

УДК 621.313.32

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.09

И.Ю. Сажин^{1,2}, Е.А. Чабанов¹, Е.В. Чабанова³¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ООО «Энергосетевая компания «Парма»», Пермь, Россия³Пермский государственный аграрно-технологический университет
им. ак. Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В настоящее время наиболее часто встречаются три основных типа электрических машин – переменного (синхронные и асинхронные) и постоянного тока. Каждая из них в силу особенностей своей конструкции обладает определенными способами пуска при работе в режиме двигателя. Объектом исследований в данной статье является синхронная машина, представляющая особый интерес по сравнению с другими типами электромеханических преобразователей по причине интенсивного использования ее в силовых электроэнергетических установках не только в качестве источника электрической, но и механической энергии, для получения которой возникает необходимость ее запуска. Существует несколько способов пуска синхронного двигателя, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками, для выявления которых была исследована разработанная модель синхронной машины и различных типов источников электрической энергии. Исследования показали, что наибольший интерес представляют частотные методы пуска синхронной машины, поскольку невмешательство в конструкцию машины позволит продолжить ее эксплуатацию. **Цель исследования:** разработка модели синхронного двигателя и различных типов источников электрической энергии; исследование пусковых характеристик машины, подключенной к различным источникам питания. **Методы:** исследования пусковых характеристик синхронного двигателя от различных источников питания выполнялись в среде Matlab (Simulink), для чего были разработаны математические модели синхронного двигателя и трех источников электропитания. **Результаты:** исследования подтвердили, что из четырех способов пуска синхронного двигателя частотный действительно обладает рядом преимуществ по сравнению с остальными. Время переходного процесса при таком пуске синхронного двигателя значительно снижается, поэтому коэффициент полезного действия машины наибольший, поскольку она быстрее выходит на номинальный режим и начинает выполнять свои функции. Наименьший тепловой импульс, наблюдаемый при этом, свидетельствует о малых тепловых потерях, что также благотворно влияет на работу синхронного двигателя и источника электропитания. Однако частотный пуск синхронного двигателя обладает существенным недостатком – пусковой ток имеет большое значение, соизмеримое с величиной тока статора при прямом пуске. **Практическая значимость:** анализ данных, полученных при исследованиях, а именно время пуска, величина теплового импульса и критического момента, позволит в дальнейшем оптимально настраивать электроэнергетические системы, содержащие синхронные двигатели, с целью повышения их коэффициента полезного действия, а также упростит процесс идентификации параметров синхронной машины, спектральный и вейвлет-анализ их переходных процессов.

Ключевые слова: электрические машины, пуск синхронного двигателя, синхронный двигатель, прямой пуск, частотный пуск, пуск через регулятор напряжения, модель синхронного двигателя.

I.Yu. Sazhin^{1,2}, E.A. Chabanov¹, E.V. Chabanova³

¹LLC Energy Grid Company "Parma", Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³State Agro-Technological University named after D.N. Pryanishnikov,
Perm, Russian Federation

SIMULATION OF STARTING MODES OF A SYNCHRONOUS MOTOR SUPPLIED FROM DIFFERENT SOURCES

Currently, the most common three main types of electrical machines – alternating (synchronous and asynchronous) and direct current. Each of them, due to the peculiarities of its design, has certain starting methods when operating in engine mode. The object of research in this article is a synchronous machine, which is of particular interest in comparison with other types of electromechanical converters due to its intensive use in power electric power plants not only as a source of electrical, but also mechanical energy, for which it becomes necessary to start it. There are several ways to start a synchronous motor, each of which has its own advantages and disadvantages, for the identification of which the developed models of a synchronous machine and various types of sources of electrical energy were studied. Studies have shown that the most interesting are the frequency methods of starting a synchronous machine, since non-interference in the design of the machine will allow its continued operation. **Purpose of the research:** development of a model of a synchronous motor and various types of sources of electrical energy; investigation of the starting characteristics of a machine connected to various power sources. **Methods:** studies of the starting characteristics of a synchronous motor from various power sources were carried out in the Matlab (Simulink) environment, for which mathematical models of a synchronous motor and three power supplies were developed. **Results:** studies have confirmed that of the four ways to start a synchronous motor, the frequency one really has a number of advantages over the others. The time of the transient process with such a start of a synchronous motor is significantly reduced, therefore the efficiency of the machine is the greatest, since it quickly reaches the nominal mode and begins to perform its functions. The smallest thermal impulse observed in this case indicates low thermal losses, which also has a beneficial effect on the operation of the synchronous motor and power supply. However, the frequency start of a synchronous motor has a significant drawback - the starting current is of great importance, commensurate with the magnitude of the stator current during direct start. **Practical significance:** the analysis of the data obtained during the research, namely the start-up time, the magnitude of the thermal impulse and the critical moment, will allow in the future to optimally tune electric power systems containing synchronous motors in order to increase their efficiency, and also simplify the process of identifying the parameters of a synchronous machine, spectral and wavelet analysis of their transient processes.

Keywords: electrical machines, start of a synchronous motor, synchronous motor, direct start, frequency start, start through a voltage regulator, model of a synchronous motor.

Введение

В настоящее время используется все большее количество электрических двигателей, поэтому потребление электроэнергии в мире увеличивается с каждым годом. Различные предприятия, заводы, фабрики по производству разнообразных товаров, а также организации, генерирующие электроэнергию, эксплуатируют электрические машины больших мощностей [1], в качестве которых чаще всего применяют синхронные электромеханические преобразователи. Машины подобной

конструкции в зависимости от надобности могут эксплуатироваться в качестве двигателя или генератора. Широкое применение синхронных машин (СМ) в качестве источника электрической или механической энергии обусловлено следующими преимуществами:

- СМ может работать при коэффициенте мощности $\cos \varphi = 1$;
- СМ обладают более высоким, чем у асинхронных машин, коэффициентом полезного действия $\eta = (97 \dots 98) \%$;
- конструктивные особенности СМ обеспечивают повышенную механическую надежность;
- в СМ есть возможность реализации достаточно простого способа регулирования частоты вращения ротора путем изменения его тока, что позволяет увеличить перегрузочную способность двигателя;
- СМ практически не чувствительны к изменению напряжения в электросети.

Однако использование СМ приводит к появлению новых проблем, связанных с их пуском. Так, например, при прямом пуске СМ, при котором машина запускается при номинальном напряжении на статоре с полной нагрузкой на валу, т.е. в так называемом асинхронизированном режиме, в цепи статора подобно асинхронной машине возникают токи, значительно превосходящие номинальные значения более чем в 7 раз. Такое воздействие на элементы конструкции СМ со стороны электрических цепей статора принято называть ударным, потому что машина в эти моменты испытывает сильнейший силовой удар, обусловленный токами большой величины, протекающими в магнитном поле индуктора. Эти ударные нагрузки могут привести к механическим перегрузкам и даже к конструктивным повреждениям не только на самом двигателе, но и на исполнительных механизмах. Повреждения СМ и подключенных к ней исполнительных механизмов могут привести к увеличению финансовых затрат на обслуживание и ремонт в случае выхода из строя оборудования. Значительный рост пускового тока статора СМ при соизмеримости мощности машины и источника питания может привести к увеличению тепловых потерь и снижению напряжения электросети. Падение напряжения может стать настолько значительным, что электромагнитный момент двигателя при пуске может оказаться соизмеримым с моментом сопротивления. В таком случае пуск двигателя может затянуться, что приведет к перегреву его обмоток

или станет вовсе невозможным. Подобные сбои в работе могут также негативно отразиться на работе другого технологического оборудования, подключенного к валу двигателя или получающего электроэнергию от того же источника питания. Очевидно, поиск методов безопасного пуска СМ, по обмоткам статора которой будут протекать токи, совпадающие с номинальными, или, в крайнем случае, незначительно превышающие их, является весьма актуальным. Верное решение проблемы пуска СМ сможет повысить безотказность функционирования как самой машины, так и потребителей механической и электрической энергии, особенно при соизмеримости мощностей двигателя и питающей электросети. Применение способов пуска СМ, решающих описанную проблему, позволит также увеличить жизненный цикл оборудования, уменьшить вероятность выхода из строя двигателей и другого технологического оборудования, а также избежать возникновения аварийных ситуаций. Поэтому в данной работе представлены результаты исследований, связанных с разработкой математической модели СМ и различных источников питания, а также с анализом пусковых характеристик СМ, получающей электропитание от этих источников. В ходе исследований были рассмотрены три источника электропитания, обеспечивающих прямой пуск СМ, пуск через регулятор частоты и пуск при одновременном регулировании частоты и напряжения. Для исследования различных режимов пуска СМ была использована математическая модель синхронного двигателя в осях d и q [2, 3]. Применение математического моделирования позволит на стадии проектирования конкретных технологических систем выбирать соответствующие способы пуска СМ и в дальнейшем подбирать необходимое оборудование для реализации этих способов. Математические модели, реализующие СМ и различные источники питания, адаптированы для конкретных исследований разных способов пуска двигателя с целью определения его основных характеристик – электромагнитного момента максимального и критического, тока статора максимального и ударного, времени пуска и теплового импульса. Анализ этих характеристик позволит в дальнейшем принять верное обоснованное решение по выбору оптимального способа пуска СМ.

Еще одним недостатком синхронной машины является отсутствие достаточного пускового момента. Инерционность ротора, обусловлен-

ная его значительной массой, не позволяет двигателю развить частоту его вращения до величины, соизмеримой с частотой магнитного поля статора. Эти частоты станут равны при подключении обмотке ротора к источнику электрической энергии постоянного тока. Другой способ достижения равенства частот – передача ротору дополнительной механической энергии от внешнего источника (дополнительного двигателя меньшей мощности), который обеспечит раскручивание ротора мощной СМ до частоты, близкой к синхронной. В этом случае двигатель втягивается в синхронизм, т.е. ротор начинает вращаться с частотой вращения поля статора, т.е. с синхронной частотой [4, 5].

Существует несколько способов пуска СМ, которые можно разбить на три основные категории [6]:

- пуск СМ с помощью разгонного двигателя;
- прямой асинхронный пуск СМ;
- частотный пуск СМ.

Математическая модель синхронной машины

Для математического описания электрических машин применяют следующие системы координат: (α, β) ; (d, q) ; (u, v) [7–9], а именно:

– система координат (α, β) является неподвижной относительно статора. Её применяют для исследования асинхронных машин, при этом параметры двигателя по оси α равны параметрам фазы «А» в трехфазной системе координат [10];

– система координат (d, q) жестко связана с ротором СМ, поэтому применяется для их исследования. Ось d – продольная ось машины, ось q – поперечная;

– система координат (u, v) является синхронно вращающейся, поэтому применяется для машин с вращающимся ротором и статором.

Рассмотрим математическую модель синхронного двигателя в осях d и q , который в данном случае описывается следующими дифференциальными уравнениями [9, 11]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= u_d + \omega \cdot \psi_q - R_c \cdot i_d; & \frac{d\psi_q}{dt} &= u_q - \omega \cdot \psi_d - R_c \cdot i_q; \\ \frac{d\psi_f}{dt} &= u_f - R_f \cdot i_f; & \frac{d\psi_{yd}}{dt} &= -R_{yd} \cdot i_{yd}; & \frac{d\psi_{yq}}{dt} &= -R_{yq} \cdot i_{yq}, \end{aligned}$$

где u_s – номинальное напряжение сети; u_f – напряжение возбуждения; ω_0 – синхронная частота вращения; ω – частота вращения ротора; θ – угол нагрузки; J – приведенный момент инерции; m_c – момент сопротивления; $R_c, R_f, R_{yd} = R_{yq}$ – активные сопротивления статора, обмотки возбуждения и демпферной обмотки; L_d, L_q – индуктивности обмотки статора по продольной и поперечной осям; L_{ad}, L_{aq} – взаимные индуктивности обмоток по продольной и поперечной осям; L_f – индуктивность обмотки возбуждения; L_{yd}, L_{yq} – индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осям.

В состав системы входят уравнения напряжений по продольной и поперечной осям d и q , а также уравнения обмоток возбуждения и демпферной по тем же осям. При этом потокосцепления обмоток описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\Psi_d &= L_d \cdot i_d + L_{ad} \cdot (i_f + i_{yd}); \Psi_q = L_q \cdot i_q + L_{aq} \cdot i_{yq}; \Psi_f = L_f \cdot i_f + L_{ad} \cdot (i_d + i_{yd}); \\ \Psi_{yd} &= L_{yd} \cdot i_{yd} + L_{ad} \cdot (i_d + i_f); \Psi_{yq} = L_{yq} \cdot i_{yq} + L_{aq} \cdot i_q,\end{aligned}$$

где индуктивности обмоток статора по осям d и q :

$$L_q = L_{aq} + L_{\sigma 1}; L_d = L_{ad} + L_{\sigma 1},$$

где $L_{\sigma 1}$ – индуктивность рассеяния обмоток статора; индуктивности для роторных обмоток и обмотки возбуждения:

$$L_{yq} = L_{aq} + L_{\sigma yq}; L_{yd} = L_{ad} + L_{\sigma yd}; L_f = L_{ad} + L_{\sigma f},$$

где $L_{\sigma yd}, L_{\sigma yq}, L_{\sigma f}$ – индуктивности рассеяния демпферной обмотки по осям d и q и индуктивность рассеяния обмотки возбуждения.

Потокосцепления взаимной индукции:

$$\Psi_{ad} = L_{ad} \cdot (i_d + i_f + i_{yd}); \Psi_{aq} = L_{aq} \cdot (i_q + i_{yq}).$$

Токи контуров статора:

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{ad}}{L_{\sigma 1}}; i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{aq}}{L_{\sigma 1}}.$$

Токи контуров ротора:

$$i_f = \frac{\Psi_f - \Psi_{ad}}{L_{\sigma 1}}; i_D = \frac{\Psi_D - \Psi_{ad}}{L_{\sigma 1}}; i_Q = \frac{\Psi_Q - \Psi_{aq}}{L_{\sigma 1}}.$$

Уравнение движения записывается в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{m_e - m_c}{I},$$

где m_e – электромагнитный момент двигателя, m_c – момент сопротивления на валу синхронного двигателя.

Электромагнитный момент определяется уравнением:

$$m_e = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d.$$

Составляющие напряжения обмотки статора:

$$u_d = -U_c \cdot \sin \theta; u_q = U_c \cdot \cos \theta,$$

где угол нагрузки θ определяется по выражению:

$$\frac{d\theta}{dt} = s = 1 - \omega.$$

Все параметры СМ выражаются в долях базовых величин, в качестве которых целесообразно взять амплитудные значения фазного номинального тока и напряжения статора: $I_6 = I_n$, $U_6 = U_n$. Аналогичным образом в качестве остальных базовых величин следует выбрать соответствующие номинальные параметры СМ, а именно: базовая мощность равна полезной номинальной мощности на валу $P_6 = P_n$, базовая тактовая частота соответствует частоте сети $f_6 = f_c$, угловая частота определяется через базовую тактовую: $\omega_6 = 2 \cdot \pi \cdot f_6 = \omega_1$, базовое полное сопротивление вычисляется через базовые напряжение и ток $Z_6 = \frac{U_6}{I_6}$,

$L_6 = \frac{Z_6}{\omega_6}$ – базовая индуктивность, $M_6 = \frac{P_6}{\omega_6}$ – базовый момент, $t_6 = \frac{1}{f_6}$ –

базовая единица времени. Это позволяет в дальнейшем сравнивать характеристики СМ разных мощностей, так как все величины будут иметь одинаковый порядок, что существенно повлияет на точность расчетов и качество проводимого анализа полученных результатов [9, 12, 13]:

$$I_{n*} = \frac{I_n}{I_6} = 1 \text{ о.е.}; U_{n*} = \frac{U_n}{U_6} = 1 \text{ о.е.};$$

$$P_{2*} = \frac{P_2}{P_6} = \cos \varphi_n \cdot \eta_n \text{ о.е.}; f_{c*} = \frac{f_1}{f_6} = 1 \text{ о.е.}; \omega_{1*} = \frac{\omega_1}{\omega_6} = 1 \text{ о.е.}$$

Реализация математической модели синхронной машины в среде Simulink

В статье представлены результаты исследований пуска неявнополюсного синхронного двигателя серии СТД, а именно СТД-12500-2УХЛ4 [12], параметры которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные исследуемого двигателя
в абсолютных значениях

Параметр	Значение
Активная мощность P_2 , кВт	12500
Полная мощность S_n , кВА	14200
Напряжение U_n , кВ	10
Скорость вращения n_n , об/мин	3000
Коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, %	90,0
Ток возбуждения I_{fn} , А	280,76
Напряжение возбуждения U_{fn} , В	220
Коэффициент полезного действия η_n , %	97,8

Базовые величины для данного двигателя будут следующие:

$$U_6 = \frac{U_n \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{10000 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8164,96 \text{ кВ};$$

$$I_6 = I_n \cdot \sqrt{2} = \frac{S_n \cdot \sqrt{2}}{U_n \cdot \sqrt{3}} = \frac{14200 \cdot 1000 \cdot \sqrt{2}}{10000 \cdot \sqrt{3}} = 1159,42 \text{ А};$$

$$Z_6 = \frac{U_6}{I_6} = \frac{8164,96}{1159,42} = 7,05 \text{ Ом}; \quad \omega_6 = \omega_n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} = \frac{3000 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 314 \text{ рад/с.}$$

Для исследования режимов пуска СМ в среде Simulink (пакет MatLab) была реализована математическая модель синхронного двигателя по представленным выше уравнениям, которые описывают протекающие в нем электромагнитные и механические процессы. Особенность этой модели заключается в том, что реализация осуществлена без применения готового решения библиотеки SimPowerSystem, а собрана на элементной базе простых функциональных блоков. Это позволит в дальнейшем достаточно быстро реализовывать эту модель даже при отсутствии специализированных библиотек, стоимость которых очень

велика. Также в среде Simulink были реализованы модели источников питания [14–18]. На рис. 1 представлена реализация потокосцеплений контуров обмоток синхронного двигателя.

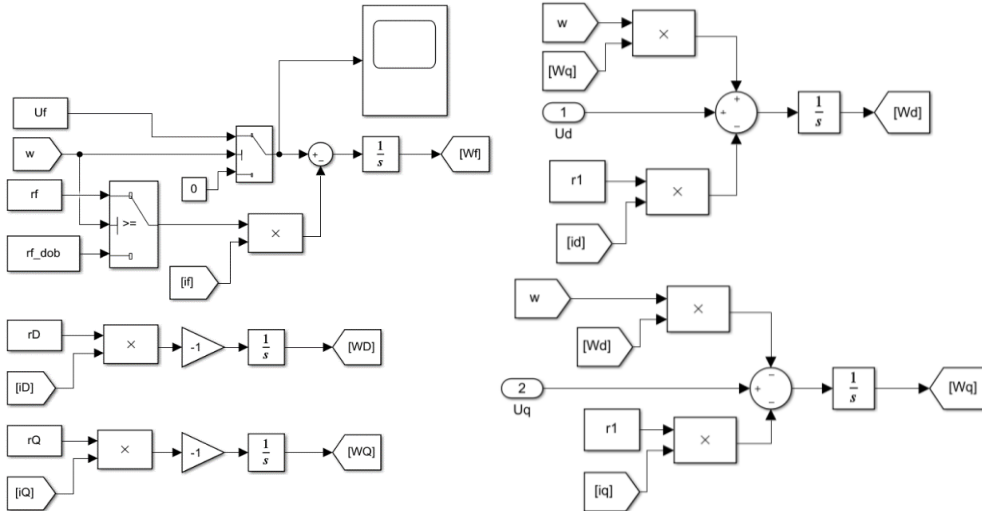


Рис. 1. Модель потокосцеплений контуров обмоток СМ

На рис. 2 представлена реализация токов контуров синхронного двигателя, которые определяются по вычисленным ранее потокосцеплениям этих контуров.

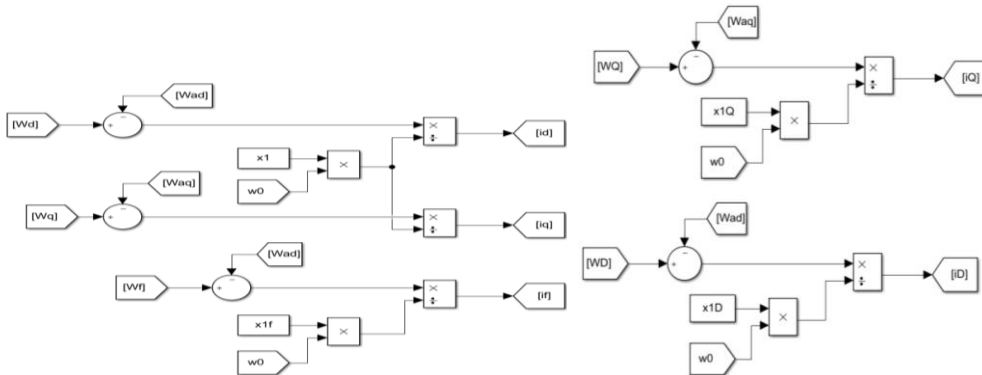


Рис. 2. Модель токов контуров СМ

На рис. 3 представлена реализация электромагнитных процессов двигателя, отражающих взаимосвязь контуров синхронного двигателя.

На рис. 4 представлена реализация уравнения, описывающего движение ротора синхронного двигателя (фрагмент формирования соб-

ственно момента СМ изображен на рис. 5) с приложенным к нему моментом сопротивления, который может быть развит на валу вентилятора (на рис. 6 представлена модель этого момента).

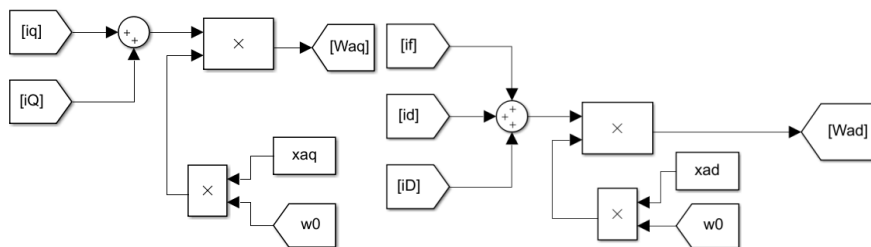


Рис. 3. Модель потокосцеплений взаимной индукции по осям d и q

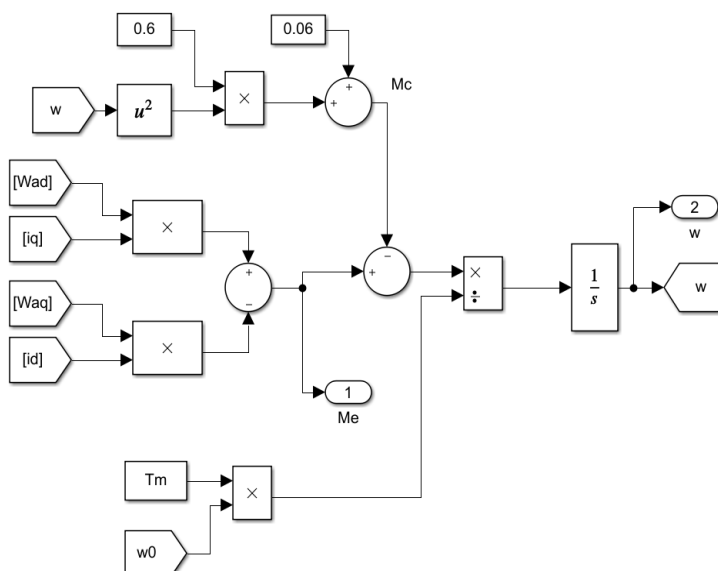


Рис. 4. Модель движения ротора СМ с вентиляторным моментом сопротивления

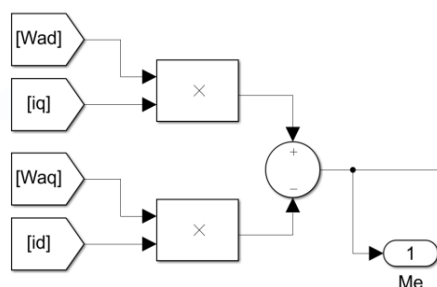


Рис. 5. Фрагмент модели электромагнитного момента двигателя

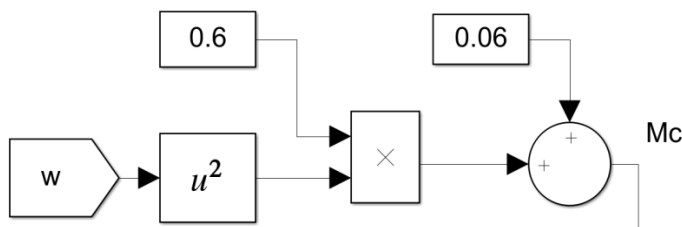


Рис. 6. Модель вентиляторного момента сопротивления

На рис. 7 представлено получение тока i_α через координатные преобразования из системы (d, q) в систему (α, β) (на рисунке γ – угол положения ротора).

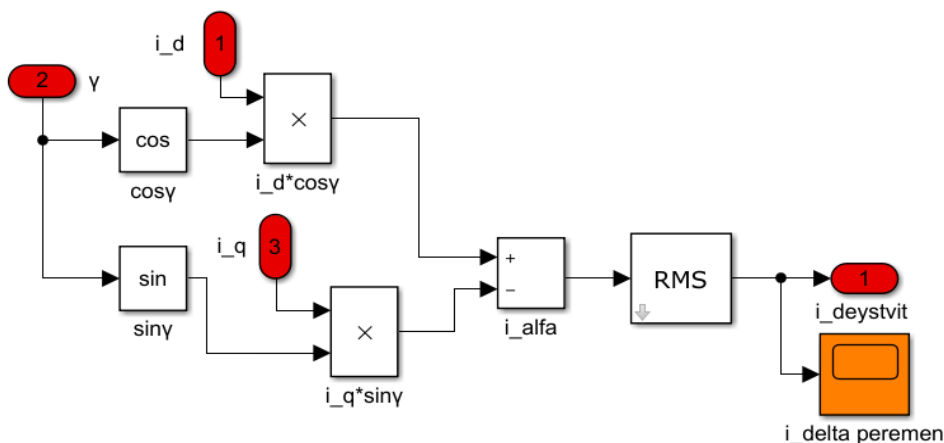


Рис. 7. Вычисление тока i_α через преобразование из (d, q) в (α, β)

Моделирование «прямого пуска» синхронного двигателя

Для реализации «прямого пуска» СМ от источника питания была разработана соответствующая модель источника (рис. 8). Особенность этой модели заключается в том, что она адаптирована для реализации «прямого пуска» синхронного двигателя (рис. 9), который характерен следующими особенностями [16]:

- применяется только при пуске маломощных СМ, так как пуск мощных двигателей может затянуться или окажется невозможным;
- пусковой ток превышает номинальный в 5–7 раз, что может оказать негативное влияние на работу всей электросети;
- включение двигателя в электросеть (особенно большой мощности) может вызвать значительное падение напряжение на ней.

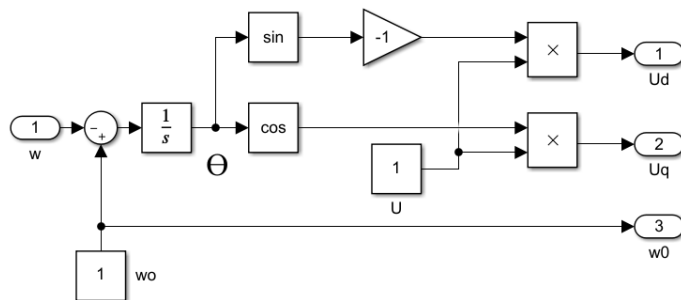


Рис. 8. Модели источника питания от сети для реализации «прямого пуска» СМ

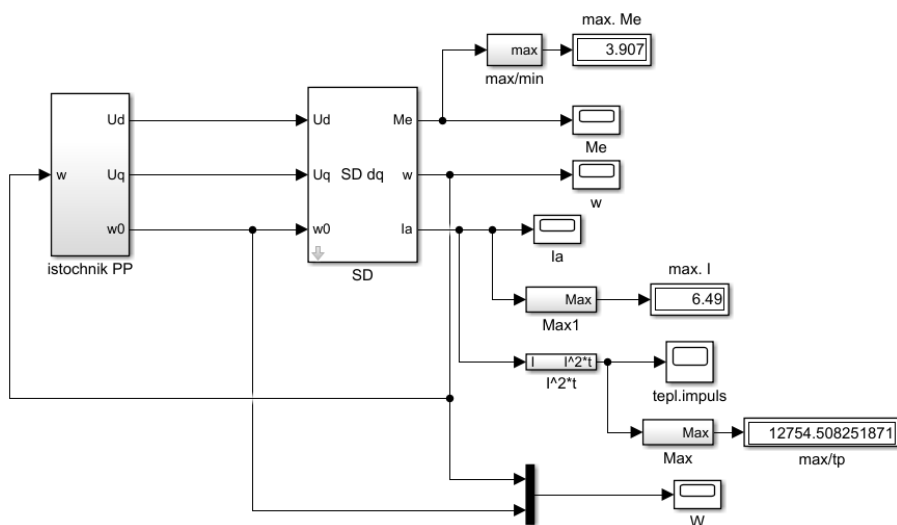


Рис. 9. Модель «прямого пуска» СМ

На рис. 10 представлен результат моделирования «прямого пуска» синхронного двигателя в виде переходного процесса, изображающего зависимость изменения электромагнитного момента СМ в течение времени разгона машины.

Согласно рис. 11 переходный процесс при «прямом пуске» СМ продолжался в течение 630 о.е., что составило около 2 секунд. Представленная на этом рисунке зависимость скорости вращения ротора от времени подтверждает, что «прямой пуск» синхронного двигателя имеет затяжной характер и сопровождается значительным знакопеременным процессом. Рисунок при этом четко отражает наглядность роста скорости вращения ротора и вхождение СМ в синхронизм с магнитным полем статора.

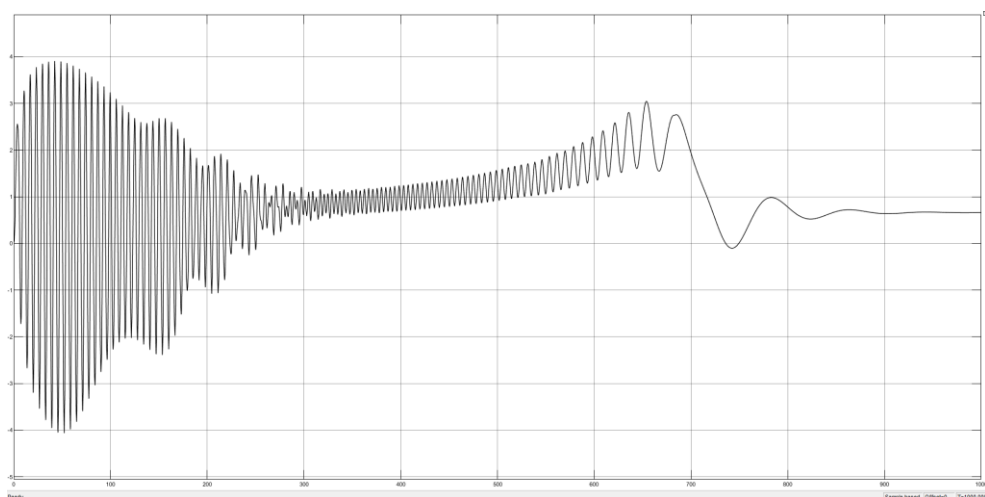


Рис. 10. Электромагнитный момент СМ при «прямом пуске»

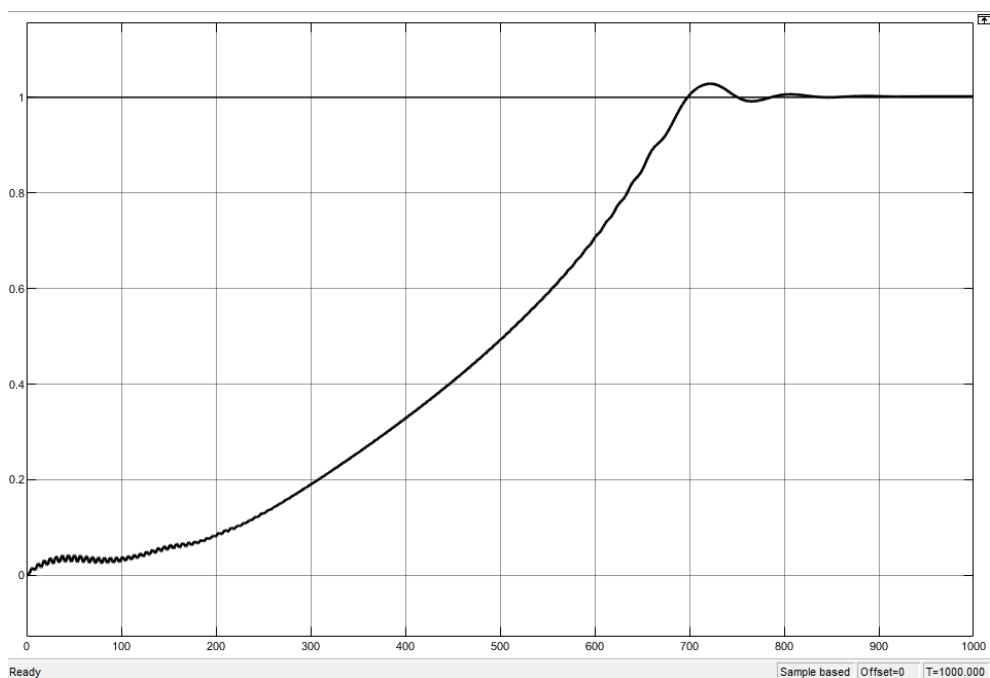


Рис. 11. Скорость вращения ротора СМ при «прямом пуске»

На рис. 12 представлена зависимость тока фазы синхронного двигателя от времени. При «прямом пуске» наблюдаются большие пусковые токи (многократно превышающие номинальное значение), следовательно, такой пуск будет сопровождаться высокими тепловы-

ми потерями. Данный график подтверждает теорию, согласно которой чем больше тепловой импульс, тем больше потерь наблюдается в устройстве. Из рисунка также следует, что во время пуска при разгоне ток достигал больших значений (примерно 6,49 о.е.), а при вхождении ротора в синхронизм с магнитным полем статора рабочий ток стал меньше 1 о.е.

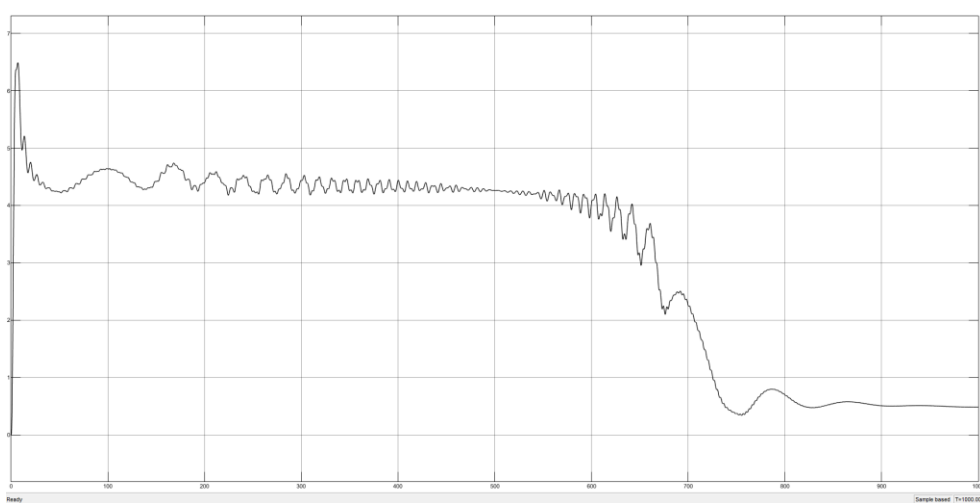


Рис. 12. Зависимость тока фазы СМ от времени

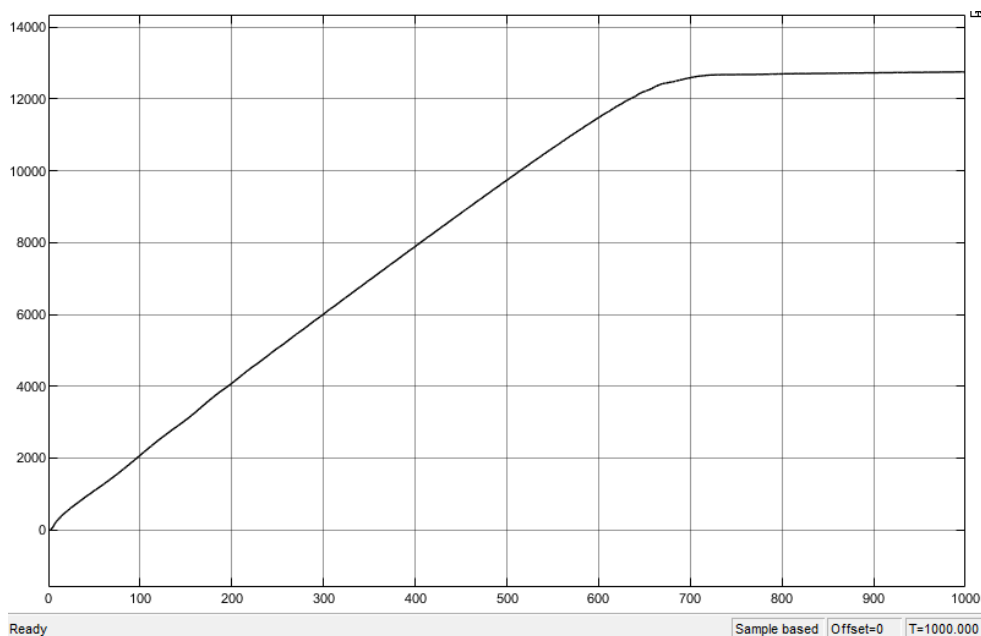


Рис. 13. Тепловой импульс СМ

На рис. 13 представлен график с тепловым импульсом синхронного двигателя, согласно которому:

- 1) ударный ток СМ достигает значения 6,5 о.е.;
- 2) критический момент, действующий на валу СМ, достигает значения 4,5 о.е.

Моделирование частотного пуска синхронного двигателя

Далее представлены результаты исследования частотного пуска синхронного двигателя, который обеспечивается использованием частотных преобразователей. Эти устройства, изготавливаемые в настоящее время из электронных компонентов, изменяют частоту питающего напряжения, подаваемого на рабочие обмотки статора СМ. Уменьшение частоты позволяет замедлить скорость вращения магнитного поля синхронного двигателя [19].

Использование регулятора частоты позволяет реализовать два вида пуска синхронного двигателя:

- 1) асинхронный пуск синхронного двигателя;
- 2) синхронный пуск синхронного двигателя.

Имеется одно существенное различие между этими двумя пусками: при синхронном пуске ротор сразу вступает в синхронизм, а при асинхронном пуске синхронизация происходит ближе к номинальным рабочим значениям. На рис. 14 представлена блочная модель асинхронного пуска синхронного двигателя, питающегося от преобразователя частоты, модель которого, несмотря на свою простоту, так же, как и предыдущие, учитывает все особенности рассматриваемого способа пуска.

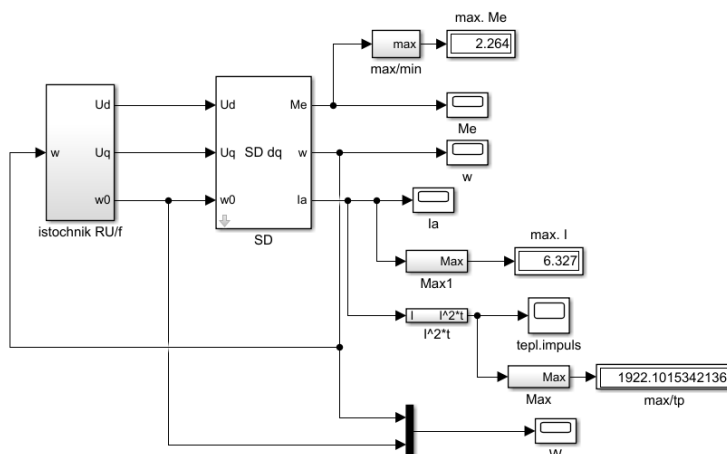


Рис. 14. Модель асинхронного пуска СМ

На рис. 15 представлена блочная модель синхронного пуска синхронного двигателя, питающегося от преобразователя частоты.

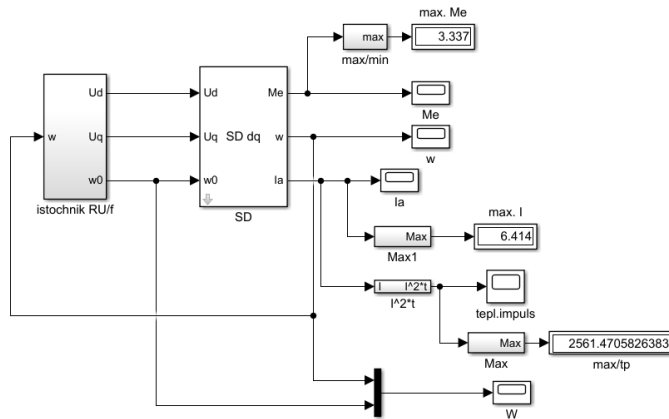


Рис. 15. Модель синхронного пуска СМ

При питании от преобразователя частоты в двух разных случаях пуска наблюдаются отличия в величинах максимальных электромагнитных моментов и тепловых импульсов. Максимальный ток при этом во время пуска примерно одинаковый.

На рис. 16 представлен график изменения скорости ротора синхронного двигателя при синхронном и асинхронном частотном пуске, поскольку при использовании преобразователя частоты в качестве источника электроэнергии данные зависимости будут идентичны.

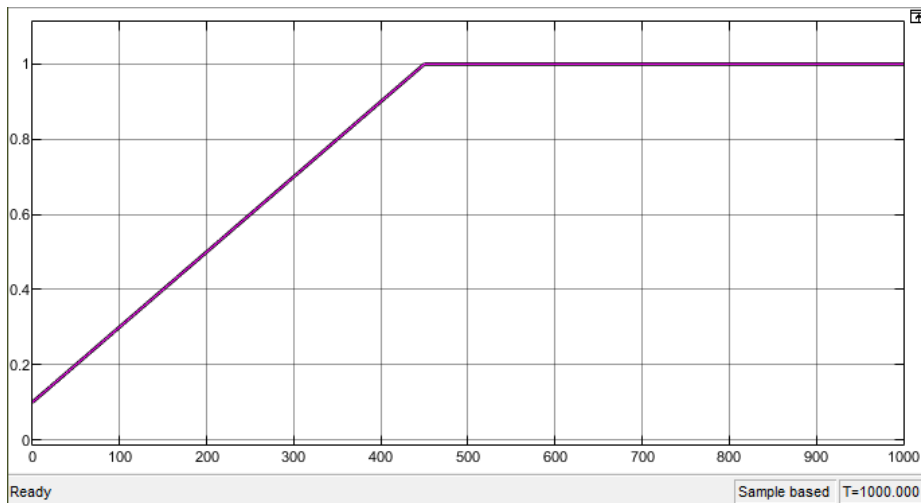


Рис. 16. Зависимость напряжения и скорости вращения магнитного поля СМ при синхронном и асинхронном пуске

На рис. 17 представлена зависимость изменения скорости ротора и магнитного поля статора при синхронном пуске СМ. При таком пуске синхронизация осуществляется непосредственно во время самого пуска, что наглядно подтверждается формой графика.

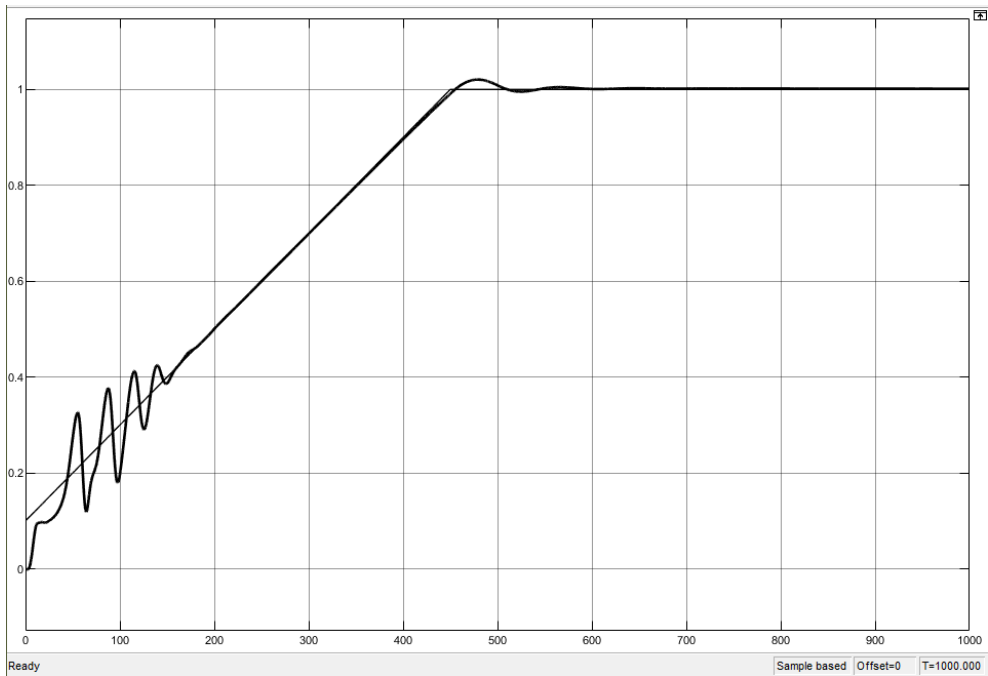


Рис. 17. График изменения скорости ротора и магнитного поля статора при синхронном пуске СМ

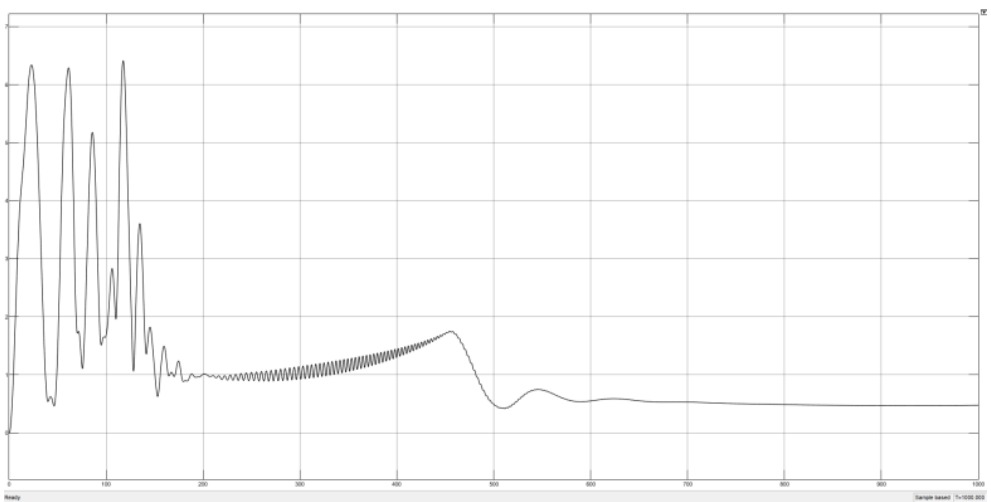


Рис. 18. Зависимость полного тока фазы статора при синхронном пуске СМ

На рис. 18 представлена зависимость полного тока фазы статора при синхронном пуске СМ. Согласно графику пусковые токи временно достигают значения 6,414 о.е., но в установившемся режиме работы СМ токи не превышают и 1 о.е.

На рис. 19 представлена зависимость электромагнитного момента, развиваемого на валу двигателя, от времени при синхронном пуске СМ.

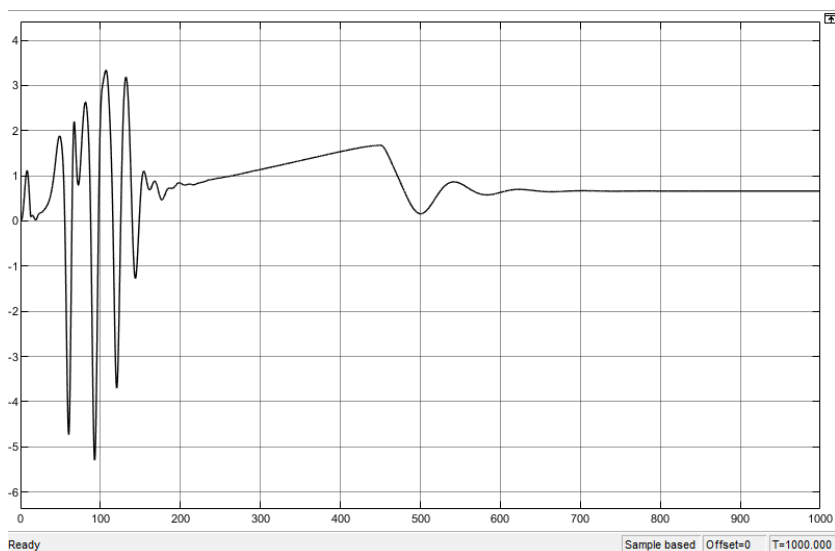


Рис. 19. Зависимость момента от времени при синхронном пуске СМ

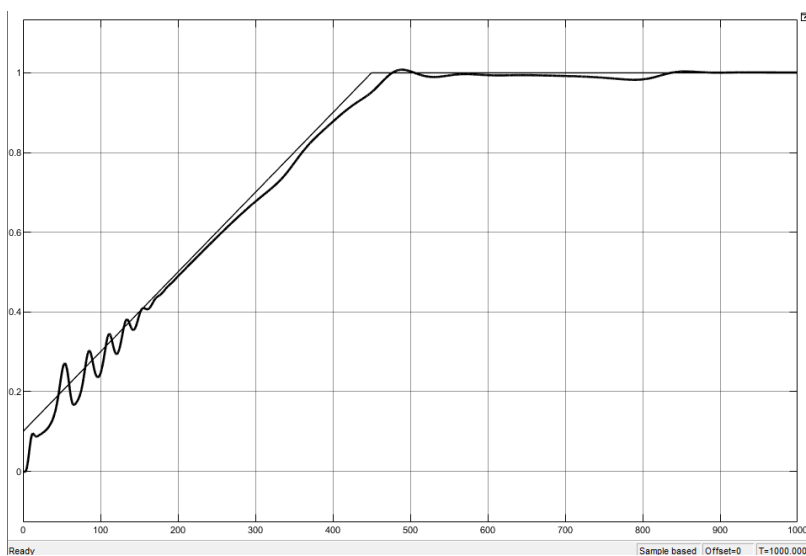


Рис. 20. Зависимость скорости ротора и магнитного поля статора при асинхронном пуске СМ

На рис. 20 представлена зависимость скорости ротора и магнитного поля статора при асинхронном частотном пуске СМ, на котором отчетливо прослеживается мгновение синхронизации ротора с магнитным полем статора. Синхронизация ротора происходит чуть позже достижения ротором номинальной скорости вращения.

На рис. 21 представлена зависимость рабочего тока обмотки статора при асинхронном пуске СМ. Во время пуска ток достигает значения 6,327 о.е.

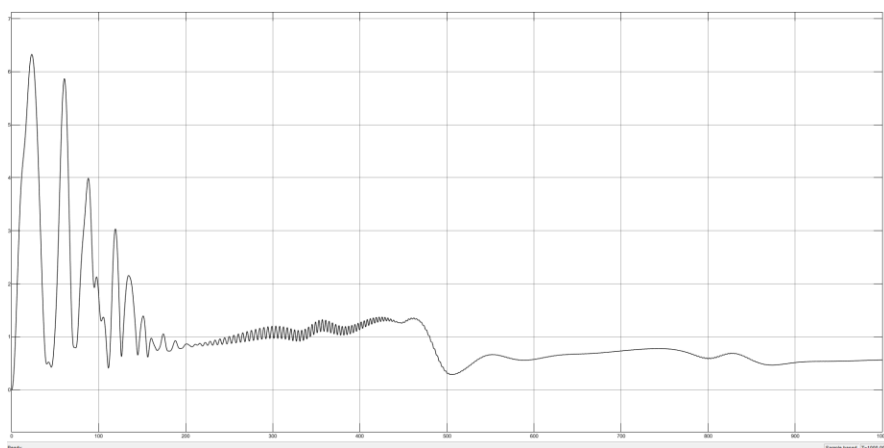


Рис. 21. Зависимость тока обмотки статора при асинхронном пуске СМ

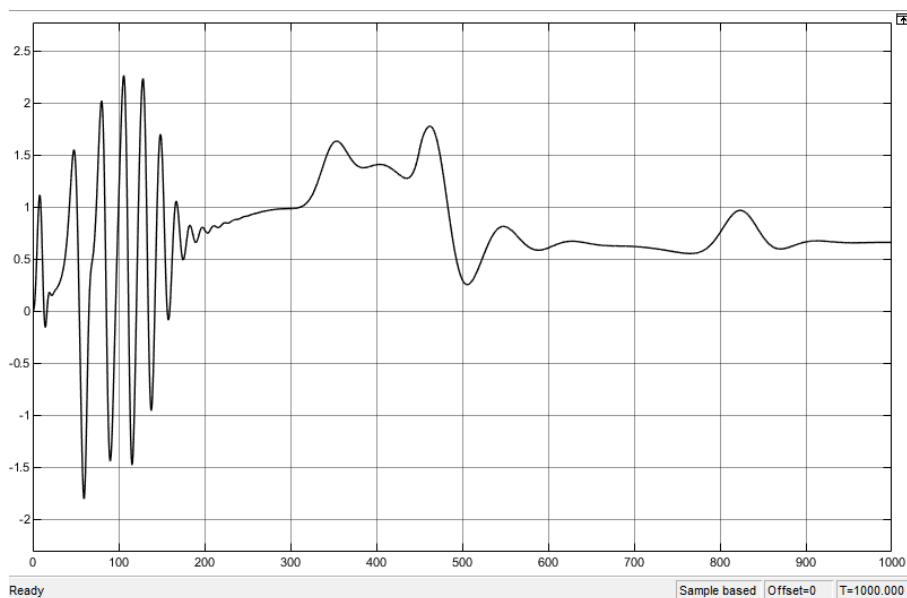


Рис. 22. Зависимость момента от времени при асинхронном пуске СМ

Зависимость электромагнитного момента, действующего на валу ротора при асинхронном пуске СМ (рис. 22), подтверждает, что момент во время переходного процесса разгона носит знакопеременный характер. Это объясняется асинхронностью пуска СМ, т.е. ротор не успевает за движением магнитного поля статора. Отрицательные значения момента обусловлены тем, что ротор имеет собственную инертность.

Моделирование пуска синхронного двигателя от регулятора напряжения

Далее представлены результаты исследования еще одного способа пуска СМ – пуск синхронного двигателя, на обмотку статора которого подается электроэнергия от регулятора напряжения (модель в виде блок-схемы изображена на рис. 23). Результаты моделирования, основывающиеся на применении блок-схемы (см. рис. 23), полностью соответствуя теории синхронных машин, подтверждают превосходство такого способа пуска по сравнению с прямым:

- максимальное значение пускового тока двигателя меньше, чем при «прямом пуске», и составляет 4,512 о.е.;
- тепловой импульс равен 10268 о.е.

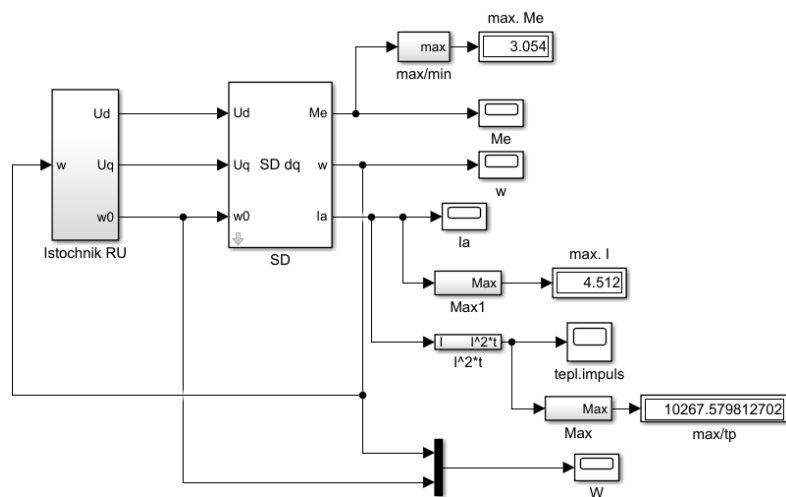


Рис. 23. Модель пуска СМ от регулятора напряжения

На рис. 24 представлена зависимость нарастающего напряжения, подаваемого от регулятора напряжения на обмотку статора СМ, и частоты источника питания, которая задает скорость вращения магнитного поля статора.

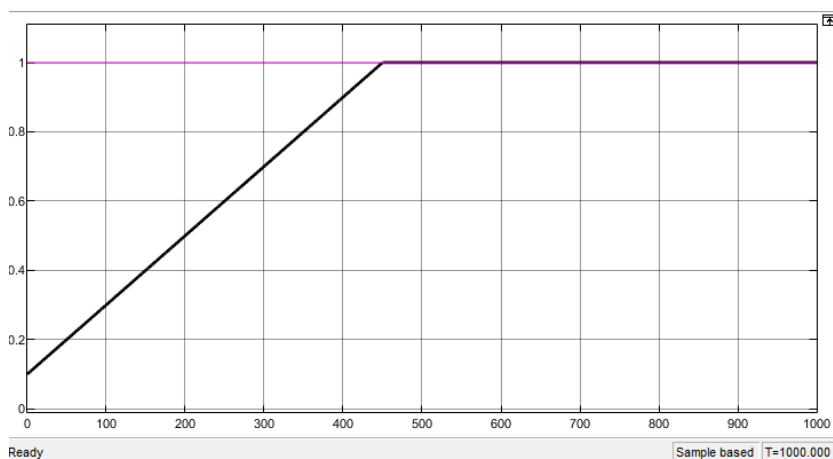


Рис. 24. Зависимость напряжения и частоты источника с регулятором напряжения

На рис. 25 изображена модель регулятора напряжения, который является источником питания синхронного двигателя.

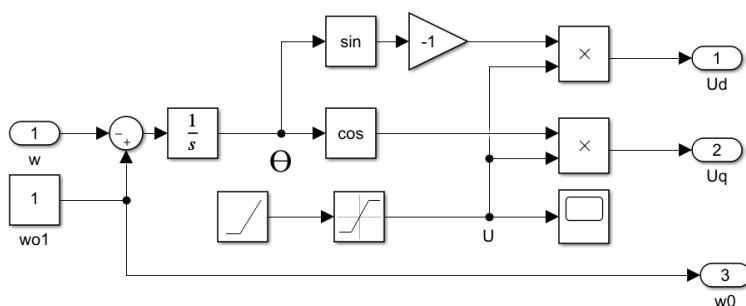


Рис. 25. Модель регулятора напряжения

Зависимость рабочего тока статора СМ, подключенного к регулятору напряжения, изображена на рис. 26. Согласно рисунку пусковой ток вначале изменяется плавно, затем начинается скачкообразное изменение тока. Амплитуда этих скачков мала, что благотворно влияет на работу СМ во время переходного процесса разгона ротора, потому что уменьшаются потери энергии, которые прямо пропорциональны квадрату тока статора. Также следует отметить, что ударный ток меньше номинального значения и составляет примерно 0,8 о.е. Это объясняется низкой величиной напряжения источника питания на тот момент времени. Максимальное значение рабочего тока достигается примерно через промежуток времени 450 о.е. и составляет около 4,5 о.е.

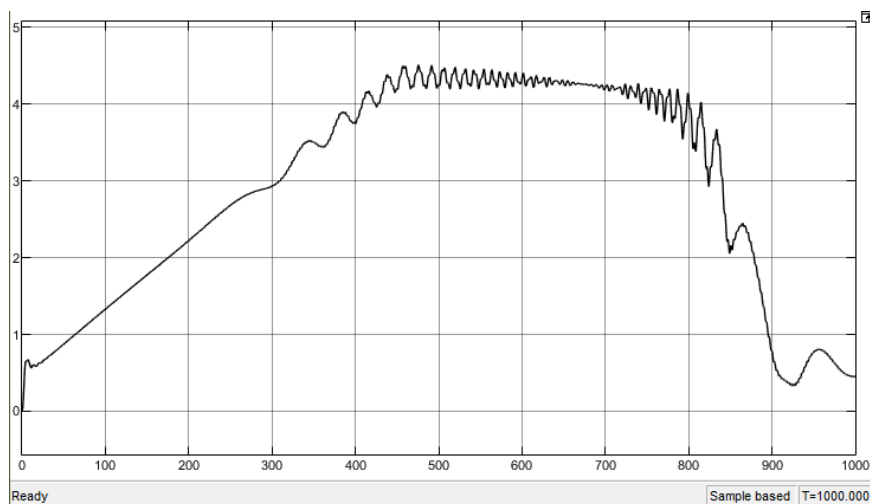


Рис. 26. Зависимость тока статора СМ, подключенной к регулятору напряжения

На рис. 27 представлена зависимость теплового импульса синхронного двигателя. Тепловой импульс достигает значений чуть выше 10 тысяч. Значение импульса довольно велико, однако по сравнению с другими источниками питания – на порядок меньше.

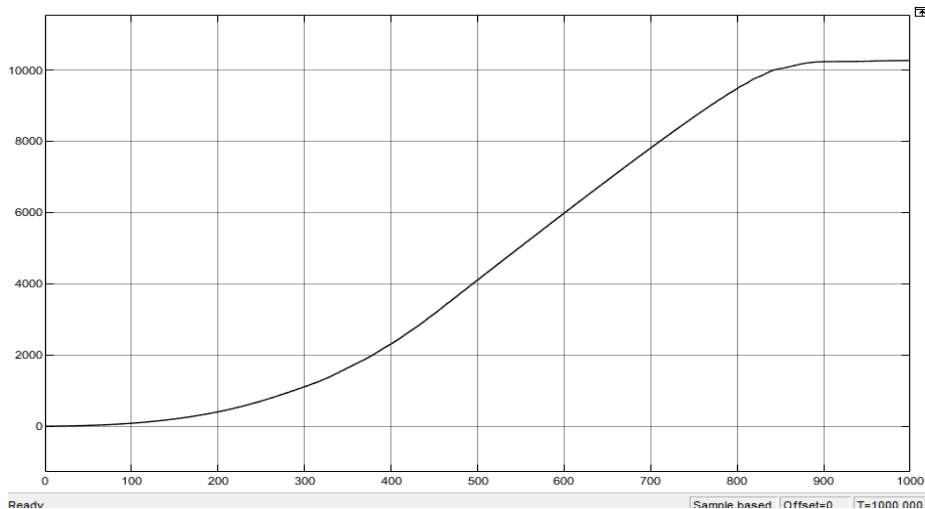


Рис. 27. Тепловой импульс СМ, подключенной к регулятору напряжения

Электромагнитный момент во время переходного процесса разгона ротора носит ярко выраженный знакопеременный характер (рис. 28). Однако благодаря плавному нарастанию питающего СМ напряжения этот процесс протекает с небольшим диапазоном изменения значений момента.

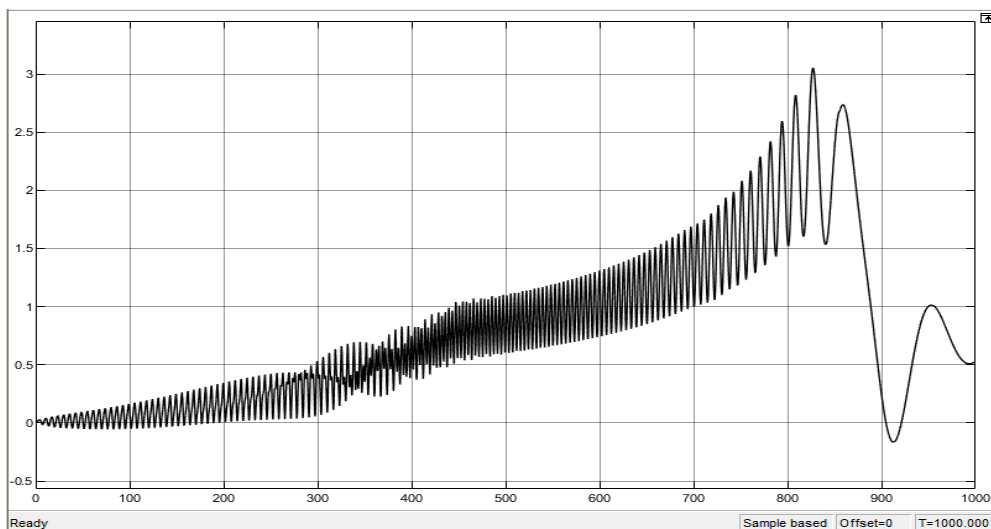


Рис. 28. Зависимость момента СМ, подключенной к регулятору напряжения

Процесс синхронизации вращения поля статора и ротора СМ представлен на рис. 29, который, как видно из рисунка, носит затяжной характер.

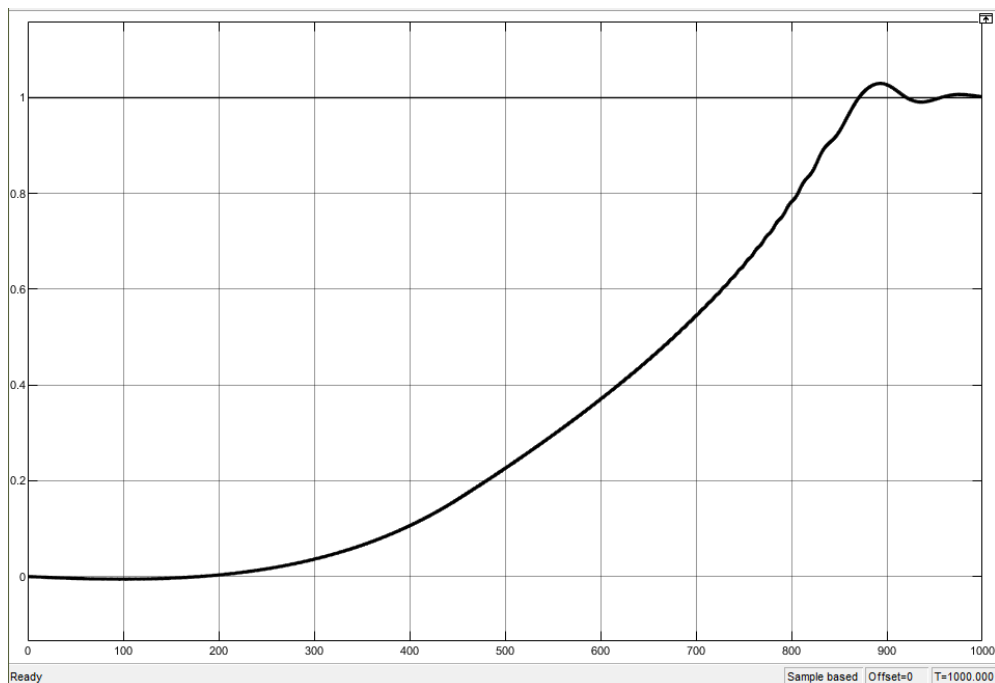


Рис. 29. Зависимость скорости вращения ротора и поля статора СМ, подключенной к регулятору напряжения

Заключение

Исследования, результаты которого были представлены в настоящей статье, стали возможны благодаря реализации математических моделей синхронного двигателя и трех источников электропитания. Различные комбинации разработанных моделей позволили успешно реализовать следующие режимы пуска синхронного двигателя:

– «прямой пуск», обусловленный подачей на обмотку статора СМ переменного напряжения при неизменной амплитуде и частоте;

– синхронный частотный пуск СМ, обмотка статора которой подключена к преобразователю частоты переменного напряжения, частота которого менялась по мере разгона двигателя, обеспечивая тем самым синхронность вращения ротора и магнитного поля статора;

– асинхронный частотный пуск СМ, обмотка статора которой также была подключена к тому же самому преобразователю частоты переменного напряжения, однако частота его не изменялась по мере разгона двигателя, поэтому синхронность вращения ротора и магнитного поля статора не наблюдалась;

– пуск СМ, обмотка статора которой подключена к регулятору переменного напряжения с неизменной частотой [7].

Полученные практически путем результаты исследований соответствуют теории переходных процессов синхронных машин (в части модели СМ) и электрических цепей (в части моделей источников), что подтверждает точность разработанных математических моделей как самого двигателя, так и всех трех источников питания, обеспечивающих исследованные режимы пуска электрической машины [1, 3, 7–9]. В табл. 2 представлены результаты исследований различных режимов пуска синхронного двигателя СТД-12500-2УХЛ4.

Таблица 2

Сравнительные характеристики синхронного двигателя

Параметр	Максимальный момент M_{\max} , о.е.	Максимальный ток I_{\max} , о.е.	Максимальный тепловой импульс, о.е.	Ударный ток $I_{уд}$, о.е.	Критический момент $M_{кр}$, о.е.	Время пуска $t_{п}$, о.е.
Прямой пуск	3,907	6,49	12754	6,49	4,2–4,5	695
Частотный синхронный пуск	3,337	6,414	2561	6,414	1,7–1,8	450
Частотный асинхронный пуск	2,264	6,327	1922	6,327	1,2–1,3	480
Регулятор напряжения	3,054	4,512	10267	0,7–0,8	4,5	960

Анализ результатов исследований, представленных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Пуск СМ, подключенной к частотному преобразователю независимо от режима его работы, т.е. при синхронном и асинхронном пуске, дает наименьшее количество тепловых потерь, что, в свою очередь, ведет к увеличению срока службы отдельно взятых компонентов двигателя, а следовательно, и всего двигателя в целом.

2. Максимальные пусковой ток и тепловой импульс достигаются при «прямом пуске» СМ. Следовательно, в этом режиме запуска синхронного двигателя в машине будет выделяться наибольшее количество тепловых потерь.

3. При пуске СМ, подключенной к регулятору напряжения, наблюдается наименьшее значение ударного тока, что благотворно будет отражаться на работе машины, поскольку в начальный момент времени она не будет испытывать значительные ударные перегрузки, а следовательно, не будут наблюдаться в двигателе механические повреждения, прежде всего обмоток. Данные обстоятельства также упростят процессы:

– идентификации параметров СМ с применением современных вероятностно-статистических методов, значительно упрощающих алгоритм и повышающих точность определения характеристик двигателя по неустановившимся режимам его работы [20–23];

– спектрального анализа режимов, предшествующих и последующих переходному процессу разгона ротора двигателя с целью определения его неисправностей [24,25];

– вейвлет-анализа процессов двигателя, которые в отличие от спектрального анализа позволяют исследовать быстропротекающие переходные процессы [26].

4. При «прямом пуске» СМ достигается самый большой по величине электромагнитный момент, благодаря которому к двигателю может быть подключена наибольшая нагрузка по сравнению с другими возможными режимами пуска.

Анализ результатов исследований подтвердил необходимость выбора способа пуска синхронного двигателя, который используется в силовых электроэнергетических системах. Это позволит снизить время переходного процесса пуска машины, уменьшить тепловые потери и обеспечить на валу двигателя необходимой в данных условиях работы

электромагнитный момент. Также применение оптимального способа пуска СМ на практике позволит уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций и увеличить срок службы электрических машин и других потребителей механической и электрической энергии.

Библиографический список

1. Алиев И.И. Электрические машины. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2014. – 448 с.

2. Жужгов Н.В., Буторин Г.В., Ключников А.Т. Исследование режимов работы синхронного двигателя // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т.; Пермь, 17 мая 2018 г. Т. 2. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – С. 20–27.

3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. завед. – М.: Академия, 2006. – 272 с.

4. Буймов А.А., Кононенко Е.В., Финк А.Ф. Исследование электромеханических переходных процессов тихоходных синхронных реактивных двигателей // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 1972. – Т. 242. – С. 230–233.

5. Фираго Б.И., Александровский С.В. Исследование переходных процессов частотно-регулируемого синхронного электропривода // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2016. – Т. 59. – № 6. – С. 507–518.

6. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2015. – 373 с.

7. Шулаков Н.В. Электрические машины: конспект лекций / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2008. – 324 с.

8. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.

9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб., 2010. – 352 с.

10. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – М.: Академия, 2005. – 480 с.

11. Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н. Синхронные машины. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2010. – 156 с.

12. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

13. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.

14. Подольцев А.Д, Бондарь Р.П. Моделирование работы трехфазного линейного синхронного двигателя колебательного движения в пакете MatLab/Simulink // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 31–34.

15. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (MatLab 7.0.1). – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. – 320 с.

16. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

17. Дьяков В.П. Simulink 5/6/7: самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

18. Субботина В.А., Тюленев М.Е. Simulink-модель для исследования пуска синхронного двигателя при пониженном напряжении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 102–109.

19. Буторин Г.В., Ключников А.Т., Чабанов Е.А. Исследование режимов пуска синхронного двигателя при пониженной частоте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31. – С. 159–176.

20. Чабанов Е.А., Судаков А.И., Шулаков Н.В. Новые подходы к получению исходной информации и методам идентификации переходных процессов мощных синхронных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 8. – С. 114–127.

21. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Высокоточная и достоверная идентификация переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами // Электротехника. – 2015. – № 11. – С. 21–27;

22. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Precise and reliable identification of the transient processes of a powerful synchronous machine by probabilistic statistical methods // *Russian Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 86, № 11. – P. 640–645.

23. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Каменских И.А. Развитие вероятностно-статистических методов идентификации зашумлённых переходных процессов синхронных машин // *Электротехника*. – 2017. – № 11. – С. 18–24;

24. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Kamenskikh I.A. The Development of Probabilistic and Statistical Methods for Identification of Noisy Transient Processes of Synchronous Machines // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – Vol. 88, № 11. – P. 714–719.

25. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. К вопросам исследования и идентификации переходных процессов мощных синхронных машин вероятностно-статистическими методами // *Электричество*. – 2013. – № 3. – С. 34–39;

26. Токарев Р.О., Чабанов Е.А. Спектральный анализ неисправностей синхронной машины // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т.*; Пермь, 17 мая 2018 г. Т. 2. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – С. 97–102.

27. Спектральный анализ неисправностей синхронной машины / Р.О. Токарев, В.В. Шапошников, Е.А. Чабанов, Е.В. Чабанова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2019. – № 30. – С. 227–240.

28. Колпакова М.А., Заборовцев Е.А., Чабанов Е.А. Оценка технического состояния синхронных машин на основе вейвлет-анализа // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2021. – № 38. – С. 195–220.

References

1. Aliev I.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric cars]. Vologda: Infra-Inzheneriia, 2014, 448 p.

2. Zhuzhgov N.V., Butorin G.V., Kliuchnikov A.T. *Issledovanie rezhimov raboty sinkhronnogo dvigatel'ia* [Research of operating modes of a

synchronous motor]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, Perm', 17 May 2018. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, vol. 2, pp. 20-27.

3. Sokolovskii G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [AC drives with frequency regulation]. Moscow: Akademiia, 2006, 272 p.

4. Buimov A.A., Kononenko E.V., Fink A.F. Issledovanie elektromekhanicheskikh perekhodnykh protsessov tikhokhodnykh sinkhronnykh reaktivnykh dvigatelei [Investigation of electromechanical transient processes of low-speed synchronous jet engines]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 1972, vol. 242, pp. 230-233.

5. Firago B.I., Aleksandrovskii S.V. Issledovanie perekhodnykh protsessov chastotno-reguliruемого sinkhronnogo elektroprivoda [Investigation of transient processes of a frequency-controlled synchronous electric drive]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 507-518.

6. Anuchin A.S. Sistemy upravleniia elektroprivodov [Control systems for electric drives]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2015, 373 p.

7. Shulakov N.V. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 324 p.

8. Sipailov G.A., Kononenko E.V., Khor'kov K.A. Elektricheskie mashiny [Electric cars]. Moscow: Vysshaia shkola, 1987, 287 p.

9. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka [Electric cars. AC machines]. Saint Petersburg, 2010, 352 p.

10. Katsman M.M. Spravochnik po elektricheskim mashinam dlia studentov obrazovatel'nykh uchrezhdenii srednego professional'nogo obrazovaniia [Handbook on electric machines: Textbook for students. educated. institutions of environments]. Moscow: Akademiia, 2005, 480 p.

11. Makarichev Iu.A., Ovsiannikov V.N. Sinkhronnye mashiny [Synchronous machines]. Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, 156 p.

12. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. 3rd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 2001, 327 p.

13. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. Ed. I.P. Kopylov. 4th ed. Moscow: Iurait, 2011, 767 p.

14. Podol'tsev A.D, Bondar' R.P. Modelirovanie raboty trekhfaznogo lineinogo sinkhronnogo dvigatel'ia kolebatel'nogo dvizheniia v pakete MatLab/Simulink [Modeling the operation of a three-phase linear synchronous motor of oscillatory motion in the MatLab/Simulink package]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2010, no. 6, pp. 31-34.

15. Terekhin V.B. Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink (MatLab 7.0.1) [Modeling of electric drive systems in Simulink (MatLab 7.0.1)]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2008, 320 p.

16. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK-Press; Saint Petersburg: Piter, 2008, 288 p.

17. D'iakov V.P. Simulink 5/6/7: samouchitel' [Simulink 5/6/7: tutorial]. Moscow: DMK-Press, 2008, 784 p.

18. Subbotina V.A., Tiulenev M.E. Simulink-model' dlia issledovaniia pushka sinkhronnogo dvigatel'ia pri ponizhenom napriazhenii [Simulink-model for studying the starting of a synchronous motor at reduced voltage]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 11, pp. 102-109.

19. Butorin G.V., Kliuchnikov A.T., Chabanov E.A. Issledovanie rezhimov pushka sinkhronnogo dvigatel'ia pri ponizhenoi chastote [Investigation of the modes of starting a synchronous motor at a reduced frequency]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 31, pp. 159-176.

20. Chabanov E.A., Sudakov A.I., Shulakov N.V. Noveye podkhody k polucheniiu iskhodnoi informatsii i metodam identifikatsii perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin [New approaches to obtaining initial information and methods of identification of transient processes of powerful synchronous machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 8, pp. 114-127.

21. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Vysokotochnaia i dostovernaiia identifikatsiia perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin veroiatnostno-statisticheskimi metodami [High-precision and reliable identification of transient processes of powerful synchronous machines by probabilistic and statistical methods]. *Elektrotehnika*, 2015, no. 11, pp. 21-27;

22. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Precise and reliable identification of the transient processes of a powerful synchronous machine by probabilistic statistical methods. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 11, pp. 640-645.

23. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Kamenskikh I.A. Razvitie veroiatnostno-statisticheskikh metodov identifikatsii zashumlennykh perekhodnykh protsessov sinkhronnykh mashin [Development of probabilistic-statistical methods for identification of noisy transient processes of synchronous machines]. *Elektrotehnika*, 2017, no. 11, pp. 18-24;

24. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Kamenskikh I.A. *The Development of Probabilistic and Statistical Methods for Identification of Noisy Transient Processes of Synchronous Machines*. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 11, pp. 714-719.

25. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V. K voprosam issledovaniia i identifikatsii perekhodnykh protsessov moshchnykh sinkhronnykh mashin veroiatnostno-statisticheskimi metodami [On research and identification of transient processes of powerful synchronous machines by probabilistic and statistical methods]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 3, pp. 34-39;

26. Tokarev R.O., Chabanov E.A. Spektral'nyi analiz neispravnostei sinkhronnoi mashiny [Spectral analysis of synchronous machine malfunctions]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, Perm', 17 May 2018. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, vol. 2, pp. 97-102.

27. Tokarev R.O., Shaposhnikov V.V., Chabanov E.A., Chabanova E.V. Spektral'nyi analiz neispravnostei sinkhronnoi mashiny [Spectral analysis of faults in a synchronous machine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*. *Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 30, pp. 227-240.

28. Kolpakova M.A., Zaborovtsev E.A., Chabanov E.A. Otsenka tekhnicheskogo sostoianiia sinkhronnykh mashin na osnove veivlet-analiza

[Assessment of the technical condition of synchronous machines based on wavelet analysis]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 38, pp. 195-220.

Сведения об авторах

Сажин Илья Юрьевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ilsazhin@yandex.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Чабанова Евгения Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Иностранные языки» Пермского государственного аграрно-технологического университета им. академика Д.Н. Прянишникова (614990, Пермь, ул. Петропавловская, 23, e-mail: jentosina@yandex.ru).

About the authors

Ilya Yu. Sazhin (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolskiy pr., e-mail: KolpMA@yandex.ru).

Evgenii A. Chabanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky prospekt str., e-mail: ceapb@mail.ru).

Evgeniia V. Chabanova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor Department of Foreign Languages Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov (614990, Perm, 29, Petropavlovskaya str., e-mail: jentosina@yandex.ru).

Получено 22.10.2021