

УДК 621.3.078

Система векторного управления автономным электроприводом

Т. Э. Муртазин*, А. А. Шевченко, В. Г. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия;

e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.09.2023;

получена
после доработки
21.09.2023;

принята к публикации
22.09.2023

Ключевые слова:

векторное управление,
имитационное
моделирование,
синхронный
электропривод,
система автономного
электропитания,
частотное
регулирование

Изучение и разработка автономных систем электропривода являются актуальными, поскольку такие системы широко распространены, особенно в отраслях морского и речного флота. Предложена имитационная модель автономного частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением и контуром активной мощности электродвигателя. Приведены результаты моделирования. Совершенствование системы управления направлено на увеличение экономичности, эффективности и надежности автономных электроприводов. Реализация контура активной мощности позволяет эффективно ограничивать потребляемую из генератора мощность, защищая от ее бросков, приводящих к останову дизель-генераторной установки. Регулирование активной мощности на валу более целесообразно для гребных электродвигателей по сравнению с регулированием скорости вращения вала. Создание единой системы управления автономным электроприводом позволяет учитывать взаимное влияние параметров электродвигателя и дизель-генераторной установки, в том числе для более эффективного регулирования напряжения и частоты установки с целью поддержания качества производимой электроэнергии на допустимом уровне. Объединение в единую систему позволит в дальнейшем интегрировать нейронные сети в качестве адаптивных нейросетевых регуляторов и систем-ассистентов. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя, а также качество энергетических параметров системы электропитания. Полученные результаты дают возможность сформулировать требования к синхронным машинам, к полупроводниковым элементам силовой части и преобразователям. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

Для цитирования

Муртазин Т. Э. и др. Система векторного управления автономным электроприводом. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 449–456. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456>.

Vector control system for autonomous electric drive

Timur E. Murtazin*, Artem A. Shevchenko, Vladimir G. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russia;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Article info

Received
01.09.2023;

received
in revised form
21.09.2023;

accepted
22.09.2023

Key words:

vector control,
simulation modeling,
synchronous
electric drive,
autonomous power
supply system,
frequency control

Abstract

The study and development of autonomous electric drive systems are relevant, since currently such systems are widespread especially in the marine and river fleet industries. A simulation model of an autonomous frequency-controlled synchronous electric drive with vector control and active power circuit of an electric motor has been proposed. Simulation results have been presented. The improvement of the control system is aimed at increasing the efficiency and reliability of autonomous electric drives. The implementation of the active power circuit allows one to effectively limit the power consumed from the generator, protecting it from surges that lead to the shutdown of the diesel generator set. The regulation of the active power on the shaft is more appropriate for electric propeller drives than the regulation of the shaft rotation speed. The creation of a unified control system for an autonomous electric drive makes it possible to take into account the mutual influence of parameters of the diesel generator set and the electric motor, including more efficient regulation of the voltage and frequency of the generator in order to maintain the quality of electricity produced at an acceptable level. The integration into a single system will further integrate neural networks as adaptive neural network regulators and Virtual Assistant systems. Modern simulation software makes it possible at the design stage to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of the electric motor, as well as the quality of energy parameters of the power supply system. Based on the results obtained, it is possible to form requirements for synchronous machines, for semiconductor elements of the power part and converters. The simulation results confirm the correctness of the adjustment of the control circuits and allow us to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

For citation

Murtazin, T. E. et al. 2023. Vector control system for autonomous electric drive. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 449–456. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456>.

Введение

Автономные системы электроприводов находят применение там, где невозможно организовать электроснабжение от основной сети общего назначения, а именно: удаленные сельскохозяйственные предприятия, суда различных отраслей морского и речного флотов, удаленные насосные станции и др. Ввиду ряда преимуществ, таких как экономичность и быстрый ввод в эксплуатацию, наибольшее распространение на сегодняшний день получили установки типа дизель-генератор – двигатель переменного тока (Алешков и др., 2009; Григорьев и др., 2014). Вопросы снижения потребления топлива дизельным двигателем, а также повышения эффективности и надежности электропривода не перестают быть актуальными. При организации электроснабжения потребителей от дизель-генератора, помимо главного электропривода, особенно остро встают вопросы о поддержании надлежащего качества электроэнергии и бесперебойности эксплуатации (Соколовский, 2006; Тихомиров и др., 2010; Михеев, 2016; Терехов и др., 2005).

В статье рассматриваются вопросы имитационного математического моделирования единой системы управления автономным частотно-регулируемым синхронным электроприводом с контуром активной мощности и стабилизацией напряжения генератора.

Материалы и методы

ГОСТ 32144-2013¹ устанавливает общие требования к предельно-допустимым длительным отклонениям величины и частоты питающего напряжения: $\pm 2\%$ от номинального значения для частоты и $\pm 10\%$ от номинального значения для амплитуды. Вместе с тем кратковременный скачок частоты допускается в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения.

Также необходимо учитывать, что превышение потребляемой из генератора мощности свыше 105–110 % от номинального уровня может привести к перегрузке агрегата, снижению срока эксплуатации из-за длительной работы на предельных режимах, существенному расходу топлива. При этом из-за большого превышения может произойти останов дизельного двигателя. Таким образом, система управления должна поддерживать скорость вращения дизельного двигателя и напряжение на обмотке возбуждения на номинальном значении для поддержания частоты и амплитуды выходного напряжения соответственно. Для ограничения и регулирования потребляемой электроприводом мощности предлагается использование векторного управления синхронным электродвигателем с контуром мощности. Возможности векторного управления позволяют вычислять момент без применения сложных систем датчиков (Фролов и др., 2018; Калачев, 2013). Для этого необходимо знать лишь потокосцепление ротора, которое остается постоянным для синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе, и значение проекции тока статора на ось q , которое определяется путем координатных преобразований сигналов с датчиков тока статора. Иными словами, при помощи датчиков тока и положения можно вычислить активную мощность на валу и сигнал обратной связи на регулятор мощности.

Составление имитационной модели и моделирование будет производиться в ПО Matlab Simulink (Дьяконов, 2008; 2012). Параметры синхронного генератора и синхронного двигателя с постоянными магнитами сведены в таблице. Мощность дизельного двигателя равна 7 000 кВт.

Таблица. Параметры электрических машин
Table. Parameters of electric machines

Синхронный генератор		Синхронный двигатель	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Номинальная мощность, S , ВА	6 500 000	Номинальная мощность, S , ВА	5 150 000
Номинальное линейное напряжение, U_n , В	6 300	Номинальное линейное напряжение, U_n , В	6 300
Номинальная частота напряжения, f , Гц	50	Номинальная частота питающего напряжения, f , Гц	50
Число пар полюсов, p	2	Тип возбуждения	постоянные магниты
Номинальная скорость, n , об/мин	1 500	Число пар полюсов, p	5
Тип ротора	явнополюсный	Форма обратной ЭДС	синусоидальная
Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,0164	Тип ротора	неявнополюсный

¹ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М., 2014.

Индуктивное сопротивление $X_{d'}$, о.е.	1,856	Активное сопротивление фазы статора R_s , Ом	0,093
Индуктивное сопротивление $X_{d''}$, о.е.	0,242	Индуктивность фазы статора L_s , Гн	0,002
Индуктивное сопротивление $X_{q''}$, о.е.	0,168	Момент инерции ротора, J , кг·м ²	3 781
Индуктивное сопротивление X_q , о.е.	1,375		
Индуктивное сопротивление X_q'' , о.е.	0,195		
Индуктивное сопротивление X_l , о.е.	0,13		

На основе представленных параметров и выше обозначенных особенностей системы управления разработана математическая имитационная модель (рис. 1).

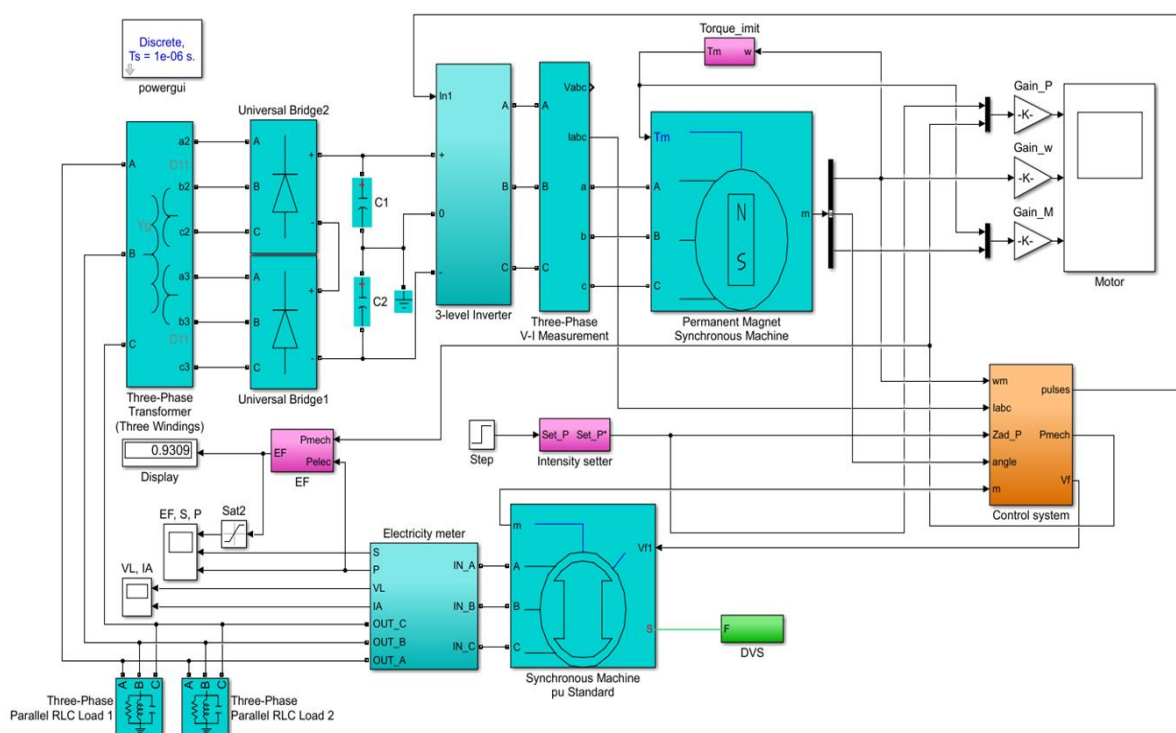


Рис. 1. Модель автономной системы синхронного электропривода
 Fig. 1. Model of an autonomous synchronous electric drive system

Блок 3-level Inverter, построенный на базе IGBT транзисторов, получает питание от синхронного генератора Synchronous Machine pu Standard через выпрямители Universal Bridge, которые подключены к обмоткам понижающего трансформатора с расщепленной обмоткой. Затем через блок измерений Three-Phase V-I Measurement напряжение поступает на двигатель. Блок Electricity meter рассчитывает потребляемую из генератора полную и активную мощность, а также действующие значения потребляемого напряжения и тока.

С помощью элемента Bus selector и осциллографа Motor будем наблюдать за сигналами двигателя. Блок Torque simulation имитирует на валу двигателя центробежную нагрузку. Блок EF рассчитывает КПД электропривода и выводит значение на элемент Display. Механическая мощность на вход синхронного генератора приходит с блока DVS, в котором реализована система стабилизации скорости двигателя с ПИ-регулятором (рис. 2).

На рис. 3 представлена внутренняя структура блока Control system.

Блок Excitation System совершает регулирование и стабилизацию напряжения синхронного генератора путем воздействия на напряжение обмотки возбуждения.

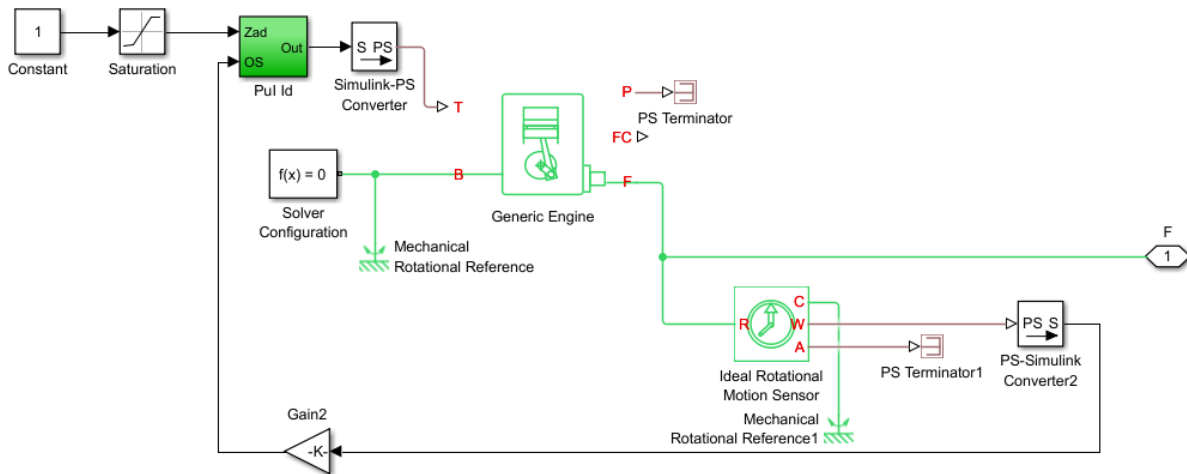


Рис. 2. Структура системы стабилизации скорости дизельного двигателя
Fig. 2. Structure of the diesel engine speed stabilization system

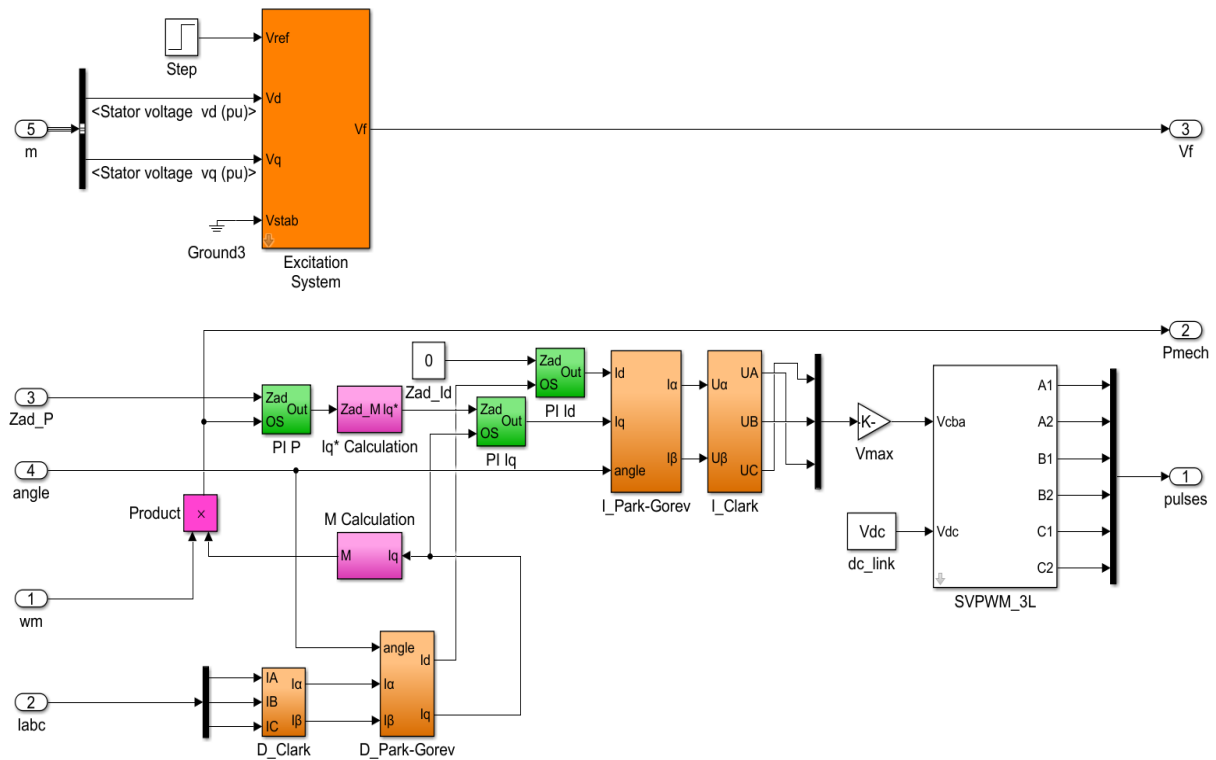


Рис. 3. Структура системы управления
Fig. 3. Structure of the control system

Блоки D_Clark, D_Park-Gorev, I_Park-Gorev и I_Clark осуществляют координатные преобразования. Блок Iq* Calculation производит вычисление задания на ток по оси q . Блоки Filter Id и Filter Iq предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси d и q соответственно от высокочастотных искажений. Блоки PI Id и PI Iq являются ПИ-регуляторами токов Id и Iq соответственно. Блок PI P – ПИ-регулятор активной мощности. Блок M Calculation вычисляет момент на валу электродвигателя. Элемент Product вычисляет механическую мощность на валу путем перемножения скорости вращения вала двигателя на электромагнитный момент.

Система управления формирует сигналы напряжения UA, UB и UC. Для реализации данных векторов использован блок ШИМ SVPWM_3L, который на основе этих сигналов подает импульсы частотой 2 кГц на затворы транзисторов инвертора.

Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур активной мощности. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, то можно использовать методы подбора.

При помощи метода Циглера – Никольса² определяем коэффициенты регуляторов токов и мощности. Номинальные параметры: механическая мощность на валу двигателя – 4 650 000 Вт, скорость вращения – 62,83 рад/с, момент двигателя – 74 000 Нм, напряжение – 6 300 В, ток двигателя – 470 А, полная мощность двигателя – 5 150 000 ВА.

Результаты и обсуждение

Результатом моделирования являются временные диаграммы переходных процессов системы при пуске электродвигателя на центробежную нагрузку с заданием 100 % мощности (рис. 4–6).

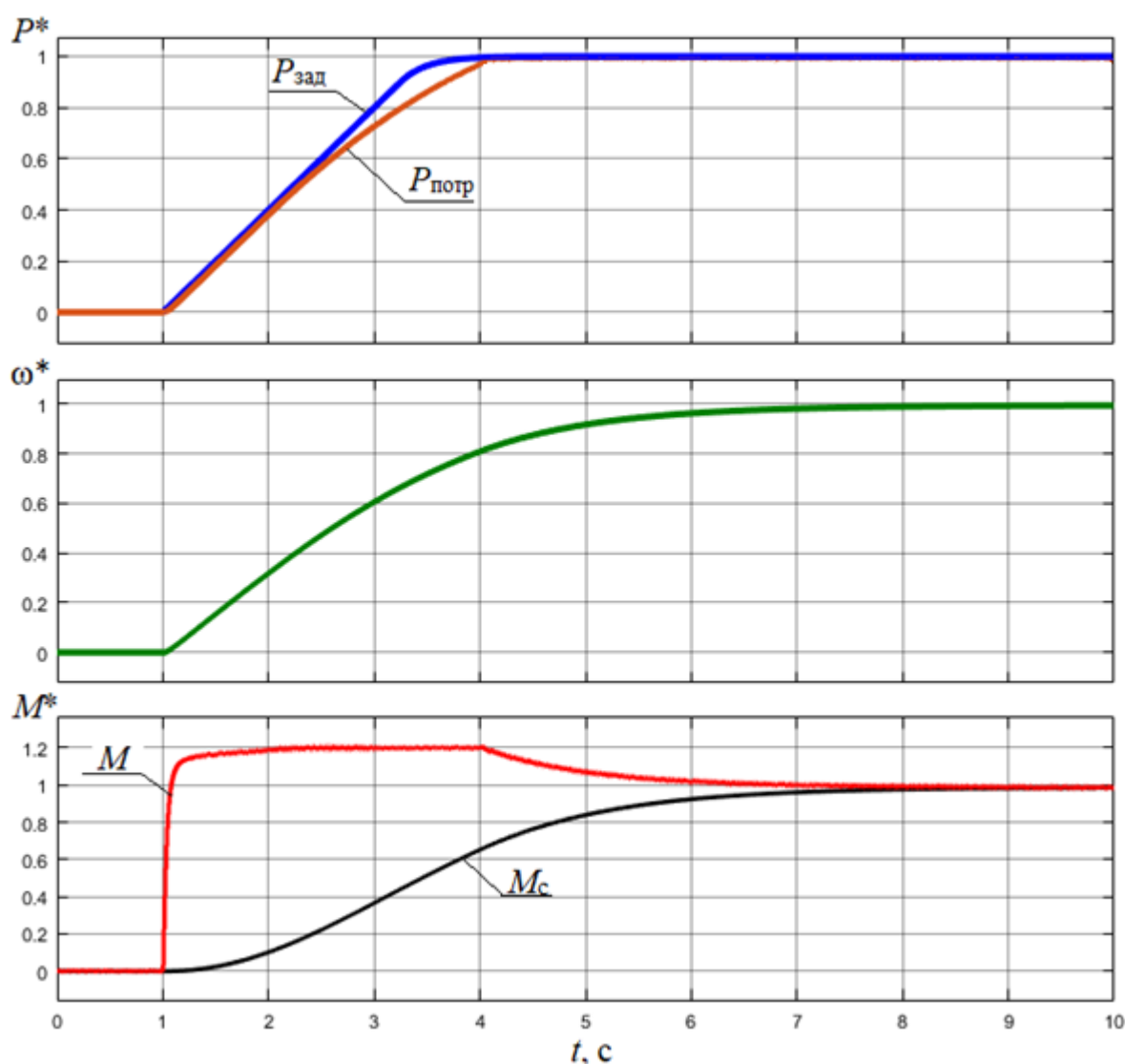


Рис. 4. Переходные процессы синхронного электродвигателя при пуске
Fig. 4. Transients of a synchronous electric motor at start-up

² Вадутов О. С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера – Никольса: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям 210100 "Электроника и микроэлектроника" и 201000 "Биотехнические системы и технологии" / сост. О. С. Вадутов; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 10 с.

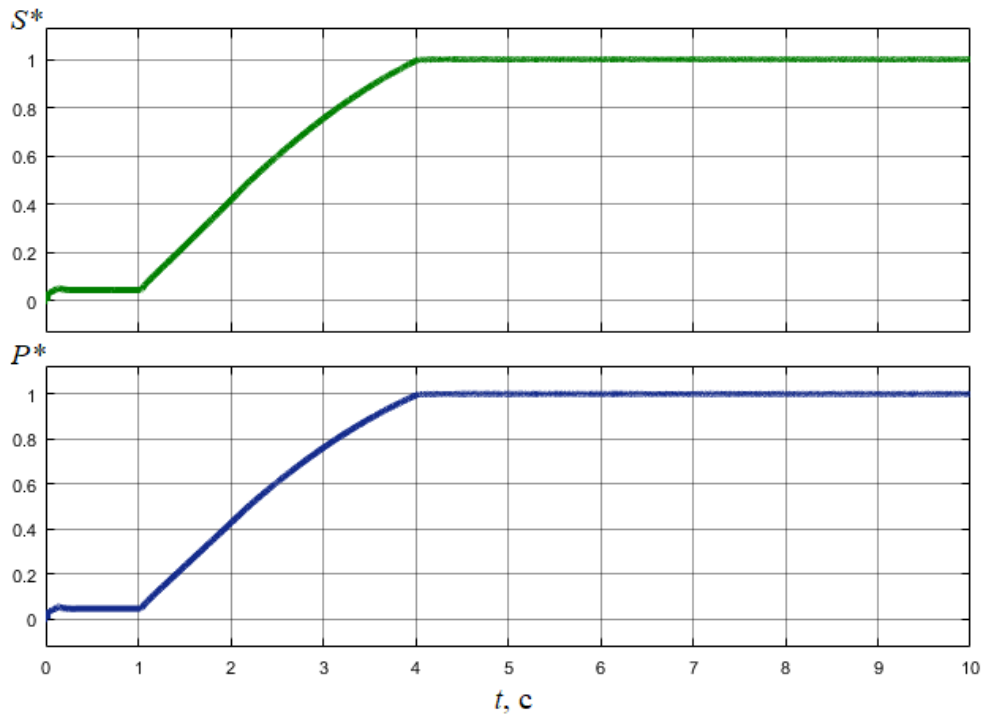


Рис. 5. Переходные процессы энергетических параметров при пуске двигателя
Fig. 5. Transients of energy parameters during motor start-up

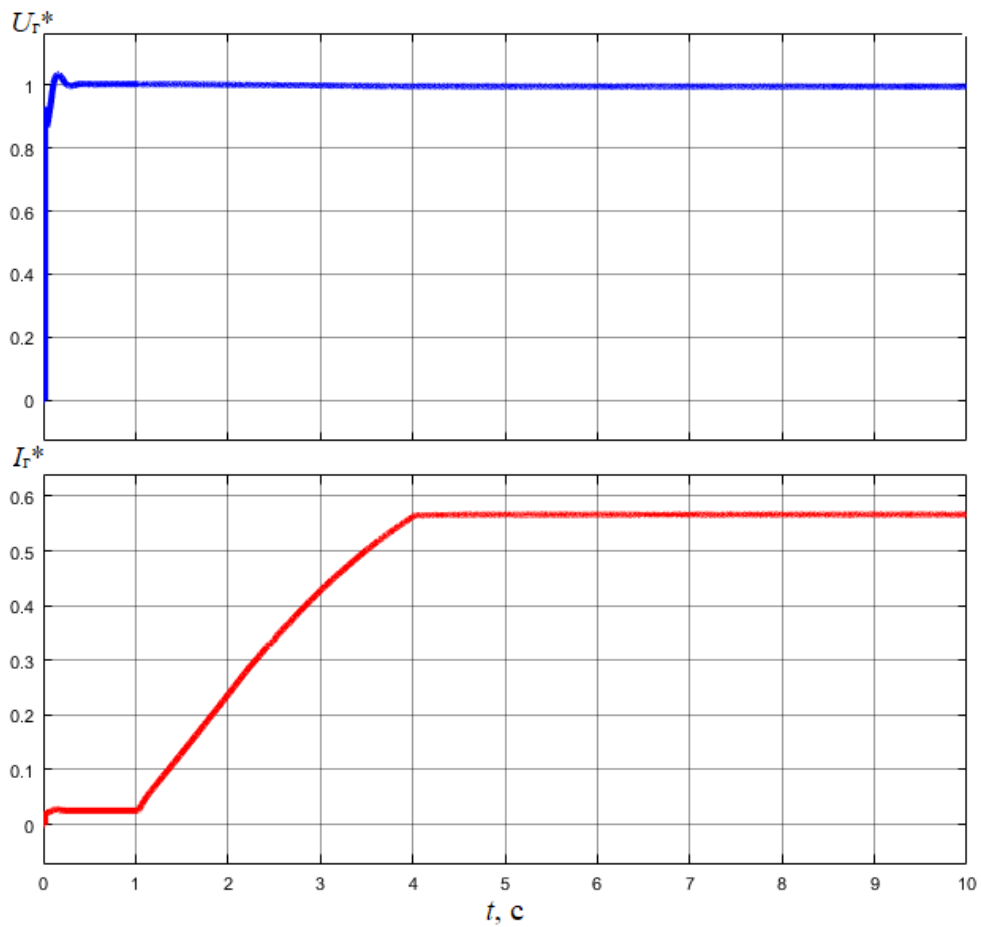


Рис. 6. Переходные процессы синхронного генератора при пуске двигателя
Fig. 6. Transients of the synchronous generator during motor start-up

Из рисунков видно, что активная мощность на валу двигателя с практически отсутствующей динамической ошибкой плавно выходит на установившееся значение без скачков и перерегулирования. Начальный наброс момента электродвигателя практически не повлиял на работу генератора и качество производимой электроэнергии. Потребляемая из генератора мощность также без скачков вышла на установившееся значение, не превышая ограничения в 105 %. По показаниям дисплея видно, что КПД электропривода в установившемся режиме составляет 93,09 %.

Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант автономной системы частотно-регулируемого синхронного электропривода с векторным управлением отвечает заявленным требованиям к энергетическим, механическим и электрическим параметрам. Использование контура активной мощности позволило исключить скачки потребляемой мощности в пусковых режимах, тем самым обеспечив бесперебойность работы и повысив живучесть дизель-генераторной установки.

В дальнейшем планируется интегрировать в предложенную единую систему управления нейронные сети в качестве адаптивных нейросетевых регуляторов и систем-ассистентов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алешков О. А., Малоземов А. А. Повышение топливной экономичности многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима первичного дизельного двигателя в его составе // Ползуновский вестник. 2009. № 1–2. С. 199–207. EDN: KZCOZD.
- Григорьев А. В., Колесниченко В. Ю. Повышение эффективности эксплуатации судовых дизельных электростанций // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. № 6(28). С. 39–43. EDN: TDOCER.
- Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2012. 768 с.
- Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М. : ДМК Пресс, 2008. 784 с.
- Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). М. : ЭФО, 2013. 72 с. URL: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf.
- Михеев Е. А. Частотное регулирование электропривода // Символ науки. 2016. № 11–3(23). С. 124–126. EDN: XBWXDR.
- Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М. : Академия, 2006. 265 с.
- Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М. : Academia, 2005. 304 с.
- Тихомиров В. А., Титов В. Г., Хватов С. В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2010. № 4(83). С. 190–204. EDN: NUXRFV.
- Фролов В. Я., Жилиготовов Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92>. EDN: QKTHBV.

References

- Aleshkov, O. A., Malozemov, A. A. 2009. Improving the fuel efficiency of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode of a primary diesel engine in its composition. *Polzunovskiy Vestnik*, 1–2, pp. 199–207. EDN: KZCOZD. (In Russ.)
- Grigoriev, A. V., Kolesnichenko, V. Yu. 2014. Improving the efficiency of operation of marine diesel power plants. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S. O. Makarova*, 6(28). С. 39–43. EDN: TDOCER. (In Russ.)
- Diakonov, V. P. 2012. MATLAB. Complete tutorial. Moscow. (In Russ.)
- Diakonov, V. P. 2008. Simulink 5/6/7: Self-help. Moscow. (In Russ.)
- Kalachev, Yu. N. 2013. Vector regulation (notes of practice). Moscow. URL: http://www.efo-power.ru/BROSHURES_CATALOGS/KALACHEV.pdf. (In Russ.)
- Mikheev, E. A. 2016. Frequency regulation of electric drive. *Symbol of Science*, 11–3(23), pp. 124–126. EDN: XBWXDR. (In Russ.)
- Sokolovskiy, G. G. 2006. Alternating current electric drives with frequency control. Moscow. (In Russ.)

- Terekhov, V. M., Osipov, O. I. 2005. Control systems of electric drives. Moscow. (In Russ.)
- Tikhomirov, V. A., Titov, V. G., Khvatov, S. V. 2010. Technical and economic aspects of the use of regulated DC and AC drives. *Transactions of NNSTU n. a. R. E. Alekseev*, 4(83), pp. 190–204. EDN: NUXRFV. (In Russ.)
- Frolov, V. Ya., Zhilgotov, R. I. 2018. Development of a sensor-free vector control system for a synchronous motor with permanent magnets in Matlab Simulink. *Journal of Mining Institute*, 229, pp. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92>. EDN: QKTHBV. (In Russ.)

Сведения об авторах

Муртазин Тимур Эмильевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, аспирант;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Timur E. Murtazin – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, PhD Student;
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9451-5803>

Шевченко Артем Алексеевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, аспирант;
e-mail: shevchenko2023@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6909-9609>

Artem A. Shevchenko – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, PhD Student;
e-mail: shevchenko2023@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6909-9609>

Титов Владимир Георгиевич – ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород, Россия, 603000;
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, д-р техн. наук,
профессор; e-mail: eos@nntu.ru

Vladimir G. Titov – 24 Minina Str., Nizhniy Novgorod, Russia, 603000;
Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: eos@nntu.ru