

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ МАТЛАБ

Посвящена вопросам моделирования режимов работы асинхронного двигателя при использовании прямого пуска двигателя и при использовании системы управления преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения. Приводится описание пакета программ MatLab, в котором производится моделирование режимов работы асинхронного двигателя. Описаны компоненты пакета программ, позволяющие моделировать сложные электромеханические системы, одними из которых являются приложения Simulink и SimPowerSystem. Выбран тип и марка асинхронного двигателя по справочной литературе. Рассчитаны параметры асинхронного двигателя, необходимые для моделирования. Для расчетов параметров асинхронного двигателя использовалась методика профессора Черных И. В. Произведено моделирование двух вариантов пуска асинхронного двигателя: прямой пуск от трехфазного источника напряжения и пуск двигателя при помощи системы преобразователя частоты – автономного инвертора напряжения. Также при моделировании системы преобразователя частоты – автономного инвертора напряжения помимо пуска асинхронного двигателя рассмотрены режимы нормальной работы и торможения. Получены результаты в виде графиков зависимостей исследуемых величин от времени моделирования: исследованы ток статора и ротора, скорость вращения двигателя, его электромагнитный момент. Сделаны выводы по результатам расчета и моделирования, произведено сравнение с существующими данными.

*Ключевые слова:* MatLab, Simulink, SimPowerSystem, моделирование, режимы работы, электропривод, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, скорость вращения, электромагнитный момент, ток статора и ротора, механическая характеристика.

А. С. Semyonov

## Simulation of Operating Modes of the Asynchronous Motor in MatLab Software Package

This article is devoted to the issue of simulation of operating modes of the asynchronous motor using across-the-line starting of motor and of the management system of the frequency converter with autonomous inverter of voltage. The description of MatLab software package, in which simulation of operating modes of the asynchronous motor is produced, is given. There are components of a software package with a help of which complex electromechanical systems, some of which are application Simulink and SimPowerSystem, can be modeled. The type and brand of the asynchronous motor were chosen after consulting reference literature. The parameters of the asynchronous motor, necessary for modeling are calculated. For calculating the parameters of the asynchronous motor the methodology of Professor I. V. Chernykh was used. Simulation of two versions of the asynchronous motor starter was worked out: direct start from the three-phase voltage source and start the engine by means of the frequency converter system – autonomous inverter of voltage. Also during simulating the system of frequency converter – autonomous inverter of voltage besides asynchronous motor starting normal operation and braking regimes are considered. The results in the form of graphs of dependencies of the quantities on the simulation time are obtained: investigated the stator and rotor current, engine speed, its electromagnetic torque. Conclusions based on the results of calculation and simulation are made, comparison with existing data is held.

*Key words:* MatLab, Simulink, SimPowerSystem, simulation, operation regimes, electric driver, asynchronous motor, frequency converter, autonomous inverter of voltage, rotation velocity, electromagnetic torque, stator and rotor current, mechanical characteristics.

---

СЕМЁНОВ Александр Сергеевич – ст. преп. кафедры электрификации и автоматизации горного производства Политехнического института (филиала) СВФУ им. М.К. Аммосова в г. Мирном.

E-mail: sash-alex@yandex.ru

SEMYONOV Aleksandr Sergeevich – Senior Lecturer of the Department of Electrification and Automation of Mining Industry, Polytechnic Institute, the branch of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Mirny.

E-mail: sash-alex@yandex.ru

Пакет программ MatLab предназначен для аналитического и численного решения различных математических задач, а также для моделирования электротехнических и электромеханических систем. MatLab получил наиболее распространенное применение в инженерной практике в отличие от других подобных программ (Mathematica, Maple, Mathcad). MatLab, сокращённое название от Matrix Laboratory, является интерактивной системой для выполнения научных и инженерных расчётов.

Таблица

Исходные данные асинхронного двигателя МАК355М6

Наименование параметра	Значение
Высота оси вращения вала, $h$	355 мм
Мощность, $P_H$	200 кВт
Масса	1280 кг
Синхронная частота вращения, $n_1$	1000 об/мин
Номинальная частота вращения, $n_H$	978 об/мин
Номинальное скольжение, $S_H$	2,2 %
КПД, $\eta$	0,945
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0,9
Номинальное напряжение, $U_H$	1140 В
Отношение пускового тока к номинальному, $I_M/I_H$	7
Отношение пускового момента к номинальному, $M_M/M_H$	1,6
Отношение максимального момента к номинальному, $M_{MAX}/M_H$	2
Отношение минимального момента к номинальному, $M_{MIN}/M_H$	0,9
Момент инерции, $J$	8,8 кг*м <sup>2</sup>
Число пар полюсов, $2p$	3
Соединение обмоток	Y/Δ

В состав системы входит ядро компьютерной алгебры Maple и пакет расширения Simulink, а также десятки других пакетов расширений, что позволяет моделировать сложные электротехнические устройства.

Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование электромеханических и электроэнергетических систем и устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и прочего оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них.

Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств. В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием

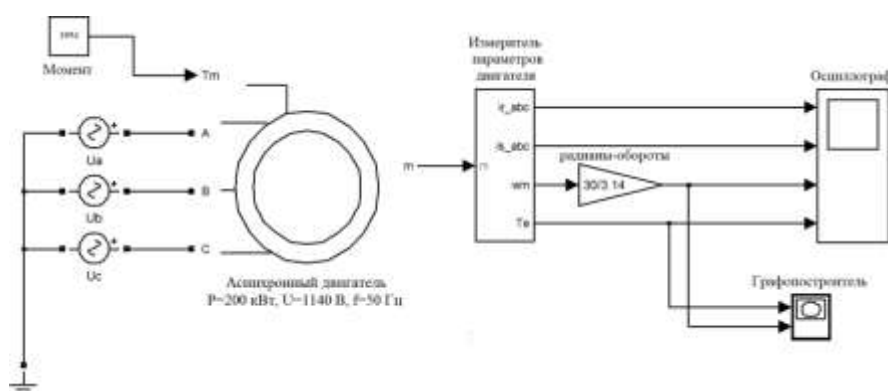


Рис. 1. Модель прямого пуска асинхронного двигателя

имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а, значит, повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLab, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Целью моделирования является построение характеристик зависимости момента и угловой скорости вращения электродвигателя от времени при пуске, а также определение перерегулирования, разрегулирования и времени переходного процесса. Сначала выполним моделирование на простой модели с прямым пуском асинхронного двигателя для проверки параметров, а затем на модели с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения.

Перед началом моделирования приведем справочные параметры выбранного для моделирования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором МАК355М6, которые понадобятся для расчета остальных недостающих обмоточных данных. Параметры двигателя приводим в виде таблицы согласно данным, имеющимся в справочнике [1], а также в методической литературе [2].

Для моделирования двигателя произведем расчет недостающих обмоточных данных по методике профессора И. В. Черных, изложенной в [2]. Определяем следующие параметры: сопротивление обмотки статора, сопротивление обмотки ротора, индуктивность обмоток статора и ротора, индуктивность цепи намагничивания (взаимоиндукция).

Переходим к построению модели асинхронного двигателя при прямом пуске от источника питания. Модель представляет собой принципиальную схему, состоящую из источников напряжения, асинхронного двигателя, блока для измерения основных параметров двигателя, осциллографа для измерения тока, момента и скорости и графопостроителя для отображения механической характеристики двигателя.

Рассчитанные параметры асинхронного двигателя подставляем в окно параметров блока асинхронного двигателя, изображенного на рис. 2.

Промоделировав, снимаем показатели тока статора и ротора двигателя, угловой скорости и момента. Сравниваем рассчитанные параметры с результатами моделирования и делаем соответствующие выводы.

На этих графиках (рис. 3) показано значение тока статора и ротора при заданных параметрах двигателя. Данные значения имеют следующие характеристики: в момент запуска двигателя пусковой ток достигает значения 955 А, после чего снижается до номинального 100 А, при этом кратность пускового тока к номинальному превышает указанное в паспорте значение и составляет 9,55 вместо 7. Такое превышение значительно повысит электропотребление и сократит срок службы двигателя.

График (рис. 4.) показывает параметры скорости вращения двигателя в зависимости от времени моделирования. Из графика видно, что время переходного процесса моделирования немного превышает 1 секунду, а перерегулирование отсутствует. Это вполне удовлетворяет условиям быстрогодействия системы электропривода при прямом пуске. После разгона через 1,05 секунды двигатель выходит на свою номинальную скорость работы 978 об/мин. В начале пуска двигателя наблюдается незначительное колебание скорости, но в реальной жизни оно привело бы к вибрации оборудования и также сократило бы срок его службы.

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz) ]:  
 [223398 1140 50]

Stator resistance and inductance[ Rs(ohm) Lls(H) ]:  
 [0.226 0.001]

Rotor resistance and inductance [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]:  
 [0.111 0.001]

Mutual inductance Lm (H):  
 0.069

Inertia, friction factor, pole pairs [ J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p()]:  
 [8.8 0.022 3]

Initial conditions  
 [ 1,0 0,0,0 0,0,0 ]

Simulate saturation

Saturation Parameters [i1,i2,... (Arms) ; v1,v2,...(VrmsLL)]  
 [61, 302.9841135, 428.7778367 ; 230, 322, 414, 460, 506, 552, 598, 644, 690]

OK Cancel Help Apply

Рис. 2. Окно параметров асинхронного двигателя

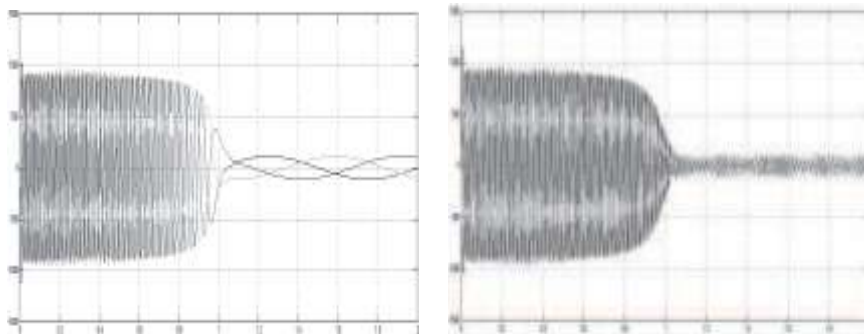


Рис. 3. Графики тока статора и ротора

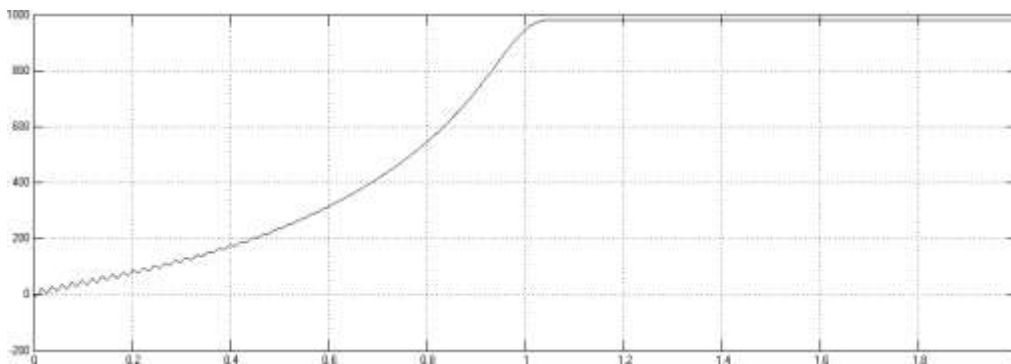


Рис. 4. График скорости вращения двигателя при прямом пуске

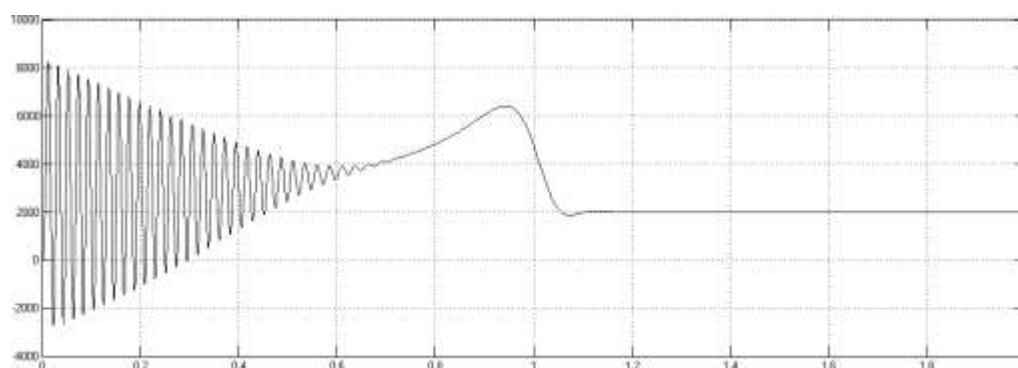


Рис. 5. График момента на валу двигателя при прямом пуске

График (рис. 5.) отображает зависимость электромагнитного момента двигателя от времени моделирования. При пуске пусковой момент превышает допустимые значения и составляет  $8000 \text{ Н*м}$  вместо  $3120 \text{ Н*м}$  ( $1,6 \text{ Мн}$ ). Рабочее (номинальное) значение момента соответствует расчетному и составляет  $1950 \text{ Н*м}$ .

Произведя моделирование прямого пуска асинхронного двигателя и рассмотрев полученные графики и данные, можно утверждать, что прямой пуск не вполне подходит для такого мощного асинхронного двигателя. Из-за повышенного пускового тока и момента такая система электропривода будет потреблять значительно больше электроэнергии из сети и быстрее выйдет из строя.

Хотелось бы отметить, что моделирование прямого пуска асинхронного двигателя ранее подробно рассматривалось в работах [3-6].

Далее опишем модель асинхронного двигателя с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения ПЧ-АДКЗ с АИН. Реализация разработанной математической модели, также как и прямой пуск, осуществляется с помощью пакета программ MatLab (приложения Simulink и SimPowerSystems).

Регулирование скорости асинхронного двигателя возможно изменением напряжения и частоты источника питания, который может работать в режиме источника напряжения или источника тока. Следовательно, регулирование скорости и момента на валу электродвигателя возможно изменением напряжения источника питания при  $f = \text{const}$ , изменением частоты и напряжения источника питания (скалярное частотное управление), изменением частоты и тока статорной обмотки (скалярное частотно-токовое управление), изменением частоты и текущих значений переменных асинхронного двигателя и взаимной ориентацией их векторов в полярной или декартовой системе координат (векторное управление).

Принцип скалярного управления частотно-

регулируемого асинхронного электропривода базируется на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, магнитных потоков, потокосцеплений и токов цепей двигателя). Выбор способа и принципа управления определяется совокупностью статических, динамических и энергетических требований к асинхронному электроприводу. Наибольшее применение нашли системы с обратной связью по току статора и скорости.

Общий вид математической модели системы преобразователя частоты – асинхронного двигателя с автономным инвертором напряжения показан на рис. 6.

Для моделирования работы двигателя необходимо внести рассчитанные ранее параметры в соответствующие графы окна задания параметров двигателя (рис. 7.).

Далее рассмотрим более подробно структуру самой системы электропривода с пояснением используемых в ней блоков (рис. 8.).

Система состоит из контроллера скорости, из блоков выпрямителя, преобразователя, инвертора напряжения и измерителя параметров, контроллера тока и самого асинхронного двигателя. Рассмотрим блоки, которые входят в структурную схему асинхронного двигателя: Source – задатчик значений двигателя; ASM mechanics – механическая часть двигателя; Speed Controller – блок контроллера скорости двигателя; F.O.C. – диспетчер производящий выборку времени; Braking chopper – блок, осуществляющий динамическое торможение. Блок задания момента сопротивления на валу двигателя представлен в функции времени, через блок «Torque reference» библиотеки SimPowerSystems, что позволяет осуществить вариации значения момента сопротивления на валу двигателя.

Далее переходим к получению результатов моделирования. В окно задания параметров блока двигателя вводим полученные значения активных и индуктивных сопротивлений, а также индуктивности обмоток статора и ротора. Далее введем параметры в остальные блоки модели. Исследованию подлежат

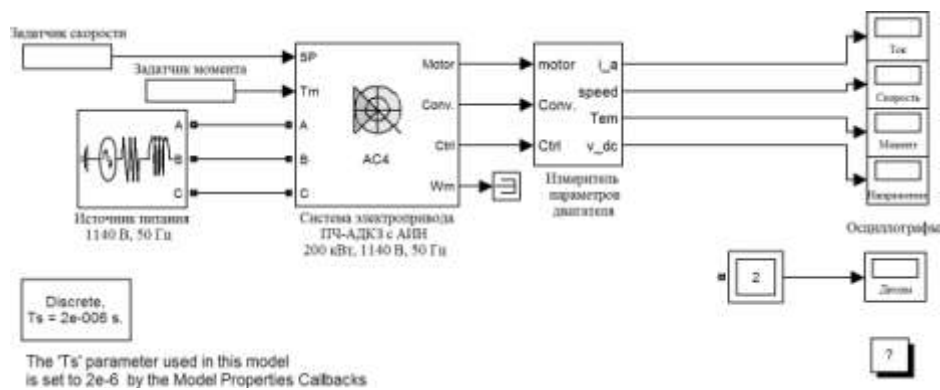


Рис. 6. Структура модели асинхронного двигателя с преобразователем частоты и автономным инвертором напряжения

режимы пуска двигателя, его работа на номинальной скорости и торможение. Переходим к получению результатов моделирования.

Результаты моделирования всех режимов работы показаны на графиках (рис. 9, 10).

На данном графике (рис. 9) показан ток статора двигателя во время пуска, работы на номинальной скорости и торможении. Пусковой ток при данной системе электропривода по сравнению с прямым пуском

снизился в 3 раза и составил 325 А. Соответственно кратность пускового тока к номинальному стала равна 3,25 (тогда как по паспорту допускается 7). Такое снижение пускового тока благоприятно отразится на работе электрооборудования и сократит затраты на потребление электроэнергии.

Анализируя график скорости двигателя (рис. 10), можно сделать следующие выводы: ко времени 0,6 с после пуска двигателя скорость вращения

The screenshot shows the 'DTC Induction Motor Drive' parameter configuration window. The window is divided into several tabs: 'Asynchronous Machine', 'Converters and DC bus', and 'Controller'. The 'Asynchronous Machine' tab is active, showing the following parameters:

- Reference frame:** Stationary
- Nominal values:**
  - Power (VA): 223398
  - Voltage (Vrms): 1140
  - Frequency (Hz): 50
- Equivalent circuit values:**
  - Stator Resistance (ohm): 0.226
  - Stator Leakage inductance (H): 0.001
  - Stator Mutual inductance (H): 0.069
  - Rotor Resistance (ohm): 0.111
  - Rotor Leakage inductance (H): 0.001
- Initial currents:**
  - Phase A: Magnitude (A): 0, Phase (deg): 0
  - Phase B: Magnitude (A): 0, Phase (deg): 0
  - Phase C: Magnitude (A): 0, Phase (deg): 0
- Mechanical parameters:**
  - Rotor values:
    - Inertia (kg\*m<sup>2</sup>): 8.8
    - Friction (N-m-s): 0.022
    - Pole pairs: 3
  - Initial values:
    - Slip: 1
    - Angle (deg): 0
- Mechanical input:** Torque Tm
- Buttons:** Load, Save, OK, Cancel, Help, Apply

Рис. 7. Окно задания параметров двигателя

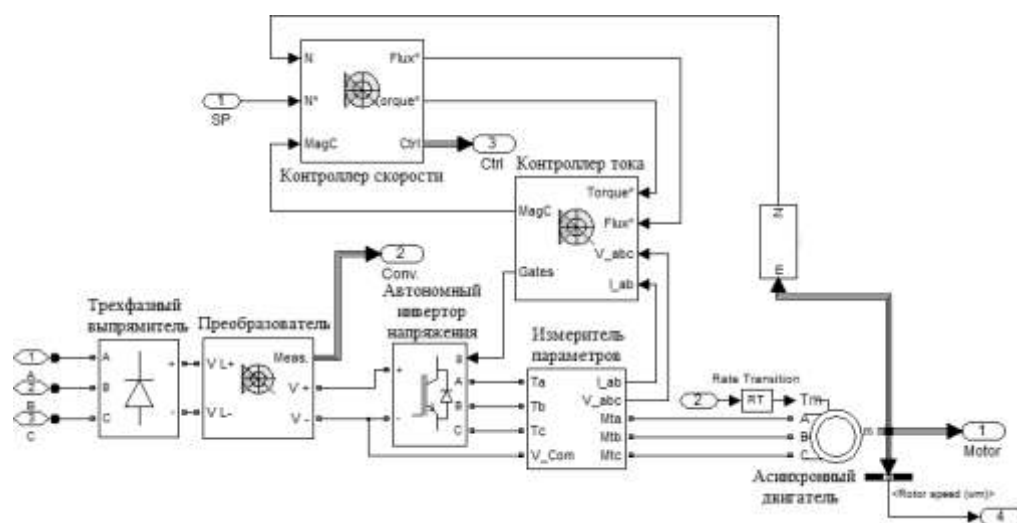


Рис. 8. Структура блока системы электропривода ПЧ-АДКЗ с АИН

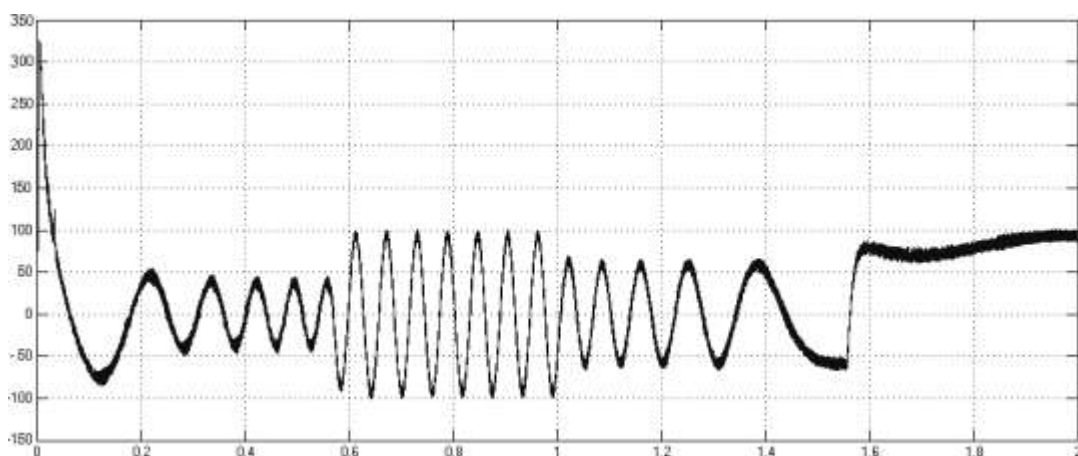


Рис. 9. График тока статора двигателя

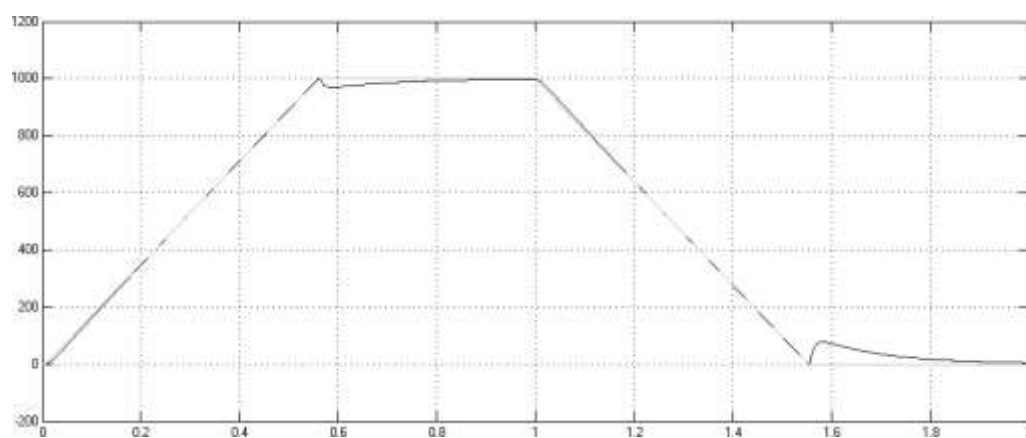


Рис. 10. График скорости вращения двигателя

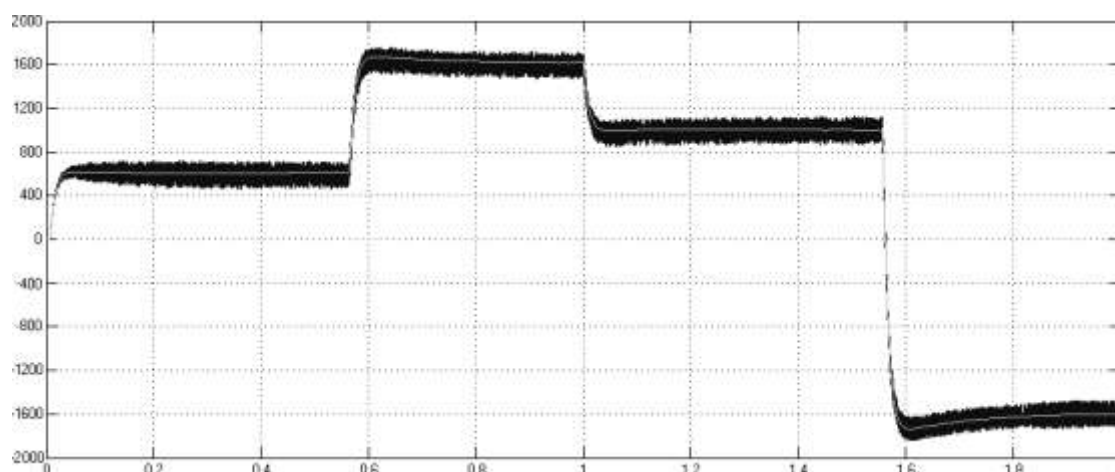


Рис. 11. График момента на валу двигателя

двигателя достигает установившегося значения 980 об./мин, что полностью соответствует поставленной задаче по условию адекватности системы; затем на времени 1 с начинается процесс торможения двигателя, после чего скорость уходит в ноль ко времени 1,8 с. Указанный промежуток времени показывает, что система удовлетворяет требованию по быстродействию. Система является устойчивой, значение колебательности отсутствует.

График момента (рис. 11) показывает, что использование системы управления ПЧ-АДКЗ с АИН позволило сократить рабочий момент двигателя на 18 % с 1950 Н\*м до 1600 Н\*м. Это позволит прилагать меньше усилий электроприводу для вращения механизма и соответственно потреблять меньше электроэнергии из сети.

#### Заключение

В целом по всем представленным графикам и произведенному моделированию четко наблюдается преимущество использования системы управления двигателем ПЧ-АДКЗ с АИН. Снижается пусковой ток, сокращается время запуска двигателя, уменьшается рабочий момент. Всё это благоприятно скажется на электропотреблении и приведет к его снижению. Также, возможно, увеличится срок службы электрооборудования, в частности обмотки двигателя не будут перегреваться из-за большого пускового тока и долгого его действия.

#### Литература

1. Алиев И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 255 с., ил.
2. Черных И. В. Моделирование электротехнических

устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с., ил.

3. Семёнов А. С., Пак А. Л., Шипулин В. С. Моделирование режима пуска электродвигателя погрузочно-доставочных машин применительно к рудникам по добыче алмазосодержащих пород // Приволжский научный вестник. – Ижевск, 2012. – № 11 (15). – С. 17-23.

4. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования: монография / А. С. Семёнов, Н. Н. Кугушева, В. М. Хубиева. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.

5. Рушкин Е. И., Семёнов А. С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MatLab // Современные наукоемкие технологии. – М., 2013. – № 8 – С. 341-342.

6. Semenov A. S. Model a low power the wind generator setup // Международный журнал экспериментального образования. – М., 2013. – № 12. – Р. 65-66.

#### References

1. Aliev I. I. Spravochnik po elektrotekhnike i elektrooborudovaniuu: Uchebnoe posobie dlia vuzov. – 2-e izd., dop. – М.: Vysshiaia shkola, 2000. – 255 s., il.

2. Chernykh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink. – М. : DMK Press ; SPb. : Piter, 2008. – 288 s., il.

3. Semenov A. S., Pak A. L., Shipulin V. S. Modelirovanie rezhima puskа elektrodvigatelia pogruzochno-dostavochnykh mashin primenitel'no k rudnikam po dobyche almozosoderzhashchikh porod // Privolzhskii nauchnyi vestnik. –



Izhevsk, 2012. – № 11 (15). – S. 17-23.

4. Modelirovanie rezhimov raboty elektroprivodov gornogo oborudovaniia: monografiia / A. S. Semenov, N. N. Kugusheva, V.M. Khubieva. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 s.

5. Rushkin E. I., Semenov A. S. Analiz energoeffektivnosti

sistemy elektroprivoda tsentrobezhnogo nasosa pri pomoshchi modelirovaniia v programme MatLab // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – M., 2013. – № 8 – S. 341-342.

6. Semenov A. S. Model a low power the wind generator setup // Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniia. – M., 2013. – № 12. – P. 65-66.

