}{dt}; U_R = RI = (R_{\text{я}} + R_{\text{х}})I, \quad (2)$$

где C – конструктивный коэффициент; F – магнитный поток, Вб; ω – угловая скорость вращения вала (ротора) двигателя, с^{-1} ; L – индуктивность обмотки якоря, Гн; I – ток в цепи якоря, А; t – время, с; R – активное сопротивление цепи якоря, Ом; $R_{\text{я}}$ – внутренне сопротивление цепи якоря, Ом; $R_{\text{х}}$ – внешнее сопротивление цепи якоря, Ом.

С учетом зависимостей (2) уравнение (1) примет вид

$$U = CF\omega + L \frac{dI}{dt} + (R_{\text{я}} + R_{\text{х}})I. \quad (3)$$

Магнитный поток F является функцией тока обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$ [1].

Ток в цепи якоря I и магнитный поток F создают электромагнитный момент двигателя $M = CFI$, который приводит во вращение ротор (якорь) двигателя и устройства, соединенные с ним. Второй закон Ньютона применительно к ротору электродвигателя имеет вид [1, 2]

$$M - M_{\text{с}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4)$$

где $M_{\text{с}}$ – момент сопротивления, Н·м; J – момент инерции ротора электродвигателя и соединенных с ним вращающихся и поступательно движущихся масс, кг·м².

Управление электродвигателем заключается в создании воздействий на него, обеспечивающих требуемое значение угловой скорости вращения ротора ω [2, 3]. Согласно уравнениям (3) и (4) возможны следующие воздействия на электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, обеспечивающие изменение угловой скорости вращения якоря (ротора) ω .

1. Изменение напряжения питания обмотки возбуждения $U_{\text{в}}$, вызывающее изменение магнитного потока F .

2. Изменение тока обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$ посредством изменения внешнего сопротивления цепи обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$, что также вызывает изменение магнитного потока F .

3. Изменение напряжения питания якоря U .

4. Изменение тока в цепи якоря I посредством изменения внешнего сопротивления цепи якоря $R_{\text{х}}$.

5. Изменение момента сопротивления $M_{\text{с}}$. Момент сопротивления также изменяется в результате действия различных случайных факторов.

6. Приложение к валу двигателя крутящего $M_{\text{к}}$ или тормозного $M_{\text{т}}$ момента.

Для моделирования электродвигателя в программе SimInTech будем использовать уравнения (3) и (4), которые запишем в виде

$$L \frac{dI}{dt} = U - CF\omega - (R_{\text{я}} + R_{\text{х}})I; J \frac{d\omega}{dt} = CFI - M_{\text{с}}. \quad (5)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (5) – угловая скорость вращения якоря ω в виде функции времени t .

Напряжение питания цепи якоря U определяется по формуле

$$U = Ku, \quad (6)$$

где K – коэффициент усиления преобразователя, например, управляемого выпрямителя; u – управляющий сигнал, вырабатываемый регулятором, В.

$$u = U_{\text{ПМ}} + k_1(U_{\text{ПМ}} - c\omega) + k_2 \int (U_{\text{ПМ}} - c\omega) dt + k_3 \frac{d(U_{\text{ПМ}} - c\omega)}{dt}, \quad (7)$$

где $U_{\text{ПМ}}$ – сигнал потенциометра (задающее воздействие), В; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; c – коэффициент усиления тахогенератора.

Сигнал потенциометра $U_{\text{ПМ}}$ связан с заданным значением угловой скорости вращения якоря ω_3

$$U_{\text{ПМ}} = c\omega_3. \quad (8)$$

Математическая модель системы автоматического регулирования (САР) угловой скорости электродвигателя постоянного тока в программе SimInTech [4, 5, 6] показана на рисунке 1. Данная модель включает модель электродвигателя и элементы САР: тахогенератор – усилитель с коэффициентом 0,02665; потенциометр – ступенька; исполнительное устройство – усилитель с коэффициентом 13,75; регулятор включает сравнивающее устройство, параллельно расположенные усилитель, интегратор, усилитель с производной. Момент сопротивления задается ступенчатой функцией.

Модель (рисунок 1) может быть использована для исследования режимов работы электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения без регулятора, когда $k_1 = 0, k_2 = 0, k_3 = 0$; с пропорциональным регулятором при $k_2 = 0, k_3 = 0$; с интегральным регулятором при $k_1 = 0, k_3 = 0$; с пропорционально-интегральным регулятором при $k_3 = 0$; с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором при $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0$. Результаты моделирования выводятся в виде графиков зависимости угловой скорости вращения якоря ω и тока якоря I от времени t (рисунок 2).

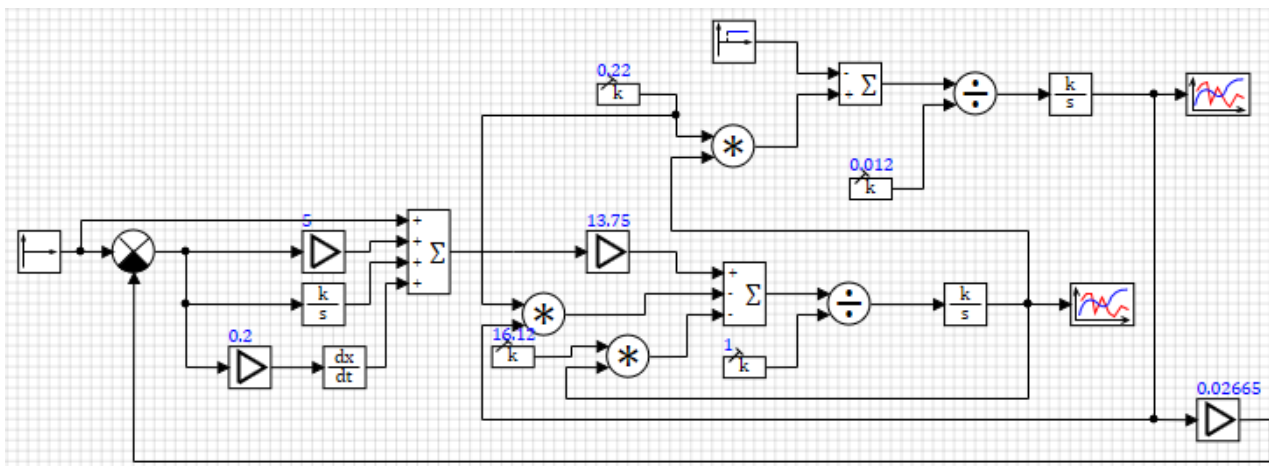


Рисунок 1 – Математическая модель САР угловой скорости электродвигателя постоянного тока в программе SimInTech

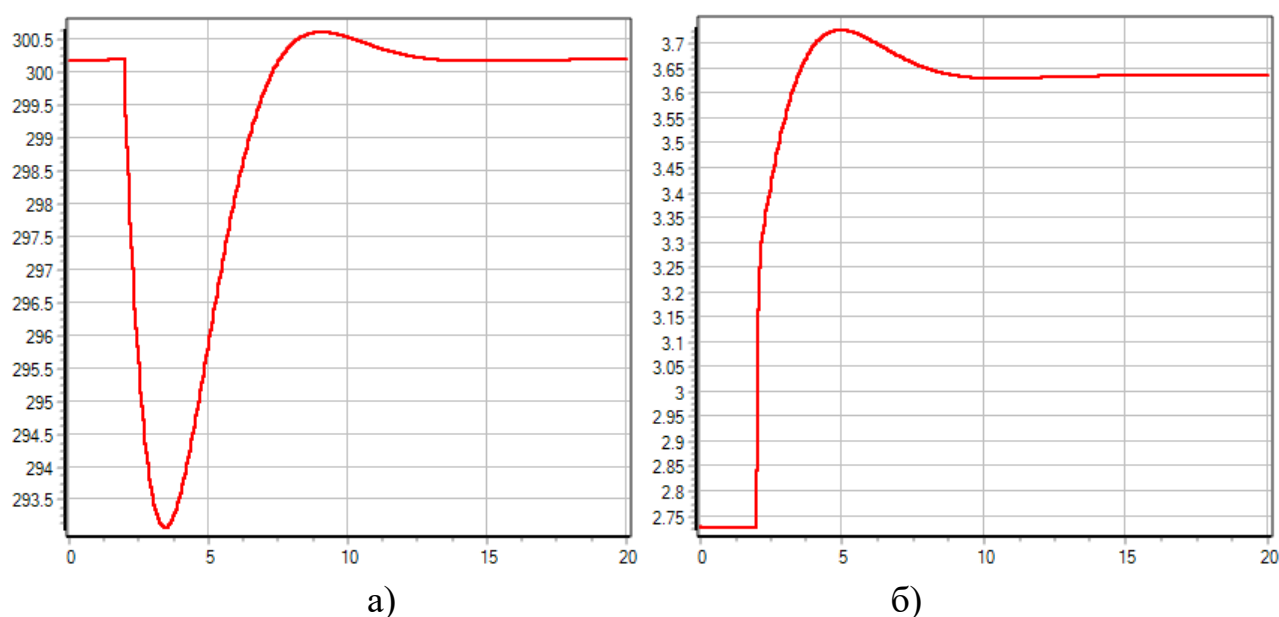


Рисунок 2 – Графики зависимости угловой скорости ω (а) и тока якоря I (б) электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения от времени t при повышении момента сопротивления на 33,3 % (ПИД-регулятор, $k_1 = 3$, $k_2 = 2$, $k_3 = 2$)

Список литературы

1. Кабдин, Н.Е. Электропривод / Н.Е. Кабдин, В.Ф. Сторчевой. – М.: МЭСХ, 2021. – 286 с.
2. Автоматика / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, М.Ю. Еремин [и др.] – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – 241 с. – URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b178137.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).
3. Поляков, С.И. Автоматика и автоматизация производственных процессов / С.И. Поляков. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», 2008. – 372 с.

4. Афони́чев, Д.Н. Компьютерные технологии в научных исследованиях / Д.Н. Афони́чев, В.В. Васи́льев, М.Ю. Еремин. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. – 83 с. – URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b176235.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).

5. Афони́чев Д.Н. Особенности моделирования электрических машин в программе SIMINTECH / Д.Н. Афони́чев, С.Н. Пи́ляев // Моделирование информационных систем: материалы международной научно-практической конференции; Воронеж, 19-20 мая 2021 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», 2021. – С. 340–345. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2021/modelirovanie-informacionnyh-sistem/> (дата обращения: 20.03.2025).

6. Среда динамического моделирования SimInTech. – URL: <http://simintech.ru> (дата обращения: 20.03.2025).

References

1. Kabdin, N.E. Electric drive / N.E. Kabdin, V.F. Storchevoy. – M.: MESKH, 2021. – 286 p.

2. Automation / D.N. Afonichev, S.N. Pilyaev, M.Yu. Eremin [et al.] – Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2025. – 241 p. – URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b178137.pdf> (date of reference: 03/20/2025).

3. Polyakov, S.I. Automation and automation of production processes / S.I. Polyakov. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering Academy, 2008. – 372 p.

4. Afonichev, D.N. Computer technologies in scientific research / D.N. Afonichev, V.V. Vasiliev, M.Yu. Eremin. – Voronezh: Voronezh State Pedagogical University, 2024. – 83 p. – URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b176235.pdf> (date of request: 03/20/2025).

5. Afonichev D.N. Features of modeling electric machines in the SIMINTECH program / D.N. Afonichev, S.N. Pilyaev // Modeling of information systems: proceedings of the International scientific and practical conference; Voronezh, May 19-20, 2021. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – Pp. 340-345. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2021/modelirovanie-informacionnyh-sistem/> / (date of access: 03/20/2025).

6. SimInTech dynamic modeling environment. – URL: <http://simintech.ru> (date of request: 03/20/2025).