

# Разработка имитационной модели асинхронного электропривода с применением векторного управления, как компонента структурного программного модуля

С. Г. Черный<sup>1,||</sup>, Б. А. Авдеев<sup>1</sup>, А.В. Вынгра<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Керченский государственный морской технологический университет", г. Керчь, Россия

<sup>||</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова", г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Разработана имитационная модель векторной системы управления асинхронным электроприводом на базе нечёткой логики. Произведено моделирование работы системы при переменной нагрузке на валу и различных значениях момента инерции. Сложная переменная нагрузка зависит от угла поворота вала электродвигателя. Применение переменного момента инерции позволило снизить коэффициент пульсаций частоты вращения электродвигателя без увеличения времени запуска. Результаты моделирования показали эффективность применения нечеткой логики для настройки коэффициентов ПИД-регулятора. Разработанная модель может быть использована для создания программной части системы управления частотного преобразователя с обратной связью.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, частотное управление, переменная нагрузка, моделирование, нечёткая логика, Simulink.

DOI 10.14357/20718632200207

## Введение

Асинхронный двигатель является наиболее используемой электрической машиной в промышленности из-за его высокой надежности, относительно низкой стоимости и скромных требований к техническому обслуживанию. Благодаря значительному прогрессу в области силовой электроники и микропроцессорной техники достигнут существенный прогресс в управлении электрическими машинами переменного тока. Асинхронный двигатель получает всё более широкое применение в составе регулируемых элект-

троприводов. Для управления трехфазным асинхронным двигателем наиболее распространенным алгоритмом является скалярный метод управления, который заключается в генерации переменного напряжения от источника постоянного напряжения с использованием широтно-импульсной модуляции. Однако скалярный метод с линейной и вентиляторной характеристикой не обеспечивает оптимального управления электроприводом с переменной нагрузкой на валу.

*Цель работы.*

Проблема оптимального управления электроприводами с переменной периодической нагруз-

кой на валу является малоизученной. В настоящее время существует несколько методов векторного управления, основанных на описании двигателя в виде проекций пространственных векторов. Векторы используются при построении структурных схем, применяющихся в роли объекта системы векторного управления. Повышенные требования к погрешности и быстродействию, предъявляемые к системам управления и автоматики, обуславливают необходимость применения замкнутых систем управления электроприводами.

Для упрощения и удешевления замкнутых систем управления используются бездатчиковые векторные преобразователи. Одним из составляющих таких систем является блок наблюдателя состояний, представляющий из себя математическую модель электропривода, на основе которой происходит определение его текущих параметров, таких как положение вала и угловая скорость. Для работы блока наблюдателя требуются точные параметры электродвигателя. Некоторые элементы системы управления можно настроить экспериментальным путем. Однако в устройствах с переменным моментом нагрузки на валу требуется точное и быстрое определение состояний нагрузки. Следовательно, необходима разработка алгоритма точной начальной идентификации параметров асинхронного электропривода и непрерывной идентификации параметров нагрузки.

Актуальность темы определяется растущим спросом на экономичные, дешевые в обслуживании системы электропривода, предназначенные для использования на объектах общепромышленного и морского назначения, таких как поршневые компрессоры холодильных установок, применяемых на предприятиях и судах.

## 1. Научный задел исследования

В статье [1] произведена оценка нагрузки электропривода поршневого компрессора судовой рефрижераторной установки. Нагрузка рассчитана с использованием индикаторной диаграммы поршневого компрессора мощностью 10,3 кВт [2]. Получен график изменения момента нагрузки на валу компрессора в зависимости от угла поворота.

В статье [3] произведено построение и исследование пусковых характеристик электро-

привода поршневого компрессора судовой холодильной установки с использованием математической модели неравномерного момента нагрузки. Зависимость момента нагрузки на валу электропривода поршневого компрессора от угла поворота представлена в виде математической модели. Построены графики переходных процессов по скорости и по току при различных значениях момента инерции двигателя и маховика. Численное моделирование показало, что при периодической переменной нагрузке без маховика, пуск асинхронного электродвигателя выполняется в рамках номинальных значений, но в установившемся режиме работы наблюдаются значительные пульсации тока более 10%. Определено, что при добавлении момента инерции маховика в модель, создающим дополнительный момент инерции, пульсации скорости вращения и тока уменьшаются, но в тоже время увеличивается время пуска электропривода. Была проанализирована работа ПИД регулятора скорости [4] электропривода, работающего на переменную периодическую нагрузку. Относительный коэффициент пульсаций составлял 0,25%, таким образом, результаты моделирования показали неудовлетворительное качество работы регулятора.

## 2. Имитационная модель системы векторного управления асинхронным двигателем в программе Simulink

Исследование системы векторного управления производится с использованием математической имитационной модели асинхронного электродвигателя с частотным векторным управлением [5]. Созданная модель представлена на Рис. 1 и состоит из нескольких структурных блоков. Основным устройством является *Асинхронный двигатель*, который получает питание от блока *Инвертор*.

Подсистема *Блок векторного управления* (Рис. 2) создана для управления силовыми ключами инвертора. Для создания сигнала управления используется обратная связь по моменту и скорости вращения электропривода. Блоки подсистемы приведены на Рис. 2. В подсистеме производится пересчет координат из трехфазной системы токов статора в двухфазную систему магнитного потока ротора. В блоке *Регулятор*

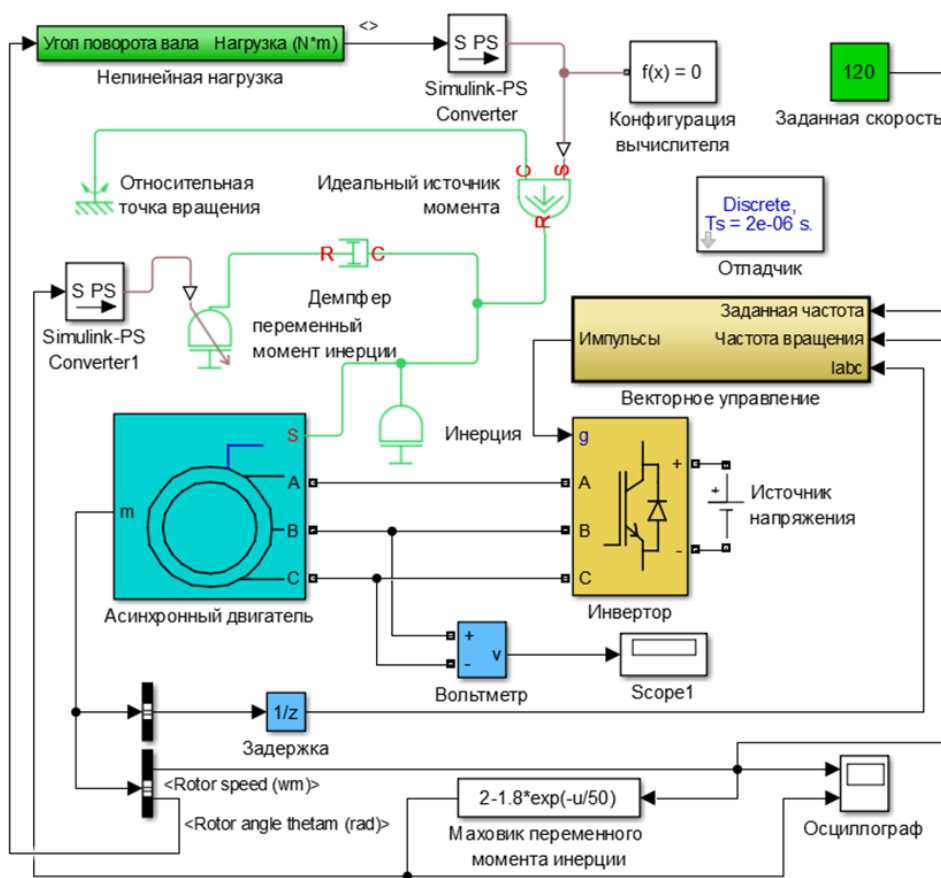


Рис. 1. Общий вид имитационной модели в программе Matlab/Simulink

скорости встроен пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор, определяющий величину необходимого электромагнитного момента электродвигателя. Для настройки коэффициентов регулятора используется блок нечеткой логики.

На выходе Блока генерации импульсов управления создаются сигналы управления для трехфазного мостового 6-ти импульсного инвертора, представленного в виде универсального IGBT-моста.

На блок Инвертор подаётся 460 В постоянного напряжения с блока Источник напряжения. Получая импульсы с широтной модуляцией от системы управления, блок преобразует постоянное напряжение в синусоидальное переменное напряжение с изменяемой частотой и амплитудой. Данное напряжение поступает на блок Асинхронный двигатель. Основные параметры асинхронного двигателя приведены в Табл. 1.

### 3.1. Настройка коэффициентов ПИД блоком нечеткой адаптации

При изменении рабочих точек из-за возмущений требуется перенастройка регуляторов. На предприятиях с непрерывным режимом работы при использовании классических регуляторов необходим постоянный контроль за ходом технологического процесса, что требует большой численности персонала. Кроме того, для процессов с переменными параметрами, запаздыванием, существенными нелинейностями и значительными помехами использование ПИ- и ПИД-регуляторов в векторной системе управления асинхронными двигателями может оказаться неэффективным. Трудности, обусловленные настройкой регуляторов, приводят к тому, что в большинстве случаев они работают не в оптимальном режиме. Для управления скоростью вращения электродвигателя в модели предложено использовать настройку коэффициентов ПИД с помощью нечеткой логики.

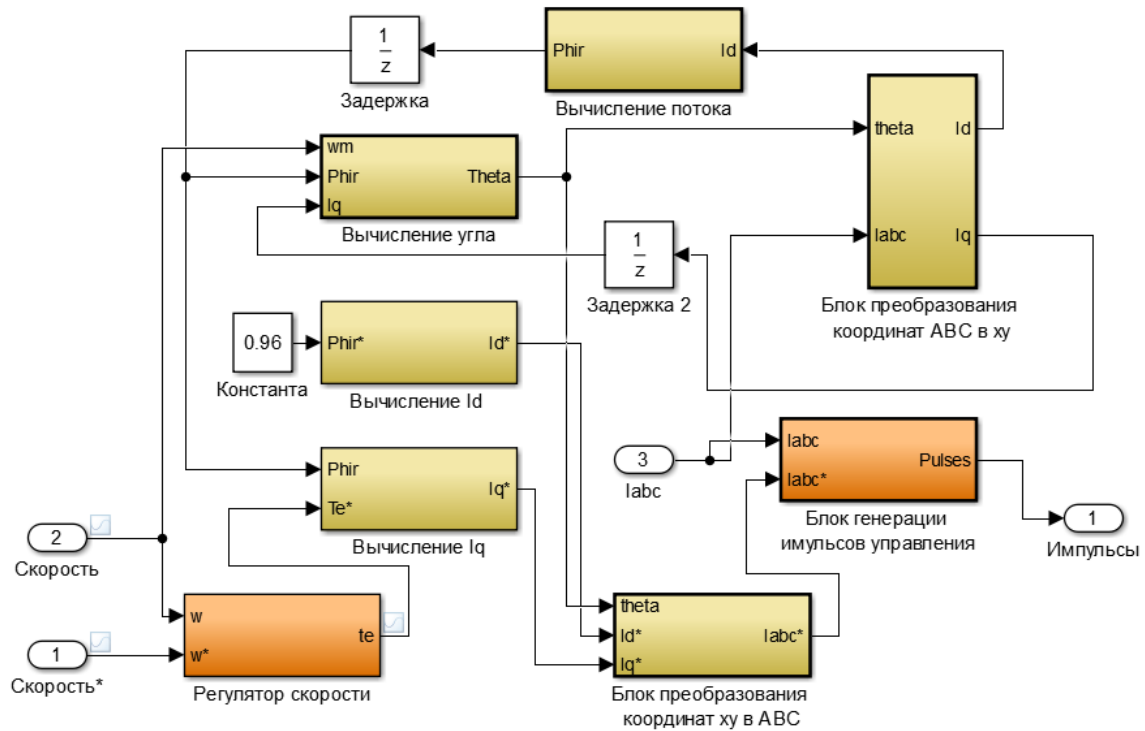


Рис. 2. Подсистема векторного управления

Табл. 1. Параметры блока асинхронного двигателя

Параметр	Значение
Номинальная мощность	37300 Вт
Напряжение питания	460 В
Частота тока	50 Гц
Активное сопротивление статора	0,087 Ом
Активное сопротивление ротора	0,228 Ом
Индуктивность статора	0,0008 Гн
Индуктивность ротора	0,0008 Гн
Взаимная индукция	0,0347 Гн
Количество пар полюсов	2
Инерция вала	1,662 кг·м <sup>2</sup>

Блок *Регулятор скорости* представлен на Рис. 3. Ошибка по скорости и ее производная подаются на *Блок нечеткой логики*, вычисляющий оптимальные коэффициенты для блока *ПИД контроллер*.

Ошибка по скорости и ее производная связана с пропорциональным, интегральным и дифференциальным коэффициентами следующим образом [7]:

1) если ошибка относительно велика, то для снижения её следует увеличить пропорциональное, уменьшить дифференциальное, а также исключить интегральное воздействия;

2) если ошибка и ее производная допустимые, то следует уменьшить пропорциональное воздействие до некоторой требуемой величины для снижения перерегулирования и влияния на систему;

3) если ошибка очень мала, необходимо увеличить пропорциональное и интегральное воздействия, чтобы системы обладала устойчивостью. Требуется так изменить дифференциальную составляющую, чтобы избежать колебания в системе. Если ошибка мала, то увеличиваем, если велика, то уменьшаем дифференциальное воздействие.

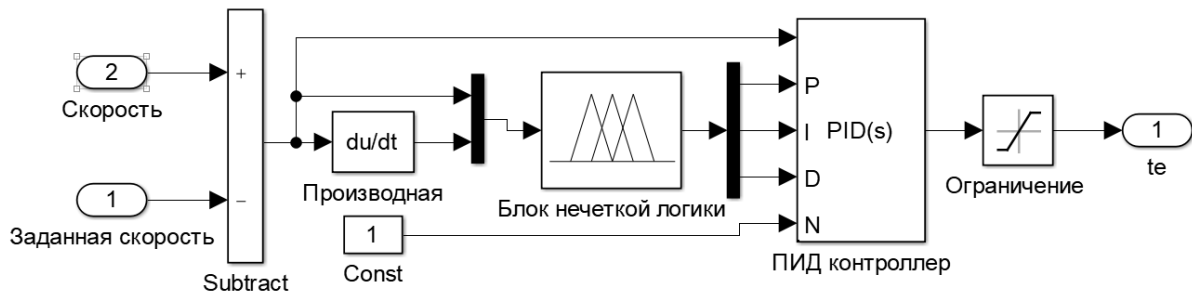


Рис. 3. Регулятор скорости

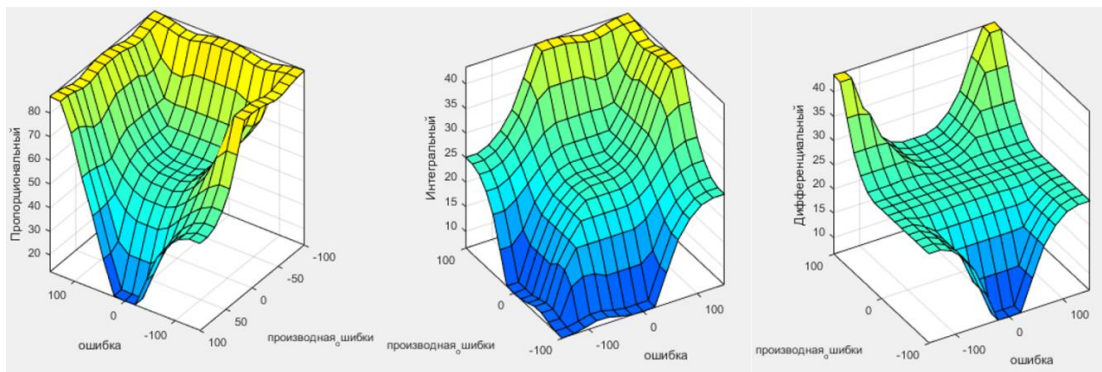


Рис. 4. Зависимости коэффициентов ПИД ошибки и производной ошибки по скорости

Исходя из вышесказанных зависимостей составляется таблица правил нечеткой логики. Зависимости коэффициентов ПИД-регулятора от входных параметров блока нечеткой логики приведены на Рис. 4. Блок работает по алгоритму Мамдани.

При обрыве CAN шины система выдает ошибку коммуникации всех модулей системы и приводит к повышенной нагрузке на backup линию связи. Список ошибок модулей связи приведен ниже:

COMM ERR BETW. ACP/BR - ESU CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - RPMU1 CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - RPMU2 CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - RAI CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - DGU CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - MEI CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - C2LOC CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - LTU BR CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - LTU ECR CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - PBT CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - MPP ECR CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - ACP-ECR CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - RDO CAN A FAIL  
 COMM ERR BETW. ACP/BR - DGU SIO CAN A FAIL

### 3.2. Получение сравнительных характеристик методом имитационного моделирования

Для получения сравнительных характеристик производилось имитационное моделирование при отсутствии маховика, с маховиком постоянного и переменного момента инерции.

#### 3.2.1. Без учета момента инерции маховика

При моделировании без учета момента инерции маховика, начальное задание частоты вращения составляет 120 рад/с. Двигатель запускается на заданную скорость с нагрузкой на валу. Момент инерции на валу составляет 0,1 кг·м<sup>2</sup>. Результаты моделирования представлены на Рис. 5.

Время пуска электродвигателя составляет 0,5 с, однако из-за переменной нагрузки видны пульсации частоты вращения (Рис. 6), обуславливающие вибрацию электродвигателя. Частота изменяется от 119,9 до 120,15 рад/с при установленной скорости в 120 рад/с. Относительная величина пульсации составляет 0,2%. Для уменьшения пульсаций частоты вращения добавим на вал момент инерции маховика.

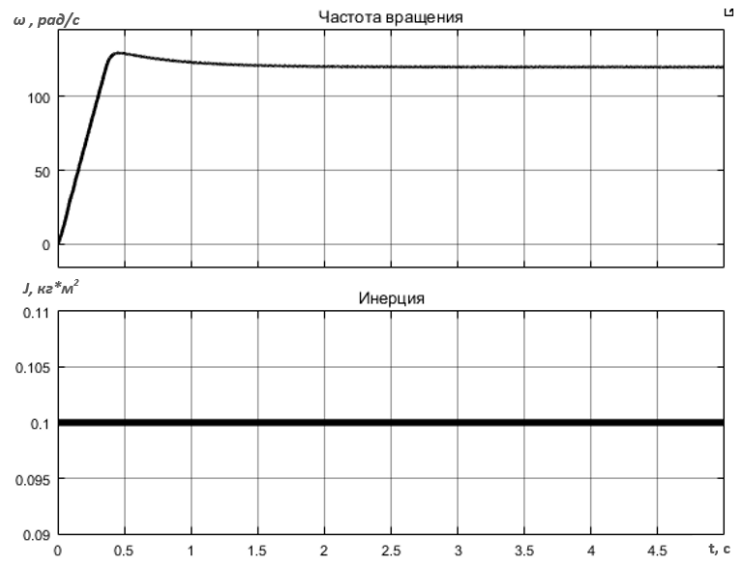


Рис. 5. Результаты моделирования без учета момента инерции маховика  
вверху – частота вращения вала, внизу – инерция маховика

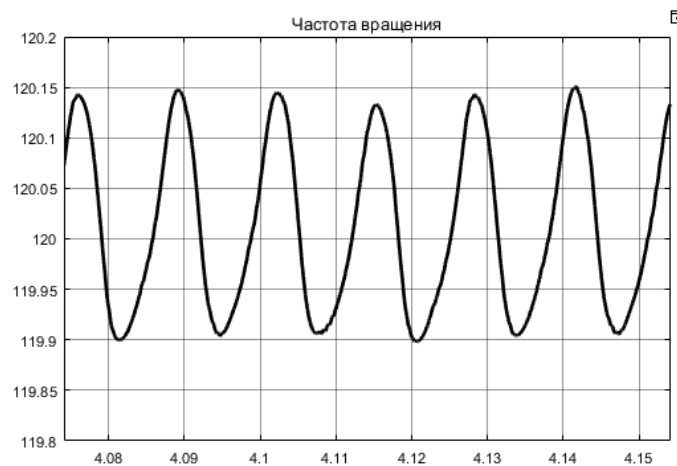


Рис. 5. Частота вращения (время 4.08-4.15 с.)

### 3.2.2. С учетом постоянного момента инерции маховика на валу

При моделировании с добавлением момента инерции маховика, временные отрезки разгона и изменения скорости вращения идентичны временным отрезкам при моделировании без маховика [8]. Результаты имитационного моделирования приведены на Рис. 7 и Рис. 8. Момент инерции маховика составляет  $1,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Из-за повышения момента инерции на валу увеличилось время запуска электродвигателя, которое составляет 1с, перерегулирование по скорости идентично полученным значениям

при моделировании без момента инерции маховика. Так же, при установившейся скорости вращения (Рис. 6) пульсации частоты вращения становятся значительно меньше. Частота изменяется от 119,97 до 120,08 рад/с при установленной скорости в 120 рад/с. Относительная величина пульсации составляет 0,09%. Это обуславливается наличием дополнительного момента инерции. Одним из минусов применения такого способа уменьшения пульсаций частоты и вибраций устройства является повышенное время запуска, а, следовательно и повышенное время протекания пусковых токов в электродвигателе. Такие токи могут повлиять

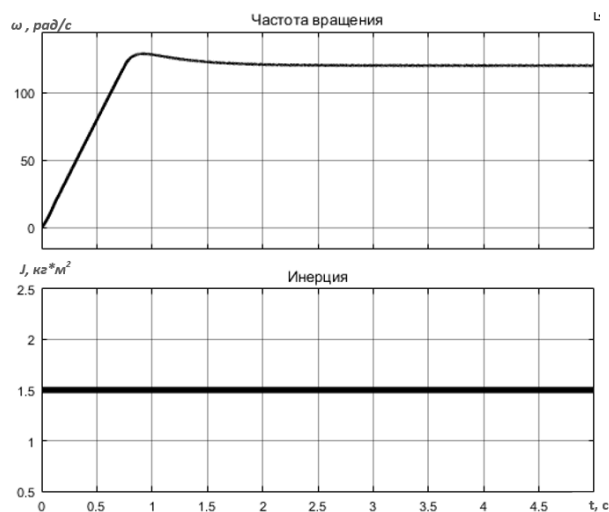


Рис. 7. Результаты моделирования при постоянной моменте инерции на валу  
вверху – частота вращения вала, внизу – инерция маховика)

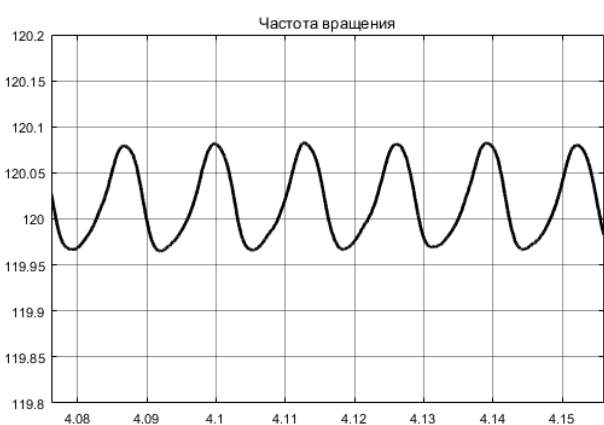


Рис. 8. Частота вращения с маховиком на валу. (время 4.08-4.15)

на время службы электродвигателя, увеличив нагрев обмоток и уменьшить эффективность электропривода, повысив количество потребляемой энергии. Для уменьшения времени запуска предложено использовать маховик переменного момента инерции.

### 3.2.3. С учетом переменного момента инерции маховика на валу

При моделировании с переменным моментом инерции на валу, который зависит от частоты вращения вала, временные отрезки разгона и изменения скорости вращения идентичны временным отрезкам при моделировании без маховика [9]. Результаты имитационного моделирования приведены на Рис. 9. Момент инерции изменяется по формуле (1).

Так как среднее значение подаваемой нагрузки на вал электродвигателя не изменилось, время запуска перерегулирование по скорости идентичны полученным значениям при моделировании без момента инерции маховика (Рис. 5). Однако при установившейся частоте вращения пульсации идентичны результатам, полученным при моделировании с маховиком постоянного момента инерции. Следует заключить, что переменный маховик инерции позволяет уменьшить амплитуды пульсаций частоты вращения без увеличения времени запуска электродвигателя [10-11].

По графикам переходных процессов момента и токов для всех случаев моделирования (Рис. 5, Рис. 7, Рис. 9) видно, как ПИД-регулятор

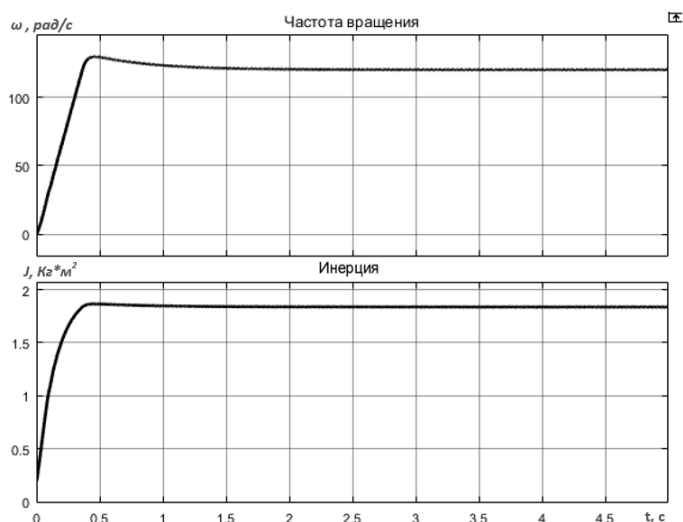


Рис.9. Результаты моделирования при переменном моменте инерции на валу  
вверху – частота вращения вала, внизу – инерция маховика

с адаптивной нечеткой подстройкой коэффициентов качественно обрабатывает задающие и возмущающие воздействия. Перерегулирование по скорости не превышает 5% от заданной скорости, следовательно переходный процесс при изменении значения заданной скорости является завершённым при первом достижении ротором заданной скорости вращения.

## Заключение

В ходе исследования в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink реализована модель асинхронного электропривода с векторным управлением, работающего на переменную нагрузку. Разработанная модель может использоваться для создания программной части системы управления частотного преобразователя с обратной связью (с использованием энкодера или датчика Холла).

Моделирование системы при работе привода на постоянную нагрузку на валу позволили сделать вывод о правильности настройки модели по параметрам схемы замещения двигателя. Применение переменного момента инерции позволило снизить коэффициент пульсаций частоты вращения электродвигателя с 0,2% до 0,09% без увеличения времени запуска. Так же, результаты моделирования показали эффективность применения нечеткой логики для настройки коэффициентов ПИД-регулятора.

## Литература

1. A. Vyngra, B. Avdeyev, Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit. // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. (FarEastCon), 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.
2. Ruselprom group. [электронный ресурс] режим доступа: <http://ruselprom.com/>. (дата обращения 25.10.2018).
3. Chernyi, S., Vyngra, A., Erofeev, P., & Novak, B. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems // Procedia Computer Science, (2020). 167, 2164-2171. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266
4. B. A. Avdeev and A. V. Vyngra, Simulation of Variable Frequency Controlled AC Induction Motor Operating On Non-Linear Load, // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 2346-2349.
5. Sokolova E.A., Dzhioev G.A. Development of an algorithm for automated enhancement of digital prototypes in machine engineering. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 10. Series "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016", 2017, pp. 012-037.
6. Пат. 2705405 Российская Федерация, МПК F16D 15/31, F16D 41/12, F16D 43/14. Маховик переменного момента инерции / Вынгра А. В., Авдеев Б. А.; - N 2018143949; заявл. 11.12.2018; опубл. 7.11.2019 Бюл. N° 31.
7. Кудинов Ю.И., Колесников В.А., Дургарян И.С., Пашенко А.Ф., Построение и настройка нечеткого адаптивного ПИД-регулятора // Информатика и системы управления, 2016, №3(49), с. 86-96.
8. Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Создание систем электродвижения для судов различного назначения // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 1(387). С. 107-122.



9. Grasso F., Allotta B., Rindi A., Pugi L., Fusi A. and Ussi A., Transient power pulse calculation in electric motor driving reciprocating compressor. // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1 – 5.
10. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. - Спб.: Коронавек, 2008. – 368 с., ил.
11. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. - Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 279 с.

**Черный Сергей Григорьевич.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова", г. Санкт-Петербург, Россия. Доцент, кандидат технических наук, доцент. Количество печатных работ: 100 (в т.ч. 3 монографии и 2 учебника). IEEE, DAAAM, EAI членство. Член редакции журналов MDPI, Hindawi. Область научных интересов: информационные технологии, моделирование гетерогенных систем. E-mail: sergiublack@gmail.com (Ответственный за переписку).

**Вынгра Алексей Викторович.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Керченский государственный морской технологический университет", г.Керчь, Россия. Аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства. Количество печатных работ: 20. Область научных интересов: электроэнергетика, морские электроэнергетические комплексы. IEEE – member. E-mail: elag1995@gmail.com.

**Авдеев Борис Александрович.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Керченский государственный морской технологический университет", г.Керчь, Россия. Доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства, кандидат технических наук. Количество печатных работ: 40 (в т.ч. 2 монографии). IEEE – member. Область научных интересов: вычислительные модели и комплексы. E-mail: dirigeant@mail.ru

## Development of Simulation Model for Asynchronous Electric Drive Using Vector Control as Component of Structural Software Module

S. G. Chernyi,<sup>1, 2</sup> B. A. Avdeev<sup>1</sup>, A. V. Vyngra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

<sup>2</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract.** A mathematical simulation model of a vector control system for an induction-motor drive is developed. The simulation of the system at constant and variable shaft load is made. The complex variable load depends on the angle of rotation of the motor shaft. The simulation results showed the presence of ripples of rotational speed. It is proposed to use a neural network controller in the control system to reduce the ripple coefficient.

**Keywords:** AC induction motor, variable-frequency drive, non-linear load, modeling, Simulink.

**DOI** 10.14357/20718632200207

## References

1. A. Vyngra, B. Avdeyev, Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit. // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. (FarEastCon), 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.
2. Ruselprom group. [jelektronnyj resurs] rezhim dostupa: <http://ruselprom.com/>. (data obrashhenija 25.10.2018).
3. Chernyi, S., Vyngra, A., Erofeev, P., & Novak, B. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems // Procedia Computer Science, (2020). 167, 2164-2171. doi: 10.1016/j.procs.2020.03.266
4. B. A. Avdeev and A. V. Vyngra, Simulation of Variable Frequency Controlled AC Induction Motor Operating On Non-Linear Load, // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 2346-2349.
5. Sokolova E.A., Dzhioev G.A. Development of an algorithm for automated enhancement of digital prototypes in machine engineering. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 10. Series "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016", 2017, pp. 012-037.

6. Pat. 2705405 Rossijskaja Federacija, MPK F16D 15/31, F16D 41/12, F16D 43/14. Mahovik peremennogo momenta inercii / Vyngra A. V., Avdeev B. A. ; - N 2018143949; zajavl. 11.12.2018; opubl. 7.11.2019 Bjul. N° 31.
7. Kudinov Ju.I., Kolesnikov V.A., Durgarjan I.S., Pashhenko A.F., Postroenie i nastrojka nechetkogo adaptivnogo PID-reguljatora // Informatika i sistemy upravlenija, 2016, №3(49), s. 86-96.
8. Vershinin V.I., Mahonin S.V., Parshikov V.A., Homjak V.A. Sozdanie sistem jelektrodvizhenija dlja sudov razlichnogo naznachenija // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. 2019. Vyp. 1(387). S. 107-122.
9. Grasso F., Allotta B., Rindi A., Pugi L., Fusi A. and Ussi A., Transient power pulse calculation in electric motor driving reciprocating compressor. // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 1 – 5.
10. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. - Spb.: Koronavek, 2008. – 368 s., il.
11. Shrejner R. T. Sistemy podchinennogo regulirovanija jelektroprivodov. - Ekaterinburg: Izd-vo GOU VPO «ros. gos. prof.-ped. un-t», 2008. 279 s.

**Chernyi S. G.** Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, Russia, Saint-Petersburg, Dvinskaya st., 5/7. Associate Professor, PhD, Associate Professor. Number of publications: 100 (including 3 monographs and 2 books). IEEE, DAAAM, EAI Membership. Member of the Editorial Board of MDPI, Hindawi journals. Research interests: information technology, modeling of heterogeneous systems. Email: sergiiblack@gmail.com

**Vyngra A. V.** Kerch State Maritime Technological University, 2983095, Russia, Kerch, Ordzonikidze st., 82. PhD student of the Department of Electrical Equipment of Ships and Industrial Automation. Number of publications: 20. Research interests: electric power industry, offshore electric power complexes. IEEE - member. Email: elag1995@gmail.com

**Avdeev B. A.** Kerch State Maritime Technological University, 2983095, Russia, Kerch, Ordzonikidze st., 82. Associate Professor at the Department of Ship Electrical Equipment and Industrial Automation, PhD. Number of publications: 40 (including 2 monographs). Research interests: computational models and complexes. E-mail: dirigeant@mail.ru