

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГЛАВНОГО ПРИВОДА
СТАНА ГОРЯЧЕГО ПРОКАТА 2800**

Стариков Александр Владимирович,

доктор технических наук, доцент,

Самарский государственный технический университет,

г. Самара

Кирдяшев Виктор Александрович

аспирант,

Самарский государственный технический университет,

г. Самара

Козырев Василий Иванович,

магистрант,

Самарский государственный технический университет, г. Самара

**MATHEMATICAL MODELING OF THE SYNCHRONOUS MAIN DRIVE MOTOR OF THE HOT-ROLLED
MILL 2800**

Starikov Alexander Vladimirovich,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Samara State Technical University,

Samara

Kirdyashev Viktor Alexandrovich

graduate student,

Samara State Technical University,

Samara

Kozyrev Vasily Ivanovich,

master student,

Samara State Technical University,

Samara

Аннотация. В данной статье рассматривается расчет параметров математической модели и динамических характеристик синхронного двигателя для главного привода стана горячего проката 2800.

Abstract. This article discusses the calculation of the parameters of the mathematical model and the dynamic characteristics of a synchronous motor for the main drive of a hot-rolled mill 2800.

Ключевые слова: математическое моделирование, синхронный двигатель главного привода стана горячего проката, расчет параметров

Keywords: mathematical modeling, synchronous motor of the main drive of the hot-rolled mill, calculation of parameters

В настоящий момент на непрерывной группе стана горячего проката 2800 в качестве главного привода используются двигатели постоянного тока. В конструкции таких двигателей применяют подшипники скольжения с комбинированной (кольцевой и принудительной проточной) системой смазки. Вентиляция двигателей постоянного тока большой мощности принудительная, осуществляется по замкнутому циклу. Самым главным недостатком двигателей постоянного тока является ограниченный срок службы щеточно-коллекторного механизма из-за наличия скользящего контакта между щетками и коллектором. Поэтому общая мировая тенденция заключается в замене двигателей постоянного тока на двигатели переменного тока.

В то же время требования к точности поддержания заданной скорости прокатного стана очень высоки. Поэтому при замене на двигатель переменного тока, например, синхронный необходимо знать его математическую модель и динамические характеристики, позволяющие в дальнейшем синтезировать систему стабилизации скорости с большим диапазоном регулирования.

Целью работы является расчет параметров математической модели и динамических характеристик синхронного двигателя для главного привода стана горячего проката 2800.

Рассмотрим математическую модель синхронного двигателя с обмоткой возбуждения на роторе. При этом будем считать, что управление скоростью осуществляется изменением амплитуды напряжения при коммутации статорных обмоток по датчику положения ротора (режим вентильного двигателя или бесколлекторного двигателя

постоянного тока). Тогда уравнения движения синхронного двигателя в системе координат $0dq$, вращающейся вместе с ротором, можно записать следующим образом [1 – 5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1d}}{dt} &= U_{1d} - \frac{R_1 L_B}{\Delta} \psi_{1d} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{Bd} + \omega_0 \psi_{1q}; \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= U_{1q} - \frac{R_1 L_B}{\Delta} \psi_{1q} + \frac{R_1 L_0}{\Delta} \psi_{Bq} - \omega_0 \psi_{1d}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} &= U_B - \frac{R_B L_1}{\Delta} \psi_B + \frac{R_B L_0}{\Delta} \psi_{1d}; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m_1 Z_n}{2} \text{Im}\{\bar{\psi}_1^* \bar{I}_1\} - M_c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R_1 и R_B – активные сопротивления обмотки статора и обмотки возбуждения; U_1 и U_B – напряжения статора (фазное) и обмотки возбуждения, соответственно; L_1 и L_B – собственные индуктивности эквивалентной обмотки статора и обмотки возбуждения; L_0 – взаимная индуктивность; ψ_{1d} и ψ_{1q} – проекции потокосцепления на соответствующие оси; ψ_B – потокосцепление, создаваемое обмоткой возбуждения; $\Delta = L_1 L_B - L_0^2$; $\bar{\psi}_1^*$ – сопряженный вектор потокосцепления статора; \bar{I}_1 – вектор тока статора; J – приведенный к валу электродвигателя момент инерции; M_c – момент сил сопротивления; m_1 и Z_n – числа фаз и пар полюсов статора двигателя; ω_0 и ω – скорости вращения магнитного поля и ротора, соответственно.

В режиме вентильного двигателя или бесколлекторного двигателя постоянного тока в синхронной машине за счет датчика положения ротора поддерживается между потокосцеплениями статора и ротора угол 90 электрических градусов и управление производится изменением напряжения, поэтому можно считать, что $L_0 = 0$; $U_{1d} = 0$; $\omega_0 = Z_n \omega$. Тогда система уравнений (1) значительно упростится

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{1d}}{dt} &= -\frac{R_1}{L_1} \psi_{1d} + Z_n \omega \psi_{1q}; \\ \frac{d\psi_{1q}}{dt} &= U_{1q} - \frac{R_1}{L_1} \psi_{1q} - Z_n \omega \psi_{1d}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} &= U_B - \frac{R_B}{L_B} \psi_B; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m_1 Z_n \psi_B}{2L_1} \psi_{1q} - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Переходя в (2) к операторной форме записи, после несложных преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} 0 &= (T_1 p + 1) \psi_{1d} - T_1 Z_n \omega \psi_{1q}; \\ T_1 U_{1q} &= (T_1 p + 1) \psi_{1q} + T_1 Z_n \omega \psi_{1d}; \\ T_B U_B &= (T_B p + 1) \psi_B; \\ J p \omega &= \frac{m_1 Z_n \psi_B \psi_{1q}}{2L_1} - M_c, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ и $T_B = \frac{L_B}{R_B}$ – электромагнитные постоянные времени обмоток статора и ротора; p – оператор дифференцирования.

Система уравнений (3) позволяет построить нелинейную структурную схему синхронной машины, работающей в режиме вентильного двигателя (рис. 1). Нелинейность математической модели синхронного двигателя связана с наличием трех множительных звеньев. Она может быть использована для компьютерного моделирования, например, в программной среде Matlab Simulink. Но для этого необходимо знать такие параметры синхронного двигателя, как T_1 , T_B и L_1 . Как правило, такие данные не приводятся в каталогах на электродвигатели.

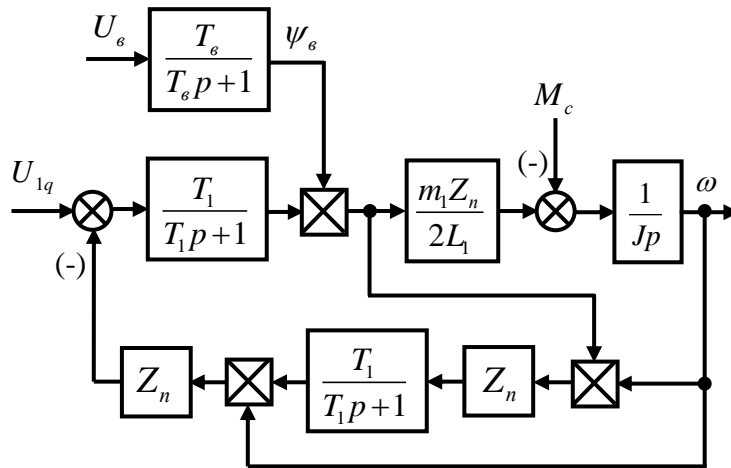


Рис.1. Нелинейная структурная схема синхронной машины, работающей в режиме вентильного двигателя

Рассмотрим синхронный двигатель DMMYZ2236, который выбран для замены двигателя постоянного тока в главном приводе стана горячего проката 2800. Он имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 5000$ кВт; $U_{1\text{ном}} = 3100$ В; $U_{\text{в,ном}} = 120$ В; $I_{1\text{ном}} = 958$ А; $I_{\text{в,ном}} = 610$ В; $n_{\text{ном}} = 175$ об/мин; $M_{\text{ном}} = 272837$ Нм; $\eta_{\text{ном}} = 0,96$; $J = 6400$ кгм²; $Z_n = 6$; $m_1 = 3$. Для определения приближенных значений параметров схемы замещения рассматриваемого синхронного двигателя, необходимых для компьютерного моделирования, предлагается следующий подход. Предположим, что падение напряжения на каждой фазе обмотки статора, соединенной в «звезду», при номинальном токе составляет 2,5% от номинального напряжения, то есть $\Delta U_1 = 0,025$. Тогда активное сопротивление фазы можно определить по формуле

$$R_1 = \frac{\Delta U_1 U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{1\text{ном}}} = \frac{0,025 \cdot 3100}{\sqrt{3} \cdot 958} = 0,047 \text{ Ом.}$$

Следовательно, потери мощности на активном сопротивлении статора составит

$$\Delta P_1 = 3 I_{1\text{ном}}^2 R_1 = 3 \cdot (958)^2 \cdot 0,047 = 128600 \text{ Вт,}$$

что составляет 2,6% от номинальной мощности выбранного двигателя и хорошо согласуется с его коэффициентом полезного действия.

Остальные потери в двигателе складываются из механических потерь, потерь в стали и электрических потерь в обмотке возбуждения, на которые приходится в данном случае 1,4% от номинальной мощности. Допустим, что на потери на активном сопротивлении обмотки возбуждения составляют 0,5%. Тогда ее активное сопротивление будет равно

$$R_{\text{в}} = \frac{0,005 P_{1\text{ном}}}{I_{\text{в,ном}}^2} = \frac{0,005 \cdot 5000000}{(610)^2} = 0,067 \text{ Ом.}$$

Теперь необходимо определить индуктивности эквивалентной обмотки статора и обмотки возбуждения. Для этого, прежде всего, определим требуемое потокоцепление обмотки возбуждения для создания номинального момента $M_{\text{ном}}$

$$\psi_{\text{в}} = \frac{2 M_{\text{ном}}}{m_1 Z_n I_{1\text{ном}}} = \frac{2 \cdot 272837}{3 \cdot 6 \cdot 958} = 31,644 \text{ Вб.}$$

Отсюда можно рассчитать приближенное значение индуктивности обмотки возбуждения

$$L_{\text{в}} = \frac{\psi_{\text{в}}}{I_{1\text{ном}}} = \frac{31,644}{610} = 0,052 \text{ Гн.}$$

Полагая, что $\psi_1 = \psi_{\text{в}}$ и в районе малых отклонений от номинальной точки работы двигателя магнитная система статора линейна, можно определить приближенное значение индуктивности фазы статорной обмотки

$$L_1 = \frac{\psi_1}{I_{1ном}} = \frac{31,644}{958} = 0,033 \text{ Гн.}$$

Полученные данные позволяют рассчитать электромагнитные постоянные времени обмоток статора и ротора

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = \frac{0,033}{0,047} = 0,707 \text{ с}; T_B = \frac{L_B}{R_B} = \frac{0,052}{0,067} = 0,772 \text{ с}$$

и разработать имитационную модель синхронного двигателя DMMYZ2236 для программной среды Matlab Simulink (рис. 2). Приведенная модель позволяет построить графики разгона двигателя до номинальной скорости (рис. 3) и переходного процесса в «малом» (рис. 4).

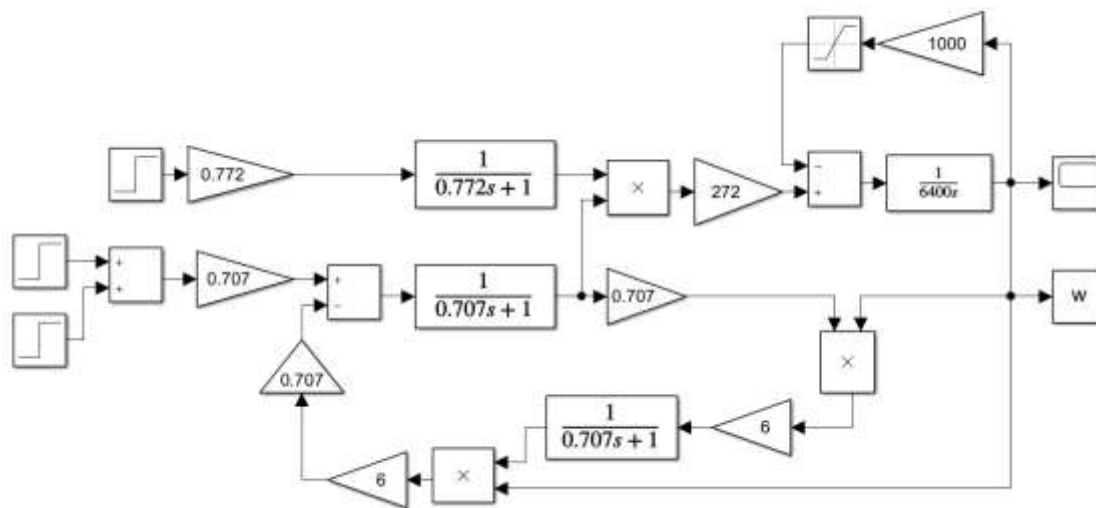


Рис. 2. Имитационная модель синхронного двигателя DMMYZ2236

Анализ графиков показывает, что при подаче номинального напряжения двигатель действительно разгоняется до номинальной скорости. При дальнейшем увеличении напряжения на 2 В происходит переходный процесс, заканчивающийся за 8,76 с. Большая инерционность рассматриваемого двигателя определяется как значительными постоянными времени обмоток, так и большим моментом инерции ротора.

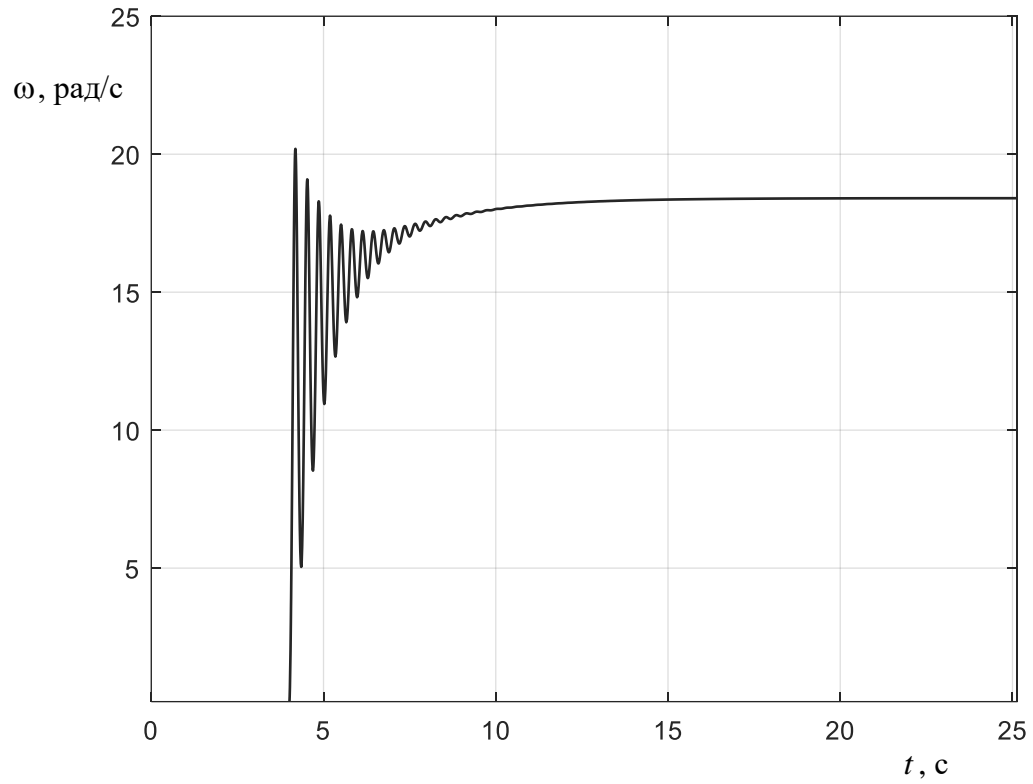


График разгона двигателя DMMYZ2236

Рис. 3.

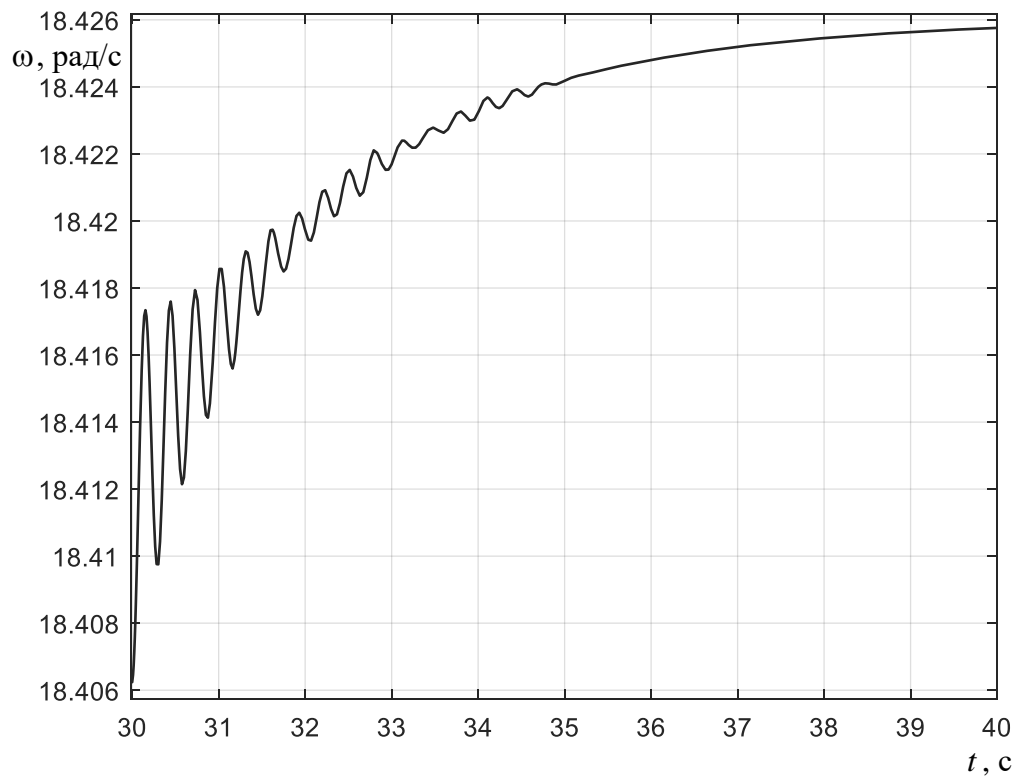


Рис. 4. График переходного процесса в двигателе DMMYZ2236 при увеличении напряжения статора на 2 В

График переходного процесса в «малом» позволяет также предположить, что синхронный двигатель ДММУЗ2236 должен представлять собой динамическое звено третьего порядка, у которого имеется как апериодическая, так и колебательная составляющая.

Проведенное исследование показывает, что при замене в главном приводе стана горячего проката 2800 двигателя постоянного тока на синхронную машину в необходимо учитывать ее математическую модель и динамические свойства, которые влияют на выбор и настройку системы управления, обеспечивающей большой диапазон регулирования и точность стабилизации скорости.

Список литературы

1. Виноградов А.Б. Векторное управления электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
2. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О.П. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
4. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; Под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академик», 2005. – 304 с.
5. Лисин С.Л. Структурно-параметрический синтез быстродействующего следящего электропривода с синхронным исполнительным двигателем: дис. ... канд. техн. наук / С.Л. Лисин – Самара: СамГТУ, 2016. – 179 с.

References

1. Vinogradov A.B. Vektornoye upravleniya elektroprivodami peremennogo toka / A.B. Vinogradov. – Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet im. V.I. Lenina», 2008. – 298 p.
2. Mikhaylov O.P. Avtomatizirovannyy elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov / O.P. Mikhaylov. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 304 p.
3. Sokolovskiy G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniyem / G.G. Sokolovskiy. – M.: Akademiya, 2006. – 265 p.
4. Terekhov V.M. Sistemy upravleniya elektroprivodov: Uchebnyk dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / V.M. Terekhov, O.I. Osipov; Pod red. V. M. Terekhova. – M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademik», 2005. – 304 p.
5. Lisin S.L. Strukturno-parametricheskiy sintez bystrodeystvuyushchego sledyashchego elektroprivoda s sinkhronnym ispolnitel'nyim dvigatelem: dis. ... kand. tekhn. nauk / S.L. Lisin – Samara: SamGTU, 2016. – 179 p.