УДК 621.039.59
DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.02
Оригинальная статья / Original paper

# Электрический пробой в оборудовании для работы в аргоне

**В.П. Смирнов, А.В. Мытарев, А.Н. Костюченко, А.Ю. Лещенко, А.В. Носов**

*НПФ «Сосны»,*
*433507 Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, д. 4а*

**Реферат.** Для создания оборудования пирохимической переработки ОЯТ были разработаны экспериментальные образцы оборудования, предназначенные для размещения в защитной камере, заполненной аргоном. Опыт эксплуатации показал частые отказы в аргоне электроприводов, оснащенных общепромышленными асинхронными электродвигателями. В процессе исследований, проведенных в боксе с аргоном, было установлено, что отказы электроприводов были связаны как с электрическим пробоем между контактами электрических соединителей в цепях питания электродвигателей, так и непосредственно с пробоем в обмотках электродвигателей. Основными причинами являлись худшие условия теплоотдачи и пониженное напряжение пробоя в аргоне по сравнению с воздухом. Согласно полученным результатам, напряжение электрического пробоя в аргоне может достигать 25% от значения напряжения электрического пробоя на воздухе. Разница между температурой обмотки электродвигателя и окружающей среды может на 27% превышать значение на воздухе. Для обеспечения работы общепромышленных электроприводов в аргоне предложен комплекс мер, уменьшающих тепловую нагрузку на электродвигатель и снижающих вероятность электрического пробоя. Часть предложенных мер успешно апробирована, эффективность остальных необходимо проверить в последующих исследованиях.

**Ключевые слова:** аргон, защитная камера, пирохимическая переработка ОЯТ, электрический соединитель, электрический двигатель, электрический пробой.

**Для цитирования:** Смирнов В.П., Мытарев А.В., Костюченко А.Н., Лещенко А.Ю., Носов А.В. Электрический пробой в оборудовании для работы в аргоне. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;4:19–28. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.02

## Введение

На СХК смонтирована камера со средой высокочистого аргона для исследования непосредственно самой камеры и экспериментальных образцов оборудования, предназначенного для бескислородной пирохимической переработки ОЯТ БР [1]. Учитывая,

что электрического оборудования, предназначенного для работы в условиях высокой мощности дозы гамма-излучения и в среде одноатомного газа, аргона, практически нет, в камере использовали общепромышленные разъемы и асинхронные или шаговые электрические двигатели [2, 3].

В среде азота электрическое оборудование в камере отработало без замечаний. После перехода на среду аргона наблюдались неоднократные отказы в работе разъемов и асинхронных двигателей, как позже выяснилось, по причине газового пробоя [4, 5]. Поскольку вынести все электрические приборы за пределы инертной камеры не представляется возможным, необходимо изучить возможности размещения электрического оборудования внутри радиационных защитных камер.

В процессе дальнейшего изучения оборудования камеры получены некоторые результаты условий пробоя и рекомендации по снижению вероятности пробоя аргона в электрических разъемах и двигателях.

## Отказы электрооборудования

В процессе эксплуатации защитной камеры и экспериментальных образцов оборудования несколько раз наблюдался отказ электрических приводов в аргоне, регистрируемый по остановке подвижных частей оборудования и выявлению ошибок превышения тока или короткого замыкания в цепях частотных преобразователей, установленных для питания электродвигателей [6, 7]. Обнаружены отказы асинхронных электродвигателей моста и тележки силового манипулятора, дважды – электродвигателя экспериментального образца оборудования, дважды – электродвигателя тележки лебедки силового манипулятора и один раз – двигателя запястья руки манипулятора. Отказы шаговых электродвигателей силового манипулятора не наблюдались.

Остановка движения по срабатыванию защиты частотного преобразователя не всегда соответствовала полной потере работоспособности электродвигателя. После выявления отказа и перемещения оборудования в воздушную среду наблюдались несколько сценариев протекания дальнейших событий.

Первый сценарий. Полное восстановление работоспособности электродвигателя на воздухе и возможность продолжительной работы в воздушной среде в течение длительного времени. Проведенный осмотр состояния цепей питания этих электродвигателей показал наличие следов нагара [8, 9] между контактами электрических соединителей. Таким образом, в этом случае пробой проходил в электрических соединителях и не повреждал обмотки электрических двигателей.

Второй сценарий. Восстановление работоспособности электродвигателя на воздухе в течение небольшого промежутка времени и затем отказ электродвигателя с обрывом или замыканием обмоток [10]. После разборки на обмотках электродвигателя наблюдали нагар, свидетельствующий о возникновении пробоя, повреждающего обмотки электродвигателя (рис. 1). Таким образом, пробой происходил на воздухе, но после эксплуатации в аргоне.

Третий сценарий. Отказ электродвигателя без восстановления его работоспособности на воздухе. Конечное состояние электродвигателя – как во втором сценарии. В этом случае пробой электрической изоляции обмоток происходил непосредственно в аргоне.

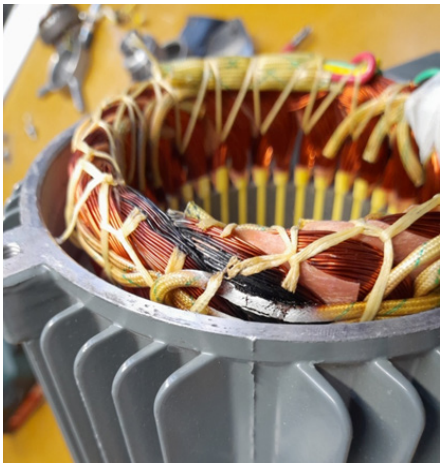

Рис. 1. Нагар в обмотках отказавшего электродвигателя после эксплуатации в аргоне

В связи с обнаруженными отказами были проведены дополнительные исследования работоспособности электрооборудования в экспериментальном боксе при постоянной продувке бокса аргоном. Бокс был оснащен автоматизированной системой, позволяющей регистрировать температуру испытываемого электрооборудования и среды в боксе.

Ниже представлены основные результаты, полученные в процессе исследований работоспособности электрических соединителей, шаговых и асинхронных электродвигателей в аргоне.

## Испытания электрических соединителей

Для проведения испытаний были выбраны общепромышленные электрические соединители, примененные в экспериментальных образцах оборудования и защитной камеры типа LEMO PSA, 2РМДТ27, Каскад ВПМ10-17, Каскад ВПМ-40. Испытания проводили при помощи установки для проверки электрической безопасности GPI-825, обеспечивающей испытательное напряжение от 0,1 до 5,0 кВ при токе до 100 мА. Полученная зависимость напряжения пробоя от расстояния между контактами электрических соединителей показана на рис. 2.

Согласно полученным результатам, при номинальном расстоянии между электрическими контактами соединителя от 4 до 8 мм напряжение электрического пробоя в аргоне составляет 25–40% от значения напряжения электрического пробоя на воздухе. Нанесение электроизоляционного покрытия – термоусаживаемой трубки или компаунда – в отдельных случаях увеличивает напряжение пробоя между электрическими контактами соединителя, но при этом часто наблюдается электрический пробой в объеме соединителя, который не может быть исключен дополнительным покрытием.

Полная заливка пары электрических соединителей компаундом увеличивает напряжение электрического пробоя, но при этом соединение становится условно разъемным: после отсоединения необходимо удалить остатки старого компаунда

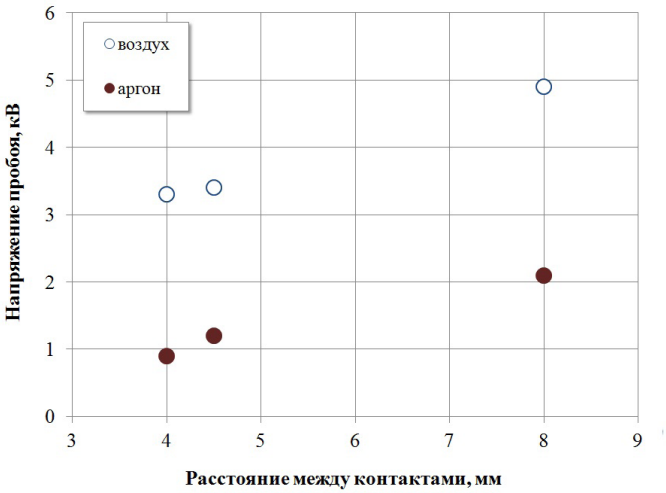


Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя от расстояния между контактами электрического соединителя в аргоне и на воздухе

с соединителей, а при повторном соединении – залить новый компаунд. При этом технологически сложно обеспечить полную заливку пары соединителей компаундом без скрытых полостей, не заполненных компаундом, и контроль отсутствия полостей в такой заливке.

Для обеспечения работоспособности электрического соединителя в аргоне рекомендовано выбирать соединитель с увеличенным расстоянием между контактами, количество соединителей минимизировать, использовать не соседние, а более удаленные друг от друга контакты. Апробация этих рекомендаций на оборудовании защитной камеры показала их эффективность – отказы в аргоне, связанные с соединителями, больше не наблюдались.

## Испытания шаговых электродвигателей

Для проведения испытаний были выбраны общепромышленные шаговые электродвигатели FL57 и FL86, аналогичные примененным в силовом манипуляторе защитной камеры. Перед проведением испытаний корпусы электродвигателей были оснащены датчиками контроля температуры, валы электродвигателей были подключены к внешней механической нагрузке.

Для исключения перегрева ток обмоток электродвигателей был ограничен 73% от номинального значения, скорость вращения вала – не более 600 об/мин (табл. 1). Температура корпуса электродвигателя во время испытаний не превышала 80°С.

После непрерывной работы в аргоне в течение 60-ти часов оба электродвигателя сохранили свою работоспособность. По результатам испытаний для обеспечения длительного непрерывного режима работы шаговых электродвигателей в аргоне рекомендовано опробовать комплекс мер:

- выбор электродвигателя с увеличенным номинальным моментом на валу;
- установка тока обмотки электродвигателя ниже номинального с учетом пропорционального уменьшения момента на валу;

Таблица 1

**Режимы испытаний шаговых электродвигателей в аргоне**

| Тип электродвигателя | Ток обмотки, % | Скорость вращения вала, об/мин | Момент на валу, Н·м | Мощность, Вт |
|---|---|---|---|---|
| FL57 | 54 | 120 | 0,5 | 6 |
| FL57 | 54 | 600 | 0,5 | 28 |
| FL86 | 73 | 120 | 6,7 | 84 |

- ограничение максимальной скорости вращении вала электродвигателя;
- принятие мер по увеличению эффективности теплоотдачи с поверхности электродвигателя – увеличение площади теплоотдачи, установка дополнительных радиаторов, обеспечение принудительной циркуляции окружающей среды;
- минимизация напряжения электропитания;
- установка датчиков контроля температуры и обеспечение отключения питания электродвигателя при превышении температуры заданной уставки.

## Испытания асинхронных электродвигателей

Для проведения испытаний были выбраны общепромышленные асинхронные электродвигатели, аналогичные примененным в силовом манипуляторе защитной камеры и экспериментальных образцах оборудования (табл. 2). Перед проведением испытаний электродвигатели были оснащены датчиками контроля температуры обмоток и подключены к внешней механической нагрузке.

Таблица 2

**Режимы испытаний асинхронных электродвигателей в аргоне**

| Тип электродвигателя, номинальная мощность, Вт | Нагрузка на валу, % | Скорость вращения вала, об/мин | Тип охлаждения | Режим испытаний |
|---|---|---|---|---|
| 5АИ56В4У2, 180 Вт | 18 – 36 | 105 – 1310 | Встроенной крыльчаткой | Вращение с постоянной скоростью |
| АДЧРС90L6У1, 1100 Вт | 14 | 330 – 966 | Дополнительный вентилятор | Вращение с постоянной скоростью в течение нескольких суток |
| АИР56В4, 180 Вт | 20 – 100 | 320 – 1310 | Встроенной крыльчаткой | Периодический режим |

По результатам испытаний электродвигателей 5АИ56В4У2 и АДЧРС90L6У1 отмечено, что при работе в аргоне разница между температурой обмотки электродвигателя и окружающей среды может на 27% превышать значение на воздухе (рис. 3). Нагрев электродвигателя при охлаждении встроенной крыльчаткой существенно увеличивается при скорости вращения вала менее 20% от номинального значения. При наличии дополнительного вентилятора охлаждения эффект повышенного нагрева при малой скорости вращения вала несущественен.

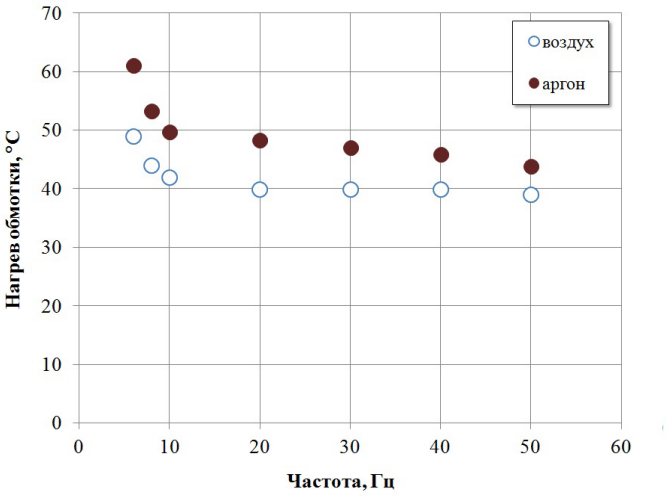


Рис. 3. Зависимость разности между температурой обмотки и окружающей среды при работе на воздухе и в аргоне от частоты питания асинхронного электродвигателя; охлаждение – встроенной крыльчаткой

Электродвигатель 5АИ56В4У2 остался в работоспособном состоянии после работы в аргоне суммарно порядка 10-ти часов при механической нагрузке на валу двигателя до 36%. Температура обмоток электродвигателя не превышала 90°С.

Электродвигатель АДЧРС90L6У1 остался в работоспособном состоянии после непрерывной работы в аргоне с номинальной скоростью вращения вала 1310 об/мин в течение 143 ч. Нагрузка на электродвигатель не превышала 14% от номинального значения, температура обмоток – не более 65°С.

Электродвигатель АИР56В4 был испытан в аргоне в периодическом режиме, имитирующем работу одного из приводов силового манипулятора защитной камеры. Нагрузка на электродвигатель достигала до 100% за счет подключения вала электродвигателя к валу внешнего генератора.

Контроль сопротивления изоляции электродвигателя в аргоне показал существенное уменьшение сопротивления с увеличением температуры (рис. 4). Во время проведения испытаний на нагрузке 100 % при увеличении скорости вращения вала от 40 до 60% от номинального значения температура обмоток за 10 минут увеличилась до 150°С, сопротивление изоляции снизилось до 200 кОм.

Контроль сопротивления изоляции после остановки и охлаждения электродвигателя до комнатной температуры показал, что сопротивление изоляции составляет 500 кОм при исходном значении более 22 ГОм. Несмотря на это двигатель сохранил работоспособное состояние, ошибки частотного преобразователя в цепи питания отсутствовали, визуальный осмотр разобранного двигателя на воздухе не выявил признаков повреждений обмоток.

Двигатель был собран, испытания в аргоне были продолжены с нагрузкой 70%. После 8 час работы при температуре обмоток 82°С был обнаружен отказ электродвигателя – зарегистрирована ошибка короткого замыкания в цепи частотного преобразователя. Таким образом, третий испытанный асинхронный электродвигатель отказал после перегрева во время кратковременной работы в аргоне на номинальной мощности.

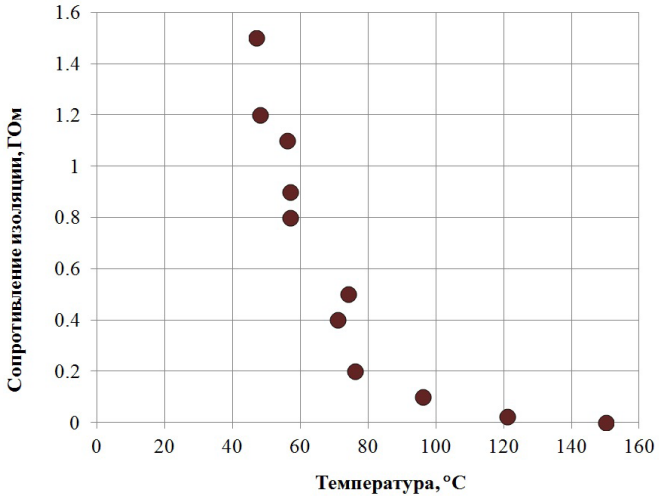


Рис. 4. Зависимость сопротивления изоляции электродвигателя от его температуры

На основании полученных результатов для обеспечения длительного непрерывного режима работы асинхронного электродвигателя в аргоне рекомендовано опробовать комплекс мер:

- выбор электродвигателя с запасом номинальной мощности;
- ограничение минимальной скорости вращения вала электродвигателя;
- обеспечение принудительной циркуляции среды около электродвигателя;
- контроль работоспособности дополнительных вентиляторов охлаждения;
- установка датчиков контроля температуры электродвигателя и обеспечение отключения питания при превышении температуры заданной уставки.

## Заключение

Повышенная вероятность электрического пробоя и перегрева существенно ограничивают применение общепромышленных электрических соединителей и электродвигателей в аргоне.

Проведенные исследования позволили выработать комплекс мер по увеличению ресурса работы электрических соединителей и электродвигателей в аргоне. Меры, предложенные для соединителей, успешно опробованы на реальных изделиях. Эффективность мер для электродвигателей нужно оценить в процессе дальнейших исследований.

Создание промышленного оборудования для работы в аргоне сдерживается отсутствием приводов с подтвержденным ресурсом работы.

### *Литература*

1. Кузьмин И.В., Лещенко А.Ю., Носов А.В., Смирнов В.П., Шамсутдинов Р.Н., Мочалов Ю.С., Суханов Л.П. Создание технологических камер большого объема с инертной атмосферой высокой чистоты для пирохимической переработки отработавшего топлива. *Атомная энергия*. 2023;135(1–2):27–31. URL: https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5318 (дата обращения 01.07.2025).

2. ГОСТ 31606–2012. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. М.: Стандартинформ, 2013, 22 с.

3. ГОСТ IEC/TS 60034-20-1-2013. Управляющие двигатели. Шаговые двигатели. М.: Стандартинформ, 2014, 32 с.

4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987, 592 с.

5. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах (Перевод с англ.). М.: Изд-во иностранной лит-ры, 1960, 605 с.

6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Academia, 2006, 265 с.

7. Колесников С.В., Леонов А.П. Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2022;18(1):33–62. EDN: ORLKDO. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-33-62

8. Бернштейн Л.М. *Изоляция электрических машин общепромышленного применения*. М.: Энергоиздат, 1981, 367 с.

9. Karmakar S., Chattopadhyay S., Mitra M., Sengupta S. Induction Motor Fault Diagnosis. Power Systems Publ., 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0624-1

10. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т., т. 1 (ред. Ю.В. Корицкого и др., 3-е изд., перераб.). М.: Энергоатомиздат, 1986, 368 с.

Поступила в редакцию 15.08.2025
После доработки 05.11.2025
Принята к опубликованию 27.11.2025

**Авторы**

Смирнов Валерий Павлович, советник директора, профессор, д.т.н.,
E-mail: vps@sosny.ru
Мытарев Алексей Викторович, начальник отдела,
E-mail: mav@sosny.ru
Костюченко Антон Николаевич, ведущий инженер, к.т.н.,
E-mail: ako@sosny.ru
Лещенко Антон Юрьевич, начальник отдела, к.т.н.,
E-mail: lay@sosny.ru
Носов Алексей Владимирович, директор,
E-mail: nav@sosny.ru

UDC 621.039.59

## Electrical Breakdown in Equipment in Argon Atmospere

**Smirnov V.P., Mytarev A.V., Kostiuchenko A.N., Leshchenko A.Y., Nosov A.V.**

*Sosny R&D Company,*
*4a Dimitrova St., 433507 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia*

### Abstract

To design and implement the equipment for spent fuel pyrochemical processing, experimental prototypes of the in-cell equipment for argon-filled hot cells were made. The experience has shown that the electric drives with industrial asynchronous motors failed frequently. The research studies in the argon glovebox revealed the electric drive failure were caused by both the electric breakdown in connector contacts in the motor

power circuits and the direct arcing in the motor windings. The main reasons are poor heat transfer properties and lower breakdown voltage of argon compared with the air. The results indicate that the argon breakdown voltage can be 25% of the air breakdown voltage. To ensure performance of the electric connector in the argon, it is recommended to select a connector with increased contact spacing, to minimize the number of connectors, and to use contacts that are spaced far from each other, not the adjacent ones. These recommendations, being tested on the in-cell equipment, demonstrated their efficiency: none of the failures related to the connector performance in the argon atmosphere had no longer occurred.

Also, the research identified that the difference in temperature between the motor winding and the argon atmosphere can be 27% larger than that for the air. To maintain long continuous operation of the electric motors in the argon atmosphere, the next research should include testing of some measures.

Proposals for stepping motors:

- Select a motor with a higher rated torque;
- Set the motor winding current to be less than the rated value considering the proportionally reduced torque;
- Limit the maximum rotation speed of the motor shaft;
- Take measures to improve the efficiency of heat transfer from the motor surface: enlarge the heat transfer area, add extra radiators, provide the forced circulation of argon atmosphere;
- Minimize power voltage;
- Provide temperature sensors and ensure the motor power supply interruption whenever its temperature is above the set value.

Proposals for asynchronous motors:

- Select a motor with rated power reserve;
- Limit the minimum rotation speed of the motor shaft;
- Provide the forced circulation of argon atmosphere surrounding the motor;
- Monitor performance of extra cooling fans;
- Provide temperature sensors and ensure the motor power supply interruption whenever its temperature is above the set value.

The efficiency of proposals above should be studied with further tests.

**Keywords:** argon, electrical breakdown, electric connector, electric motor, hot cell, spent fuel pyrochemical processing.

**For citation:** Smirnov V.P., Mytarev A.V., Kostiuchenko A.N., Leshchenko A.Y., Nosov A.V. Electrical Breakdown in Equipment in Argon Atmospere. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;4:19–28. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.4.02 (in Russian).

## References

1. Kuzmin I.V., Leshchenko A.Y., Nosov A.V., Smirnov V.P., Shamsutdinov R.N., Mochalov Y.S., Sukhanov L.P. Development of large-scale purified inert atmosphere cells for pyroprocessing treatment of spent nuclear fuel. *Atomic energy*. 2023;135(1–2):34–39. DOI: https://doi.org/10.1007/s10512-024-01078-8

2. GOST 31606–2012. Asynchronous Motors with Power Rating from 0.12 to 400 kW. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 22 p. (in Russian).

3. GOST IEC/TS 60034-20-1-2013. Control Motors. Stepping Motors. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 32 p. (in Russian).

4. Raizer Yu.P. Gas Discharge Physics. Moscow, Nauka Publ., 1987, 592 p. (in Russian).

5. Meek J.M., Craggs J.D. Electrical Breakdown of Gases (Translated from English). Moscow, Foreign Languages Publ., 1960, 605 p. (in Russian).

6. Sokolovskii G.G. Variable Frequency AC Drives. Moscow, Academia Publ., 2006, 265 p. (in Russian).

7. Kolesnikov S.V., Leonov A.P. Reliability Problems of Frequency-Controlled Electric Motors. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*. 2022;18(1):33–62. EDN: ORLKDO. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-1-33-62 (in Russian).

8. Bernshtein L.M. Insulation of Electric Machines for General Industry Application. Moscow, Enregoizdat Publ., 1981, 367 p. (in Russian).

9. Karmakar S., Chattopadhyay S., Mitra M., Sengupta S. Induction Motor Fault Diagnosis. Power Systems Publ., 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0624-1

10. Electrical Engineering Reference Guide. In three volumes. Vol. 1 (edit. by Korytskii et al., 3rd ed. Revised). Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 368 p. (in Russian).

**Authors**

Valery P. Smirnov, Director Adviser, professor, Doc. Sci. (Engineering),
Email: vps@sosny.ru
Alexey V. Mytarev, Head of Automation Department,
Email: mav@sosny.ru.
Anton N. Kostiuchenko, Leading Engineer, Cand. Sci. (Engineering),
Email: ako@sosny.ru
Anton Y. Leshchenko, Head of Research and Analysis Department, Cand. Sci. (Engineering),
Email: lay@sosny.ru
Aleksej V. Nosov, Director,
Email: nav@sosny.ru