

лекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 9. – С. 111-120.

4. Асалханов П.Г., Иванько Я.М., Полковская М.Н. Модели прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур в задачах параметрического программирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 2. – С. 57-66.

5. Багаев А.А., Чернусь Р.С. Частотно-регулируемый электропривод центробежного расходомера сыпучих материалов как средство расширения диапазона измерения // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4. – С. 154-161.

6. Ruzic, S., Vuckovic, A., Nikolic N. (2003). Weather sensitive method for short term load forecasting in Electric Power Utility of Serbia. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 18 (4): 1581-1586.

7. Masood N.A., Ahsan Q. (2013). A Methodology for Identification of Weather Sensitive Component of Electrical Load Using Empirical Mode Decomposition Technique. *Energy and Power Engineering*. Vol. 5: 293-300.

#### References

1. Rajan, D.V., Mallik, S., Thakur, S.S. (2012). An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Vol. 1 (3): 1-9.

2. Bagaev A.A., Bobrovskii S.O. Osnovnye polozeniya metodiki kosvennogo izmereniya toka v

induktore TVCh-ustanovki // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 5. – S. 171-178.

3. Stankevich T.S. Razrabotka metoda operativnogo prognozirovaniya dinamiki razvitiya lesnogo pozhara posredstvom iskusstvennogo intellekta i glubokogo mashinnogo obucheniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2018. – Т. 22. – No. 9. – S. 111-120.

4. Asalkhanov P.G., Ivanyo Ya.M., Polkovskaya M.N. Modeli prognozirovaniya urozhainosti selskokhozyaistvennykh kultur v zadachakh parametricheskogo programmirovaniya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – Т. 21. – No. 2. – S. 57-66.

5. Bagaev A.A., Chernus R.S. Chastotno-reguliruemiyi elektroprivod tsentrobezhnogo raskhodomera sypuchikh materialov kak sredstvo rasshireniya diapazona izmereniya // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 4. – S. 154-161.

6. Ruzic, S., Vuckovic, A., Nikolic N. (2003). Weather sensitive method for short term load forecasting in Electric Power Utility of Serbia. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 18 (4): 1581-1586.

7. Masood N.A., Ahsan Q. (2013). A Methodology for Identification of Weather Sensitive Component of Electrical Load Using Empirical Mode Decomposition Technique. *Energy and Power Engineering*. Vol. 5: 293-300.



УДК 621.316.72

Н.А. Серебряков, С.О. Хомутов  
N.A. Serebryakov, S.O. Khomutov

### АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВРЕМЕННОГО РЯДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ГРУППЫ ТОЧЕК ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СЕЛЬХОЗПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

### ANALYSIS OF THE RANDOM COMPONENT OF ELECTRIC LOAD TIME SERIES OF DELIVERY POINT CLUSTER AGRICULTURAL PRODUCERS

**Ключевые слова:** прогнозирование потребления электроэнергии, суточный график электрической нагрузки, группа точек поставки электроэнергии, временной ряд, гарантирующий поставщик электроэнергии, оптовый рынок электроэнергии и мощности, факторы, отключение электросетевого оборудования, рынок на сутки вперед, случайные воздействия.

**Keywords:** forecasting of electricity consumption, daily load curve, delivery point cluster, time series, default provider, wholesale electricity market, factors, power supply equipment disconnection, day ahead market, random influence.

В условиях рыночной электроэнергетики проблема краткосрочного прогнозирования почасового потребления электроэнергии становится в разы актуальнее. Покупка электроэнергии гарантирующими поставщиками на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) предполагает прогнозирование собственного почасового потребления электроэнергии на следующие сутки по всем группам точек поставки электроэнергии (ГТП). От точности данного прогноза зависят как финансовые результаты самого гарантирующего поставщика, так и цена на электроэнергию для конечных потребителей. Временной ряд почасового потребления электроэнергии ГТП гарантирующего поставщика второго уровня, включающей крупных сельхозпроизводителей, является многофакторной функциональной зависимостью. Анализ факторного пространства является важнейшим этапом прогнозирования электрической нагрузки на следующие сутки. Освящены вопросам оценки степени влияния случайных воздействий на временной ряд электрической нагрузки ГТП гарантирующего поставщика электроэнергии в краткосрочной перспективе. На примере гарантирующего поставщика АО «Алтайкрайэнерго» произведена классификация основных факторов, влияющих на данный временной ряд. Рассмотрены пути снижения неопределенности, связанной с использованием прогнозов метеорологических условий при формировании прогноза потребления электроэнергии. Произведен анализ влияния плановых и аварийных отключений на электросетевом оборудовании 6-220 кВ на электрическую нагрузку ГТП гарантирующего поставщика. Определены особенности изменения режима потребления электроэнергии ГТП сельхозпроизводителей при отключении холодного водоснабжения в населенном пункте. Исследована взаимосвязь между режимом работы крупных сельскохозяйственных потребителей электроэнергии и изменениями в суточном графике электрической нагрузки всей ГТП гарантирующего поставщика. Работа представ-

ляет интерес для работников энергосбытовых компаний и гарантирующих поставщиков электроэнергии, занимающихся краткосрочным прогнозированием почасового потребления электроэнергии на «рынке на сутки вперед».

Under market conditions of electric power industry, the problem of short-term forecasting of hourly electricity consumption becomes much more relevant. The purchase of electricity by default provider on the wholesale electricity market (WEM) involves forecasting their hourly electricity consumption for the next day on all delivery point clusters. The accuracy of this forecast exerts influence on the financial results of default provider and the price of electricity for final consumers. The time series of hourly electricity load of default provider's delivery point cluster which includes large agricultural producers is a multifactor functional dependence. The analysis of the factor space is the most important step in predicting the electrical load for the next day. This paper discusses the degree of influence of random effects on the time series of electrical load of a default provider in the short term. Through the example of a default provider AO "Altaykrayenergo", the classification of the main factors which affect time series was made. The ways to reduce the uncertainty associated with the use of weather forecast in the formation of the forecast of electricity consumption are considered. The analysis of the effect of planned and emergency outages on the electric grid equipment of 6-220 kV on the electrical load of default provider's delivery point cluster was made. The correlation between the schedule of electricity consumption of agricultural producers and electric power consumption of delivery point cluster was determined. The features of changing the mode of electricity consumption when the water supply is turned off were defined. This paper may be of interest for employees of energy sales companies and default provider who engage in short-term forecasting of hourly electricity consumption in the "day-ahead market".

**Серебряков Николай Александрович**, аспирант, каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: na\_serebryakov@altke.ru.

**Хомутов Станислав Олегович**, д.т.н., проф., зав. каф. «Электроснабжение промышленных предприятий», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: homutov.so@yandex.ru.

**Serebryakov Nikolay Aleksandrovich**, post-graduate student, Chair of Power Supply of Industrial Enterprises, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: na\_serebryakov@altke.ru.

**Khomutov Stanislav Olegovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Power Supply of Industrial Enterprises, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: homutov.so@yandex.ru.

### Введение

После проведения рыночной реформы в электроэнергетике проблема краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки (short term load forecasting – STLF) выходит на первый план. В настоящее время для покупки электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) гарантирующему поставщику электроэнергии (ГП) необходимо спрогнозировать собственное почасовое потребление электроэнергии на следующие сутки и подать ценовую заявку на «рынок

на сутки вперед» (PCB). Для того чтобы покупатели электроэнергии на ОРЭМ придерживались собственных прогнозов, покупка или продажа отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного происходят по невыгодной цене. Помимо негативных финансовых последствий для самих ГП, ошибки STLF приводят к необоснованным пускам и остановам генерирующего оборудования [1], которые оплачиваются конечными потребителями электроэнергии на розничном рынке электроэнергии. Сформулирован-

ное противоречие составляет суть актуальной научно-технической проблемы [2]. В связи с этим разработано большое количество моделей прогнозирования. Но ни одну из них нельзя назвать универсальной. Под каждую практическую задачу необходимо разрабатывать свою прогнозную модель [3].

Самым распространенным методом STLF в энергосбытовых компаниях и ГП является метод коллективных экспертных оценок. То есть прогноз является продуктом умственных усилий группы экспертов и опыта краткосрочного прогнозирования. Итоговый прогноз получается на основе некоторой комбинации мнений экспертов. В качестве меры согласованности мнений группы экспертов используется коэффициент конкордации Кендалла [4]. Но данный метод в следствие ряда причин не позволяет снизить ошибку STLF ниже определённого значения.

Большинство существующих статистических моделей не позволяют получать качественные STLF без хорошо подготовленной базы исходных данных [5]. Анализ факторного пространства временного ряда электрической нагрузки ГТП сельхозпроизводителя является важнейшим шагом к увеличению качества прогнозирования.

**Целью** исследований является оценка степени влияния случайных и условно детерминированных воздействий на временной ряд электрической нагрузки ГТП в краткосрочной перспективе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- классифицировать исходные данные для краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии;

- произвести оценку степени влияния аварийных и плановых отключений на сетевом оборудовании 6-220 кВ, а также графика работы крупных сельскохозяйственных товаропроизводителей на объемы потребления электроэнергии ГТП ГП второго уровня;

- выполнить поиск способов учёта недетерминированных факторов при краткосрочном прогнозировании.

**Классификация и анализ недетерминированных факторов, влияющих на временной ряд электрической нагрузки.** Типовой суточный график электрической нагрузки (СГЭН) отражает суточные ритмы жизни общества и характерен для многих энергосистем [5]. При прогнозировании СГЭН на следующие сутки появляется необходимость оперировать прогнозом метеорологи-

ческих условий, который имеет некоторую погрешность. Ошибки прогноза метеорологических условий вносят дополнительную неопределенность при прогнозировании электрической нагрузки «на сутки вперед». Необходимо анализировать информацию о погодных условиях из различных источников, а также вести собственную статистическую базу о фактическом потреблении электроэнергии ГТП для повышения достоверности исходных данных для STLF.

При STLF крупных объектов прогнозирования, таких как энергосистема региона РФ или ГТП ГП первого уровня, можно не учитывать отключения на объектах электросетевого хозяйства напряжением ниже 220 кВ. В то же время любое отключение сетевого оборудования подстанций, входящих в ГТП ГП второго уровня, приводит к тому, что электроэнергия не может быть доставлена сразу к нескольким точкам поставки. Данный факт в значительной мере сказывается на потреблении электроэнергии ГТП. В целях повышения качества прогнозирования почасовых объемов потребления электроэнергии необходимо учитывать все плановые работы на сетевом оборудовании компаний, обеспечивающих транспорт электрической энергии до конечного потребителя. Транспорт электрической энергии до конечных потребителей АО «Алтайкрайэнерго» обеспечивают:

- филиал ПАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Сибири» – на напряжении свыше 220кВ;

- филиал ПАО «МРСК Сибири – «Алтайэнерго» – на напряжении 35-110 кВ;

- АО «СК Алтайкрайэнерго» – на напряжении ниже 35 кВ.

Заявки на ремонт и техническое обслуживание сетевого оборудования предоставляются в виде оперативной информации о состоянии сетевого оборудования 6-220 кВ. В заявке указывается время отключения и включения сетевого оборудования, диспетчерское наименование отключаемых фидеров, а также доля нагрузки, запитанной по резерву. При этом далеко не всегда ремонтные работы, указанные в заявке, выполняются в полном объеме или доводятся до персонала гарантирующего поставщика. Данное обстоятельство создает дополнительную неопределенность при STLF.

Учёт заявок на ремонт электросетевого оборудования при STLF осуществляется путем уменьшения прогнозного объема потребления электроэнергии ГТП на величину потребления электроэнергии в отключаемых точках поставки:

$$P_h = P_{ph} - \sum_0^n P_{ih}, \quad (1)$$

где  $P_h$  – итоговый прогнозный объем потребления электроэнергии ГТП в час суток  $h$ ;

$P_{ph}$  – прогнозный объем потребления электроэнергии ГТП в час  $h$ ;

$n$  – количество отключаемых фидеров;

$P_{ih}$  – объем потребления электроэнергии по фидеру  $i$  в час суток  $h$ .

На рисунке 1 представлены СГЭН ГТП «Корчинская» при плановых работах на сетевом оборудовании подстанций «Романовская» и «Мамонтовская» 26.04.2017 г. В заявках на ремонтные работы указано время с 6:00 до 13:30 московского времени. Фактически работы продолжались с 6:30 до 14:00 ч московского времени. Прогнозный объем потребления электроэнергии в часы ремонтных работ определяется на основании выражения (1).

Как мы видим из рисунка 1, потребление электроэнергии ГТП «Корчинская» в часы ремонтных работ уменьшилось в среднем на 69,77%. После подачи напряжения электрическая нагрузка возросла, по сравнению с нагрузкой в аналогичные часы 25.04.2017 г., на 9,3% в первый час, 5,49% во второй и на 2,93% в третий час. Данный скачок потребления обусловлен включением оборудования промпредприятий после вынужденного простоя, а также массовым включением бытовых приборов. Для каждой точки поставки рост потребления электроэнергии после отключения се-

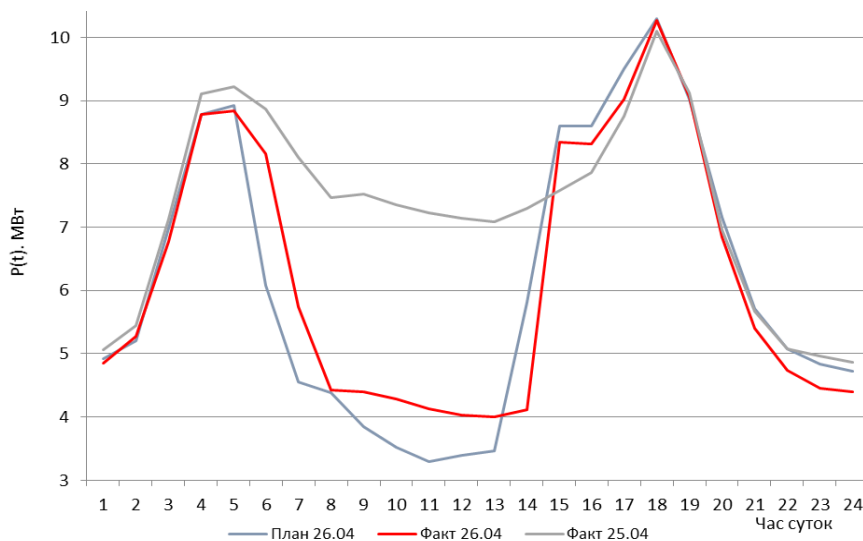
тевого оборудования индивидуален и определяется на основе статистики предыдущих отключений.

**Анализ влияния случайных факторов на временной ряд электрической нагрузки.** Прогноз потребления электроэнергии должен иметь «запас прочности», то есть точность прогнозирования должна быть несколько выше 95%. Это связано с тем, что случайный характер (размытость) данных о параметрах электрической нагрузки не позволяет быть уверенным в том, в любой момент не произойдет непредвиденная ситуация, такая как [7]:

- аварийное отключение на сетевом оборудовании;
- смена режима работа крупного сельхозпроизводителя или другого промпредприятия;
- отключение горячей или холодной воды.

На рисунке 2 представлен суточный график электрической нагрузки ГТП «Южная» при отключении холодной воды в г. Рубцовске.

При отключенном холодном водоснабжении в воскресенье 19.08.2018 г. в г. Рубцовске потребление электроэнергии снизилось в среднем на 13,4% по сравнению с 12.08.2018 г. при схожих метеорологических условиях. Данный факт объясняется отсутствием возможности у населения заниматься повседневными делами, отключением приводов насосных станций и т.д. После возобновления водоснабжения электрическая нагрузка возросла на 8,7%. Рост потребления электроэнергии связан с массовым включением бытовых приборов после простоя, поливом сельхозкультур.

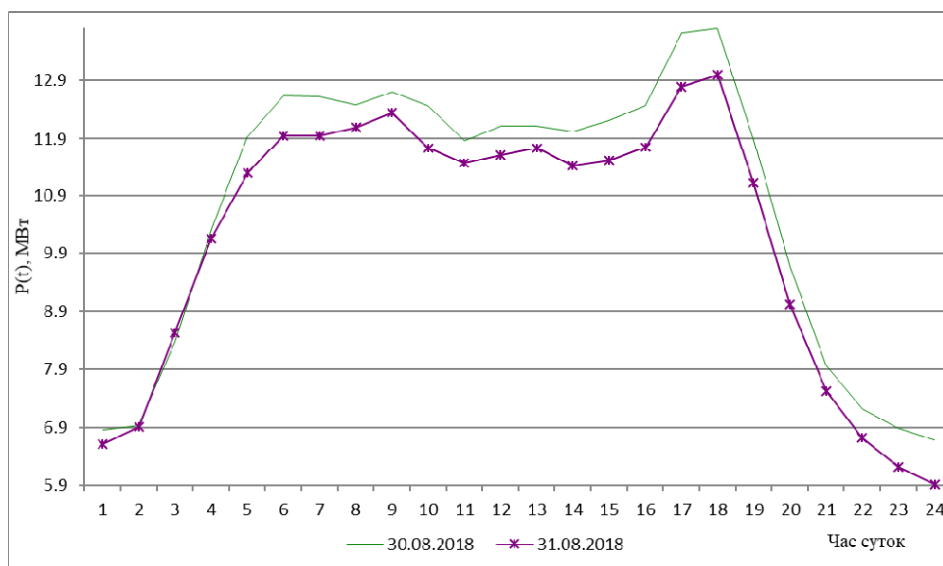


**Рис. 1. СГЭН ГТП «Корчинская» при плановых работах на сетевом оборудовании подстанций «Романовская» и «Мамонтовская» 26.04.2017 г.**





**Рис. 2. Суточный график электрической нагрузки ГТП «Южная» при отключении холодной воды в г. Рубцовске**



**Рис. 3. СГЭН ГТП «Власиха» при различных режимах работы ООО «Усть-Калманский элеватор»**

Режим работы крупных сельхозпроизводителей является важнейшим фактором при STLF ГТП ГП. Для повышения качества краткосрочного прогнозирования необходимо учитывать режим работы потребителей электроэнергии с присоединенной мощностью свыше 670 кВт. Изменения в режиме работы более мелких потребителей можно отнести к естественным колебаниям электрической нагрузки. На рисунке 3 представлены СГЭН ГТП «Власиха» при различных режимах работы ООО «Усть-Калманский элеватор».

Производственный цех элеватора работал до 4:00 ч московского времени 31.08.2018 г., после чего на предприятии началось техническое обслуживание оборудования. В связи с этим по-

требление электроэнергии ГТП «Власиха» в остальные часы суток снизилось на 650 кВт, или в среднем на 5,74%, по сравнению с потреблением 30.08.2018 г. при аналогичных уровнях воздействия других факторов. Как мы видим из рисунка 4, электрическая нагрузка данного сельхозпроизводителя соизмерима с нагрузкой всей ГТП «Власиха». Отсутствие информации о режиме работы данного крупного сельхозпроизводителя может дать относительную ошибку прогнозирования более 5%, без учета влияния других факторов.

### Вывод

Временной ряд почасового потребления электроэнергии ГТП гарантирующего поставщика вто-

рого уровня зависит от множества влияющих факторов. В данной работе исследовано влияние недетерминированных воздействий на поведение временного ряда. Было установлено, что факторы, которые являются несущественными при прогнозировании электрической нагрузки энергосистемы региона, в значительной степени влияют на электрическую нагрузку ГТП ГП второго уровня, включающих крупных сельхозпроизводителей. Для повышения качества прогнозирования потребления электроэнергии на следующие сутки необходимо учитывать недетерминированные факторы, такие как: отключения сетевого оборудования 6-110 кВ, режим работы потребителей с присоединенной мощностью 0,67-10 МВт, а также отсутствие водоснабжения в населенных пунктах, питающихся от данной ГТП. Учет данных факторов позволяет снизить неопределенность при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки, что, свою очередь, даст возможность снизить величину отклонений фактического потребления электроэнергии от прогнозного.

#### Библиографический список

1. Rajan, D.V., Mallik, S., Thakur, S.S. (2012). An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Vol. 1 (3): 1-9.
2. Багаев А.А., Бобровский С.О. Влияние поверхностного эффекта на величину тока в индукторе ТВЧ установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6. – С. 186-192.
3. Соколова Л.В., Беляев В.И. Модель прогнозирования урожайности яровой мягкой пшеницы в умеренно засушливой колочной степи алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 12. – С. 54-57.
4. Садов В.В. Экспертная оценка комбикормовых агрегатов на основе нечетких множеств // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 9. – С. 179-185.
5. Хлебников В.К., Воронина Е.В., Хлебникова М.В., Хлебникова Н.В. Прогнозирование потерь

электроэнергии в электрической сети // Изв. вузов. Электромеханика. – 2018. – № 6. – С. 61-67.

6. Гуртовцев А.Л., Забелло Е.П. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика // Новости электротехники. – 2008. – № 5 (53). – С. 18-23.

7. Лицкевич С.А., Лицкевич А.П. Многофакторная модель прогнозирования износа электрических аппаратов, работающих в условиях морских портов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2017. – № 6. – С. 15-20.

#### References

1. Rajan, D.V., Mallik, S., Thakur, S.S. (2012). An efficient approach for short-term load forecasting using historical data. *International Journal of Engineering Research & Technology*. Vol. 1 (3): 1-9.
2. Bagaev A.A., Bobrovskii S.O. Vliyanie poverkhnostnogo effekta na velichinu toka v induktore TVCh ustanovki // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 6. – S. 186-192.
3. Sokolova L.V., Belyaev V.I. Model prognozirovaniya urozhainosti yarovoi myagkoi pshenitsy v umerenno zasushlivoi kolochnoi stepi Altaiskogo kraia // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 12. – S. 54-57.
4. Sadov V.V. Ekspertnaya otsenka kombikormovykh agregatov na osnove nechetkikh mnozhestv // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 9. – S. 179-185.
5. Khlebnikov V.K. Prognozirovaniye poter elektroenergii v elektricheskoi seti / V.K. Khlebnikov, E.V. Voronina, M.V. Khlebnikova, N.V. Khlebnikova // Izv. vuzov. Elektromekhanika. – 2018. – No. 6. – S. 61-67.
6. Gurtovtsev A.L. Elektricheskaya nagruzka energosistemy. Vyravnivaniye grafika / A.L. Gurtovtsev, E.P. Zabello // Novosti elektrotekhniki. – 2008. – No. 5 (53). – S. 18-23.
7. Litskevich S.A. Mnogofaktornaya model prognozirovaniya iznosa elektricheskikh apparatov, rabotayushchikh v usloviyakh morskikh portov / S.A. Litskevich, A.P. Litskevich // Izv. vuzov. Elektromekhanika. – 2017. – No. 6. – S. 15-20.

