

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-95-104

УДК 681.5

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТОЧНОЙ НАСТРОЙКИ И ОТЛАДКИ СУДОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

*С. Г. Черный, А. С. Соболев, П. А. Ерофеев*

*Керченский государственный морской технологический университет,  
Керчь, Российская Федерация*

Частотно-регулируемый электропривод состоит из двух элементов: электрический привод, в качестве которого используются синхронный или асинхронные электроприводы, т. е. приводы, работающие от переменного тока, и преобразователь частоты, способный управлять амплитудой и частотой напряжения, поступающего на электропривод. Появляется возможность управления частотой вращения электродвигателя и моментом на его валу. Наиболее оптимальная энергоэффективность при использовании компрессорных установок достигается при таком режиме работы, когда его среднесуточный коэффициент загрузки составляет не менее 85 %. При указанном режиме работы колебания в потреблении сжатого воздуха будут минимальными, также обеспечивается наиболее стабильная работа компрессора на его расчетной номинальной мощности. На практике в данном режиме работы эксплуатируются не более чем 15 % от всех промышленных компрессоров. Для остальных 85 % компрессорных установок вопрос о повышении энергоэффективности с помощью регулирования его производительности остается открытым. Способ регулирования производительности с использованием преобразователя частоты на данный момент является наиболее оптимальным и совершенным, т. к. при таком способе регулировки параметров электропривода обеспечивается наиболее точное регулирование давления сжатого воздуха, что позволяет снизить затраты электроэнергии процесса нагнетания сжатого воздуха, а также продлить срок службы используемого оборудования. Рассматривается устройство с частотным регулированием компрессорной установки, отладка которого производилась на основании математической модели, что позволит подобрать наиболее оптимальные параметры для частотного регулирования электропривода компрессорной установки с целью повышения энергоэффективности. Осуществляется анализ всех преимуществ и недостатков частотного регулирования, а также проводится сравнительный анализ для выбора оптимального преобразователя частоты с учетом импортозамещения.

**Ключевые слова:** моделирование, имитационная модель, электропривод, оптимальные параметры, пульсация.

**Для цитирования:** Черный С. Г., Соболев А. С., Ерофеев П. А. Разработка имитационных моделей для точной настройки и отладки судовых преобразователей частоты // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 4. С. 95–104. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-95-104.

### **Введение**

Наиболее оптимальных показателей энергоэффективности работы частотных электроприводов получается достичь лишь при максимально точной настройке частотного преобразовате-

ля. Зачастую настройка частотных преобразователей производится экспериментальным путем либо, что является крайне трудозатратным способом, на основании изначально известных параметров электропривода. Зачастую номинальные параметры электропривода, особенно ненового, могут отличаться от реальных в силу различных факторов, поэтому и такой метод тоже не всегда позволяет достичь максимальной энергоэффективности [1].

В настоящей статье рассматривается метод настройки частотного электропривода, основанный на показателях предварительно созданной имитационной модели в среде моделирования MatLab. Рассматриваемый метод позволяет значительно ускорить и упростить процесс настройки преобразователя частоты, а также максимально повысить энергоэффективность работы частотного электропривода.

### **Разработка имитационной модели**

Так как для работы компрессорной установки используется бездатчиковый векторный преобразователь с целью упростить и удешевить замкнутую систему управления, то необходимо учитывать одну из важнейших составляющих подобных систем – блок наблюдателя состояний. Блок представляет собой математическую модель электродвигателя, на основе которой определяются его текущие параметры, такие как угловая скорость и положение вала. Для корректной работы блока наблюдателя необходимо учитывать точные параметры электропривода. Существует возможность настроить экспериментально-опытным путем некоторые элементы системы управления, однако для устройств с переменным моментом нагрузки на валу электропривода требуется максимально точное и быстрое определение состояний нагрузки. В итоге появляется необходимость в создании алгоритма точной изначально идентификации параметров асинхронного электродвигателя и постоянной идентификации параметров нагрузки.

В данном разделе произведена оценка нагрузки электродвигателя поршневой компрессорной установки [2]. Нагрузку на вал двигателя рассчитывали при использовании индикаторных диаграмм компрессорной установки, мощность которой составляет 2,2 кВт. В результате измерений был получен график, который иллюстрирует изменение момента нагрузки на валу компрессора, зависящего от угла поворота. График используют для создания модели векторной системы управления асинхронным двигателем. Также были созданы и изучены пусковые характеристики электропривода поршневой компрессорной установки, при этом используется математическая модель неравномерного момента нагрузки на валу компрессорной установки. Зависимость момента нагрузки на валу электропривода компрессорной установки от угла поворота представлена как математическая модель. После чего были построены графики переходных процессов, основанные на показателях скорости электропривода компрессорной установки и на потреблении тока, при этом учитывались различные значения момента инерции двигателя и маховика. Численное моделирование выявило, что при условии неравномерной периодической нагрузки на валу электропривода компрессорной установки без маховика пуск асинхронного двигателя выполняется при номинальных значениях, но в установившемся режиме работы проявляются весоые пульсации тока (более 10 %). Установлено, что при условии когда добавляется момент инерции маховика в модель, который создает дополнительный момент инерции, пульсации скорости вращения и тока значительно уменьшаются, но при этом увеличивается время, затрачиваемое на пуск электродвигателя (рис. 1).

Для проведения исследований системы векторного управления необходимо использовать математическую имитационную модель асинхронного электропривода с частотным векторным управлением. Данная модель состоит из структурных блоков. Основным устройством является асинхронный электропривод, получающий питание от IGBT-инвертора.

На выходе блока пульсаций генерируются импульсы для трехфазного мостового 6-импульсного инвертора, который представлен в виде универсального IGBT-моста.

Подсистема блока управления контролирует силовые ключи инвертора. Чтобы получить сигнал управления, используется обратная связь по моменту, а также скорости вращения электродвигателя. Блоки подсистемы изображены на рис. 2.

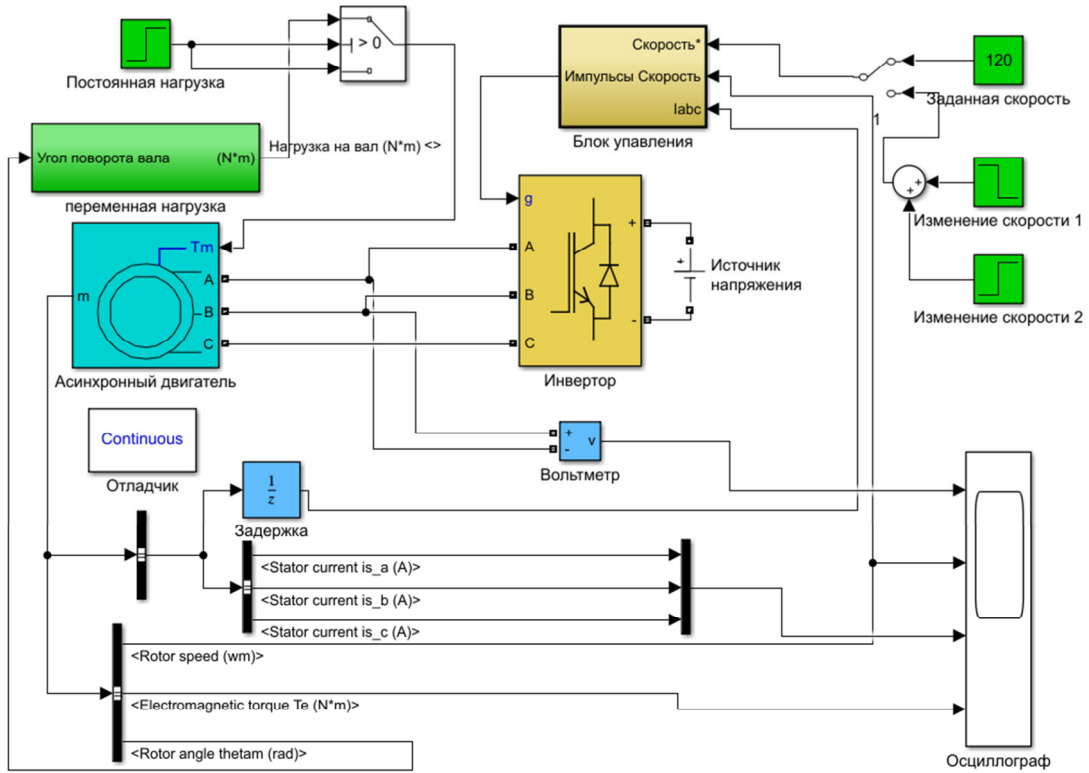


Рис. 1. Схема имитационной модели MatLab

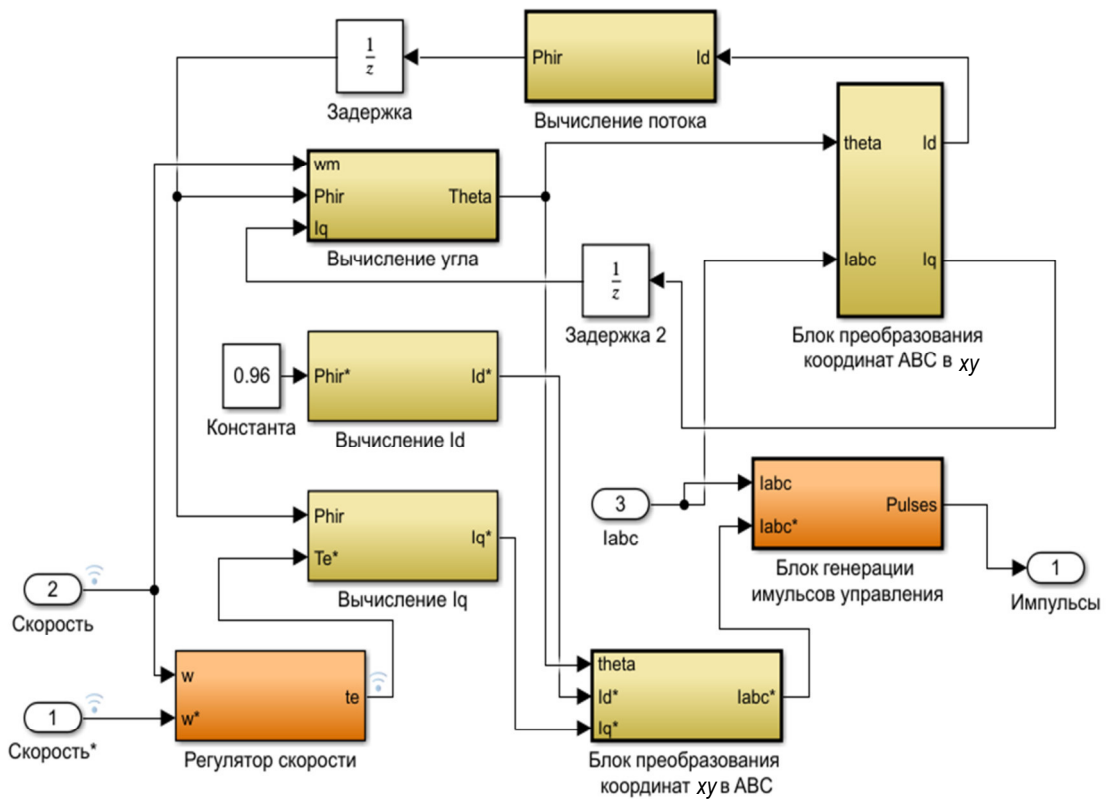


Рис. 2. Подсистема векторного управления

В подсистеме происходит пересчет координат их трехфазной системы токов статора в двухфазную систему магнитного потока ротора. В блок регулятора скорости встроены ПИ-регулятор, который определяет величину необходимого электромагнитного момента электропривода.

На блок инвертора подается постоянное напряжение с блока источника питания – 380 В. При получении импульсов с широтной модуляцией (ШИМ) от системы управления блок преобразует постоянное напряжение в синусоидальное переменное напряжение с изменяемой частотой и амплитудой. Такое напряжение в свою очередь поступает на блок асинхронного двигателя.

Блок асинхронного двигателя имеет основные параметры (табл.).

**Характеристики блока асинхронного двигателя**

Параметры	Величина
Номинальная мощность, Вт	50 × 746
Напряжение питания, В	380
Частота тока, Гц	50
Активное сопротивление статора, Ом	0,087
Активное сопротивление ротора, Ом	0,228
Начальная индукция, Гн	0,0347
Количество пар полюсов	2
Инерция, кг·м <sup>2</sup>	1,662

В качестве момента нагрузки для моделирования запуска и работы электропривода используются постоянный и переменный моменты. Выбор блоков постоянной нагрузки и переменной нагрузки определяет тип нагрузки, которая подается на вал электропривода. При выборе постоянной нагрузки электропривод запускается в холостом режиме, и при 2 с подключится момент нагрузки 170 Нм. При выборе переменной нагрузки на вал электропривода будет подаваться изменяемый периодически момент нагрузки, который представлен в виде формулы

$$M_{St}(\varphi) = 136,6385 - 47,047 \sin(4\varphi + 1,53) + 18,695 \sin(8\varphi - 0,802) - 3,274 \sin(12\varphi + 1,331) + 5,272 \sin(16\varphi + 1,469) + 2,321 \sin(20\varphi - 0,656).$$

Подобный момент нагрузки характеризует сложные механические устройства, которые обладают кривошипно-шатунным механизмом, например поршневые компрессорные установки и насосы. На рис. 3 представлена подсистема переменной нагрузки.

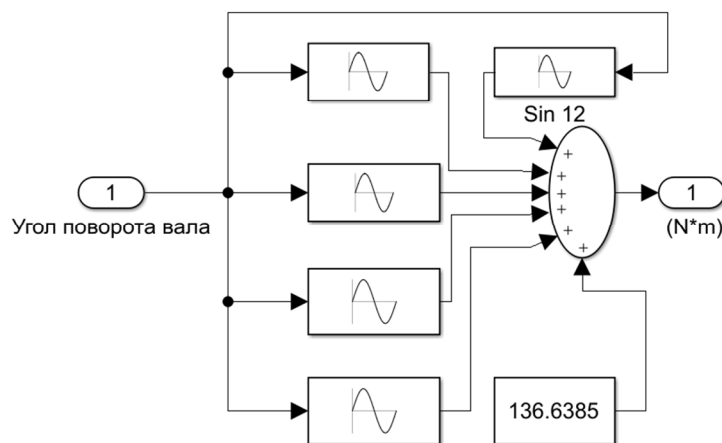


Рис. 3. Подсистема нелинейной нагрузки

Входным сигналом для блоков синусоидальных гармоник является угол поворота вала электродвигателя.

### Результаты моделирования

Для того чтобы оценить правильность работы ПИ-регулятора, была проведена серия моделирований с различными коэффициентами пропорциональной и интегральной части регулятора при пуске двигателя на холостом ходу. Полученные данные представлены на диаграмме (рис. 4).

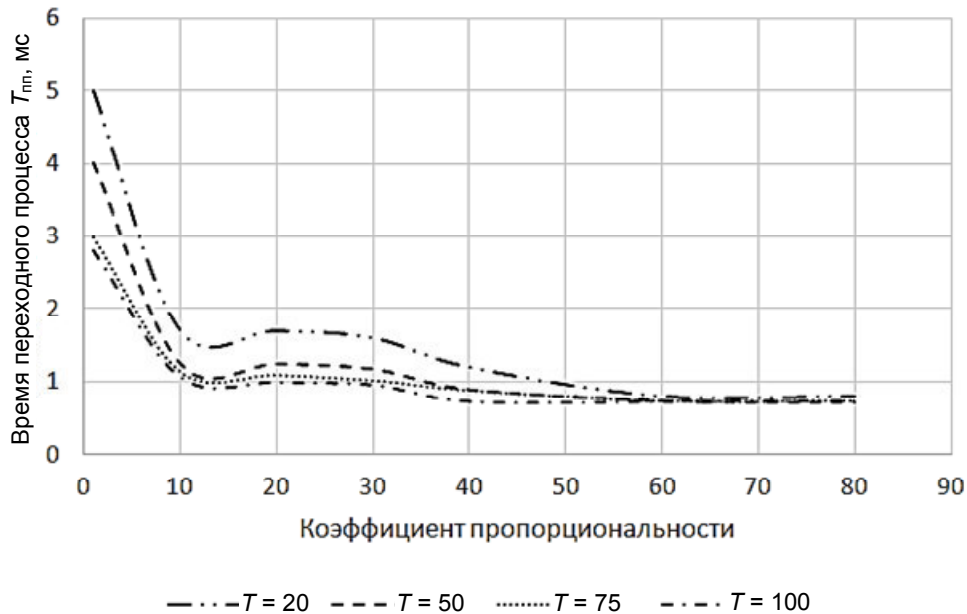


Рис. 4. Зависимость времени запуска электродвигателя от коэффициентов ПИ-регулятора

Наименьшее время переходного процесса (разгона электродвигателя до заданной скорости в диапазоне погрешности 5 %) появляется при наибольшем значении пропорциональной части регулятора и при увеличении интегральной его части. При значениях коэффициента пропорциональности менее 10 значение перерегулирования по скорости вращения составляет больше 5 %, за счет чего резко увеличивается время переходного процесса.

Следует отметить, что при значениях коэффициента пропорциональности больше 50 система находится на грани устойчивости (колебания скорости вращения не уменьшаются). Для достижения наибольшей точности работы регулятора в сконструированной модели необходимо принимать коэффициенты пропорциональной части  $K = 50$  и интегральной  $T = 100$ . Результаты подбора коэффициентов идентичны настройке параметров регулятора по методу Зиглера – Никольса, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Для получения сравнительных характеристик производилось имитационное моделирование при постоянной и изменяемой нагрузке.

#### 1. Постоянная нагрузка на валу.

В момент проведения моделирования скорость, которая была задана изначально, составляет 120 рад/с. Пуск электропривода при этом выполняется вхолостую, а уже после выходит на скорость, заданную изначально, без нагрузки на валу электропривода. После вывода электропривода на заданную номинальную скорость происходит ввод нагрузки на вал электропривода в момент времени  $t = 2$  с. После этого, в момент времени  $t = 3$  с, происходит снижение изначально заданной скорости до 70 рад/с. В момент времени 4 с наблюдается увеличение скорости, которая была задана изначально, до 80 рад/с.

Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6.

По показателям графиков, описывающих переходные процессы момента и токов во время изменения скорости, становится ясно, что регуляторы наиболее качественно компенсируют различные воздействия, как задающие, так и возмущающие. Перерегулирование по скорости при этом составляет не более 5 % от скорости, которая задавалась изначально. Таким образом, переходный процесс при изменении значения скорости, которая задавалась изначально, будет считаться завершенным при первом достижении ротором заданной изначально скорости вращения.

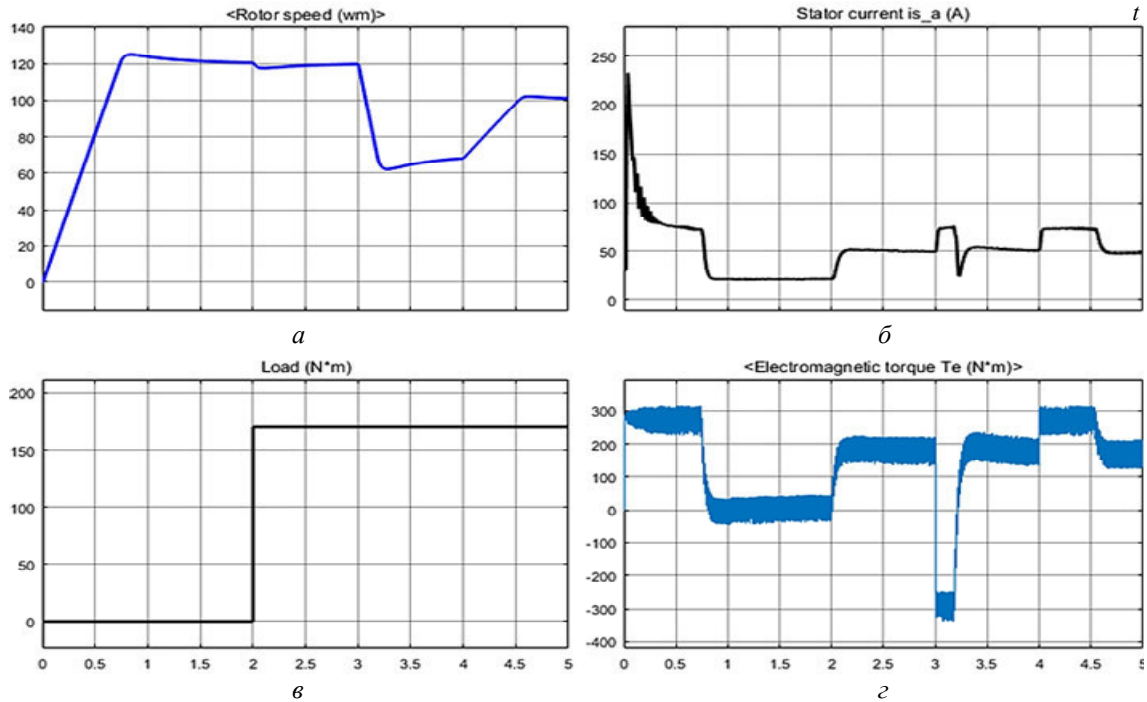


Рис. 5. Результаты моделирования при постоянной нагрузке на валу:  $a$  – скорость вращения вала;  $б$  – ток статора;  $в$  – нагрузка на валу;  $г$  – электромагнитный момент

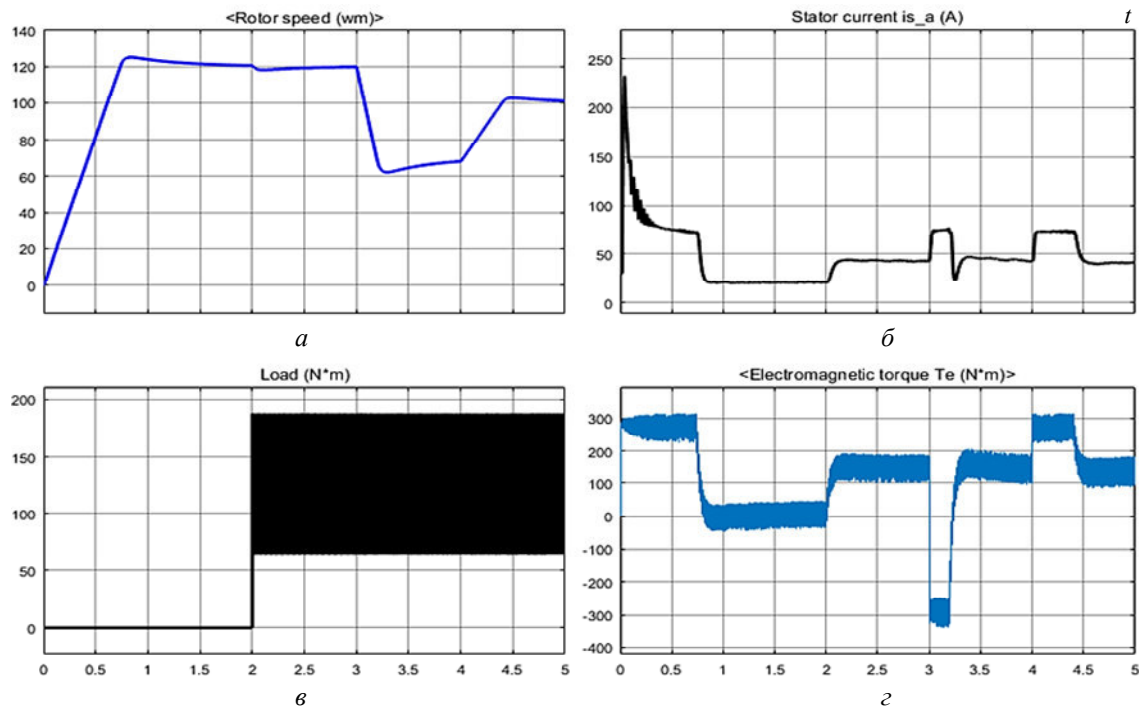


Рис. 6. Результаты моделирования при переменной нагрузке на валу:  $a$  – скорость вращения вала;  $б$  – среднеквадратичное значение тока статора;  $в$  – нагрузка на валу;  $г$  – электромагнитный момент

## 2. Переменная нагрузка на валу.

При проведении моделирования с переменной нагрузкой на валу электропривода, которая в свою очередь зависит от угла поворота вала, временные промежутки разгона, подключения

нагрузки на вал и изменения скорости вращения совпадают с временными отрезками при моделировании с постоянной нагрузкой. Результаты моделирования с переменной нагрузкой на валу приведены на рис. 5, 6.

Поскольку среднее значение нагрузки, которая подается на вал электропривода, кардинально не изменилось, переходные процессы и перерегулирование по скорости совпадают с полученными значениями при моделировании с постоянным моментом нагрузки [3–5]. Однако при установившейся скорости вращения можно заметить пульсации скорости вращения и значения тока, которые формируют дрожание электродвигателя в реальных условиях.

#### Результаты настройки частотного электропривода на основании полученной модели

Для получения результатов измерения параметров устройства использовался цифровой осциллограф с возможностью записи результатов на съемный носитель для их последующей обработки. Замеры производились через трансформатор тока.

Вначале устройство частотного управления электроприводом компрессорной установки было запущено без предварительной настройки, основанной на результатах проведенного моделирования. Согласно рис. 7 на питающем электропривод сигнале присутствуют значительные пульсации тока, что крайне негативно влияет на общую энергоэффективность всей установки.

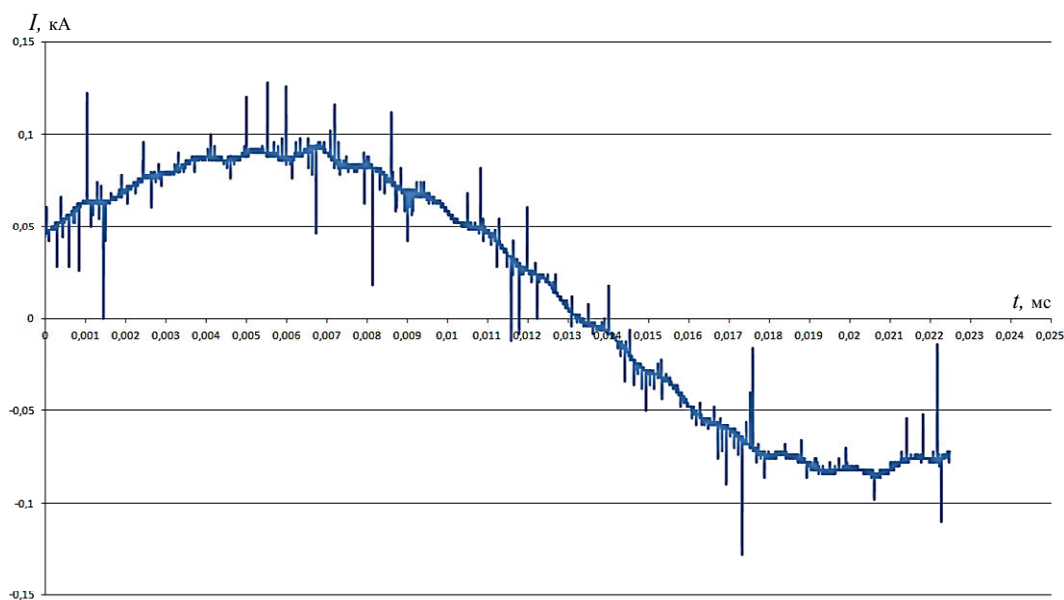


Рис. 7. Результаты измерений физической модели без предварительной настройки

Исходя из результатов моделирования были определены оптимальные параметры питания электропривода компрессорной установки от преобразователя частоты, на основании которых произведена настройка частотного преобразователя с целью минимизировать пульсации на питающем электропривод сигнале. После настройки, основанной на результатах моделирования, пульсации на питающем электропривод сигнале сократились во всем диапазоне, как в режиме работы при номинальных параметрах на максимальной скорости, так и в режимах частотного регулирования, когда скорость вращения вала электропривода значительно меньше номинальной (рис. 8).

Результаты моделирования с переменной нагрузкой на валу электропривода подтвердили наличие пульсаций скорости вращения и тока статора. Созданная модель векторного управления может применяться для создания программной части системы управления частотно-регулируемым электроприводом в датчиковом режиме (с использованием энкодера или датчика Холла).

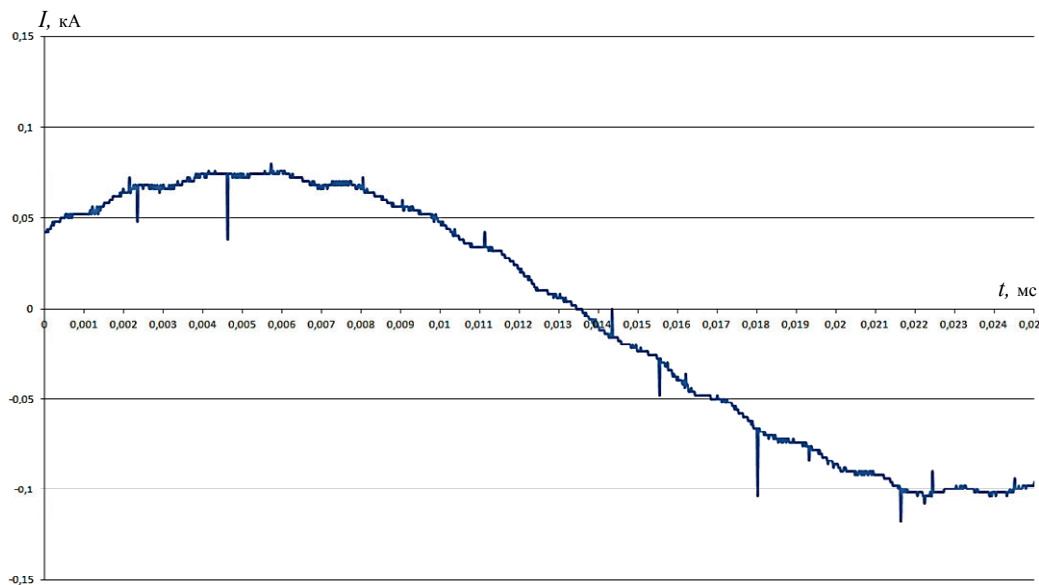


Рис. 8. Результаты измерений физической модели в режиме частотного регулирования после предварительной настройки

Согласно результатам, полученным при моделировании, были подобраны оптимальные параметры питания электропривода компрессорной установки. Подбор параметров позволил сгладить пульсации питающего электропривод сигнала, что привело к значительному росту энергоэффективности компрессорной установки, а также продлению ее срока службы из-за стабилизации температурного режима электропривода при минимизировании пульсаций питающего сигнала.

### Заключение

В настоящей статье произведено исследование в среде имитационного моделирования MatLab, на основании полученной модели выявлены оптимальные параметры по настройке частотного преобразователя, питающего электропривод с переменной нагрузкой на валу. Результаты исследования позволили значительно сократить пульсации питающего электропривод сигнала, что привело к значительному росту энергоэффективности всей установки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромятников И. А. Режим работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
2. Раймонд Мэк. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению. М.: Додэка-XXI, 2010. 272 с.
3. ОВЕН ПЧВ3 преобразователи частоты векторные для насосов и вентиляторов. URL: [https://owen.ru/product/preobrazovatel\\_chastoti\\_oven\\_pchv3](https://owen.ru/product/preobrazovatel_chastoti_oven_pchv3) (дата обращения: 01.06.2020).
4. Вынгра А. В., Комиссаров Д. Р., Черный С. Г. Физическое моделирование автоматизированной системы управления креном судна // Системы управления и обработки информ. 2020. № 3 (50). С. 40–49.
5. Жиленков А. А., Черный С. Г. Сетевая система отказоустойчивого управления критически важными объектами морского транспорта // Законодат. и приклад. метрология. 2019. № 5 (162). С. 35–38.

Статья поступила в редакцию 02.10.2020

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Черный Сергей Григорьевич** – Россия, 298309, Керчь; Керченский государственный морской технологический университет; канд. техн. наук, доцент; зав. кафедрой электрооборудования судов и автоматизации производства; [sergiiblack@gmail.com](mailto:sergiiblack@gmail.com).



**Соболев Александр Сергеевич** – Россия, 298309, Керчь; Керченский государственный морской технологический университет; магистрант кафедры машин и аппаратов пищевых производств; sobolev.alexandr1496@gmail.com.

**Ерофеев Павел Андреевич** – Россия, 298309, Керчь; Керченский государственный морской технологический университет; аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; pavel.erofeev.95@mail.ru.



## DEVELOPING SIMULATION MODELS FOR PRECISE ADJUSTMENT AND DEBUGGING OF SHIP FREQUENCY INVERTERS

*S. G. Cherniy, A. S. Sobolev, P. A. Erofeev*

*Kerch State Maritime Technological University,  
Kerch, Russian Federation*

**Abstract.** The paper describes a variable frequency drive which consists of two elements: an electric drive (synchronous or asynchronous electric drives, that is, drives powered by alternating current are used in capacity of it), and a frequency converter able to control the amplitude and frequency of the voltage supplied to the drive. It becomes possible to control the speed of rotation of the electric motor and the torque on its shaft. The most optimal energy efficiency when using compressor units is achieved under the operating mode when its average daily load factor makes at least 85%. Under the mentioned operating mode fluctuations during the compressed air consumption will be minimal, and the most stable operation of the compressor at its rated nominal power is ensured. In practice, no more than 15% of all the industrial compressors are operated in such operating mode. For 85% of the compressor units the question of improving energy efficiency by regulating its capacity remains open. The method of capacity regulation by using a frequency converter is currently the most optimal and perfect, because adjusting the parameters of the electric drive in this way, the most accurate regulation of the compressed air pressure is provided, which allows reducing the energy consumption in the compressed air injection process, as well as extending the service life of the equipment used. There has been considered a device with frequency control of a compressor unit, debugging of which was carried out on the basis of a mathematical model, which allows choosing the most optimal parameters for frequency control of an electric drive of a compressor unit in order to increase energy efficiency. The analysis of all the advantages and disadvantages of frequency regulation is being carried out, as well as a comparative analysis for selecting the optimal frequency converter in terms of the import substitution.

**Key words:** simulation, simulation model, electric drive, optimal parameters, pulsation.

**For citation:** Cherniy S. G., Sobolev A. S., Erofeev P. A. Developing simulation models for precise adjustment and debugging of ship frequency inverters. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;4:95-104. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-95-104.

### REFERENCES

1. Syromiatnikov I. A. *Rezhim raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigatelei* [Mode of operation of asynchronous and synchronous electric motors]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 240 p.
2. Raimond Mek. *Impul'snye istochniki pitaniia. Teoreticheskie osnovy proektirovaniia i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniui* [Switching power supplies. Theoretical principles of design and practical guidelines]. Moscow, Dodeka-XXI Publ., 2010. 272 p.
3. *OVEN PChV3 preobrazovateli chastoty vektornye dlia nasosov i ventilatorov* [OVEN PChV3 vector frequency converters for pumps and fans]. Available at: [https://owen.ru/product/preobrazovatel\\_chastoti\\_oven\\_pchv3](https://owen.ru/product/preobrazovatel_chastoti_oven_pchv3) (accessed: 01.06.2020).
4. Vyngra A. V., Komissarov D. R., Cherniy S. G. Fizicheskoe modelirovanie avtomatizirovannoi sistemy upravleniia krenom sudna [Physical modeling of automated ship roll control system]. *Sistemy upravleniia i obrabotki informatsii*, 2020, no. 3 (50), pp. 40-49.

5. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G. Setevaia sistema otkazoustoichivogo upravleniia kriticheski vazhnymi ob"ektami morskogo transporta [Network system of fault tolerant control over critical marine transport facilities]. *Zakonodatel'naiia i prikladnaia metrologiia*, 2019, no. 5 (162), pp. 35-38.

The article submitted to the editors 02.10.2020

### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Cherniy Sergey Grigoryevich** – Russia, 298309, Kerch; Kerch State Maritime Technological University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; sergiiblack@gmail.com.

**Sobolev Alexandr Sergeevich** – Russia, 298309, Kerch; Kerch State Maritime Technological University; Master's Course Student of the Department of Machines and Apparatuses of Food Production; sobolev.alexandr1496@gmail.com.

**Erofeev Pavel Andreevich** – Russia, 298309, Kerch; Kerch State Maritime Technological University; Postgraduate Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; pavel.erofeev.95@mail.ru.

