

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Сформулирована актуальность вопроса разработки энергоэффективных электротехнических комплексов, предназначенных для проведения испытаний асинхронных машин. Отмечена необходимость автоматизации испытательных стендов с целью повышения их надежности. В качестве объекта исследований выбраны схемы для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки. Для данных схем разработаны алгоритмы эффективного управления, исключающие возможную перегрузку в процессе пуска и последующего нагружения электрических машин до номинального режима. Полученные результаты могут быть применены при производстве и эксплуатации асинхронных машин.

Ключевые слова: испытательный комплекс, асинхронная машина, частотный преобразователь, нагрузочные испытания, алгоритм управления, взаимная нагрузка.

Электроприводы переменного тока получают все большее распространение в различных областях применения, в том числе для привода транспортных средств [1–5]. Данная тенденция обусловлена значительным скачком в развитии силовой полупроводниковой техники, в том числе силовых транзисторов и выполненных на их основе преобразователей [6–10]. Эксплуатация электрических машин на различных стадиях жизненного цикла неотъемлемо связана с проведением их испытаний [11, 12]. Современные стенды, обеспечивающие проведение испытаний электрических машин, представляют собой сложные электротехнические комплексы, оснащенные широким набором силового, измерительного и диагностического оборудования, электронных, микроконтроллерных и микропроцессорных систем, средствами управления процессом испытаний и др.

Одними из основных требований, предъявляемых к современным техническим комплексам, являются высокая надежность и энергоэффективность. Высоких показателей энергоэффективности можно добиться путем применения схем испытания, использующих метод взаимной нагрузки [13–17]. Повышения надежности испытательных стендов можно добиться путем их автоматизации [18].

Для обеспечения автоматизации процесса испытаний асинхронных машин методом взаимной нагрузки ранее разработан ряд схем, приведенных на рис. 1, 2 [19, 20]. По аналогии с данными схемами авторами предложена схема, приведенная на рис. 3, позволяющая автоматизировать стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки, приведенный в источнике [17].

Данные схемы позволяют в соответствии с требованиями действующих ГОСТов проводить нагрузочные испытания асинхронных двигателей, применяемых как при питании от источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц (рис. 1), так и при питании от управляемого инвертора напряжения или преобразователя частоты (рис. 2, 3).

Рассматриваемые схемы (рис. 1–3) имеют общие элементы: сеть 1, преобразователь частоты 2, задатчик параметров 3, система управления 4, вычислитель частоты напряжения 5, датчик тока 6, датчик частоты вращения 7, асинхронная машина 8, муфта 9, соединяющая вал испытуемого двигателя с нагрузочной машиной.

Дальнейшая разработка автоматизированных систем испытаний требует составления алгоритмов управления процессом испытаний.

Представленные ниже алгоритмы управления процессом испытаний (рис. 4–6) имеют общую часть: перед запуском машин оператором должны быть заданы параметры испытуемого двигателя — номинальные ток I_n и частота вращения n_n , по которым система управления определяет шаги регулирования частоты вращения Δf_1 и Δf_2 . Далее алгоритмы позволяют обеспечить запуск машин до режима холостого хода, после чего осуществляется задание номинальной нагрузки испытуемому двигателю. Далее обе машины работают в установленном режиме в течение времени, установленного для данного типа испытаний, и производятся необходимые измерения диагностических параметров. В том случае, если на стенде испытываются однотипные машины, номинальные параметры испытуемого двигателя могут быть заданы однократно

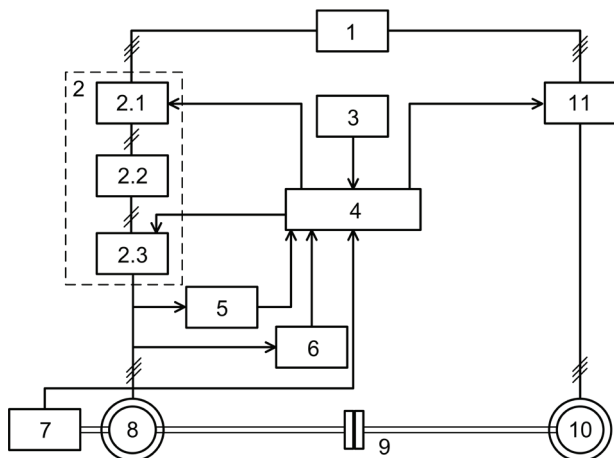


Рис. 1. Схема испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом электроэнергией по сети

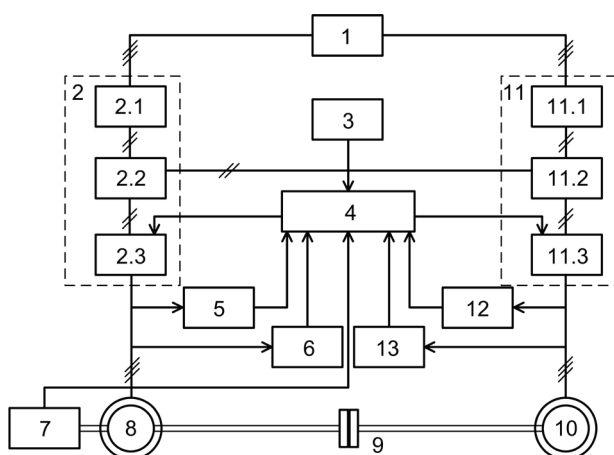


Рис. 2. Схема испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом электроэнергией по звену постоянного тока

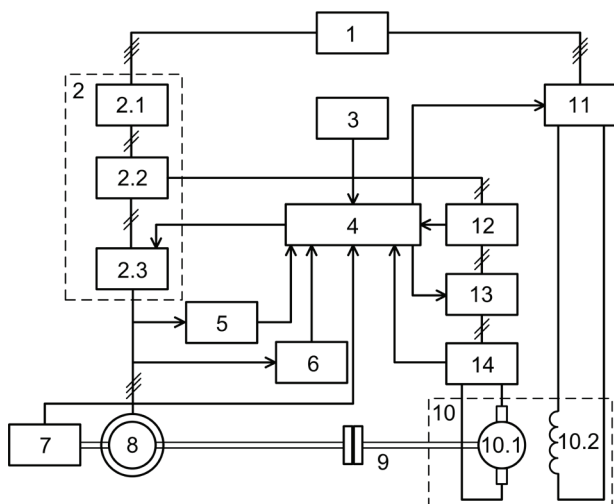


Рис. 3. Схема испытаний с нагрузочной машиной постоянного тока

и при проведении последующих испытаний повторно не вносятся.

Схема, приведенная на рис. 1, помимо общих элементов 1–9 имеет асинхронную машину 10

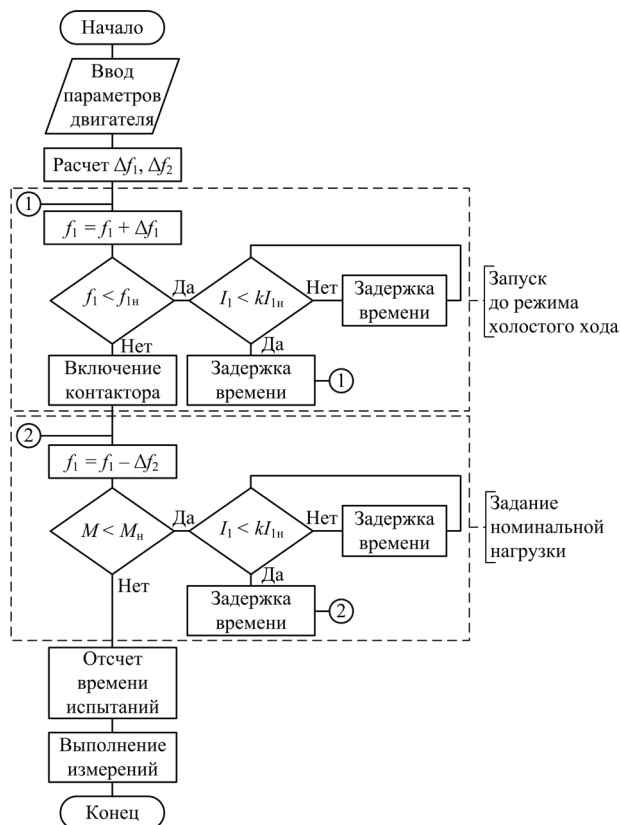


Рис. 4. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом энергией по сети

и контактор 11. Преобразователь частоты на данной схеме имеет звено постоянного тока 2.2, управляемые выпрямители-инверторы 2.1 и 2.3. Испытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 10, нагрузочной — машина 8.

Алгоритм управления процессом испытаний данной схемы приведен на рис. 4. Данный алгоритм характеризуется следующими особенностями осуществления запуска до режима холостого хода и задания номинальной нагрузки.

Для запуска машин до режима холостого хода производится увеличение частоты питающего напряжения f_1 с шагом Δf_1 , пока не перестанет выполняться условие

$$f_1 < f_{1н} \tag{1}$$

где $f_{1н}$ — номинальное значение частоты питающего напряжения испытуемого двигателя.

Шаг Δf_1 должен быть рассчитан так, чтобы цикл, обеспечивающий увеличение f_1 , завершился при равенстве $f_1 = f_{1н}$.

Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения f_1 выполняется с задержкой по времени, необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения $kI_{1н}$, т. е. обеспечивалось условие:

$$I_1 < kI_{1н} \tag{2}$$

Коэффициент $k > 1$ может быть принят равным приблизительно от 1,2 до 1,5 в зависимости от того, насколько плавным необходимо обеспечить процесс регулирования. Если за время задержки ток I_1

не успел снизиться до значения $kI_{ин'}$, задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (2) производится включение контактора 11 (см. рис. 1). Обе асинхронные машины оказываются подключенными к источникам питания и работающими в режиме холостого хода.

Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного снижения частоты f_1 с шагом Δf_2 , пока не перестанет выполняться условие

$$M < M_n \quad (3)$$

где M_n — номинальное значение вращающего момента испытуемого двигателя.

Каждый шаг снижения частоты питающего напряжения f_1 выполняется с задержкой по времени, необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения $kI_{ин'}$. Если за время задержки ток I_1 не успел снизиться до значения $kI_{ин'}$, задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (3) испытуемый двигатель 10 (рис. 1) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Схема, приведенная на рис. 2, помимо общих элементов 1–9 имеет асинхронную нагрузочную машину 10 и дополнительные преобразователь частоты 11, вычислитель частоты напряжения 12 и датчик тока 13. Оба преобразователя частоты на данной схеме имеют неуправляемые выпрямители 2.1 и 11.1, звенья постоянного тока 2.2 и 11.2, управляемые выпрямители-инверторы 2.3 и 11.3. Испытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 8, нагрузочной — машина 10.

Алгоритм управления процессом испытаний данной схемы (рис. 2) приведен на рис. 5. Данный алгоритм имеет следующие особенности.

Для запуска машин до режима холостого хода с шагом Δf_1 производится увеличение частот питающего напряжения $f_1 = f_2$, подаваемого на машины 8 и 10 (см. рис. 2), пока не перестанет выполняться условие (1).

Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения f_1 выполняется с задержкой по времени, необходимой для обеспечения условия (2). Если за время задержки ток I_1 не успел снизиться до значения $kI_{ин'}$, задержка времени повторяется до выполнения условия (2). После выполнения данного условия обе асинхронные машины оказываются работающими в режиме холостого хода. Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного снижения частоты f_1 с шагом Δf_2 , пока не перестанет выполняться условие (3).

Каждый шаг снижения частоты питающего напряжения f_1 выполняется с задержкой по времени, необходимой для того, чтобы ток статора снизился до значения $kI_{ин'}$. Если за время задержки ток I_1 не успел снизиться до значения $kI_{ин'}$, задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (3) испытуемый двигатель 8 (рис. 2) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Схема, приведенная на рис. 3, помимо общих элементов 1–9 имеет нагрузочную машину постоянного тока 10, управляемый выпрямитель 11, контактор 13, датчики напряжения 12 и 14. Преобразователь частоты на данной схеме имеет неуправляемый выпрямитель 2.1, звено постоянного тока 2.2 и управляемый выпрямитель-инвертор 2.3. Ис-

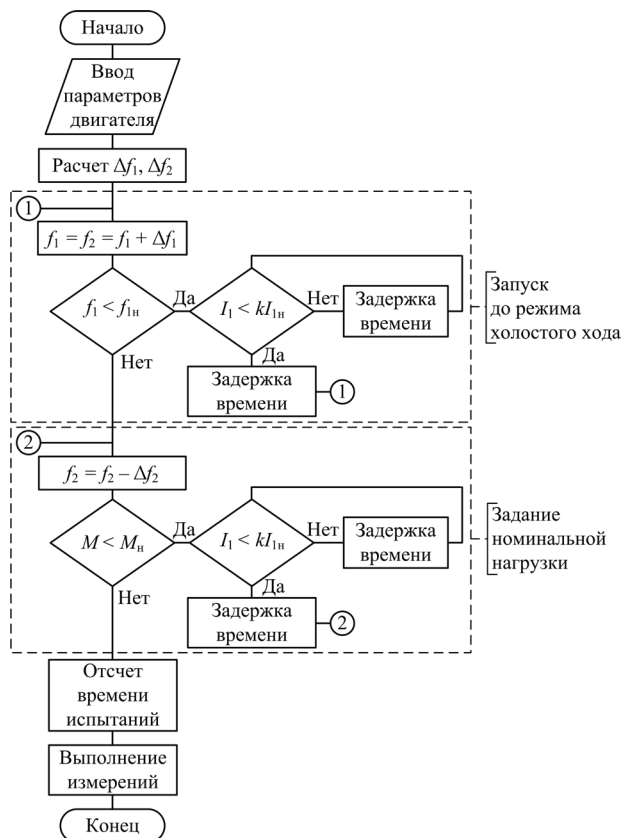


Рис. 5. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной асинхронной машиной и обменом энергией по звену постоянного тока

пытуемым двигателем на схеме является асинхронная машина 8, нагрузочной — машина постоянного тока 10, обмотка якоря которой получает питание через контактор 13 от звена постоянного тока 2.2 преобразователя частоты 2, а обмотка возбуждения получает питание от управляемого выпрямителя 11.

Алгоритм управления процессом испытаний данной схемы приведен на рис. 6. В соответствии с данным алгоритмом необходимо выполнить следующие действия.

Для запуска машин до режима холостого хода с шагом Δf_1 производится увеличение частоты питающего напряжения f_1 , подаваемого на машину 8 (см. рис. 3), пока не перестанет выполняться условие (1). Каждый шаг увеличения частоты питающего напряжения f_1 выполняется с задержкой по времени, необходимой для обеспечения условия (2). Если за время задержки ток I_1 не успел снизиться до значения $kI_{ин'}$, задержка времени повторяется до выполнения условия (2). После выполнения данного условия на обмотку возбуждения нагрузочной машины постоянного тока подается напряжение U_b , которое увеличивается с шагом ΔU_b без выдержек времени, пока не перестанет выполняться условие

$$U_a < U_{ан'} \quad (4)$$

где U_a — напряжение, на выводах обмотки якоря нагрузочной машины постоянного тока; $U_{ан'}$ — номинальное напряжение обмотки якоря нагрузочной машины.

Далее осуществляется включение контактора 13 (рис. 3), после чего обе электрические машины оказываются подключенными к источникам питания и работающими в режиме холостого хода.

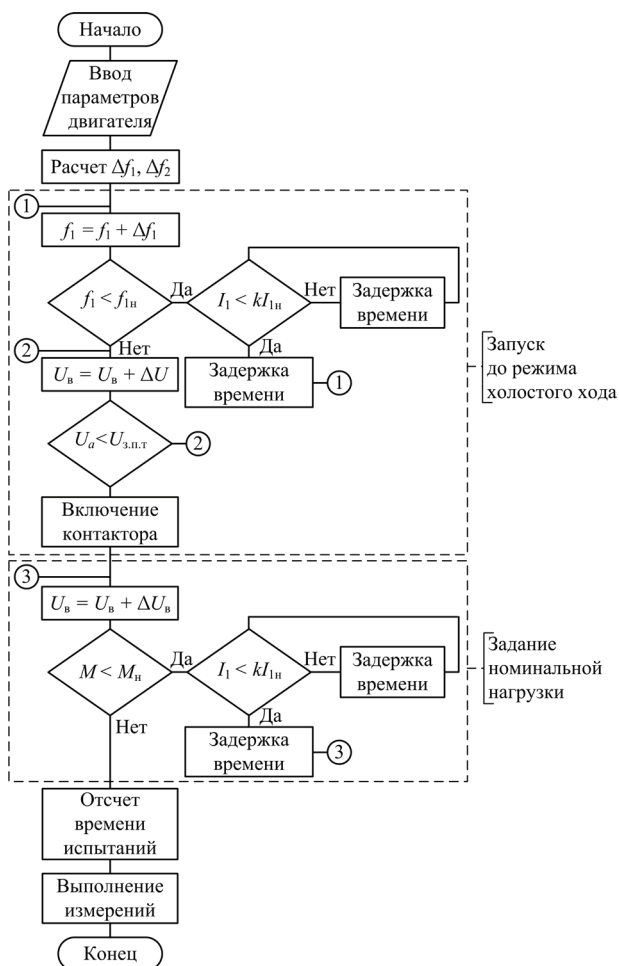


Рис. 6. Алгоритм управления процессом испытаний с нагрузочной машиной постоянного тока

Далее осуществляется задание номинальной нагрузки путем постепенного увеличения напряжения U_b с шагом ΔU_b , пока не перестанет выполняться условие (3).

Каждый шаг увеличения напряжения U_b выполняется с задержкой по времени, необходимой для того, чтобы ток статора испытуемого асинхронного двигателя снизился до значения kI_{1n} . Если за время задержки ток I_1 не успел снизиться до значения kI_{1n} , задержка времени повторяется до выполнения условия (2).

После выполнения условия (3) испытуемый двигатель 8 (рис. 3) оказывается нагруженным номинальным моментом.

Разработанные алгоритмы эффективного управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки (рис. 4–6) позволяют повысить надежность испытательных стендов за счет исключения человеческого фактора и осуществить последующую разработку программного обеспечения, необходимого для микропроцессорных средств управления процессом испытаний.

Результаты данной работы рекомендуются к внедрению на предприятиях, занимающихся производством и эксплуатацией асинхронных машин.

Библиографический список

1. Struhariňanský L., Vittek J., Mačyš P. [et al.]. Vector control techniques for traction drive with induction machines –

comparison // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 851–856. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.147.

2. Smarandescu I. D., Marinescu R.-F., Nicolae M.-S. [et al.]. Considerations on designing and simulation of an induction motor drive system for an electric locomotive // *Proc. of the 2017 Intern. Conf. on Modern Power Systems (MPS)*, June 6–9, 2017. Cluj-Napoca, 2017. DOI: 10.1109/MPS.2017.7974436.

3. Bulucea C. A., Nicola D. A., Rosen M. A. [et al.]. Operation analysis of AC traction motors in terms of electromagnetic torque capability on sustainable railway vehicles // *Proc. of the MATEC Web conf.* 2016. Vol. 76. DOI: 10.1051/mateconf/20167602005.

4. In'kov Y. M., Litovchenko V. V., Feoktistov V. P. A two-system freight electric locomotive for railroads of the Russian Federation // *Russian Electrical Engineering*. 2014. Vol. 85, Issue 3. P. 176–182. DOI: 10.3103/S1068371214030079.

5. Steimel A. Power-electronic grid supply of AC railway systems // *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, May 24–26, 2012. Brasov, 2012. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231844.

6. Омельченко Е. Я. Основные направления развития автоматизированного электропривода // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. № 4 (25). С. 4–7.

7. Blaabjerg F., Pedersen J. K., Jaeger U. Evaluation of modern IGBT-modules for hard-switched AC/DC/AC converters // *Proc. of the Industry Applications Conf. Thirtieth IAS Annual Meeting*. 1995. Vol. 2. P. 997–1005.

8. Zhou Yue. A study of a novel AC-DC-AC matrix converter with high voltage transfer ratio // *Proc. of the Intern. Conf. on Business Management and Electronic Information*. 2011. P. 721–725.

9. Lipnicki P., Lewandowski D., Orkisz M. [et al.]. The effect of change in DC link series resistance on the AC/AC converter operation: power converters embedded diagnostics // *Proc. of the IEEE 1st Intern. Conf. on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. 2013. P. 122–127.

10. Abo-Khalil A. G. Current injection-based DC-link capacitance estimation using support vector regression // *IET Power Electronics*. 2012. Vol. 5, no. 1. P. 53–58. DOI: 10.1049/iet-pel.2010.0310.

11. Омельченко Е. Я., Белый А. В., Енин С. С. [и др.]. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 3 (40). С. 12–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19.

12. Kazakov Y., Palilov I. Research related electromechanical processes in an asynchronous traction motor – asynchronous generator with common shaft based on field model // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2015. Vol. 13, no. 5. P. 442–446. DOI: 10.15598/aeec.v13i5.1388.

13. Пат. 2200960 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / Курбасов А. С., Таргонский И. Л., Долгошеев Э. А. № 2001101213/09; заявл. 12.01.01; опубл. 20.03.03, Бюл. № 8.

14. Beyerleyn E. V., Tyuteva P. V. Energy efficiency of back-to-back method for induction traction motors testing // *Proc. of the 15th Intern. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*. 2014. P. 359–361.

15. Синявский И. В., Жирков А. И., Курочка А. А. Стенд для испытаний асинхронных тяговых электродвигателей // *Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения*. 2014. № 1 (67). С. 3–12.

16. Харламов В. В., Попов Д. И., Литвинов А. В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов: моногр. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2016. 159 с. ISBN 978-5-949-41144-5.

17. Пат. 178716 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/00. Стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И. № 2017143232; заявл. 11.12.17; опубл. 17.04.18, Бюл. № 11.

18. Авилов В. Д., Попов Д. И., Литвинов А. В. Модернизированный стенд для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. Омск: Изд-во ОмГУПС, 2013. С. 137–141.

19. Пат. 186188 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34, H 02 K 15/02. Стенд для испытания асинхронных машин / Попов Д. И. № 2018133027; заявл. 17.09.18; опубл. 11.01.19, Бюл. № 2.

20. Пат. 163996 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/34. Схема испытания асинхронных электродвигателей методом их взаимной нагрузки / Харламов В. В., Попов Д. И., Руменко С. О., Стрегенцев А. И. № 2016113850/28; заявл. 11.04.16; опубл. 20.08.16, Бюл. № 23.

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

ORCID: 0000-0003-3621-3377

AuthorID (SCOPUS): 7006332004

Адрес для переписки: емое@omgups.ru

ПОПОВ Денис Игоревич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 8506-9250

AuthorID (РИНЦ): 657177

ORCID: 0000-0001-9519-1062

AuthorID (SCOPUS): 57200090858

Адрес для переписки: popovomsk@yandex.ru

Для цитирования

Харламов В. В., Попов Д. И. Разработка алгоритмов эффективного управления процессом испытаний асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 29–33. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-29-33.

Статья поступила в редакцию 17.06.2019 г.

© В. В. Харламов, Д. И. Попов