

УДК 681.5+621.52

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

О. Н. Прокопеня¹, А. В. Францевич², Л. И. Вабищевич³, А. И. Пикула⁴¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: olegprokopenya@mail.ru² Магистр, аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alex.favg@gmail.com³ К. т. н., доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vabik1948@mail.ru⁴ Старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и производств УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alexandr.pikula@gmail.com

Реферат

Для мехатронных модулей, используемых в составе промышленных роботов и мобильных транспортных средств, является актуальной проблема оптимизации параметров с целью обеспечения минимальных потерь энергии при заданных динамических характеристиках. Целесообразным является использование в мехатронных модулях трехфазных асинхронных электродвигателей, как обладающих рядом преимуществ. В частности, меньший момент инерции ротора создает предпосылки для получения лучших динамических свойств, чем при использовании в других типов двигателей.

В данной статье предлагается решение задачи оптимизации управляющей части мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем. Оно основано на использовании линейной математической модели второго порядка, полученной путем линеаризации механической характеристики двигателя, и квадратичного критерия оптимизации. Допустимость линеаризации модели обоснована и подтверждена результатами моделирования. Переменными состояния для рассматриваемого модуля являются угол поворота выходного вала и угловая скорость электродвигателя.

Задача оптимизации решена аналитически. В результате получены аналитические зависимости для расчета оптимальных коэффициентов обратной связи по углу поворота выходного вала и угловой скорости электродвигателя. Данные зависимости могут использоваться в инженерных расчетах. Установлено, что коэффициент обратной связи по углу поворота выходного вала определяется только элементами матриц критерия оптимизации, что позволяет один из элементов выбирать произвольно. Коэффициент обратной связи по скорости зависит также от параметров двигателя. С помощью математической модели исследовано влияние матриц критерия оптимизации на качество переходных процессов и потери энергии. Предложены рекомендации по выбору данных матриц при проектировании оптимальных приводов.

Ключевые слова: мехатронный модуль, оптимизация, трехфазный асинхронный электродвигатель.

OPTIMIZATION OF MECHATRONIC MODULE CONTROL SUBSYSTEM BASED ON THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

O. N. Prokopenya, A. V. Francevich, L. I. Vabishchevich, A. I. Pikula

Abstract

For mechatronic modules used in industrial robots and mobile vehicles, the problem of optimizing parameters in order to ensure minimum energy losses at given dynamic characteristics is urgent. It is advisable to use three-phase asynchronous motors in mechatronic modules as having a number of advantages. In particular, a smaller moment of inertia of the rotor creates prerequisites for obtaining better dynamic properties than when used in other types of motors.

This article provides a solution to the problem of optimizing the control part of a mechatronic module with a three-phase asynchronous motor. It is based on the use of a linear mathematical model of the second order, obtained by linearizing the mechanical characteristic of the motor, and a quadratic optimization criterion. The model linearization is justified and confirmed by simulation results. The state variables for the module are the rotational angle of the output shaft and the angular velocity of the motor.

The optimization problem is solved analytically. As a result, analytical dependencies were obtained to calculate optimal feedback coefficients for the angle of rotation of the output shaft and the angular velocity of the electric motor. These dependencies can be used in engineering calculations. It was found that the coefficient of feedback on the angle of rotation of the output shaft is determined only by the elements of the matrices of the optimization criterion, which allows one of the elements to be selected arbitrarily. The speed feedback factor also depends on the engine parameters. Using a mathematical model, the effect of optimization criterion matrices on the quality of response curve and energy loss was investigated. Recommendations on selection of these matrices at designing of optimal drives are offered.

Keywords: mechatronic module, optimization, three-phase induction motor.

Введение

Мехатронные модули широко применяются в составе робототехнических устройств, мобильных транспортных средств, поэтому возникает потребность в совершенствовании методов их проектирования [1–9]. Как правило, к ним предъявляются высокие требования по точности, динамическим характеристикам, управляемости. При использовании в мобильных транспортных средствах весьма важное значение имеет энергоэффективность, и предпринимаются попытки ее улучшения [10, 11]. Хорошей управляемостью обладают двигатели постоянного тока, шаговые двигатели, синхронные серводвигатели, которые чаще всего используются в мехатронных модулях. Асинхронные двигатели сложнее в управлении, особенно при работе на низких скоростях, что ограничивает их применение. Однако создание инверторов, обеспечивающих незави-

симое управление частотой и амплитудой выходного напряжения, а также разработка принципов векторного управления скоростью создают предпосылки для широкого применения данных двигателей в мехатронике. Ротор асинхронного двигателя имеет меньший момент инерции в сравнении с двигателем постоянного тока при той же мощности, что позволяет получить более высокое быстродействие и лучшие динамические характеристики модуля.

Мехатронные модули имеют развитую электронную и вычислительную части, что позволяет реализовать оптимальное управление движением. Ранее задача оптимизации была решена применительно к приводу с двигателем постоянного тока [14–16] на основе линейной математической модели объекта и квадратичного критерия, которая именуется аналитическим конструированием регулятора [17]. Описание трехфазно-

го асинхронного электродвигателя линейными уравнениями затрудняется тем, что его механическая характеристика существенно нелинейна.

В данной работе предпринята попытка аналитического решения задачи оптимизации для управляющей подсистемы мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем на основе линеаризованных уравнений состояния.

Постановка задачи

Для решения задачи оптимизации необходимо получить математическую модель трехфазного асинхронного электродвигателя в виде линейных дифференциальных уравнений (уравнений состояния). Это позволит найти аналитическое решение оптимизационной задачи для управляющей части мехатронного модуля, позволяющее рассчитывать оптимальные значения коэффициентов обратной связи по угловому перемещению выходного вала и скорости двигателя в зависимости от значений элементов, входящих в критерий оптимизации матриц Q и R , которые определяют качество переходного процесса и количество затрачиваемой на регулирование энергии. Последующий анализ влияния коэффициентов данных матриц на показатели качества переходного процесса и потери в приводе даст возможность сформулировать рекомендации по выбору значений элементов данных матриц при расчете и проектировании мехатронных модулей с трехфазным асинхронным электродвигателем.

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{s \omega_1 [(R + c' R_2' / s)^2 + (X + c'' R_2' / s)^2]}, \quad (3)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора;

U_1 – напряжение на обмотке статора;

R_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора.

Скольжение ротора

$$s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1, \quad (4)$$

где ω_1 – синхронная скорость вращения (скорость вращения магнитного поля).

Значения входящих в (3) сопротивлений

$$R = R_1 - c'' X_2'; \quad X = X_1 + c' X_2',$$

где R_1 и X_1 – активное и индуктивное сопротивления обмотки статора;

X_2' – приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление обмотки ротора;

c' и c'' – постоянные коэффициенты, зависящие от сопротивления обмотки статора.

Для практических расчетов с достаточной точностью можно принимать $c' = 1$ и $c'' = 0$ [18].

$$M = \frac{m_1 U_1^2 (\omega_1 - \omega)}{\omega_1^2 R_2'} = \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \omega_1 - \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_1}{\omega_1} \right)^2 \omega. \quad (6)$$

Если считать, что отношение U_1/ω_1 поддерживается инвертором постоянным в процессе регулирования, т. е. $(U_1/\omega_1)^2 = \text{const}$ (на практике в большинстве случаев это имеет место), то выражение (6) представляет собой линейную зависимость момента от угловой скорости. Целесообразно выразить это отношение через номинальные значения напряжения и угловой скорости, т. е. $(U_1/\omega_1)^2 = (U_{1\text{ном}}/\omega_{1\text{ном}})^2$.

Тогда, подставляя (6) в (2), получаем

$$J_{\text{пр}} \cdot \dot{\omega} = \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega_1 - \frac{m_1}{R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega. \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = - \frac{m_1}{J_{\text{пр}} R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega + \frac{m_1}{J_{\text{пр}} R_2'} \left(\frac{U_{1\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}} \right)^2 \omega_1. \quad (10)$$

Решение задачи оптимизации

Исходные уравнения, описывающие динамику привода

$$\dot{\alpha} = k_p \omega; \quad (1)$$

$$J_{\text{пр}} \cdot \dot{\omega} = M, \quad (2)$$

где α – угол поворота выходного звена;

ω – угловая скорость ротора двигателя;

k_p – коэффициент передачи редуктора;

$J_{\text{пр}}$ – приведенный к валу двигателя момент инерции привода;

M – момент двигателя.

В уравнении (2) не учтен момент сопротивления на валу двигателя, поскольку рассматривается переходный процесс при пуске двигателя без нагрузки. Предполагается также, что инвертор, управляющий двигателем, не обладает инерционностью, т. е. является пропорциональным звеном.

Момент асинхронного электродвигателя [18–19]

Тогда при $s \ll 1$ выражение (3) сводится к виду

$$M = \frac{m_1 U_1^2 s}{\omega_1 R_2'}. \quad (5)$$

Получили линейную зависимость момента от скольжения и, соответственно, от скорости вращения ротора. Данная зависимость достаточно точно описывает рабочий участок механической характеристики асинхронного электродвигателя, на котором располагается точка, соответствующая номинальному режиму работы. Механическая характеристика на данном участке обладает высокой жесткостью, т. е. изменение угловой скорости с ростом момента незначительно. Данному участку соответствует изменение момента и скольжения примерно от нуля до двух номинальных значений ($0 < M < 2M_{\text{ном}}$ и $0 < s < 2s_{\text{ном}}$). Следовательно, выражение (4) справедливо, если в процессе работы двигателя данные переменные поддерживаются в указанных диапазонах. Это можно обеспечить в приводе с частотным регулированием скорости [12], увеличивая задающий сигнал на перемещение по линейному закону, т. е. фактически ограничивая заданную скорость вращения.

Подставляя (4) в (5), получаем

Приводя (1) и (7) к стандартному виду уравнений состояния [20],

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (8)$$

где A и B – матрицы объекта;

x – вектор переменных состояния (в нашем случае α, ω);

u – вектор управления (в нашем случае ω_1),

получаем

$$\dot{\alpha} = k_p \omega; \quad (9)$$

Тогда матрицы модели объекта

$$A = \begin{bmatrix} 0 & k_P \\ 0 & -\frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Полученная линейная модель объекта позволяет решать задачу оптимизации на основе квадратичного критерия (задача аналитического конструирования регулятора).

Критерий качества регулирования (на интервале времени $t_0 - t_k$)

$$I = \int_{t_0}^{t_k} (u^T R u + x^T Q x) dt, \quad (13)$$

где R – симметричная, положительно-определенная матрица весовых коэффициентов, определяющих затраты на управление;

Q – симметричная, неотрицательно-определенная матрица весовых коэффициентов, определяющих качество переходного процесса.

Оптимальное значение критерия

$$I^* = x^T P(t) x, \quad (14)$$

где $P(t)$ – весовая матрица, в общем случае зависящая от времени.

Постоянные значения весовой матрицы получаются при оптимизации на бесконечном интервале времени и находятся из решения алгебраического уравнения [17]

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \quad (15)$$

Найденную матрицу постоянных коэффициентов обозначаем $\bar{P}$.

$$\begin{bmatrix} p_{12}^2 a_{22}^2 / r - q_{11} & \frac{a_{22}^2}{r} p_{12} p_{22} - k_P p_{11} + a_{22} p_{12} \\ \frac{a_{22}^2}{r} p_{12} p_{22} - k_P p_{11} + a_{22} p_{12} & \frac{a_{22}^2}{r} p_{22}^2 + 2a_{22} p_{22} - 2k_P p_{12} - q_{22} \end{bmatrix} = 0. \quad (23)$$

В матрице (23) обозначено

$$a_{22} = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2. \quad (24)$$

Для нахождения p_{12} и p_{22} приравняем к нулю элементы на главной диагонали (23)

$$p_{12}^2 a_{22}^2 / r - q_{11} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{a_{22}^2}{r} p_{22}^2 + 2a_{22} p_{22} - 2k_P p_{12} - q_{22} = 0. \quad (26)$$

Из (25) и (26) находим

$$k_2 = -1 + \sqrt{1 + 2 \frac{J_{ПП}R_2'}{m_1} \left(\frac{\omega_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} \right)^2 k_P k_1 + \frac{q_{22}}{r}}, \quad (30)$$

За счет выбора элементов матриц Q и R при вычислении k_1 и k_2 можно получить желаемое соотношение между качеством переходного процесса и затратами энергии на регулирование.

В общем случае для симметричной матрицы

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

При этом оптимальное управление

$$u^* = -Kx, \quad (17)$$

где $K = R^{-1}B^T \bar{P}$ – матрица коэффициентов обратной связи по переменным состояния.

В нашем случае (для системы второго порядка) требуется нахождение коэффициентов k_1, k_2 матрицы K .

Для системы с одним входом матрица R состоит из одного элемента. Обозначим

$$R = [r]. \quad (18)$$

Из (17) с учетом (12), (16), (18) закон управления

$$u^* = -k_1 \alpha - k_2 \omega, \quad (19)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \frac{p_{12}}{r}, \quad (20)$$

$$k_2 = \frac{m_1}{J_{ПП}R_2'} \left(\frac{U_{1НОМ}}{\omega_{1НОМ}} \right)^2 \frac{p_{22}}{r}. \quad (21)$$

Таким образом, для построения оптимальной системы требуется

нахождение только двух элементов p_{12} и p_{22} матрицы $\bar{P}$.

Матрицу Q , входящую в критерий (13), принимаем в виде

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Уравнение (15) после подстановки матриц (11), (12), (16), (18), (22) приводится к виду

$$p_{12} = \frac{\sqrt{r q_{11}}}{a_{22}}, \quad (27)$$

$$p_{22} = \frac{r}{a_{22}} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2p_{12}k_P}{r} + \frac{q_{22}}{r}} \right). \quad (28)$$

Подставляя (27), (28) в (20), (21), с учетом (24) получаем

$$k_1 = \sqrt{q_{11}} / r, \quad (29)$$

Методика исследований

Для оценки показателей качества переходного процесса и потерь энергии разработана математическая модель в приложении Simulink, которая приведена на рисунке 1.

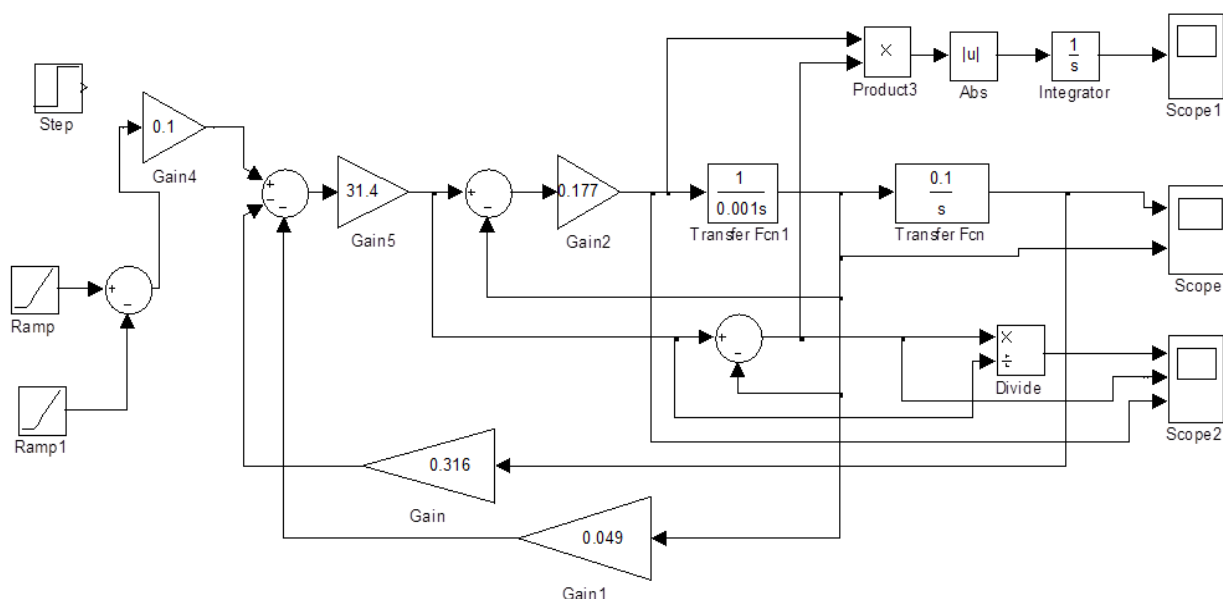


Рисунок 1 – Модель управляющей подсистемы мехатронного модуля в приложении Simulink

В основу математической модели положены уравнения (9), (10), записанные в операторной форме. В модели предусмотрен вывод на осциллограф Scope переменных состояния: угла поворота выходно-

го вала α (она же является выходной переменной) и угловой скорости ω . Вид осциллограммы показан на рисунке 2.

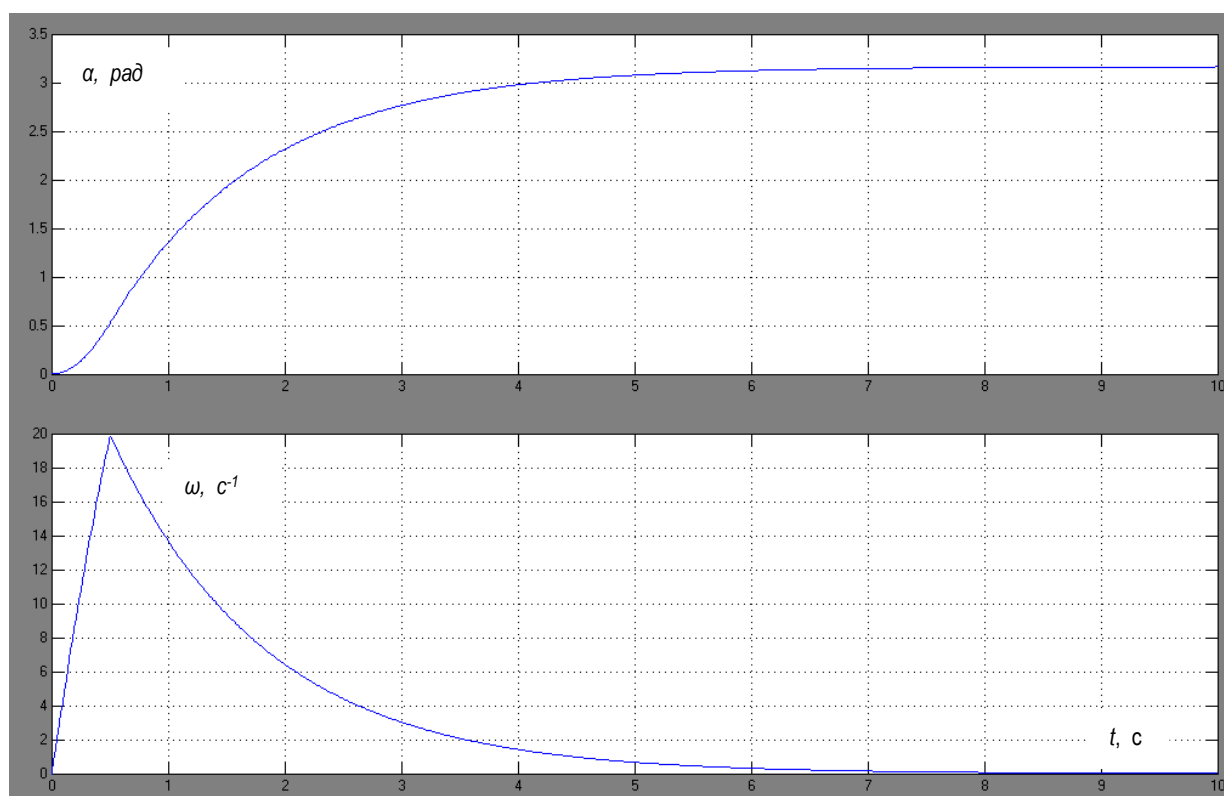


Рисунок 2 – Осциллограммы изменения угла поворота выходного вала и угловой скорости

На осциллограф Scope1 выводится кривая изменения потерь энергии в роторе двигателя ΔW_{32} . Вид осциллограммы показан на рисунке 3. Потери вычисляются путем интегрирования значения мгновенной мощности потерь в роторе [18]

$$\Delta W_{32} = \int M(\omega_1 - \omega) dt \quad (31)$$

Поскольку задача исследования не предполагает определение точного значения потерь в двигателе, а состоит в нахождении настро-

ек, при которых эти потери минимальны, то учет только потерь в роторе вполне допустим. Это обусловлено тем, что изменение тока обмотки ротора приводит к соответствующему изменению тока обмотки статора, поэтому минимальным потерям в обмотке ротора будут соответствовать минимальные потери в двигателе в целом.

Осциллограмма показывает, что интенсивный рост потерь имеет место в период разгона ротора, далее ротор вращается синхронно с полем, и ток в обмотке ротора отсутствует.

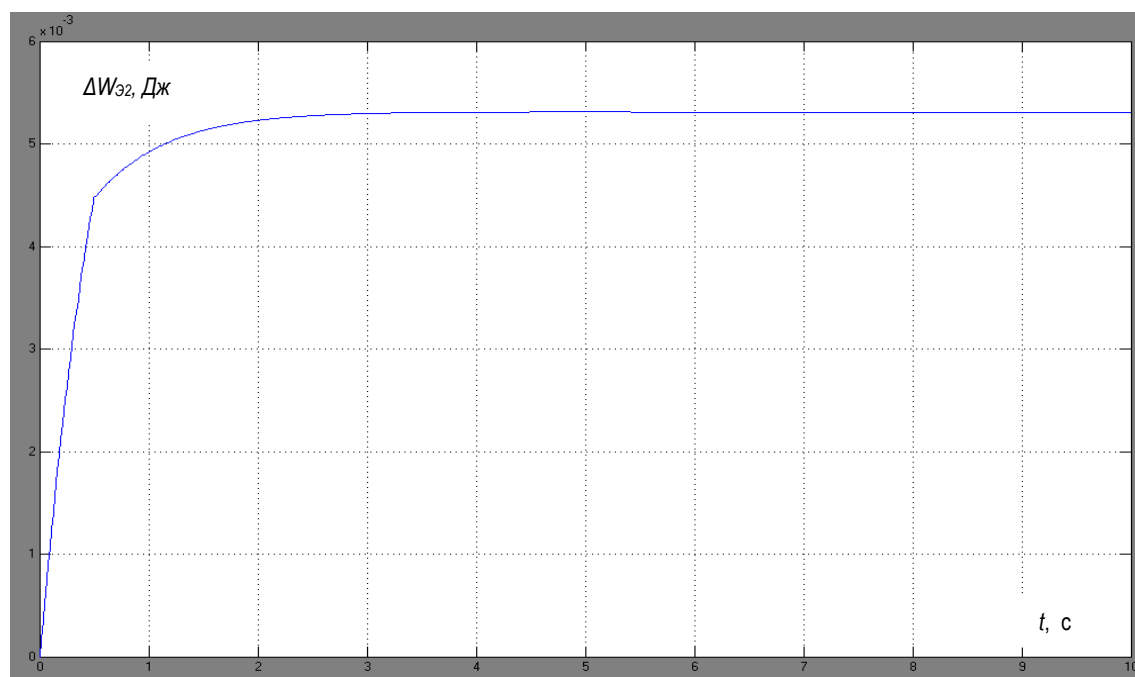


Рисунок 3 – Осциллограмма изменения потерь энергии в обмотке ротора

На осциллограф Scope2 выводятся зависимости скольжения, разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, а также момента двигателя от времени. Вид осциллограммы показан на рисунке 4.

Первая кривая показывает, что в самый начальный момент скольжение достаточно велико, однако это не означает, что работа двигателя осуществляется на нелинейном участке характеристики. Просто, при очень низкой скорости вращения ротора скольжение может быть достаточно большим даже при невысокой скорости вращения поля, как следует из (4). Однако при этом не нарушается условие $0 < M < 2M_{\text{ном}}$, а это значит, что рабочая точка не выходит за

пределы линейного участка характеристики. Это подтверждают кривые изменения разности скоростей и момента. Следует отметить, что для выполнения указанного условия входной сигнал изменяется по линейному закону до заданного значения, т. е. скорость его изменения ограничена. Выход за пределы линейного участка может иметь место в случае, если ступенчато подать на вход достаточно большое значение задающего сигнала. Таким образом, подбирая соответствующий темп нарастания входного сигнала, можно обеспечить работу на линейном участке механической характеристики, что делает обоснованными принятые допущения.

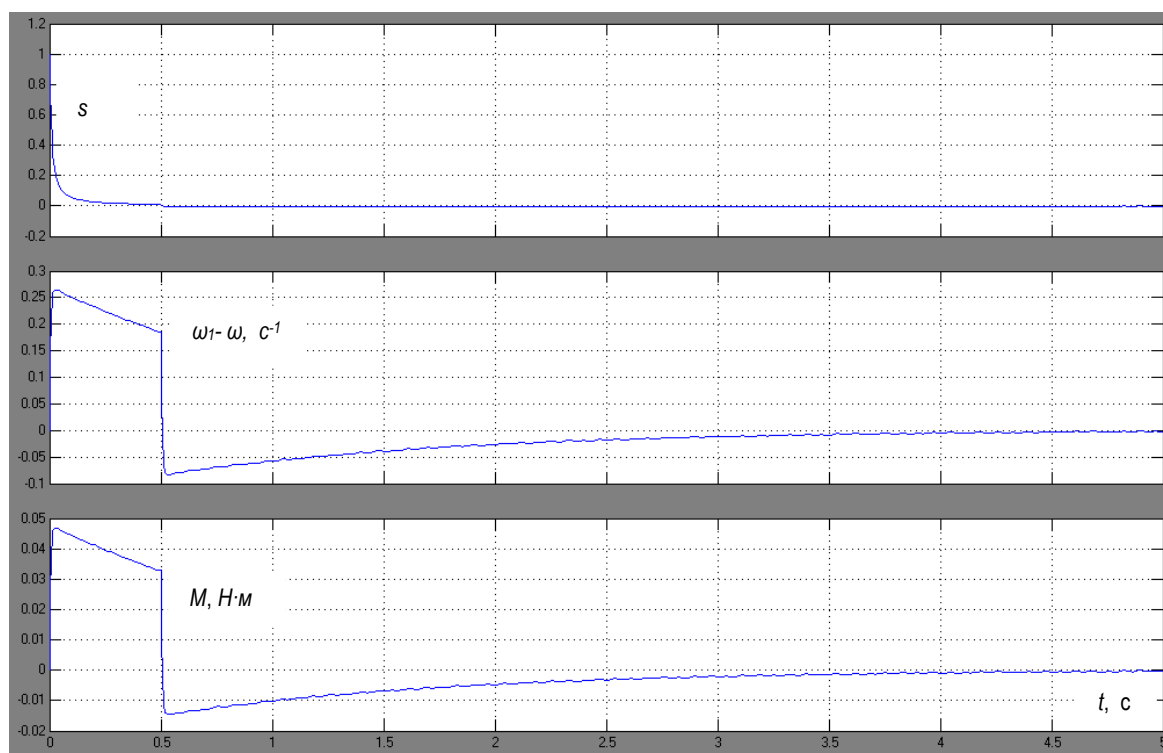


Рисунок 4 – Осциллограммы изменения скольжения, разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, а также момента двигателя во времени

Предложенная математическая модель использована для анализа влияния значений элементов матриц Q и R на качество переходного процесса и потери в мехатронном модуле с трехфазным асинхронным двигателем. Расчет выполнен для двигателя 4A71A2Y3, паспортные данные и параметры схемы замещения для которого указаны в [21].

Результаты исследования и обсуждение

Процедура анализа реализуется следующим образом. При заданных значениях элементов матриц Q и R вычисляются значения k_1 , k_2 по (20), (21). Данные коэффициенты вводятся в модель и на основе получаемых в результате моделирования осциллограмм находятся показатели качества переходного процесса и потери энергии. В качестве показателей качества переходного процесса приняты время регулирования t_p (вычисляется при допустимом отклонении регулируемой переменной 5 %) и перерегулирование σ , а в качестве показателя энергоэффективности – потери энергии в обмотке ротора двигателя за время переходного процесса $\Delta W_{\Sigma 2}$.

Поскольку, согласно (20) коэффициент k_1 определяется соотношением q_{11} и r , то целесообразно принять $q_{11} = 1$, а изменять r . Изменению также подлежит коэффициент q_{22} матрицы Q .

Результаты вычислений приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 1$ ($k_1 = 1$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000565	0,0959	0,184	0,265	0,342	0,415
t_p , с	1,3	4,0	7,0	>10	>10	>10
σ , %	0	0	0	–	–	–
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	54,0	5,58	2,06	–	–	–

Таблица 2 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 4$ ($k_1 = 0,5$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000335	0,0250	0,0491	0,0727	0,0957	0,1072
t_p , с	2,3	3,7	5,3	7,0	8,0	>10
σ , %	0	0	0	0	0	0
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	18,6	6,90	3,62	2,23	1,52	–

Таблица 3 – Результаты моделирования при $q_{11} = 1$, $r = 10$ ($k_1 = 0,316$)

q_{22}	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
k_2	0,000178	0,0101	0,0199	0,0297	0,0394	0,0490
t_p , с	3,2	4,2	5,0	6,0	7,0	7,8
σ , %	0	0	0	0	0	0
$\Delta W_{\Sigma 2}$, мДж	8,65	5,31	3,60	2,60	1,97	1,55

Из полученных результатов следует, что увеличение значения r матрицы R , как и увеличение значения q_{22} матрицы Q , приводит к снижению потерь во всех случаях. Это сопровождается увеличением длительности переходного процесса (времени регулирования). При меньших значениях r влияние q_{22} проявляется более интенсивно.

Одно и то же значение времени регулирования можно получить при различных сочетаниях r и q_{22} . При этом для большего значения r потери несколько ниже (до 10 %). Однако при этом возрастает минимальное время регулирования, которое можно получить при $q_{22} = 0$. Если требуется меньшее время регулирования, то его можно обеспечить уменьшением r . При отсутствии жесткого ограничения на время регулирования следует принимать r по возможности большим.

Следует отметить, что во всех случаях обеспечивается монотонный переходный процесс (отсутствие перерегулирования).

В то же время увеличение r приводит к уменьшению k_1 и, как следствие, k_2 , а увеличение q_{22} – к росту k_2 . Это же следует и из полученных аналитических зависимостей (20), (21). При выборе r можно исходить, в том числе из наиболее приемлемого значения k_1 . Это актуально, если измерительная часть является аналоговой. Увеличение k_1 приводит к повышению быстродействия, что сопровождается ростом потерь.

Таким образом, при выборе элементов матриц Q и R можно использовать следующий подход. Принять $q_{11} = 1$, а r по возможности большим (до 10...15), далее q_{22} увеличивать, пока время регулирования не достигнет максимально допустимого значения. В этом случае потери будут минимальны при заданной длительности переходного процесса.

Заключение

В результате решения задачи оптимального управления для управляющей подсистемы мехатронного модуля с трехфазным асинхронным электродвигателем получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов обратной связи по углу поворота выходного вала и угловой скорости. Это позволяет синтезировать оптимальный привод инженерным расчетом, не прибегая каждый раз к процедуре оптимизации. При этом коэффициент обратной связи по положению однозначно определяется значениями матриц Q и R , а коэффициент обратной связи по скорости зависит также от параметров двигателя. Они могут быть вычислены на основе полученных аналитических выражений.

Анализ результатов расчета и последующего моделирования работы оптимального привода при варьировании значениями матриц Q и R показал, что увеличение значения r матрицы R и значения q_{22} матрицы Q во всех случаях приводит к уменьшению потерь в приводе при соответствующем росте длительности переходного процесса. Целесообразно принимать $q_{11} = 1$, а r по возможности больше, вплоть до 10...15. При этом дальнейшее снижение потерь может быть достигнуто за счет увеличения q_{22} в пределах, определяемых допустимым временем регулирования. Выявленные закономерности позволяют целенаправленно подойти к выбору матриц Q и R при проектировании мехатронных модулей с оптимальными параметрами.

Список цитированных источников

1. Жавнер, В. Л. Мехатронные системы: учеб. пособие / В. Л. Жавнер, А. Б. Смирнов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 131 с.
2. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стер. / Ю. В. Подураев. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с.
3. Егоров, О. Д. Конструирование мехатронных модулей: учебник / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. – 360 с.
4. Проектирование мехатронного модуля с использованием асинхронного двигателя и шарико-винтовой передачи // Научные Статьи.Ру. – URL: <https://nauchniestati.ru> (дата обращения: 24.02.2024).
5. Герман-Галкин, С. Г. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech / С. Г. Герман-Галкин, Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.
6. Поляков, А. Н. Проектирование мехатронных модулей станков с ЧПУ: учебное пособие / А. Н. Поляков. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 128 с.
7. Родичев, А. Ю. Проектирование мехатронных и робототехнических систем: учебное пособие / А. Ю. Родичев, Р. Н. Поляков, А. В. Горин. – Орел: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – 271 с.
8. Волкова, М. А. Приводы мехатронных и робототехнических систем: методические рекомендации / М. А. Волкова. – М.: РТУ МИРЭА, 2024. – 19 с.
9. Романов, А. М. Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем: учебно-методическое пособие / А. М. Романов, М. А. Волкова. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – 68 с.
10. Волков, А. Н. Выбор энергосберегающих законов движения мехатронных приводов технологических машин / А. Н. Волков, О. Н. Мацко, А. В. Мосалова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – № 4. – С. 141–149.
11. Синтез оптимальных по критерию энергосбережения алгоритмов работы приводов роботов и технологических машин: учеб. пособие / А. Н. Волков, А. А. Корнилова, О. Н. Мацко, А. В. Козлов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 80 с.

12. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2006. – 363 с.
13. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов постоянного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.
14. Оптимизация привода постоянного тока с регулируемой скоростью / О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, А. В. Францевич [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
15. Супрунчук, П. Д. Оптимальный электропривод постоянного тока / П. Д. Супрунчук, О. Н. Прокопеня, О. Г. Прожишко // Новые технологии и материалы, автоматизация производства : сборник статей / Брестский государственный технический университет – Брест : Издательство БрГТУ, 2021. – С. 20–25.
16. Оптимизация позиционного привода постоянного тока / О. Н. Прокопеня, Л. И. Вабищевич, О. Г. Прожишко, А. С. Лапука // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
17. Солодовников, В. В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
18. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1980. – 928 с.
19. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 350 с.
20. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
21. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
7. Rodichev, A. YU. Proektirovanie mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : uchebnoe posobie / A. YU. Rodichev, R. N. Polyakov, A. V. Gorin. – Orel : OGU imeni I.S. Turgeneva, 2023. – 271 s.
8. Volkova, M. A. Privody mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : metodicheskie rekomendacii / M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2024. – 19 s.
9. Romanov, A. M. Programmnoe obespechenie mekhatronnyh i robototekhnicheskikh sistem : uchebno-metodicheskoe posobie / A. M. Romanov, M. A. Volkova. – M. : RTU MIREA, 2019. – 68 s.
10. Volkov, A. N. Vyborenergoberegayushchih zakonov dvizheniya mekhatronnyh privodov tekhnologicheskikh mashin / A. N. Volkov, O. N. Macko, A. V. Mosalova // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. – 2018. – № 4. – С. 141–149.
11. Sintez optimal'nykh po kriteriyu energosberezheniya algoritmov raboty privodov robotov i tekhnologicheskikh mashin: ucheb. posobie / A. N. Volkov, A. A. Kornilova, O. N. Macko, A. V. Kozlovich. – SPb. : POLITEKH-PRESS, 2023. – 80 s.
12. Firago, B. I. Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka / B. I. Firago, L. B. Pavlyachik. – Minsk : Tekhnoperspektiva, 2006. – 363 s.
13. SHrejner, R. T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov postoyannogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty / R. T. SHrejner. – Ekaterinburg : URO RAN, 2000. – 654 s.
14. Optimizatsiya privoda postoyannogo toka s reguliruemoj skorost'yu / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, A. V. Francevich [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2023. – № 2. – С. 93–96.
15. Suprunchuk, P. D. Optimal'nyy elektroprivod postoyannogo toka / P. D. Suprunchuk, O. N. Prokopenya, O. G. Prozhizhko // Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva : sbornik statej / Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet – Brest : Izdatel'stvo BrGTU, 2021. – С. 20–25.
16. Optimizatsiya pozitsionnogo privoda postoyannogo toka / O. N. Prokopenya, L. I. Vabishchevich, O. G. Prozhizhko, A. S. Lapuka // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 2. – С. 79–83.
17. Solodovnikov, V. V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / V. V. Solodovnikov, V. N. Plotnikov, A. V. YAKovlev. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 536 s.
18. Ivanov-Smolenskij, A. V. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov / A. V. Ivanov-Smolenskij. – M. : Energiya, 1980. – 928 s.
19. Vol'dek, A. I. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnik dlya vuzov / A. I. Vol'dek, V. V. Popov. – SPb. : Piter, 2008. – 350 s.
20. Fillips, CH. Sistemy upravleniya s obratnoj svyaz'yu / CH. Fillips, R. Harbor. – M. : Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001. – 616 s.
21. Asinhronnye dvigateli serii 4A: spravochnik / A. E. Kravchik, M. M. SHlaf, V. I. Afonin, E. A. Sobolenskaya. – M. : Energoizdat, 1982. – 504 s.

References

1. ZHavner, V. L. Mekhatronnye sistemy: ucheb. posobie / V. L. ZHavner, A. B. Smimov. – SPb. : IZD-VO Politekhn. un-ta, 2011. – 131 s.
2. Poduraev, YU. V. Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobie dlya studentov vuzov. – 2-e izd., ster. / YU. V. Poduraev. – M. : Mashinostroenie, 2007. – 256 s.
3. Egorov, O. D. Konstruirovaniye mekhatronnykh modulej: uchebnik / O. D. Egorov, YU. V. Poduraev. – M. : MG TU «STANKIN», 2004. – 360 s.
4. Proektirovaniye mekhatronnogo modulya s ispol'zovaniyem asinhronnogo dvigatelya i shariko-vintovoy peredachi // Nauchnye Stat'i.Ru. – URL: <https://nauchniestati.ru> (data obrashcheniya: 24.02.2024).
5. German-Galkin, S. G. Model'noye proektirovaniye elektromekhanicheskikh mekhatronnykh modulej dvizheniya v srede SimInTech / S. G. German-Galkin, B. A. Kartashov, S. N. Litvinov. – M. : DMK Press, 2021. – 494 s.
6. Polyakov, A. N. Proektirovaniye mekhatronnykh modulej stankov s CHPU : uchebnoye posobie / A. N. Polyakov. – Orenburg : OGU, 2019. – 128 s.

Материал поступил 02.04.2025, одобрен 08.04.2025,
принят к публикации 14.04.2025