

УДК 621.31

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СРЕДЕ MATLAB

Семёнов А.С., Хубиева В.М., Петрова М.Н.

Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Мирный, e-mail: kafeiagp@rambler.ru, sun1u@mail.ru

Данная научная статья посвящена вопросам математического моделирования режимов работы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при использовании реостатного пуска в пакете программ MatLab. Приводится описание пакета программ MatLab, в котором производится моделирование режимов работы двигателя. Описаны компоненты пакета программ, позволяющие моделировать сложные электромеханические системы, одними из которых являются приложения Simulink и SimPowerSystem. Выбран тип и марка двигателя постоянного тока по справочной литературе. Рассчитаны параметры двигателя, необходимые для моделирования. Для расчетов параметров двигателя использовалась методика профессора И.В. Черных. Произведено моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Получены результаты в виде графиков зависимостей исследуемых величин от времени моделирования: исследованы ток, скорость вращения двигателя, его электромагнитный момент. Сделаны выводы и заключения по результатам расчета и моделирования, произведено сравнение с существующими данными.

Ключевые слова: MatLab, Simulink, SimPowerSystem, моделирование, режимы работы, электропривод, двигатель постоянного тока, реостатный пуск, скорость вращения, электромагнитный момент, ток, механическая характеристика

MATHEMATICAL MODELING OF OPERATING MODES THE DC MOTOR IN MATLAB

Semenov A.S., Khubieva V.M., Petrova M.N.

Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, e-mail: kafeiagp@rambler.ru, sun1u@mail.ru

This scientific article is devoted questions of mathematical modeling of operation modes of the DC motor with separate excitation using rheostatic start the software package MatLab. Describes the software package MatLab, which is modeling of operation modes of DC motor. Describes the components of a package of programs which allow to model complex electromechanical systems, among which are the applications Simulink and SimPowerSystem. Selected type and brand of the DC motor at the reference literature. Calculated the parameters of DC motor, necessary for simulation. For the calculation of parameters of the DC motor, used the technique of professor I.V. Chernykh. Produced a simulation of rheostatic start of the DC motor with separate excitation. The results obtained in the form of graphs of dependences of the investigated variables from the time of the simulation: the current, rotation speed of the motor, electromagnetic torque. Made conclusions on the results of the calculation and modeling, compared with the existing data.

Keywords: MatLab, Simulink, SimPowerSystem, modeling, modes of operation, electric motor drive, DC motor, rheostatic start, rotation speed, electromagnetic torque, current, mechanical characteristic

Пакет программ MatLab предназначен для аналитического и численного решения различных математических задач, а также для моделирования электротехнических и электромеханических систем. MatLab получил наиболее распространенное применение в инженерной практике в отличие от других подобных программ (Mathematica, Maple, Mathcad). MatLab, сокращённое название Matrix Laboratory, является интерактивной системой для выполнения научных и инженерных расчётов. В состав системы входит ядро компьютерной алгебры Maple и пакет расширения Simulink, а также десятки других пакетов расширений, что позволяет моделировать сложные электротехнические устройства.

Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополни-

тельных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование электромеханических и электроэнергетических систем и устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и прочего оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них. Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств.

В частности, пользователь имеет возможность рассчитать установившийся режим работы системы на переменном токе, выполнить расчет импеданса участка цепи, получить частотные характеристики, проанализировать устойчивость, а также выполнить гармонический анализ токов и напряжений. Более подробно это изложено в [8,17, 26].

Несомненным достоинством SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MatLab, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем [2–3, 15, 19].

Целью моделирования режимов работы двигателя постоянного тока является построение характеристик зависимости тока, момента и угловой скорости вращения электродвигателя от времени при пуске, а также определение перерегулирования, разрегулирования и времени переходного процесса. Для проведения моделирования используем данные двигателя постоянного тока типа 4ПФ160М, которые принимаем по [1]. Основные справочные данные выглядят следующим образом: $P = 18,5$ кВт, $n_{\text{макс}} = 4500$ об/мин, КПД = 0,808, $I_n = 49,6$ А. Произведем расчет недостающих обмоточных данных по методике профессора И.В. Черных, изложенной в [26]. Определяем следующие параметры: сопротивление обмоток якоря и возбуждения, индуктивность обмоток якоря и возбуждения, взаимную индукцию, требуемое сопротивление реостатных ступеней, момент инерции.

Переходим к построению модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при реостатном пуске [13]. Модель представляет собой принципиальную схему, состоящую из двух источников питания обмоток двигателя и возбуждения, самого двигателя постоянного тока, блока реостатных ступеней, измерителей тока и напряжения, блока для измерения основных параметров двигателя, сопротивления, имитирующего нагрузку, осциллографов для

измерения тока, момента и скорости и графопостроителя для отображения электро-механической характеристики двигателя.

Рассчитанные параметры двигателя подставляем в окно параметров блока двигателя постоянного тока. Промоделировав, снимаем показатели тока, угловой скорости и момента. Так же строим механическую характеристику двигателя постоянного тока. Сравниваем рассчитанные параметры с результатами моделирования и делаем соответствующие выводы.

На графике (рис. 1) показано значение тока якоря при заданных параметрах двигателя. Данные значения имеют следующие характеристики: в момент запуска двигателя пусковой ток достигает значения 300 А, после включения первой реостатной ступени его значение понижается до 165 А, затем при вводе в действие второй ступени он опускается до 100 А и, наконец, после включения третьей ступени он выходит на своё номинальное значение 50 А, что соответствует паспортным данным.

График на рис. 2 показывает параметры частоты вращения двигателя в зависимости от времени моделирования. Из графика видно, что время переходного процесса моделирования немного превышает 1 секунду, а перерегулирование отсутствует. Это вполне удовлетворяет условиям быстрого действия системы электропривода при реостатном пуске. После разгона через 9 секунд двигатель выходит на свою номинальную частоту вращения 170 рад/с, что соответствует скорости 1630 об/мин. Указанное значение не превышает паспортного максимального значения 4500 об/мин, но немного выше номинального рабочего значения 1500 об/мин. Такое превышение может незначительно повысить электропотребление и сократить срок службы двигателя.

График на рис. 3 отображает зависимость электромагнитного момента двигателя от времени моделирования. При пуске пусковой момент достигает значения 370 Н·м, после включения первой реостатной ступени его значение понижается до 200 Н·м, затем при вводе в действие второй ступени он опускается до 125 Н·м и, наконец, после включения третьей ступени он выходит на своё номинальное значение 65 Н·м, что не соответствует расчетному значению, которое составляет 108 Н·м.

Далее построим механическую характеристику двигателя постоянного тока. Она отображает зависимость частоты вращения двигателя от электромагнитного момента. На построенной характеристике можно определить рабочую точку двигателя, которая соответствует значению частоты 170 рад/с и момента 65 Н·м.

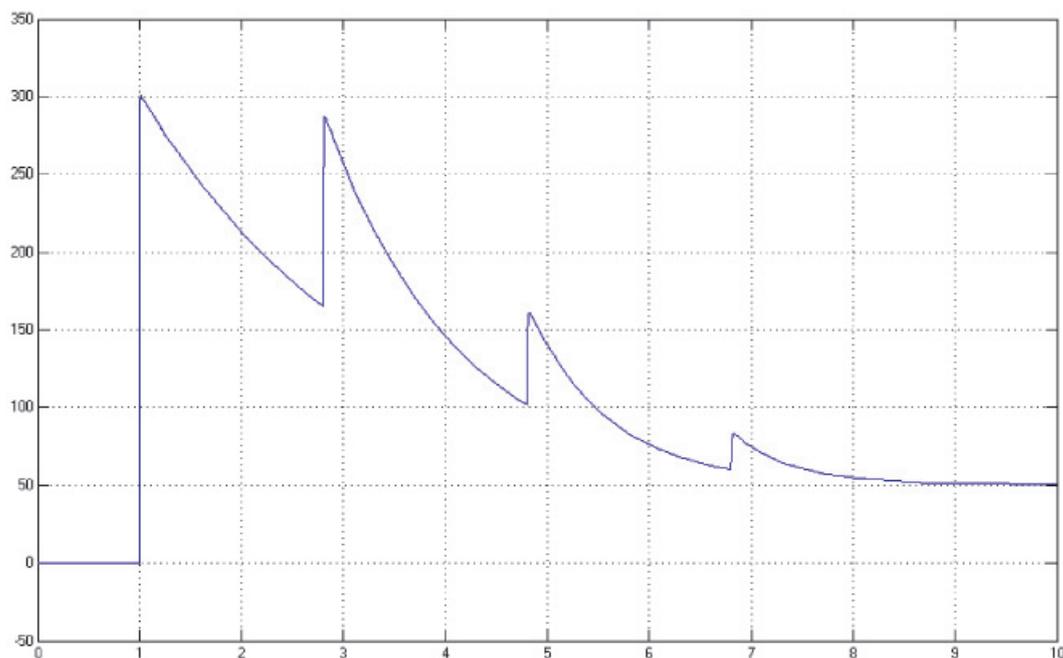


Рис. 1. Ток якоря двигателя постоянного тока

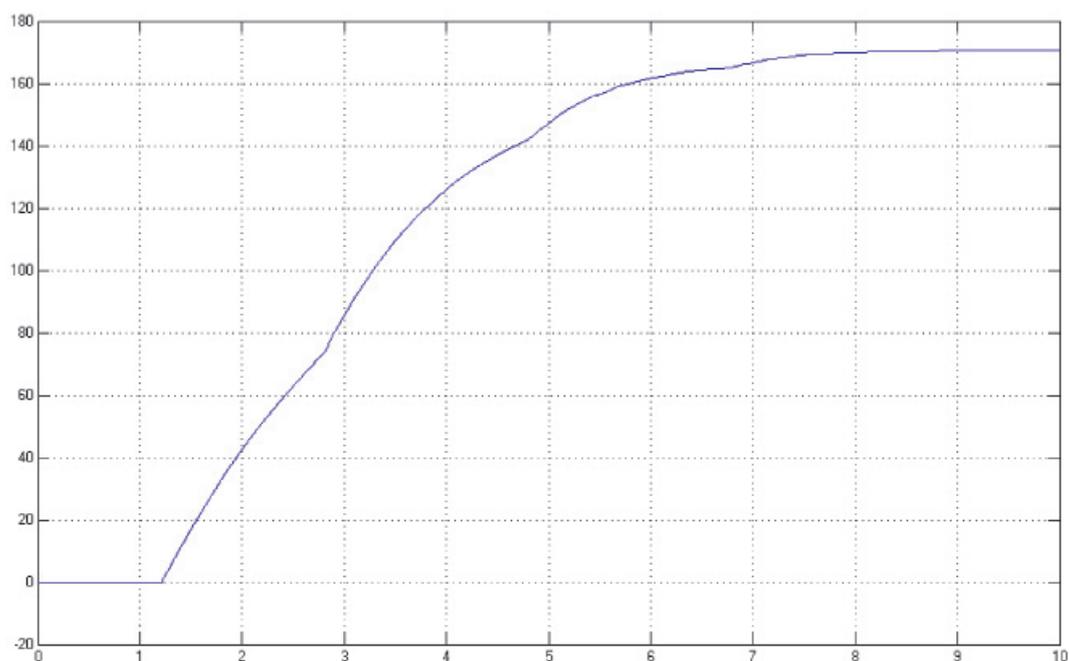


Рис. 2. Частота вращения двигателя постоянного тока

Произведя моделирование режимов работы двигателя постоянного тока и рассмотрев полученные графики и данные, можно утверждать, что реостатный пуск вполне подходит для двигателей постоянного тока средней мощности (10–100 кВт). Хотелось бы отметить, что моделирование более мощного двигателя постоянного тока с преобразователем частоты ранее подробно рассматривалось в [3].

В результате проделанной работы была создана модель функционального уровня реостатного пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. В ходе работы были определены оптимальные параметры эксперимента, обеспечивающие выполнение расчетов при необходимой точности и, кроме того, обеспечивающие лучшую наглядность результатов [4–5, 9–11, 8]. Результаты эксперимента представлены

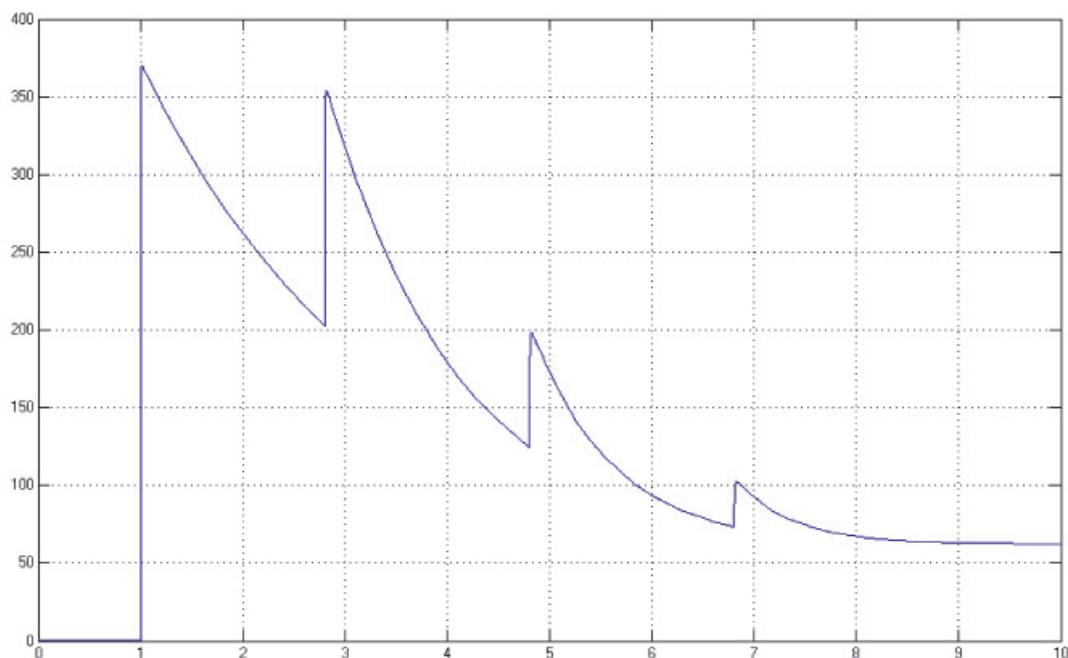


Рис. 3. Электромагнитный момент двигателя постоянного тока

в графиках. Оценка результатов позволяет считать данный способ пуска двигателя удовлетворяющим всем целям и требованиям. Можно однозначно считать использование реостатного пуска (по сравнению с прямым пуском) более предпочтительным для двигателей постоянного тока средней мощности [6, 12, 14, 16, 22, 24]. Описание прочих различных способов пуска и исследования режимов работы всех типов двигателей в программе MatLab изложено в работах [7, 18, 20–21, 23, 25, 27–29].

Список литературы

1. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.
2. Моделирование режимов работы систем электропитания горных предприятий: монография / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, Н.Н. Кугушева. – М.: Издательство «Перо», 2015. – 100 с.
3. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования: монография / А.С. Семёнов, Н.Н. Кугушева, В.М. Хубиева. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.
4. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 341–342.
5. Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Исследование системы частотно-регулируемого электропривода вентилятора главного проветривания при помощи моделирования // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 20. – С. 34–41.
6. Рушкин Е.И., Семёнов А.С., Саввинов П.В. Анализ применения протокола MODBUS для управления электроприводом на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–12. – С. 2615–2619.
7. Саввинов П.В., Семёнов А.С. Модификация электроприводов насосов малой мощности на горных предприятиях // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5–1. – С. 232.
8. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода: методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов специальности 140601 – «Электромеханика». – М.: Изд-во «Спутник+», 2012. – 60 с.
9. Семёнов А.С. Моделирование режима пуска синхронного двигателя электропривода насоса ГрАТ-4000 // Наука в центральной России. – 2012. – № 2S. – С. 23–27.
10. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. – № 1. – С. 51–59.
11. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя при прямом пуске и с преобразователем частоты в пакете программ MATLAB // Естественные и технические науки. – 2013. – № 4. – С. 296–298.
12. Семёнов А.С. Моделирование режимов работы электродвигателей насосов малой и средней мощности водоотливных установок применительно к подземным рудникам // Современная наука: тенденции развития материалы II Международной научно-практической конференции, (30 июля 2012 г.): сборник научных статей: в 3 томах / ред. Р.В. Бисалиев. – Краснодар, 2012. – С. 112–116.
13. Семёнов А.С. Моделирование реостатного пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9–2. – С. 29–34.
14. Семёнов А.С. Перспективы внедрения вентиляльных электроприводов в горной промышленности // Научная дискуссия: вопросы технических наук: материалы II Международной заочной научно-практической конференции. Международный центр науки и образования. – 2012. – С. 52–56.
15. Семёнов А.С. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5–1. – С. 232–236.
16. Семёнов А.С. Применение системы электропривода с преобразователем частоты и автономным инвертором

напряжения на проходческом комбайне // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 18. – С. 71–77.

17. Семёнов А.С. Программа MATLAB: Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 140211 – «Электроснабжение». – М.: Изд-во «Спутник+», 2012. – 40 с.

18. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки главного проветривания применительно к подземному руднику по добыче алмазосодержащих пород // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–5. – С. 1066–1070.

19. Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М., Матул Г.А. Внедрение пакета программ MATLAB в учебную и научную работу студентов технических специальностей // Естественные и технические науки. – 2014. – № 3 (71). – С. 165–171.

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

21. Семёнов А.С., Рушкин Е.И. Моделирование электродвигателя привода рабочего органа комбайна АМ-105 // Наука и инновационные разработки – Северу. – 2014. – С. 195–199.

22. Семёнов А.С., Саввинов П.В., Рушкин Е.И. Внедрение частотно-регулируемых электроприводов как метод энергосбережения на горных предприятиях // Достижения и перспективы естественных и технических наук: сборник материалов II Международной научно-практической конференции. – М.: Центр научного знания Логос, 2012. – С. 60–63.

23. Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 5–5. – С. 694–698.

24. Семёнов А.С., Шипулин В.С. Электропривод – многофункциональное, высокопроизводительное, энергоэффективное устройство // Наука XXI века: новый подход: материалы II молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 28 сентября 2012 года, г. Санкт-Петербург. Науч.-изд. центр «Открытие». – Петрозаводск, 2012. – С. 63–65.

25. Семёнов А.С., Шипулин В.С., Рушкин Е.И. Моделирование режимов работы микро-ГЭС и ветрогенераторной установки // Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности: сборник научных статей по материалам I Международной научно-практической конференции. Минобрнауки России, Юго-западный государственный университет (ЮЗГУ); редколлегия: А.В. Филинович. – 2012. – С. 102–107.

26. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

27. Шипулин В.С., Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8–2. – С. 344–347.

28. Semenov A.S. Model a low power the wind generator setup // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 12. – С. 65–66.

29. Semenov A.S., Shipulin V.S. Analysis of energy efficiency of the system drive centrifugal pump GRAT-4000 by modeling in MATLAB // Europäische Fachhochschule. – 2013. – № 1. – С. 228.

References

1. Aliev I.I. Spravochnik po elektrotehnike i elektrooborudovaniyu: Ucheb. posobie dlya vuzov. 2-e izd., dop. M.: Vyssh. shk., 2000. 255 p.

2. Modelirovanie rezhimov raboty sistem elektrosnabheniya gornykh predpriyatiy: monografiya / A.S. Semenov, V.M. Khubieva, N.N. Kugusheva. M.: Izdatelstvo «Pero», 2015. 100 p.

3. Modelirovanie rezhimov raboty elektroprivodov gornogo oborudovaniya: monografiya / A.S. Semenov, N.N. Kugusheva, V.M. Khubieva. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 112 p.

4. Rushkin E.I., Semenov A.S. Analiz energoeffektivnosti sistemy elektroprivoda tsentrobezhnogo nasosa pri pomoshchi modelirovaniya v programme MATLAB // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2013. no. 8–2. pp. 341–342.

5. Rushkin E.I., Semenov A.S. Issledovanie sistemy chastotno-reguliruemogo elektroprivoda ventilyatora glavnogo provetrivaniya pri pomoshchi modelirovaniya // Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike. 2013. no. 20. pp. 34–41.

6. Rushkin E.I., Semenov A.S., Savvinov P.V. Analiz primeneniya protokola MODBUS dlya upravleniya elektroprivodom na gornykh predpriyatiyakh // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. no. 11–12. pp. 2615–2619.

7. Savvinov P.V., Semenov A.S. Modifikatsiya elektroprivodov nasosov maloy moshchnosti na gornykh predpriyatiyakh // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. no. 5–1. pp. 232.

8. Semenov A.S. Modelirovanie avtomatizirovannogo elektroprivoda: Metodicheskie ukazaniya po vypolneniyu laboratornykh rabot dlya studentov spetsialnosti 140601 «Elektromekhanika». M.: Izdatelstvo «Sputnik+», 2012. 60 p.

9. Semenov A.S. Modelirovanie rezhima puska sinkhronnogo dvigatelya elektroprivoda nasosa GrAT-4000 // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2012. no. 2S. pp. 23–27.

10. Semenov A.S. Modelirovanie rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya v pakete programm MATLAB // Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova. 2014. T. 11. no. 1. pp. 51–59.

11. Semenov A.S. Modelirovanie rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya pri pryamom puske i s preobrazovatelem chastoty v pakete programm MATLAB // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2013. no. 4. pp. 296–298.

12. Semenov A.S. Modelirovanie rezhimov raboty elektrodvigatelye nasosov maloy i sredney moshchnosti vodootlivnykh ustanovok primenitelno k podzemnym rudnikam // Sovremennaya nauka: tendentsii razvitiya materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, (30 iyulya 2012 g.): sbornik nauchnykh statey: v 3 tomakh. Redaktor: Bisaliev R. V. Krasnodar, 2012. pp. 112–116.

13. Semenov A.S. Modelirovanie reostatnogo puska dvigatelya postoyannogo toka s nezavisimym vzbuzhdeniem // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy. 2014. no. 9–2. pp. 29–34.

14. Semenov A.S. Perspektivy vnedreniya ventilynykh elektroprivodov v gornoy promyshlennosti // Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk materialy II Mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Mezhdunarodnyy tsentr nauki i obrazovaniya. 2012. pp. 52–56.

15. Semenov A.S. Prepodavanie uchebnykh distsiplin u spetsialnostey «Elektrosnabzhenie» i «Elektromekhanika» s ispolzovaniem programmy MATLAB // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. no. 5–1. pp. 232–236.

16. Semenov A.S. Primenenie sistemy elektroprivoda s preobrazovatelem chastoty i avtonomnym invertorom napryazheniya na prokhodcheskom kombayne // Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike. 2013. no. 18. pp. 71–77.

17. Semenov A.S. Programma MATLAB: Metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam dlya studentov spetsialnosti 140211 «Elektrosnabzhenie». M.: Izdatelstvo «Sputnik+», 2012. 40 p.

18. Semenov A.S., Kugusheva N.N., Khubieva V.M. Modelirovanie rezhimov raboty chastotno-reguliruemogo elektroprivoda ventilyatornoy ustanovki glavnogo provetrivaniya primenitelno k podzemnomu rudniku po dobyche almazosoderzhashchikh porod // Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 8–5. pp. 1066–1070.

19. Semenov A.S., Kugusheva N.N., Khubieva V.M., Matul G.A. Vnedrenie paketa programm MATLAB v uchebnuyu i nauchnyu rabotu studentov tekhnicheskikh spetsialnostey // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2014. no. 3 (71). pp. 165–171.
20. Semenov A.S., Pak A.L., Shipulin V.S. Modelirovanie rezhima pushka elektrodvigatelya pogruzochno-dostavochnykh mashin primenitelno k rudnikam po dobychealmazosoderzhashchikh porod // Privolzhskiy nauchnyy vestnik. 2012. no. 11 (15). pp. 17–23.
21. Semenov A.S., Rushkin E.I. Modelirovanie elektrodvigatelya privoda rabocheho organa kombayna AM-105 // Nauka i innovatsionnye razrabotki Severu 2014. pp. 195–199.
22. Semenov A.S., Savvinov P.V., Rushkin E.I. Vnedrenie chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov kak metod energosberezheniya na gornykh predpriyatiyakh // Dostizheniya i perspektivy estestvennykh i tekhnicheskikh nauk Sbornik materialov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tsentr nauchnogo znaniya Logos. 2012. pp. 60–63.
23. Semenov A.S., Khaziev R.R. Vyborelektrodvigatelya prokhodcheskogo kombayna putem matematicheskogo modelirovaniya // Mezhdunarodnyy studentcheskiy nauchnyy vestnik. 2015. no. 5–5. pp. 694–698.
24. Semenov A.S., Shipulin V.S. Elektroprivod mnogofunktsionalnoe, vysokoproizvoditelnoe, energoeffektivnoe ustroystvo // Nauka XXI veka: novyy podkhod materialy II molodezhnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 28 sentyabrya 2012 goda, g. Sankt-Peterburg. Nauch.-izd. tsentr «Otkrytie». Petrozavodsk, 2012. pp. 63–65.
25. Semenov A.S., Shipulin V.S., Rushkin E.I. Modelirovanie rezhimov raboty mikro-GES i vetrogeneratornoy ustanovki // Sovremennyye issledovaniya v oblasti energosberezheniya i povysheniya energeticheskoy effektivnosti sbornik nauchnykh statey po materialam I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Minobrnauki Rossii, Yugo-zapadnyy gosudarstvennyy universitet (YuZGU); redkollegiya: A. V. Filinovich. 2012. pp. 102–107.
26. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. 288 p.: il.
27. Shipulin V.S., Semenov A.S. Modelirovanie rezhimov raboty sistemy elektrosnabzheniya dobychnogo uchastka podzemnogo rudnika // Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. 2013. no. 8–2. pp. 344–347.
28. Semenov A.S. Model a low power the wind generator setup // Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya. 2013. no. 12. pp. 65–66.
29. Semenov A.S., Shipulin V.S. Analysis of energy efficiency of the system drive centrifugal pump GRAT-4000 by modeling in MATLAB // Europäische Fachhochschule. 2013. no. 1. pp. 228.

Рецензенты:

Зырянов И.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ГиНД политехнического института (филиал), ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», зам. директора по науке НИИ «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ОАО), г. Мирный;

Викулов М.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой горных машин, профессор кафедры электрификации и автоматизации горного производства политехнического института (филиал), ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Мирный.