

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**Сергей Николаевич Пиляев
Дмитрий Николаевич Афоничев**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Известные методики определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя основаны на ряде допущений и направлены на установление указанных параметров, обеспечивающих требуемую форму механической характеристики в заданном диапазоне частоты вращения ротора. Результаты реализации динамической модели асинхронного электродвигателя 4A112M2U3, для которого известны параметры Г-образной схемы замещения, с помощью системы визуального моделирования Simulink показывают, что значение скольжения и электромагнитного момента при номинальной нагрузке практически соответствуют каталожным данным. В то же время значение максимального момента, полученное с помощью динамической модели, несколько меньше каталожного. Также установлено, что при номинальной нагрузке значение тока соответствует каталожному. Таким образом, параметры схемы замещения асинхронной машины можно считать адекватными. Расчёты параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя 4A112M2U3, выполненные по трём известным методикам, приведённым в работах В.Б. Терехина, С.Г. Герман-Галкина и Ю.А. Мощинского, показали, что вычислить наиболее близкие к каталожным значения позволяет методика Ю.А. Мощинского. При этом следует отметить наличие заметных отклонений значений зависимостей вращающего момента от скольжения ротора (при скольжении ротора, близком к критическому), взятых из каталогов и вычисленных по параметрам схемы замещения. Разработана методика обоснования параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, основанная на минимизации функции квадратов отклонений каталожных значений номинального момента, максимального момента и критического скольжения от их вычисленных значений для текущих значений параметров. Такая методика позволяет найти параметры, очень близкие к каталожным, и практическое совпадение зависимостей вращающего момента от скольжения ротора, установленных по каталожным и вычисленным параметрам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электропривод, асинхронный электродвигатель, параметры схемы замещения, динамическая модель, скольжение ротора, вращающий момент.

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR REPLACEMENT CIRCUIT

**Sergey N. Pilyaev
Dmitriy N. Afonichev**

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Known methods for determining parameters of the asynchronous electric motor replacement circuit are based on a number of assumptions and are aimed at establishing these parameters that provide the required form of mechanical characteristics in a given range of rotor speed. The results of the implementation of the dynamic model of the 4A112M2U3 asynchronous electric motor, for which the parameters of the L-shaped substitution scheme are given, using the Simulink visual modeling system show that the value of the slip and the electromagnetic moment at the rated load practically correspond to the catalog data. At the same time, the maximum torque value obtained using the dynamic model is slightly less than the catalog value. It is also established that at the rated load, the current value corresponds to the catalog value. Thus, the parameters of the asynchronous machine substitution scheme can be considered as adequate. Calculations of the parameters of the replacement circuit of the 4A112M2U3 asynchronous electric motor, performed according to three well-known methods described in the works of V.B. Terekhin, S.G. German-Galkin and Yu.A. Moshinskiy, showed that the method of Yu.A. Moshinsky allows calculating the values closest to the catalog ones. At the same time, it should be noted that there are noticeable deviations in the values of the dependencies of the torque on the motor slip (when the motor slip is close to critical), taken from the catalogs and calculated from the parameters of the substitution scheme. A method for substantiating the parameters of the asynchronous motor replacement circuit is developed, based on minimizing the function of squared deviations of the catalog values of the nominal torque,

maximum torque and critical slip from their calculated values for the current parameter values. This method allows calculating parameters that are very close to the catalog ones, and obtaining practical coincidence of the dependencies of the torque on the motor slip set according to the catalog and calculated parameters.

KEYWORDS: electric drive, asynchronous electric motor, substitution circuit parameters, dynamic model, motor slip, torque.

Введение

В настоящее время с развитием систем силовой электроники главенствующим типом электропривода большинства технологических установок в сельском хозяйстве и на перерабатывающих производствах стал частотно управляемый асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором [8, 13, 14, 16]. При этом основным инструментом проектирования частотно управляемых электроприводов на базе асинхронных электродвигателей является построение динамических моделей самого двигателя и системы управления [3, 9, 14, 16]. Для этих целей обычно используются такие системы мультифизического визуального моделирования (симуляции), как Matlab/Simulink, SimInTech, Amesim и т. д. [2, 9, 11]. Во всех этих системах реализована стандартная динамическая модель асинхронного двигателя в виде идеализированного двухфазного электродвигателя, приведённого к ортогональным осям, вращающимся с частотой питающей сети [6, 7, 10, 16]. Данная модель основывается на использовании схемы замещения асинхронного электродвигателя (Г-образной или Т-образной) [6, 7, 10, 16].

Параметрами схемы замещения являются: активные сопротивления обмоток статора и ротора R_1, R_2 , индуктивности обмоток статора и ротора L_1, L_2 и взаимная индуктивность обмоток статора и ротора L_m , определяющие значения индуктивных сопротивлений X_1, X_2, X_m .

Точное определение параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя практически невозможно по нескольким причинам:

- для определения индуктивностей рассеяния и взаимной индуктивности нужно проводить расчёт магнитной цепи машины, а для этого необходимо знание всех размеров её зубцовой зоны;
- индуктивности реальной машины зависят от величины магнитного потока в воздушном зазоре машины и степени насыщения магнитной цепи;
- магнитный поток асинхронного двигателя определяется током обмоток статора и ротора, а следовательно, зависит от нагрузки на валу;
- активное сопротивление ротора зависит от скорости его вращения из-за эффекта вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора.

Таким образом, в связи с нелинейностью реальной асинхронной машины её идеализированная динамическая модель не может адекватно отображать все режимы работы. Параметры, соответствующие пусковому режиму, не позволяют адекватно описать номинальный режим работы, и наоборот. Поскольку наиболее часто целью построения динамических моделей является исследование работы двигателя в номинальном режиме, то параметры его схемы замещения выбираются таким образом, чтобы модель обеспечивала наиболее полную адекватность характеристикам электродвигателя в этом режиме. Следовательно, возникает проблема выбора параметров схемы замещения так, чтобы её характеристики соответствовали характеристикам моделируемого асинхронного двигателя в номинальном режиме.

Основным источником информации о реальных асинхронных машинах являются только каталоги различных производителей, в которых приводятся только номинальные данные: номинальная мощность двигателя P_n ; номинальное линейное напряжение U_n ;

номинальная частота питающей сети f_n ; число пар полюсов статора p ; синхронная частота вращения магнитного поля статора n_0 ; номинальное скольжение ротора s_n ; критическое скольжение s_k ; коэффициент мощности в номинальном режиме работы $\cos \varphi_n$; коэффициент полезного действия в номинальном режиме η_n ; кратность пускового тока k_i ; кратность пускового момента k_p ; кратность максимального момента k_m . Только для двигателей серии 4А [1] дополнительно известны параметры упрощённой Г-образной схемы замещения. Для остальных современных асинхронных электродвигателей подобные данные недоступны. Поэтому при построении динамической модели асинхронного электропривода всегда возникает задача определения адекватных параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя исходя только из его номинальных характеристик. Степень адекватности этих параметров определяется совпадением в модели статических значений зависимости электромагнитного момента двигателя от скольжения ротора $M(s)$ в области $0 < s \leq s_k$ со значениями данной зависимости, построенной по каталожным параметрам. То есть полученные при исследовании динамической модели значения электромагнитного момента при номинальной частоте вращения, максимальный момент и критическое скольжение должны быть близкими к каталожным значениям.

Методы и средства исследований

Однозначного решения задачи определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя через каталожные данные не существует, поскольку невозможно найти пять неизвестных переменных, имея только две точки механической характеристики, связывающие их. Поэтому все известные методики определения этих параметров носят субъективный характер, основаны на ряде допущений [7, 9, 10, 11, 14] и направлены на определение указанных параметров, обеспечивающих требуемую форму механической характеристики в заданном диапазоне частоты вращения ротора. Все эти методики можно разделить на две группы: использующие дополнительные точки механической характеристики путём учёта частичной нагрузки двигателя [10, 14] и не использующие точки частичной нагрузки [7, 9, 11].

Рассмотрим степень эффективности применения этих методик на конкретном примере асинхронного электродвигателя марки 4А112М2У3 со следующими каталожными данными: $P_n = 7,5$ кВт; $U_n = 380$ В; $f_n = 50$ Гц; $p = 1$; $n_0 = 3000$ об/мин.; $s_n = 0,026$; $s_k = 0,108$; $\cos \varphi_n = 0,88$; $\eta_n = 0,875$; $k_i = 7,5$; $k_p = 2$; $k_m = 2,2$. Согласно [1] для этого двигателя параметры Г-образной схемы замещения имеют следующие значения: $R_1 = 0,766$ Ом; $X_1 = 0,966$ Ом; $R_2 = 0,466$ Ом; $X_2 = 2,33$ Ом; $X_m = 61,64$ Ом.

Пользуясь каталожными данными, можно по известным выражениям [14] определить номинальный момент двигателя $M_n = 24,51$ Н·м, номинальный ток $I_n = 14,758$ А, максимальный электромагнитный момент $M_m = k_m M_n = 2,2 \cdot 24,51 = 53,92$ Н·м и пусковой момент двигателя $M_p = k_p M_n = 2 \cdot 24,51 = 49,02$ Н·м. Согласно этим данным номинальная частота вращения ротора составляет 2922 об/мин., а максимальный момент соответствует частоте вращения ротора 2676 об/мин. На рисунке 1 представлена механическая характеристика двигателя 4А112М2У3.

Информация, приведённая на рисунке 1, показывает, что механическая характеристика соответствует каталожным данным (не считая пускового момента) в диапазоне скольжений $0 < s \leq s_k$.

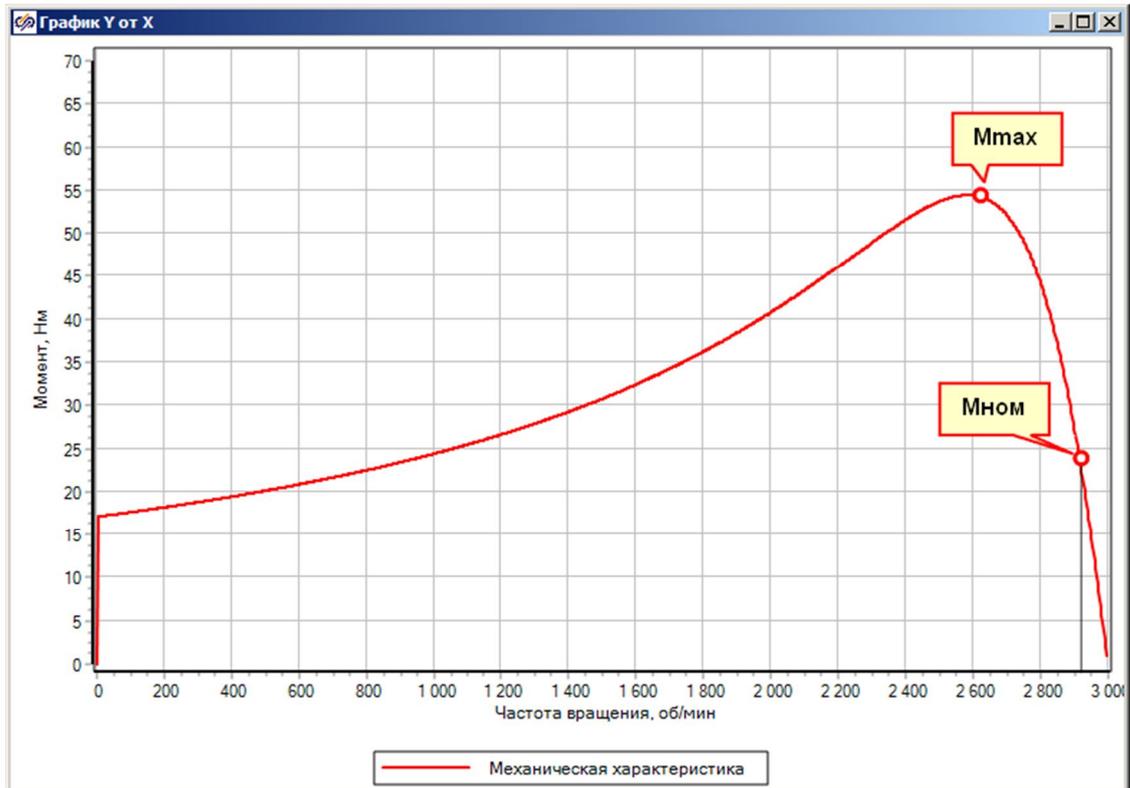


Рис. 1. Механическая характеристика двигателя 4A112M2У3, полученная на основе Г-образной схемы замещения

Далее построим динамическую модель асинхронного электродвигателя с помощью системы визуального моделирования Simulink [7, 11] (рис. 2).

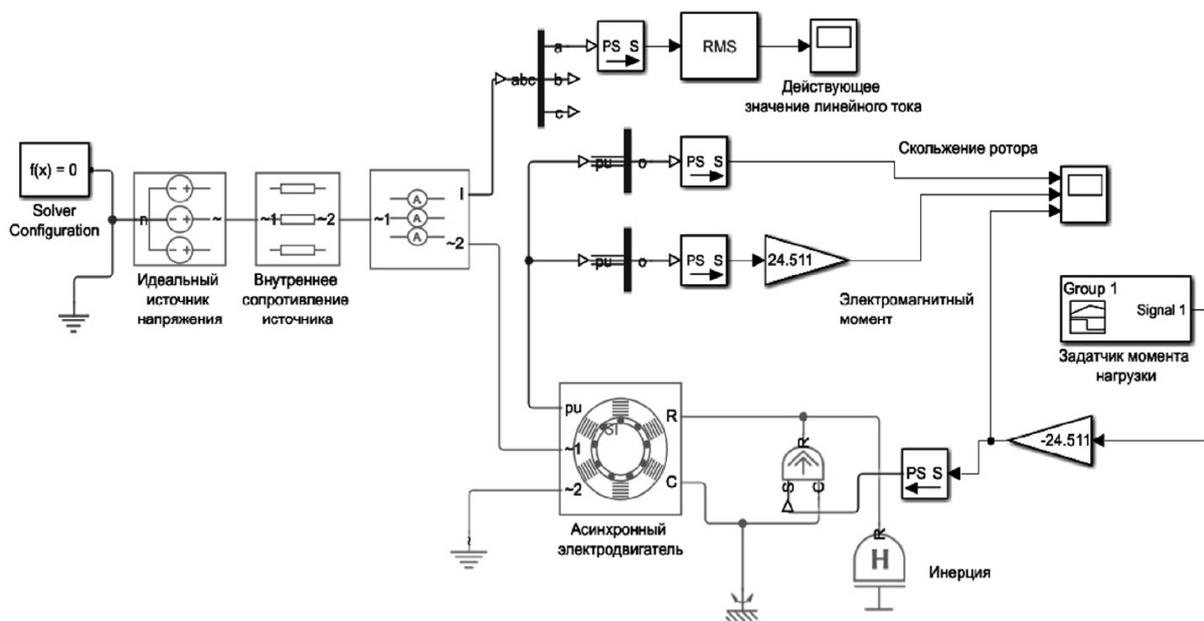


Рис. 2. Динамическая модель асинхронного электродвигателя

На рисунке 3 представлена диаграмма изменения электромагнитного момента и скольжения ротора двигателя при изменении нагрузки от нулевого значения до максимально возможного при сохранении его устойчивой работы. На кривых рисунка 3

нетрудно заметить, что значения скольжения и электромагнитного момента при номинальной нагрузке практически соответствуют каталожным данным. В то же время значение максимального момента, полученное с помощью динамической модели, несколько меньше каталожного. Таким образом, параметры схемы замещения асинхронной машины R_1 , X_1 , R_2 , X_2 , X_m можно считать адекватными. Также установлено, что при номинальной нагрузке значение тока соответствует каталожному. Это можно считать ещё одним признаком адекватности динамической модели реальному электродвигателю.

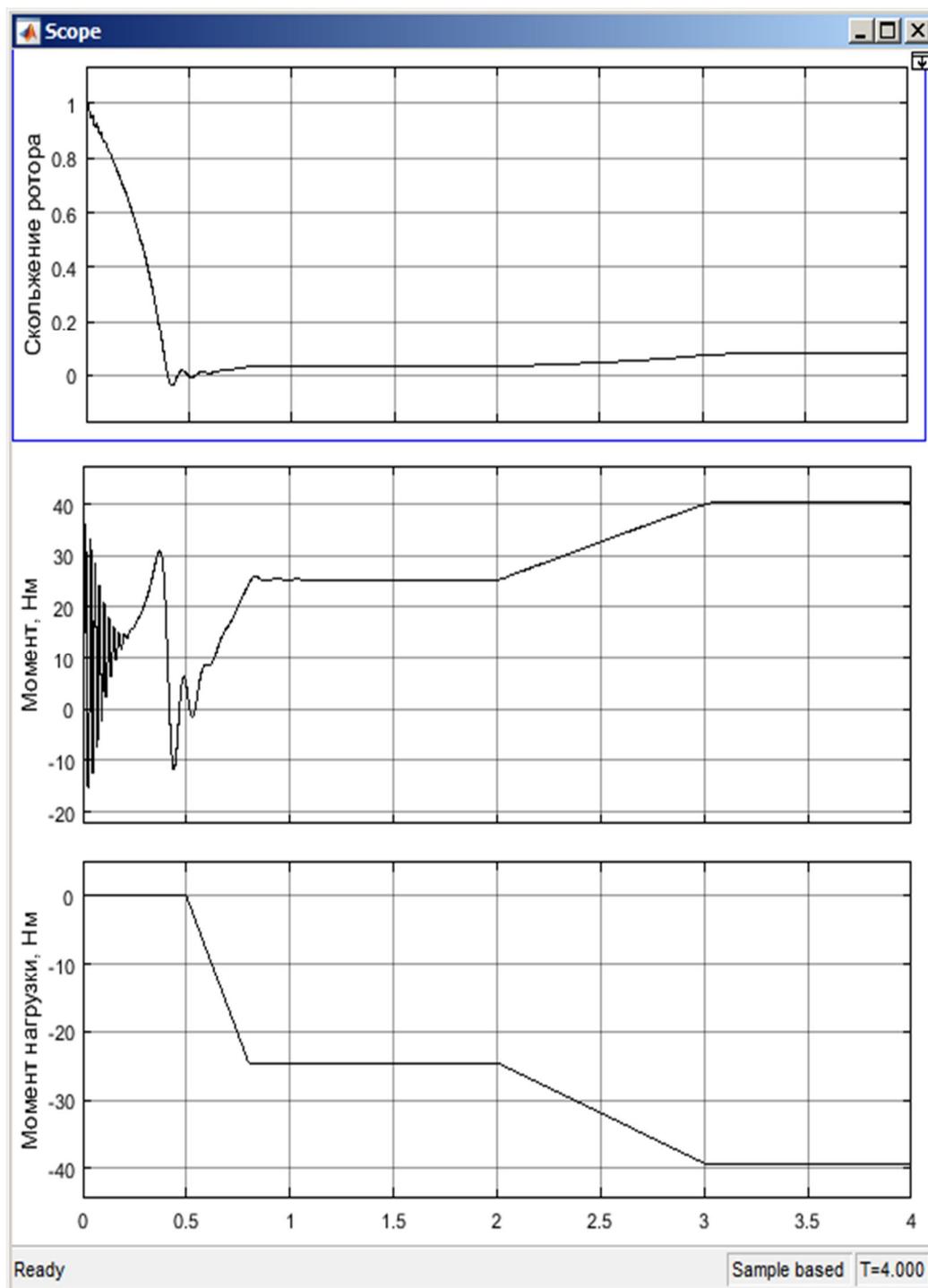


Рис. 3. Скольжение ротора и электромагнитный момент двигателя при различной нагрузке

В случае, когда параметры схемы замещения неизвестны, можно попытаться их определить, используя разные методики. Рассмотрим три наиболее известные: первая приведена в работе В.Б. Терехина [11], вторая – в работе С.Г. Герман-Галкина [7], третья – в работе Ю.А. Мощинского [10].

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены результаты расчёта параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя 4А112М2У3 по трём методикам, а на рисунке 4 – зависимости вращающего момента от скольжения ротора, построенные по параметрам из таблицы 1. В таблице 2 представлены основные значения зависимостей, показанных на рисунке 4. На них видно, что наиболее близкой к каталожной кривой является зависимость, построенная по параметрам, полученным по третьей методике, приведённой в работе Ю.А. Мощинского [10].

Таблица 1. Результаты расчёта параметров схемы замещения (Ом)

Источник	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Каталожные параметры	0,766	0,958	0,466	2,330	61,575
Первая методика	0,396	0,894	0,472	0,894	55,760
Вторая методика	1,147	0,489	0,311	0,489	31,070
Третья методика	0,628	1,500	0,390	2,057	128,190

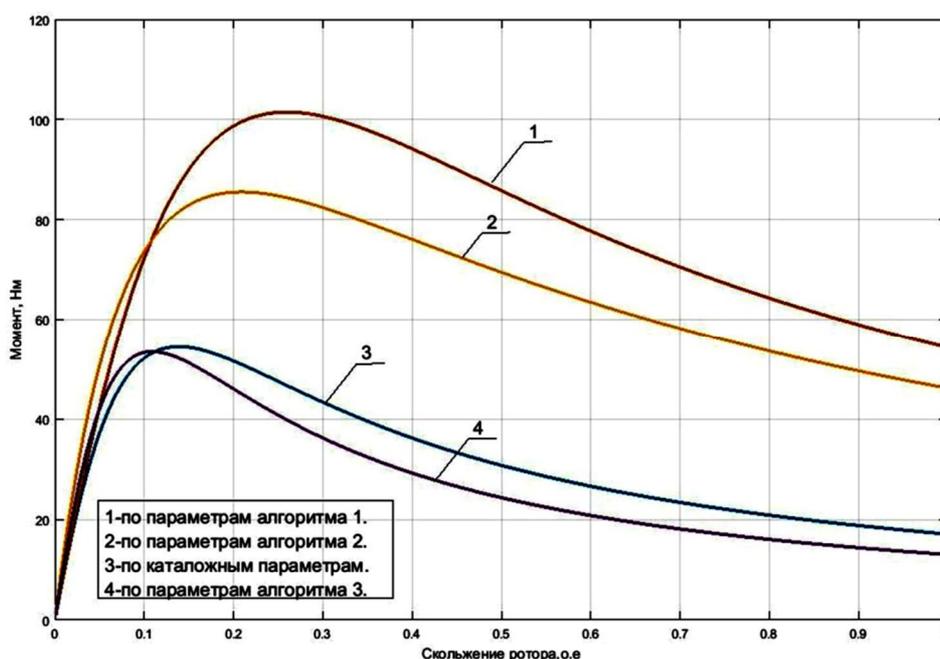


Рис. 4. Зависимости вращающего момента от скольжения ротора, построенные по параметрам, представленным в таблице 1

Таблица 2. Значения номинального и максимального моментов и скольжения ротора

Источник	Номинальный момент M_n , Н·м	Номинальное скольжение s_n	Максимальный момент M_m , Н·м	Критическое скольжение s_k
Каталожные значения	24,511	0,026	53,9	0,108
По каталожным данным схемы замещения	24,5	0,029	54,46	0,139
Первая методика	24,5	0,028	101,5	0,26
Вторая методика	24,5	0,0195	85,52	0,209
Третья методика	24,5	0,024	52,8	0,092

Учитывая, что все рекомендуемые методики определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя основаны на ряде допущений и носят субъективный характер, то для получения более адекватных каталожным данным зависимостей вращающего момента от скольжения ротора предлагаем следующую методику определения этих параметров.

Вначале по каталожным данным по третьей методике [10] в качестве начального приближения определяются параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя.

Далее, используя каталожные значения номинального момента M_n , номинального скольжения s_n , максимального момента M_m и критического скольжения s_m , подбираем значения активных R_1, R_2 и индуктивных X_1, X_2, X_m сопротивлений путём минимизации следующей целевой функции:

$$F = \alpha_1 [M_n - M(s_n)]^2 + \alpha_2 (M_m - M_k)^2 + \alpha_3 (s_m - s_k)^2, \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты;

$M(s_n)$ – вычисленное значение момента при номинальном скольжении s_n для текущих значений параметров, Н·м;

M_k – вычисленное значение максимального момента для текущих значений параметров, Н·м;

s_k – вычисленное значение критического скольжения для текущих значений параметров.

$$M(s_n) = \frac{3pU_n^2 R_2}{2\pi f s_n \left[\left(R_1 + \frac{cR_2}{s_n} \right)^2 + (X_1 + cX_2)^2 \right]}; \quad (2)$$

$$M_k = \frac{3pU_n^2}{4\pi f c \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX_2)^2} \right)}; \quad (3)$$

$$s_k = \frac{cR_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX_2)^2}}; \quad (4)$$

$$c = \left| 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \right|, \quad (5)$$

где f – частота питающего напряжения, Гц;

Z_1 и Z_m – полные сопротивления обмотки статора и ветви намагничивания Т-образной схемы замещения, Ом.

Минимизация целевой функции (1) с помощью программы `fminunc` пакета программ MATLAB позволила получить параметры схемы замещения асинхронной машины, очень близкие к каталожным. Результаты оптимизации приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты поиска оптимальных параметров

Источник	R_1	X_1	R_2	X_2	X_m
Каталожные параметры	0,766	0,958	0,466	2,33	61,575
Третья методика	0,628	1,500	0,390	2,057	128,190
Оптимальные параметры	0,754	1,010	0,440	2,270	62,372

На рисунке 5 приведены зависимости вращающего момента от скольжения ротора, полученные по каталожным параметрам и по оптимальным параметрам из таблицы 3.

Зависимость вращающего момента от скольжения ротора, рассчитанная по оптимизированным данным, практически совпадает с каталожной.

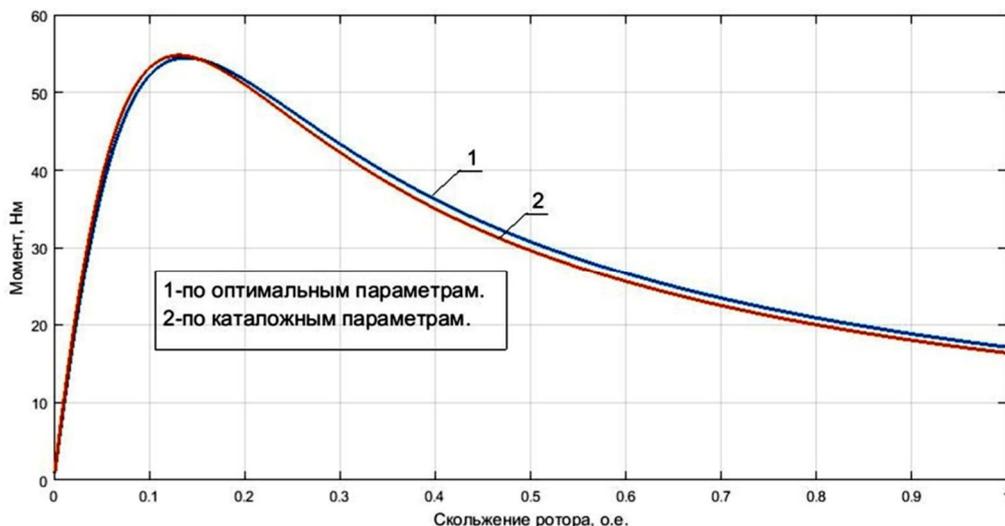


Рис. 5. Зависимости вращающего момента от скольжения ротора, полученные по каталожным данным и по оптимальным параметрам из таблицы 3

Результаты исследования динамической модели двигателя с оптимальными параметрами приведены на рисунке 6.

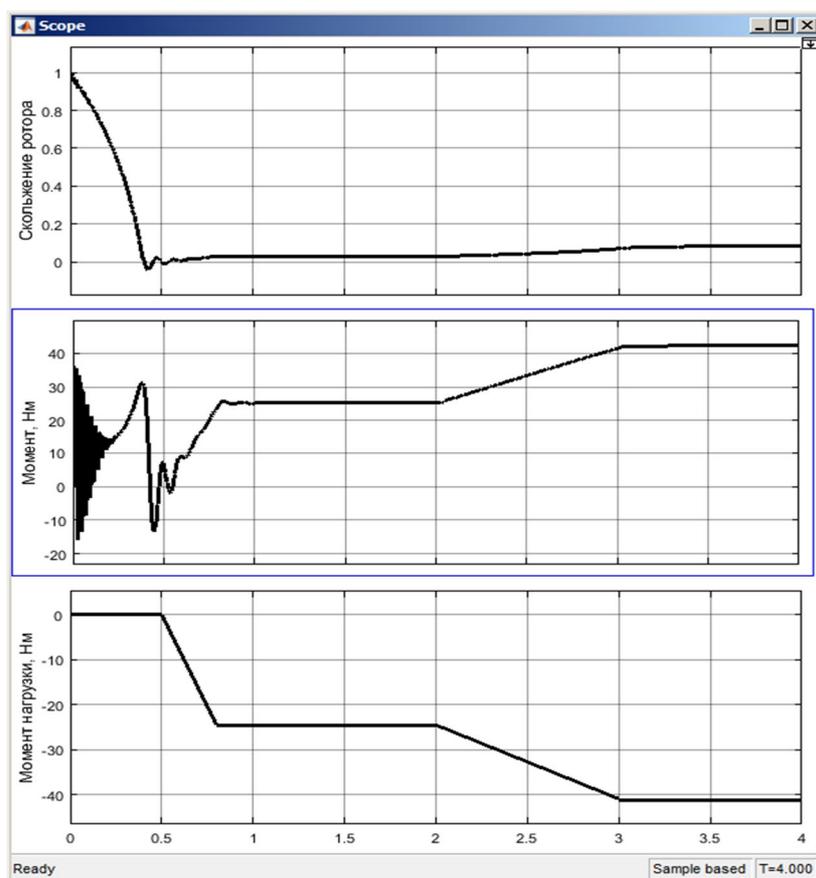


Рис. 6. Результаты исследования динамической модели двигателя с оптимальными параметрами

Предложенная методика, позволяющая получить адекватные параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя, может быть использована при разработке

энергосберегающих частотно управляемых асинхронных электроприводов [4, 5, 15], совершенствовании конструкций асинхронных электродвигателей [6, 12].

Выводы

1. При построении динамической модели асинхронного электропривода возникает задача вычисления параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, исходя только из его номинальных характеристик, степень адекватности которых определяется совпадением в модели статических значений зависимости электромагнитного момента двигателя от скольжения ротора со значениями этой зависимости, построенной по каталожным параметрам.

2. Расчёты параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя 4А112М2У3, выполненные по трём известным методикам, приведённым в работах В.Б. Терехина [11], С.Г. Герман-Галкина [7] и Ю.А. Мощинского [10], показали, что получить наиболее близкие к каталожным значения позволяет методика Ю.А. Мощинского. При этом следует отметить наличие заметных отклонений значений зависимостей вращающего момента от скольжения ротора (при скольжении ротора, близком к критическому), определённых по каталожным и вычисленным параметрам.

3. Предложенная авторами методика обоснования параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя, основанная на минимизации функции квадратов отклонений каталожных значений номинального момента, максимального момента и критического скольжения от их вычисленных значений для текущих значений параметров, позволяет найти значения, очень близкие к каталожным, при практическом совпадении зависимостей вращающего момента от скольжения ротора, установленных по каталожным и вычисленным параметрам, что даёт основание рекомендовать данную методику для использования.

Библиографический список

1. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соколенская. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 503 с.
2. Афоничев Д.Н. Информационные системы в электроэнергетике : учеб. пособие / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – 234 с.
3. Афоничев Д.Н. Математическая модель управляемого асинхронного электродвигателя / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, М.А. Степин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : матер. международной науч.-практ. конф., посвященной 115-й годовщине со дня рождения профессора Харитончика Е.М. (Россия, г. Воронеж, 6 апреля 2017 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – Ч. 2. – С. 10–15.
4. Афоничев Д.Н. Повышение энергоэффективности систем сельскохозяйственного электроснабжения средствами электропривода / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, Н.Э. Шубин // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК : матер. международной науч.-практ. конф. (Россия, г. Воронеж, 27 марта 2020 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – Ч. 2. – С. 209–214.
5. Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода : учебник / Б.Ю. Васильев. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 350 с.
7. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК : учеб. пособие для вузов / С.Г. Герман-Галкин. – Санкт-Петербург : КОРОНА Век, 2008. – 368 с.
8. Епифанов А.П. Электропривод : учеб. пособие / А.П. Епифанов, Л.М. Малайчук, А.Г. Гуцинский. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 392 с.
9. Калачев Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе : инструкция по пониманию / Ю.Н. Калачев. – Москва : ДМК-Пресс, 2019. – 95 с.
10. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.
11. Терёхин В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода в Simulink : учеб. пособие для СПО / В.Б. Терёхин, Ю.Н. Дементьев. – Москва : Изд-во Юрайт, 2018. – 306 с.
12. Филонов С.А. Поиск рациональных конструкций и моделирование асинхронных двигателей с массивным зубчатым ротором : монография / С.А. Филонов. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – 120 с.
13. Фролов Ю.М. Регулируемый асинхронный электропривод : учеб. пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 464 с.
14. Электропривод типовых производственных механизмов : учеб. пособие для академического бакалавриата / Ю.Н. Дементьев, В.М. Завьялов, Н.В. Кояин, Л.С. Удут. – Москва : Изд-во Юрайт, 2019. – 403 с.
15. Эрк А.Ф. Методы энергосбережения и повышения энергоэффективности сельскохозяйственного производства / А.Ф. Эрк, В.Н. Судаченко // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2015. – № 87. – С. 233–239.
16. Lyshevski S.E. Electromechanical systems and devices / S.E. Lyshevski. – 1st edition. – US: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 584 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Сергей Николаевич Пиляев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 18.11.2020

Дата принятия к печати 24.12.2020

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Sergey N. Pilyaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Dmitriy N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Received November 18, 2020

Accepted after revision December 24, 2020