

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ПУСКОВОГО ТОКА ПРИ ЗАПУСКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**В.Н. Мещеряков¹, Т.В. Синюкова¹, А.В. Синюков¹,
О.В. Крюков², Д.И. Шишлин¹**

¹ Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия,

² ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород, Россия

Функционирование мощных электроустановок промышленного производства, в частности металлургии и нефтегазовой отрасли, связано со сложными технологическими процессами, требующими повышенного внимания к используемому оборудованию, так как оно функционирует в сложных и особо опасных производственных условиях, используется на объектах непрерывного действия. Мощные высоковольтные воздушные и газовые компрессоры относятся к объектам с повышенным потреблением электрической энергии, имеющим значительные пусковые токи. Данные обстоятельства накладывают отпечаток не только на форму питающего напряжения, но и на состояние энергетической системы в целом. В настоящее время разработка методов ограничения пусковых токов является актуальной задачей для объектов, используемых на промышленных предприятиях разного профиля. Включение компрессора в технологический процесс не всегда возможно без предварительного согласования его пуска с уже работающим оборудованием, особенно с объектами с высокой категорией электропитания. В данной работе произведено исследование имеющейся системы управления, а также рассмотрены возможные варианты модернизации системы, направленные на улучшение ее энергетических показателей.

Ключевые слова: синхронный электропривод, пусковые токи, математическая модель, реакторный пуск, безударный пуск, частотный пуск.

Введение

Синхронный электропривод турбомеханизмов охватывает значительный класс мощных и наиболее ответственных технологических установок в металлургической, нефтегазовой и других отраслях промышленности [1–3]. Статистика отказов показывает, что с учетом штатного ресурса машин наиболее опасными режимами синхронного электропривода являются динамические процессы пуска и останова [4–6]. Аналогичные данные есть и по другим мощным системам [7–13]. Основными причинами их являются эксплуатационные ограничения, связанные с прямым реакторным пуском машин:

– ограниченное количество пусков (до 150), после которых необходим ремонт ротора и мониторинг обмоток статора;

– чаще всего по условиям завода-изготовителя допускается только два пуска с разгруженным центробежным компрессором из холодного состояния с перерывами между пусками 15 мин или только 1 пуск из горячего состояния;

– пуск электродвигателя с нагрузкой допускается только при пониженном напряжении сети и разгруженном агрегате.

При пуске температура статора двигателя из холодного состояния (30–35 °С) до рабочей (65–75 °С) изменяется более чем за 2 ч. Частые и затянутые пуски под нагрузкой приводят к значительным электродинамическим усилиям в роторе (выпучивание стержней обмоток, вылетание пятачков и поломки валов), перегреву и старению изоляции статорных обмоток (при перегреве на 8 °С срок службы снижается вдвое).

Разработка новых систем управления, позволяющих улучшить механические и энергетические показатели производственного оборудования, является актуальной задачей для исследования [14–17].

Исследование переходных процессов энергетических систем рассмотрено в работе [18, 19], анализ причин провалов напряжения и их влияния на энергосистему и подключенное к ней оборудование, влияния пусков мощных двигателей на энергосистему произведен в работе [20].

Рассматриваемый объект задействован в металлургическом производстве, где одновременно может происходить запуск нескольких агрегатов, а также существуют ограничения на запуск мощных электродвигателей с большими пусковыми токами.

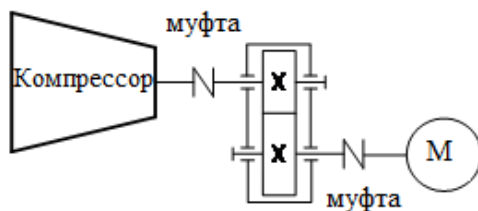


Рис. 1. Кинематика воздушного компрессора

Исследуемый компрессор установлен на кислородной станции, в его задачи входит сжатие воздуха с последующим его охлаждением. На объекте установлен неявнополюсный синхронный электрический двигатель, скорость которого по технологическому процессу не требует регулировки. Напряжение возбуждения компрессора составляет 10 кВ.

Кинематика электропривода компрессора представлена на рис. 1.

Модель реального объекта с реакторным пуском

На первоначальном этапе исследования была рассчитана и составлена математическая модель реального объекта, на нем используется система с реакторным пуском синхронного двигателя, схема в среде математического моделирования представлена на рис. 2. От источника питания через выключатель, срабатывание которого происходит при моделировании, через 1 с питание подается на двигатель, запуск которого возможен только по истечении еще одной минуты, за счет срабатыва-

ния выключателя Q2. Все это время происходит запуск синхронного двигателя в асинхронном режиме. При достижении подсинхронной скорости происходит исключение из работы в схеме блока «Гасящее сопротивление», на который зашунтирована обмотка возбуждения двигателя, следовательно, она оказывается под напряжением. Параллельно отключается выключатель Q2, а выключатель Q1 становится во включенное положение, при этом двигатель входит в синхронизм, но его работа происходит как и в реальных условиях без нагрузки, пока не будет на практике открыта рабочая заслонка, представленная в модели блоком «Рабочая нагрузка».

Полученные при моделировании графики тока и напряжения статора приведены на рис. 3 и 4. Анализируя полученный переходный процесс, можно сделать вывод, что ток статора при пуске превышает номинальное значение примерно в 5 раз, а действующее значение напряжения в 4 раза меньше номинального значения, при этом время пуска составляет около 16,6 с, на реальном объекте наблюдаются те же данные.

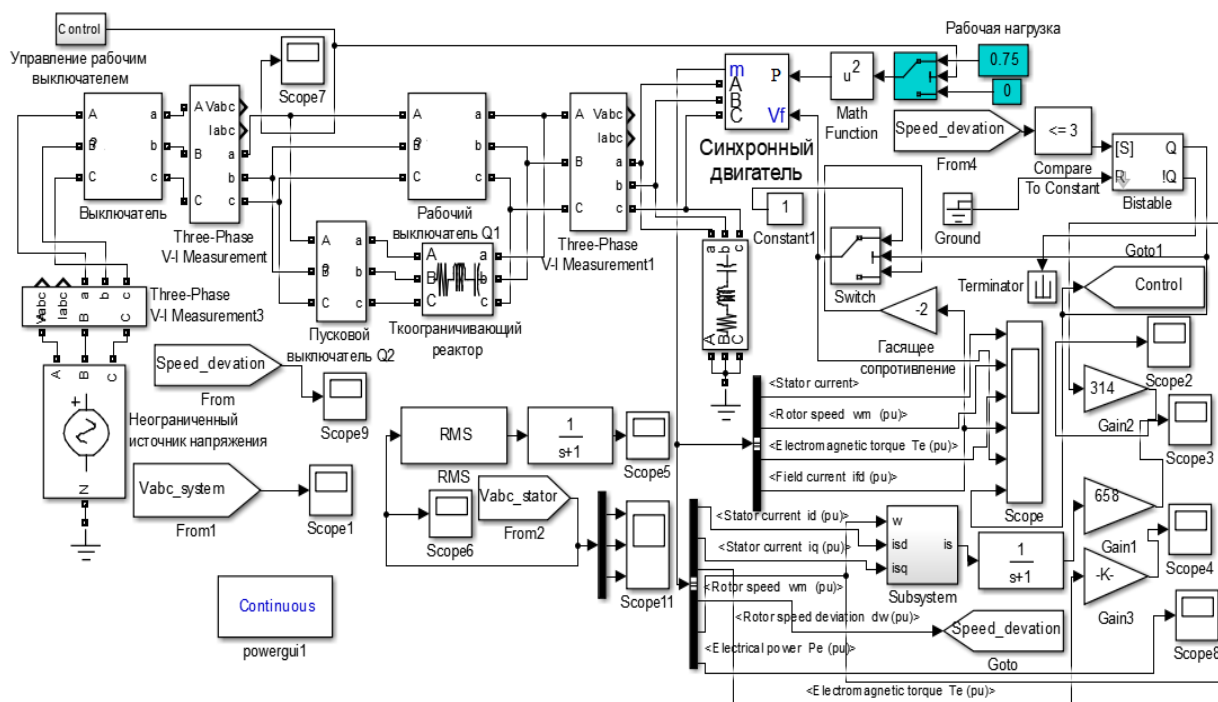


Рис. 2. Математическая модель реакторного пуска синхронного двигателя

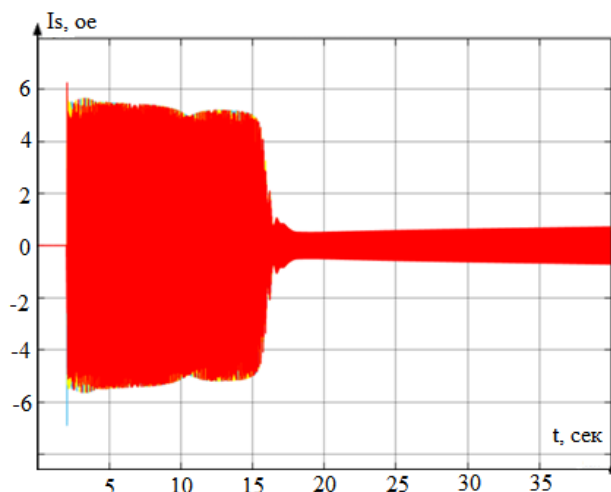


Рис. 3. Переходный процесс тока при пуске через токоограничивающий реактор

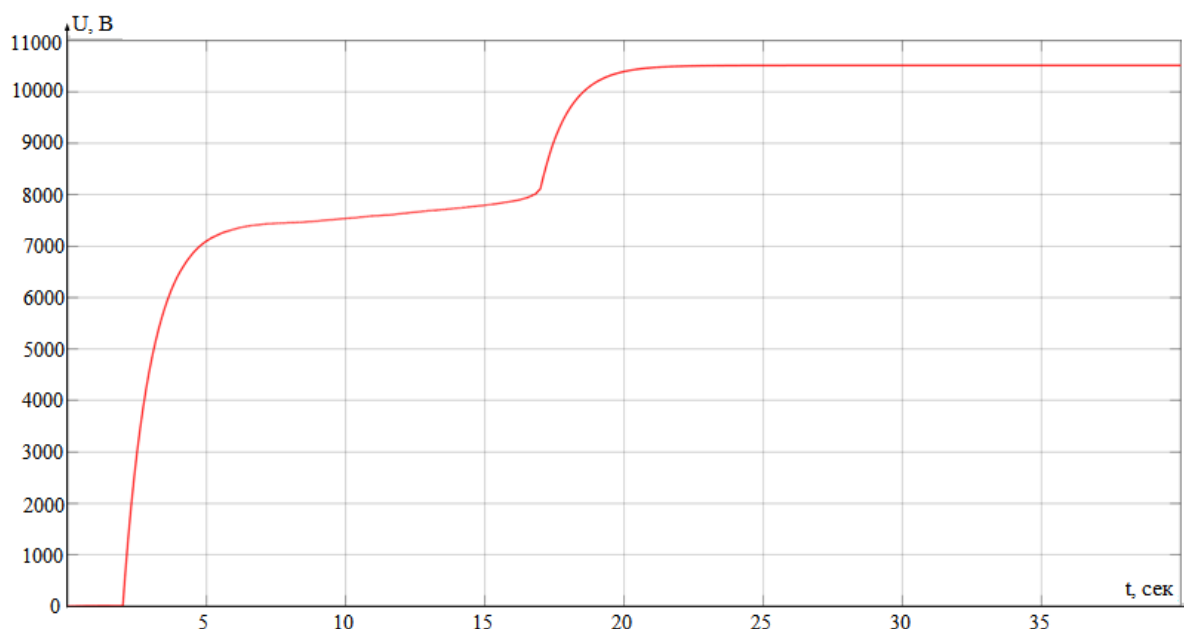


Рис. 4. Переходный процесс напряжения при пуске через токоограничивающий реактор

Модель с устройством безударного пуска

Снижение ударных нагрузок на систему электроснабжения во время пуска высоковольтных синхронных двигателей возможно за счет использования в системе управления устройства безударного пуска.

Применение устройства данного типа, работающего по схеме тиристорного регулятора напряжения, позволяет добиться снижения интенсивности нарастания и количественного значения пускового тока путем регулирования отпирания тиристоров в системе импульсно-фазного управления. Увеличение напряжения, подаваемого на обмотки статора, осуществляется плавно до значения номинального показателя в заданном временном промежутке.

Использование предлагаемого устройства имеет ряд достоинств в виде присутствия разъеди-

нителей с заземляющими ножами, благодаря которым при работающем двигателе появляется возможность проводить обслуживание тиристорных блоков. Борьба с перенапряжением на тиристорных блоках осуществляется посредством ограничителей перенапряжения.

На рис. 5 представлена математическая модель, содержащая устройство безударного пуска. Запуск двигателя происходит от совместно функционирующих блоков S1, S2, S3 и трех блоков Controlled Voltage Source, в них задана частота, но возможно регулирование напряжения при помощи задатчика интенсивности ЗИ.

Представленная система позволяет снизить пусковые токи примерно до значений, составляющих трехкратные показатели номинального тока статора (рис. 6), но при этом наблюдается увеличение времени пуска двигателя до 35 с

(рис. 7). На основании анализа представленных графиков видно, что использование системы с безударным пуском позволяет снизить влияние

запуска синхронного двигателя на энергосистему, что говорит об эффективности предлагаемого метода.

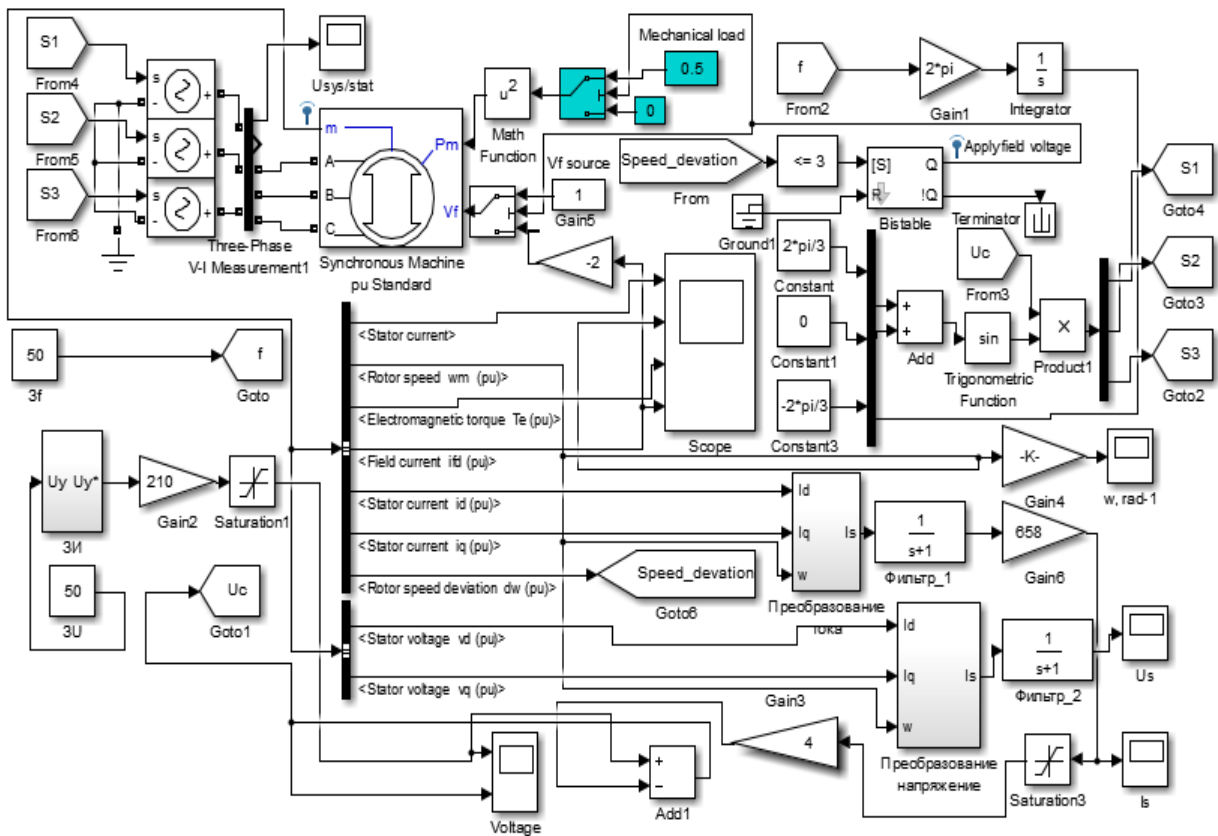


Рис. 5. Модель с устройством безударного пуска

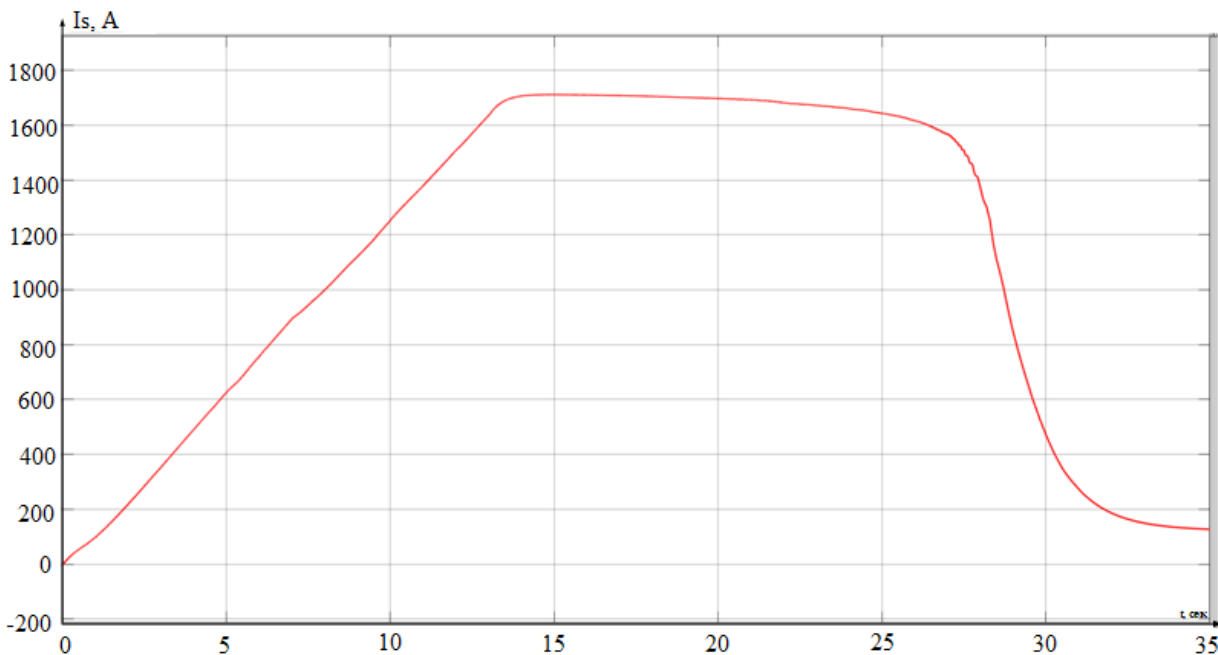


Рис. 6. Действующее значение тока статора

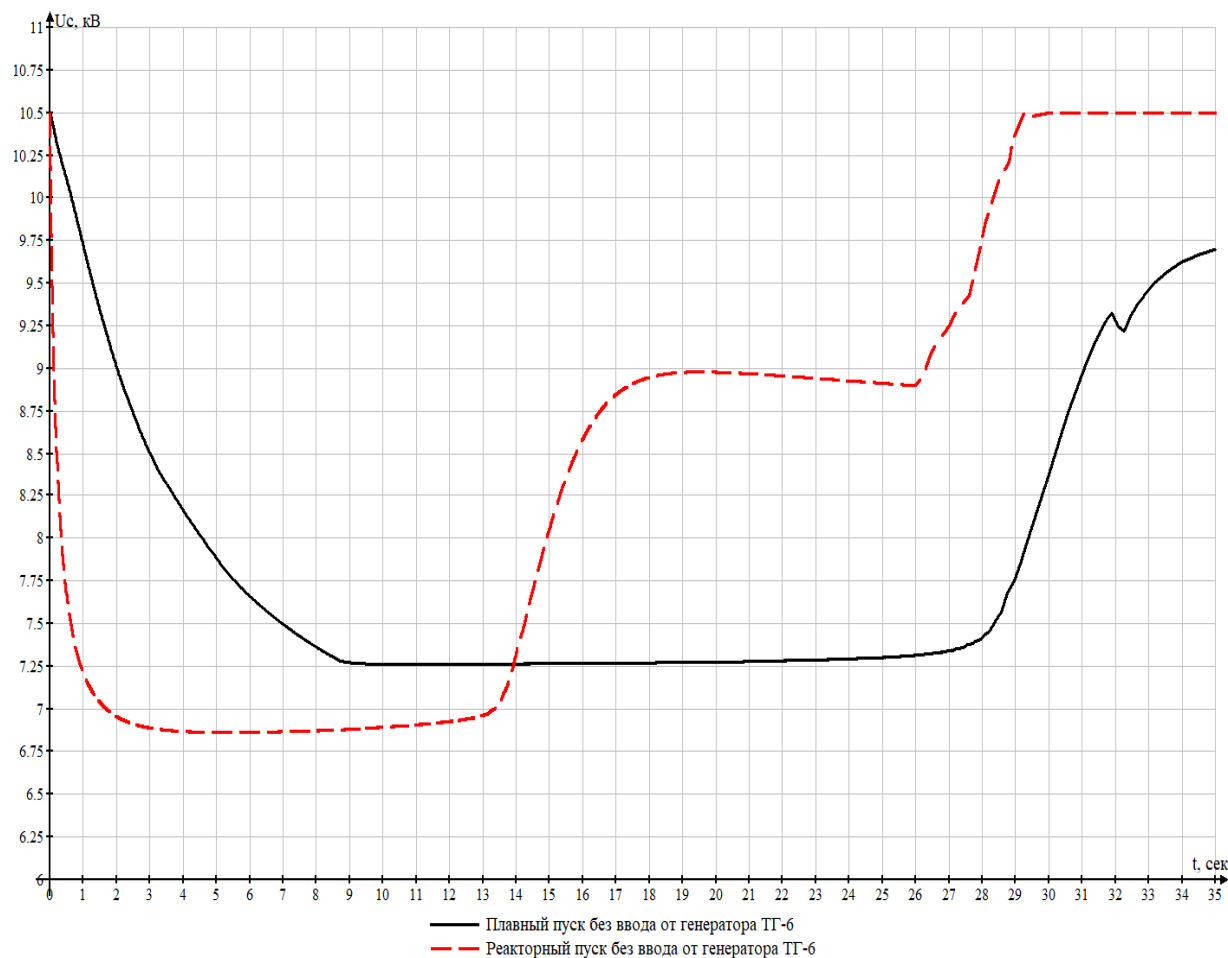


Рис. 7. График колебания напряжений

Модель с частотным пуском

Еще одним вариантом снижения пиковых нагрузок на реальных объектах будет использование устройства частотного плавного пуска, принцип действия которого заключается в плавной подаче тока на двигатель до показателей, при которых двигатель начинает вращение, затем происходит стабилизация пускового тока (разгон двигателя происходит с постоянным значением пускового тока). Когда значения скорости двигателя приближаются к номинальным показателям, происходит снижение тока до параметров, зависящих от нагрузки на валу в текущий момент времени; напряжение, поступающее на двигатель, при таких условиях соответствует полному напряжению питающей сети. По истечении времени, заложенного в устройстве плавного пуска на разгон двигателя, оно отключается и нагрузку на себя берет питающая сеть с токоограничивающим реактором.

На рис. 8 представлена математическая модель предлагаемой для исследования системы в среде MATLAB, построенная на базе предыдущей

модели, но в данном случае сигнал задания подается на задатчик интенсивности, где происходит формирование как частоты, так и напряжения по закону постоянства момента $U/f = \text{const}$.

На рис. 9 представлена полученная в результате моделирования характеристика тока статора.

На основании анализа приведенной характеристики можно сделать вывод о том, что происходит существенное снижение значений пиковых пусковых токов, что также говорит об эффективности предлагаемого метода.

Приведенный на рис. 10 график демонстрирует улучшение состояния энергосистемы при использовании системы с частотным пуском, причем показатели колебания напряжения снизились даже по сравнению с системой с безударным пуском.

Результаты, полученные при компьютерном моделировании, соответствуют результатам экспериментальных исследований пуска синхронного двигателя турбокомпрессора мощностью 3700 кВт.

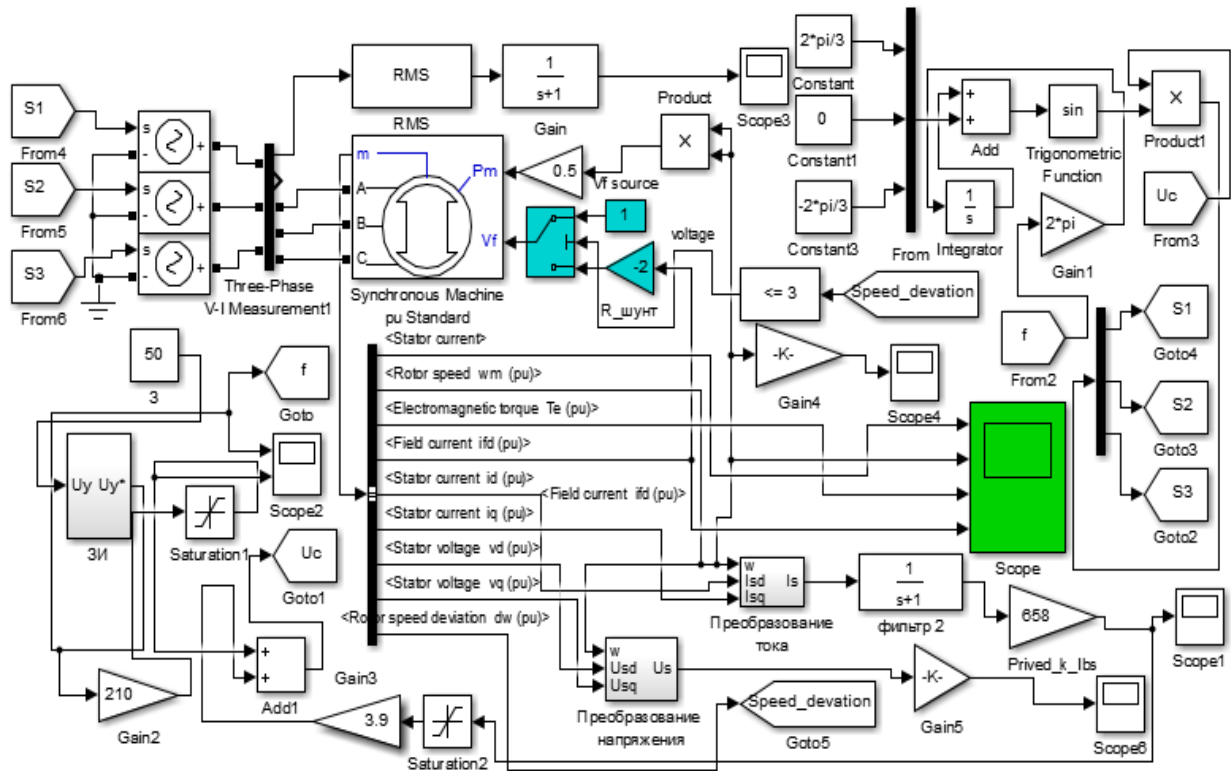


Рис. 8. Система с устройством частотного плавного пуска

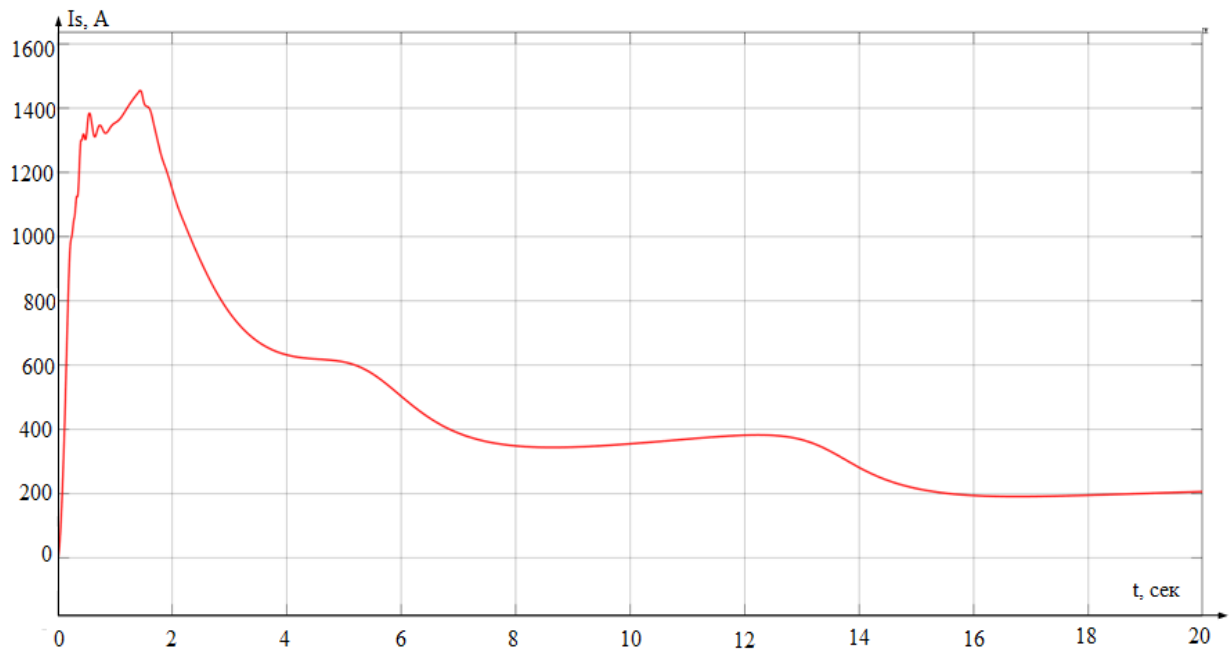


Рис. 9. Действующее значение тока статора

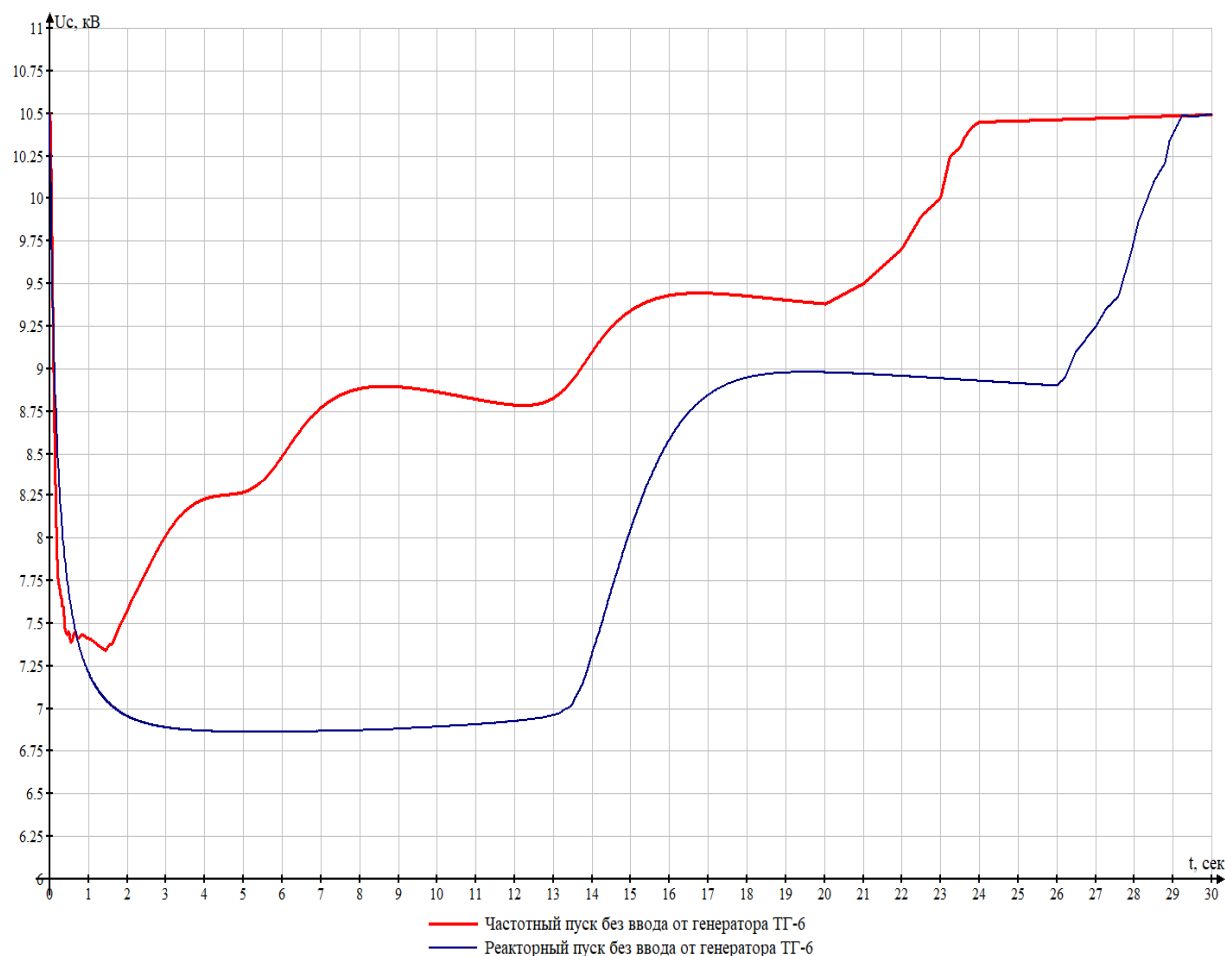


Рис. 10. График колебания напряжений

Экспериментальные исследования синхронного привода компрессоров

На рис. 11 и 12 показаны графики пускового тока, линейного напряжения питающей сети и скорости вращения синхронного электродвигателя в относительных единицах. Осциллограммы пуска (см. рис. 11) иллюстрируют пуск по заданной траектории с темпом 2 Гц/с, а САУ за счет обратной связи по скорости формирует пусковой ток, который в данном случае меньше $0,5 I_{ном}$. Осциллограммы пуска (см. рис. 12) иллюстрируют пуск с максимальным ускорением, заданным величиной ограничения пускового тока, а САУ поддерживает пусковой ток на уровне ограничения пускового тока.

Приведенные осциллограммы пусков показывают, что при частотном пуске синхронного электродвигателя провалы питающего напряжения на входе пускового устройства, обусловленные пусковыми токами, не превышают значений, установленных ГОСТ 13109–97(2002), и соответствуют:

- не более 3 % от номинального напряжения при пусковом токе, не более 0,75 номинального тока статора;
- не более 2 % от номинального напряжения

при пусковом токе, не более 0,45 номинального тока статора.

Для обеспечения работы устройства в зоне низких частот вращения ток возбуждения синхронного двигателя в начале пуска был установлен на уровне 1,1 номинального тока возбуждения. В процессе пуска с ростом частоты вращения ток возбуждения плавно снижался до номинального значения.

Отличительной особенностью рассмотренного пуска является использование комбинированной схемы электроснабжения, когда в качестве резервного источника использована дизель-генераторная электростанция. В этом случае применение устройства плавного пуска позволило не только сэкономить ресурсы электродвигателя и компрессора, но и решить технологическую проблему пуска компрессорной установки в условиях, когда прямой пуск от дизель-генераторной электростанции невозможен. Область применения устройств плавного пуска – это электроприводы с высоковольтными синхронными двигателями, требующие большого пускового момента, такие как станы, мельницы, компрессоры и прочие механизмы с вентиляторным моментом.

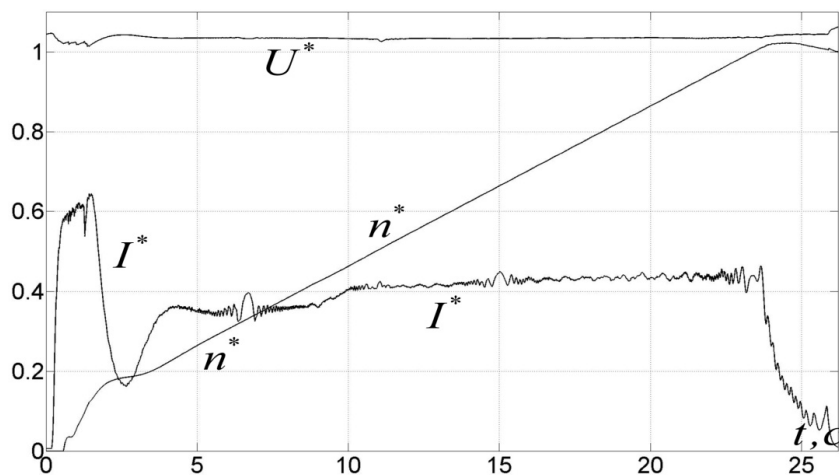


Рис. 11. Пуск синхронного двигателя 3700 кВт турбокомпрессора с заданным темпом 2 Гц/с

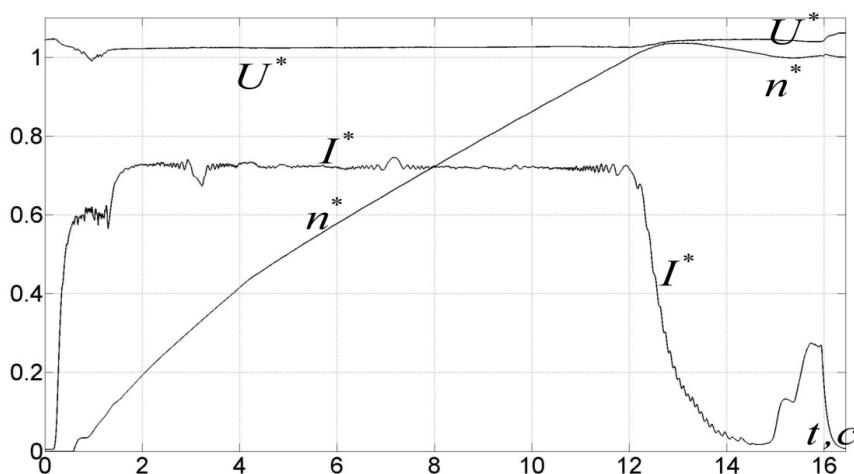


Рис. 12. Пуск синхронного двигателя 3700 кВт турбокомпрессора при ограничении пускового тока на уровне 0,75 от номинального тока статора

Заключение

По проведенным исследованиям можно сделать вывод, что использование предлагаемых методов позволяет добиться значимых результатов.

В целом проведенное исследование позволило проанализировать возможный эффект от модернизации существующего объекта без использования дополнительных материальных затрат.

На практике реализация данных методов также не вызывает каких-либо трудностей, так как отечественные компании занимаются выпуском устройств с системами безударного пуска и системами частотного пуска, хорошо зарекомендовав-

шими себя в условиях эксплуатации на объектах разного назначения.

Проведенное исследование имеет практическую ценность, так как может быть использовано на объектах с синхронными двигателями и вентиляторной нагрузкой.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

Литература

1. Багдасарян, М.К. Способ контроля аномальных режимов синхронного привода двигателя рудоразмольной мельницы / М.К. Багдасарян, Т.Н. Мноян, С.В. Саргсян // Евразийский союз ученых. – 2018. – № 4-1 (49). – С. 6–8.
2. Афанасьев, М.М. Тяговый электропривод с синхронными двигателями для электропоезда постоянного тока / М.М. Афанасьев, Д.В. Клоков, Ю.М. Иньков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 5. – С. 30–34.

3. Вохидов, А.Д. Компенсация реактивной мощности синхронных двигателей насосной станции / А.Д. Вохидов // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. – 2018. – № 4 (9). – С. 48–52.
4. Крюков, О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58. DOI: 10.14489/td.2016.12.pp.050-058
5. Плотников, И.Г. Оптимизация режимов пуска электромеханического комплекса с синхронным двигателем / И.Г. Плотников, Д.А. Устинов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2011. – № 3 (130). – С. 50–54.
6. Крюков, О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом / О.В. Крюков // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 4. – С. 39–44.
7. Крюков, О.В. Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов ГПА / О.В. Крюков // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.
8. Wu, Bin. High-Power Converters and ac Drives / Bin Wu. – The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. US, 2006. – 333 p.
9. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations / I. Cadirci, M. Ermis, E. Nalcacl et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, iss. 3. – P. 402–412. DOI: 10.1109/60.790889
10. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors / Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache // 2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN). – 2017. DOI: 10.1109/sielmen.2017.8123313
11. Güdelhöfer, J. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents / J. Güdelhöfer, R. Gottkehaskamp, A. Möckel // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece. – 2018. DOI: 10.1109/icelmach.2018.8507162
12. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor / Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China. – 2010. – P. 3423–3427.
13. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations / A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev, O.V. Kryukov // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. – 2019. – P. 444–449. DOI: 10.1109/summa48161.2019.8947487
14. Abu-Rub, H. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models / H. Abu-Rub, A. Iqbal, J. Guzinski. – United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2012. – 482 p. DOI: 10.1002/9781119969242
15. Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications / A. Castagnini, T. Kansakangas, J. Kolehmainen, P.S. Termini // 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene. – 2015. – P. 121–126. DOI: 10.1109/iemdc.2015.7409047
16. Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor / Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han et al. // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei. – 2016. – P. 1858–1862. DOI: 10.1109/ipemc.2016.7512577
17. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method / Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho et al. // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea. – 2007. – P. 868–873. DOI: 10.1109/icems.2005.202669
18. Синюков, А.В. Наблюдатели состояния в системах управления электроприводом с синхронным двигателем / А.В. Синюков, Т.В. Синюкова // Системы управления электротехническими объектами (СУЭТО-8): труды восьмой всероссийской научно-практической конференции, Тула. – 2018. – С. 64–66.
19. Дадабаев, Ш.Т. Исследование технологических и переходных процессов электроприводов турбомеханизмов / Ш.Т. Дадабаев, Х.А. Рахматов, Б.А. Абдумаликов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 256–262.
20. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев и др. // ЭСсК. Электроэнергетика. – 2014. – № 2 (23). – С. 44–48.

Мещеряков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; mesherek@yandex.ru.

Синюкова Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; stw0411@mail.ru.

Синюков Алексей Владимирович, аспирант, кафедра «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; zeitsn@yandex.ru.

Крюков Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, заместитель директора по науке, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород; o.v.kryukov@mail.ru.

Шишлин Денис Иванович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; denis-shishlin@yandex.ru.

Поступила в редакцию 19 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/power210210

INVESTIGATION OF WAYS TO REDUCE THE INRUSH CURRENT WHEN STARTING HIGH-VOLTAGE MOTORS

V.N. Meshcheryakov¹, mesherek@yandex.ru,

T.V. Sinyukova¹, stw0411@mail.ru,

A.V. Sinyukov¹, zeitsn@yandex.ru,

O.V. Kryukov², o.v.kryukov@mail.ru,

D.I. Shishlin¹, denis-shishlin@yandex.ru

¹ Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,

² LLC "TSN-electro", Nizhny Novgorod, Russian Federation

The operation of high-power industrial electrical installations, particularly in metallurgy and the oil and gas industry, is associated with complex technological processes that require increased attention to the equipment used, as such equipment is used in complex and dangerous production conditions and in continuous operation facilities. High-voltage air and gas compressors are objects with increased electrical energy consumption and have significant starting currents. These circumstances affect both the shape of the supply voltage and the state of the energy system in general. Currently, the development of methods for limiting inrush currents is an urgent task for objects used in industrial enterprises. Introducing a compressor into the technological process is sometimes requires prior coordination of its start with the equipment in operation, especially that with a high power consumption. The paper studies the existing control system as well as ways to upgrade the system to improve its energy performance.

Keywords: synchronous electric drive, starting currents, mathematical model, reactor start-up, shock-free start-up, frequency start-up.

References

1. Bagdasaryan M.K., Mnoyan T.N., Sargsyan S.V. [Method for monitoring abnormal modes of synchronous drive of the ore-grinding mill motor]. *Evraziyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2018, no. 4-1 (49), pp. 6–8. (in Russ.)

2. Afanas'ev M.M., Klovov D.V., In'kov Yu.M. [Electric traction drive with synchronous motors for DC electric trains]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Transport electronics and electrical equipment], 2020, no. 5, pp. 30–34. (in Russ.)

3. Vokhidov A.D. [Compensation of the reactive power of synchronous motors of the pumping station]. *Vestnik PITTU imeni akad. M. Osimi* [Bulletin TTU named after acad. M.Osim], 2018, no. 4 (9), pp. 48–52. (in Russ.)

4. Kryukov O.V. [Monitoring of operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 12, pp. 50–58. (in Russ.) DOI: 10.14489/td.2016.12.pp.050-058

5. Plotnikov I.G., Ustinov D.A. [Optimization of the start-up modes of an electromechanical complex with a synchronous motor]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnic University], 2011, no. 3 (130), pp. 50–54. (in Russ.)

6. Kryukov O.V. [Algorithms for fast Walsh transformation in microprocessor-based electric drive control systems]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Izvestiya vuzov. Electrical Engineering], 2005, no. 4, pp. 39–44. (in Russ.)
7. Kryukov O.V. [Methodology and means of neuro-fuzzy prediction of the state of HPA electric drives]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering], 2012, no. 9, pp. 52–60. (in Russ.)
8. Bin Wu. *High-Power Converters and ac Drives. The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE. US, 2006. 333 p.
9. Cadirci I., Ermis M., Nalcacl E., Ertan B., Rahman M. A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, vol. 14, iss. 3, pp. 402–412. DOI: 10.1109/60.790889
10. Ion Vlad, Aurel Campeanu, Sorin Enache, Monica-Adela Enache. Study of direct-on-line starting of low power asynchronous motors. *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*, 2017. DOI: 10.1109/sielmen.2017.8123313
11. Güdelhöfer J., Gottkehaskamp R., Möckel A. Transient Model of Direct on Line Induction and Synchronous Reluctance Motors with Inter-bar Currents. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Alexandroupoli, Greece, 2018. DOI: 10.1109/icelmach.2018.8507162
12. Yanxia Lu, Chunyang Chen, Haichuan Tang, Ruikuo Liu. Simulation and research on direct torque control of asynchronous traction motor. *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*. Beijing, China, 2010, pp. 3423–3427.
13. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019*, 2019, pp. 444–449. DOI: 10.1109/summa48161.2019.8947487
14. Abu-Rub H., Iqbal A., Guzinski J. *High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd. 2012. 482 p. DOI: 10.1002/9781119969242
15. Castagnini A., Kansakangas T., Kolehmainen J., Termini P.S. Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications. *2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Coeur d'Alene, 2015, pp. 121–126. DOI: 10.1109/iemdc.2015.7409047
16. Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han, Q. Gao, Gang Li and D. Xu. Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor. *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*. Hefei, 2016, pp. 1858–1862. DOI: 10.1109/ipemc.2016.7512577
17. Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, JangYoung Choi, Won-Kyu Oh. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method. *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*. Seoul, Korea, 2007, pp. 868–873. DOI: 10.1109/icems.2005.202669
18. Sinyukov A.V., Sinyukova T.V. [Status monitors in synchronous motor electric drive control systems]. *Sistemy upravleniya elektrotekhnicheskimi ob"ektami (SUETO-8): trudy vos'moy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tula* [Control systems of electrotechnical objects (SUETO-8): proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference, Tula], 2018, pp. 64–66. (in Russ.)
19. Dadabaev Sh.T., Rakhmatov Kh.A., Abdumalikov B.A. [Research of technological and transient processes of electric drives of turbomechanisms]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of TulSU. Technical sciences], 2017, no. 4, pp. 256–262. (in Russ.)
20. Kornilov, G.P., Kovalenko A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Khramshin T.R. [Limitation of voltage dips in power supply systems of industrial enterprises]. *ESiK. Elektroenergetika* [ESiK. Electric power industry], 2014, no. 2 (23), pp. 44–48. (in Russ.)

Received 19 March 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование способов снижения пускового тока при запуске высоковольтных двигателей / В.Н. Мещеряков, Т.В. Синюкова, А.В. Синюков и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 94–104. DOI: 10.14529/power210210

FOR CITATION

Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V., Sinyukov A.V., Kryukov O.V., Shishlin D.I. Investigation of Ways to Reduce the Inrush Current when Starting High-Voltage Motors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 94–104. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210210