

О ПОВЫШЕНИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПУТЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ИХ ОБМОТОК

А.И. Сидоров, Ю.С. Смирнов, И.Ф. Суворов, А.Л. Цытович, Ю.В. Медведева

Одной из часто возникающих причин вынужденного простоя технологического оборудования и аварийных ситуаций на промышленных объектах является пробой изоляции электрических машин, возникающий по причине тяжелых условий их эксплуатации, когда частые пуско-тормозные режимы работы электроприводов приводят к интенсивному снижению электрической прочности изоляции обмоток электродвигателя. В немалой степени этим процессам способствует дискретный (импульсный) характер выходного напряжения силовых вентильных преобразователей (тиристорные преобразователи, автономные и ведомые сетью преобразователи частоты и т. д.), формирующих высокочастотные гармоники, вносящих свою долю в нагрев электрической машины и, следовательно, в снижение сопротивления изоляции электрической машины. Одной из причин пробоя изоляции электродвигателей являются также резкие перепады температуры и влажности окружающей среды, возникающие во многих производственных помещениях.

В статье рассматривается принцип построения индикатора комплексного сопротивления изоляции электрических машин и другого электротехнического оборудования.

Индикатор сопротивления ИС представляет собой автоколебательную систему, выходной сигнал которой является тестовым сигналом, подаваемым на контролируемый объект. Отклик этого объекта воздействует на постоянную времени интегратора автоколебательного каскада ИС, изменяя частоту его выходных импульсов. Затем частотно-модулированный сигнал подается на двоичный счетчик, где накапливается число, пропорциональное величине сопротивления контролируемой цепи. По завершении цикла преобразования, задаваемого внешним генератором тактовых импульсов, данные переносятся в регистр памяти, счетчик обнуляется и цикл преобразования повторяется.

Ключевые слова: интегратор, релейный элемент, сопротивление изоляции, электропривод, электродвигатель, счетчик, регистр памяти, мультиплексор.

Существующие измерительные приборы (тестеры изоляции) [1–4] имеют целый ряд недостатков, что ограничивает их практическое применение на производстве. В первую очередь, подобного рода аппаратура имеет достаточно высокую стоимость, и предприятиям невыгодно оснащать каждый технологический механизм такими устройствами диагностики. Во-вторых, подавляющее большинство измерителей сопротивления изоляции работают на постоянном токе и не в состоянии контролировать величину комплексного сопротивления изоляции электротехнического механизма. В то же время при питании, например, асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией не исключено, что потеря электрической прочности изоляции обмоток начинается с уменьшения его не активного, а ёмкостного сопротивления. Однако, подобного рода измерители [5–8], которые могли бы решать указанную задачу, имеют крайне высокую стоимость, исчисляемую сотнями тысяч рублей, и поэтому их применение на промышленных объектах нецелесообразно. Общим недостатком подавляющего большинства тестеров изоляции является отсутствие цифрового выхода, хотя «внутри» их схем производится цифровая обработка данных.

Ниже рассматривается принцип построения индикатора комплексного сопротивления (ИС), в

основе которого лежит принцип частотно-импульсной модуляции выходного сигнала в функции величины контролируемого сопротивления.

Теоретическая часть

Структурная схема индикатора комплексного сопротивления (ИС) (рис. 1, а) содержит интегратор И с постоянной времени $T_{и}$, релейный элемент РЭ с симметричной относительно «нуля» гистерезисной характеристикой, суммирующий счетчик СТ, регистр памяти RG и элемент задержки DL. Выходной сигнал РЭ меняется дискретно в пределах $\pm A$. Выходное напряжение интегратора И имеет пилообразную форму с амплитудой, ограниченной порогами переключения РЭ.

ИС относится к классу автоколебательных систем с амплитудно-частотно-импульсной модуляцией [9–12], где частота выходных импульсов РЭ зависит от величины сопротивления Z_0 контролируемого объекта, в которую подаются выходные импульсы РЭ (см. рис. 1, а). Под действием сигнала отклика контролируемого объекта меняется постоянная времени интегратора И, что, соответственно, приводит к изменению частоты импульсов на выходе РЭ:

$$f_{\text{ВЫХ}} = [4\bar{b} \cdot T_{и} (Z_0)]^{-1},$$

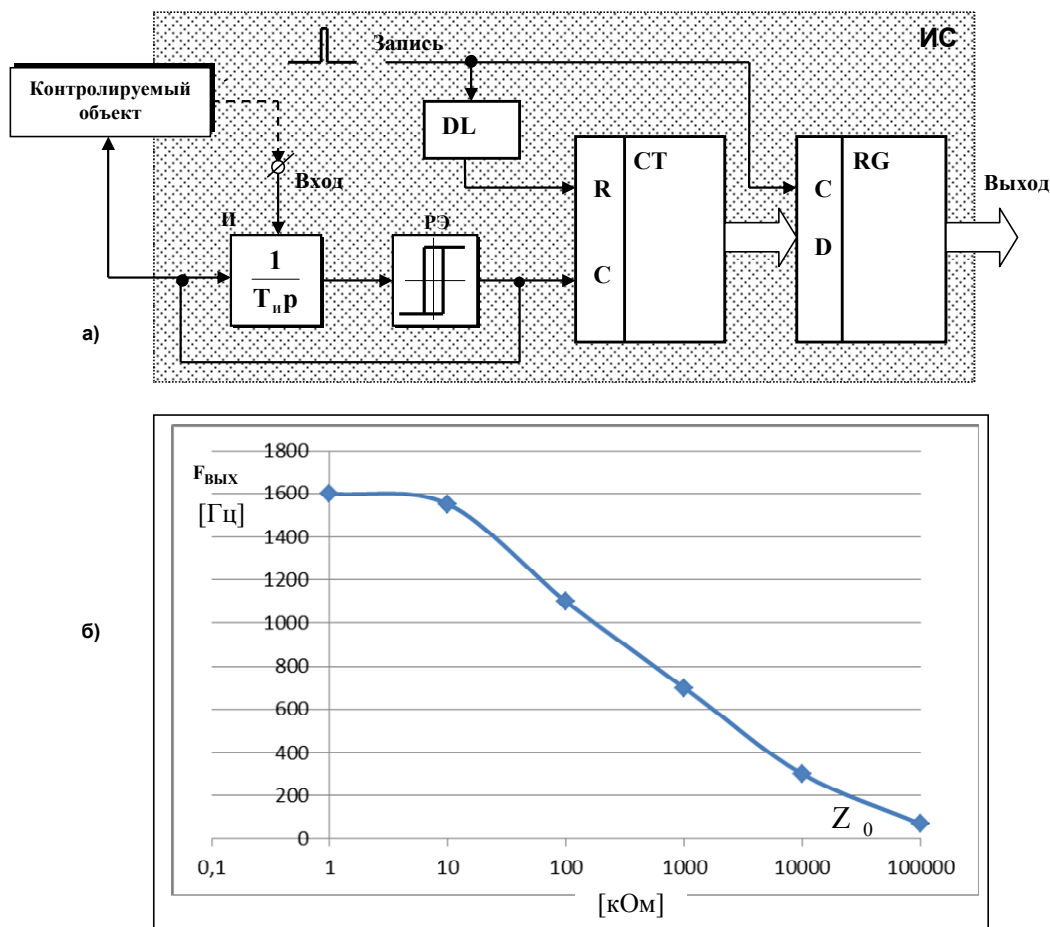


Рис. 1. Обобщенная структурная схема (а) и статическая характеристика (б) аналого-цифрового индикатора значения комплексного сопротивления изоляции

где $\bar{b} = |b/A|$ – нормированная величина порогов переключения РЭ.

Затем выходные импульсы РЭ поступают на счетный С-вход суммирующего счетчика СТ. Интервал преобразования Z_0 в цифровой код задается внешним генератором тактовых импульсов, под действие которых данные из СТ переносятся в регистр памяти RG. После этого с задержкой по времени (единицы микросекунд), задаваемой элементом задержки DL, счетчик СТ обнуляется и цикл преобразования повторяется.

Практическая часть

Экспериментальная статическая характеристика ИС $F_{\text{вых}} = f(Z_0)$ приведена на рис. 1, а. Диапазон преобразуемого сопротивления составляет от 10,0 до 10^5 кОм. Линеаризация зависимости $F_{\text{вых}} = f(Z_0)$, если таковая потребуется, осуществляется программным путем, где $F_{\text{вых}}$ – частота выходных импульсов РЭ. Температурный дрейф «нуля» ИС не превышает 1–3 % в диапазоне от -15°C до $+50^\circ\text{C}$. Для работы ИС достаточно 8 разрядов двоичного кода.

В системах управления электроприводами и

другим электротехническим оборудованием, на наш взгляд, целесообразны следующие варианты применения ИС (рис. 2).

1. Ручной режим. В этом случае (рис. 2, а) при останове электродвигателя М, когда разомкнут автоматический выключатель АВ, ИС поочередно подключается к цепям «фаза А – корпус», «фаза В – корпус», «фаза С – корпус» и между обмотками фаз «А – В», «А – С» и «В – С» с ручной фиксацией результатов измерения. Если величина Z_0 хотя бы в одной из проверок оказывается ниже допустимой величины, обслуживающий персонал обязан заменить исполнительный электродвигатель на исправный.

2. Локальный автоматический режим. Здесь (рис. 2, б) каждый из электроприводов снабжается индивидуальным ИС, а диагностика М, как и ранее, осуществляется при его отключении от сети, но в автоматическом режиме без участия оператора. Система управления электроприводом СУ, дающая команду на отключение преобразователя частоты ПЧ и АВ, одновременно запускает систему мультиплексирования каналов диагностирования МХ и входящий в нее тактовый генератор, с помощью которой ИС периодически подключается к измеряемым цепям. Если состояние

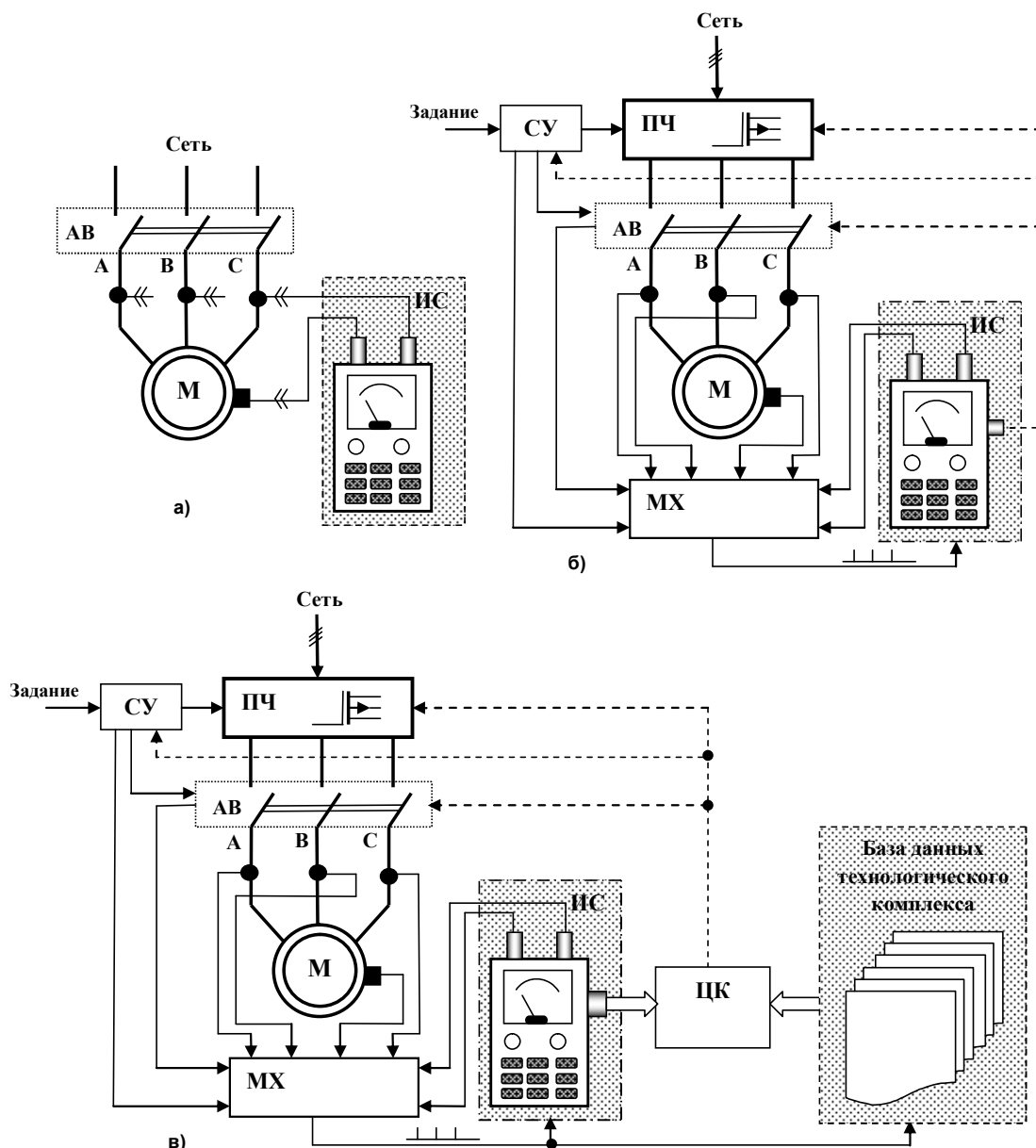


Рис. 2. Режим ручного (а), локального автоматического (б) и централизованного автоматического тестирования сопротивления изоляции электрической машины

изоляции М неудовлетворительное, ИС формирует сигнал «1», блокирующий возможность включения системы управления СУ, ПЧ и АВ.

3. Централизованный автоматический режим. Его отличие от предыдущего случая заключается в том, что здесь ИС связан с централизованной базой данных, где содержатся данные изоляции электрооборудования всех технологических установок цеха для каждой из цепей диагностирования. Сигнал «1» формируется с помощью цифрового компаратора ЦК, сравнивающего код с выхода ИС с кодом, который хранится в базе данных.

Выводы

1. Рассмотрена обобщенная структурная схема ИС с частотно-импульсной модуляцией, отличающаяся простотой технической реализации и

относительно высокой стабильностью характеристик. Диапазон контролируемых сопротивлений изоляции составляет $10,0 \dots 10^5$ кОм.

2. Предложены варианты построения на базе ИС систем диагностирования, как для ручного, так и для автоматических режимов работы [8–11].

Литература

1. Измеритель сопротивления изоляции ИСИ 3–10. – <http://terma-energo.ru/products/Sistemy-kontrolya-napryadjeniya/ISI/> (дата обращения: 02.04.14).
2. Приборы для измерения сопротивления изоляции, мегаомметры. – <http://www.electronshik.ru/class/pribori-dlya-izmereniya-soprotivleniya-izolyatsii-megaometri-052003#sthash.pIRng48v.dpuf> (дата обращения: 03.04.14).

3. Тестеры изоляции. – http://electric-shop.ru/isolation_testers.0.html (дата обращения: 06.04.14).

4. HAMEG HM8118 – RLC-метр. – <http://www.skomplekt.com/tovar/1/13/48/?yclid=5670531036496978697> (дата обращения 06.04.14).

5. Цифровой тестер изоляции ISOTEST 7050. <http://www.electric-shop.ru/index.php?Content=96&Data=098013&menu=1> (дата обращения: 01.04.14).

6. The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws / Yu.S. Usinin, M.A. Grigorjev, A.N. Shishkov et al. // SAE Paper 2011-01-0039, SAE 2011 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; 12 April 2011 through 14 April 2011; Code 91197.

7. Аналого-цифровой преобразователь с интегрирующей синфазной амплитудно-частотно-импульсной модуляцией для систем вентильного электропривода / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин и др. // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 10–15.

8. Дудкин, М.М. Динамические спектральные характеристики развертывающих преобразователей с широтно-импульсной модуляцией /

М.М. Дудкин, Л.И. Цытович, О.Г. Брылина // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 4 (48). – С. 49–55.

9. Бухтояров, В.Ф. Концепция системы управления процессами обеспечения безопасности при эксплуатации электроустановок / В.Ф. Бухтояров, К.Ю. Рыбалченко // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–6. – С. 1303–1306.

10. Бухтояров, В.Ф. Зависимости между затратами на охрану труда и показателями производственного электротравматизма (на примере Южно-Уральской железной дороги) / В.Ф. Бухтояров, К.Ю. Рыбалченко // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–1. – С. 49–52.

11. Бухтояров, В.Ф. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в электроустановках 6–10 кВ и опыт их применения / В.Ф. Бухтояров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – № 16 (275). – С. 70–75.

12. Бухтояров, В.Ф. Синтез логических моделей организации безопасного выполнения работ в электроустановках / В.Ф. Бухтояров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – № 16 (275). – С. 88–91.

Сидоров Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sidorovai@susu.ac.ru.

Смирнов Юрий Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Приборостроение», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; smirnovus@susu.ac.ru.

Суворов Иван Флегонтович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sidorovai@susu.ac.ru.

Цытович Анна Леонидовна, канд. мед. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tcytovichal@susu.ac.ru.

Медведева Юлия Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; medvedevayv@susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 14 апреля 2014 г.

IMPROVING ELECTRICAL MACHINES OPERATION SAFETY BY COMPLEX INSULATION AND WINDING RESISTANCE PERIODIC TESTING

A.I. Sidorov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
sidorovai@susu.ac.ru,

Yu.S. Smirnov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
smirnovys@susu.ac.ru,

I.F. Suvorov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
sidorovai@susu.ac.ru,

A.L. Tsytovich, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
tcytovichal@susu.ac.ru,

Yu.V. Medvedeva, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
medvedevayv@susu.ac.ru

One of the frequently occurring causes of manufacturing equipment forced outage and emergencies at industrial facilities is electrical machine insulation breakdown, arising due to severe conditions of operation, when the electric drive frequent start-ups and breakings lead to the intense reduce of the motor windings insulating strength. To a large extent these processes result from discrete (pulse) nature of the output voltage of the power rectifier converters (thyristor converters, stand-alone and network driven frequency converters, etc) that form the high-frequency harmonics that conduce the electric machine heating and therefore the reduction of insulation resistance of the electrical machine. One of the reasons of the electrical machine insulation breakdown is also sudden changes in ambient temperature and humidity that arise in many production areas. In these circumstances, it is necessary to carry out periodic diagnostics of the electric motors windings and other electrical equipment. It is now usually performed too rarely, mainly during maintenance works on the technological object. At the same time, many objects have production interruptions provided with the technology so that it is available to perform manual or automatic testing of electrical equipment insulation that exhibits the most obvious failures.

This article discusses the construction principle of the electrical machine or another electrical equipment insulation complex resistance indicator.

Resistance indicator RI is an autooscillating system, the output of which is a test signal to the controlled object. The response of this object affects the time constant of the integrator of the RI autooscillating cascade changing the frequency of its output pulses. Then, the frequency-modulated signal is sent to a binary counter which accumulates the number that is proportional to the controlled circuit resistance. After completion of the transformation cycle defined by an external clock generator, data is transferred to the memory register, the counter is reset and a conversion cycle is repeated. An experimental static characteristic of the RI is given. Controlled resistance range is from 10 k Ω to 105 k Ω . Temperature error is 3% max. Different variants of the RI inclusion for electrical equipment diagnosing are sentenced.

Keywords: integrator, relay element, insulation resistance, electric drive, electrical motor, counter, memory register, multiplexer, database, digital comparator.

References

1. *Izmeritel' soprotivleniya izolyatsii ISI 3–10* [Insulation resistance tester IRT 3–10]. Available at: <http://terma-energo.ru/products/Sistemy-kontrolya-napryadjeniya/ISI/> (accessed 02.04.2014).

2. *Pribory dlya izmereniya soprotivleniya izolyatsii, megaohmmetry* [Instruments for measuring insulation resistance, megohmmeters]. Available at: <http://www.electronshtik.ru/class/pribori-dlya-izmereniya-soprotivleniya-izolyatsii-megaohmmetri-052003#sthash.pIRng48v.dpuf> (accessed 03.04.2014).

3. *Testery izolyatsii* [Insulation Testers]. Available at: http://electric-shop.ru/isolation_testers.0.html (accessed 06.04.2014).

4. *HAMEG HM8118 – RLC-metr* [HAMEG HM8118 – RLC-meter]. Available at: <http://www.skomplekt.com/tovar/1/13/48/?yclid=5670531036496978697> (accessed 06.04.2014).

5. *Tsifrovoy tester izolyatsii ISOTEST 7050* [ISOTEST Digital Insulation Tester 7050]. Available at: <http://www.electric-shop.ru/index.php?Content=96&Data=098013&menu=1> (accessed 01.04.2014).

6. Usinin Yu.S., Grigorjev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Gladyshev S.P. The Losses in Control Electric Drives of Transport Mechanisms at Different Controlled Laws. SAE Paper 2011-01-0039, SAE 2011 World Congress and Exhibition; Detroit, MI; United States; April 12, 2011 through April 14, 2011; Code 91197.

7. Tsytoovich L.I., Brylina O.G., Dudkin M.M., Rakhmatulin R.M., Tyugaev A.V. [Analog-to-digital converter with an integrating-phase amplitude-frequency-modulated systems for valve electric drives]. *Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 5, pp. 10–15. (in Russ.)

8. Dudkin M.M., Tsytoovich L.I., Brylina O.G. [Dynamic spectral characteristics of sweep converters with PWM]. *Practical power electronics*, 2012, no. 4 (48), pp. 49–55. (in Russ.)

9. Bukhtoyarov V.F., Rybalchenko K.Yu. [Concept of the control system of electrical installations safety processes]. *Fundamental research*, 2013, no. 8–6, pp. 1303–1306. (in Russ.)

10. Rybalchenko K.Yu., Bukhtoyarov V.F. [Connections between the cost of work safety and industrial electrical injuries index (the case of South Ural Railway)] *Fundamental research*, 2013, no. 8–1, pp. 49–52. (in Russ.)

11. Bukhtoyarov V.F. [Adaptive current earth fault protection in electrical installations of 6–10 kV and experience with their application]. *Bulletin of the South Ural University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 16 (275), pp. 70–75. (in Russ.)

12. Bukhtoyarov V.F. [Synthesis of safe work management logical models in electrical installations]. *Bulletin of the South Ural University. Ser. Power Engineering*, 2012, no. 16 (275), pp. 88–91. (in Russ.)

Received 14 April 2014