

**ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РЕЖИМ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ГРУППЫ ТОЧЕК ПОСТАВКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТОВАРОПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ****THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON ELECTRICITY CONSUMPTION  
OF DELIVERY POINT CLUSTER AGRICULTURAL PRODUCERS**

**Ключевые слова:** факторное пространство, потребление электроэнергии, краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки, группа точек поставки электроэнергии, временной ряд, гарантирующий поставщик, метеофакторы, суточный график электрической нагрузки, оптовый рынок электроэнергии и мощности, точность прогнозирования.

В условиях рынка электроэнергии и мощности проблема краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки выходит на первый план. В настоящее время создано огромное количество алгоритмов прогнозирования объемов потребления электроэнергии. Но ни один из них не может быть назван универсальным. Любой алгоритм краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки очень требователен к предварительной обработке статистических данных о поведении временного ряда. Важнейшей задачей при составлении прогноза на следующие сутки является отбор и кодировка основных факторов, влияющих на объемы покупки электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности гарантирующим поставщиком второго уровня. Освещены вопросы анализа степени влияния метеорологических условий на поведение временного ряда почасовой электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии (ГТП) сельскохозяйственных товаропроизводителей в краткосрочной перспективе. На примере гарантирующего поставщика электроэнергии «АО Алтайкрайэнерго» исследована взаимосвязь между почасовыми объемами потребления электроэнергии ГТП и температурой наружного воздуха, уровнем естественной освещенности, скоростью ветра и другими метеофакторами. Выполнен отсев второстепенных факторов, не оказывающих решающего воздействия на временной ряд электрической нагрузки ГТП в краткосрочной перспективе. Рассмотрены сезонные изменения степени влияния метеорологических факторов на режим потребления электроэнергии ГТП сельскохозяйственных потребителей. Предложено использовать дисперсию суточных значений температуры как меру инерционности изменений временного ряда потребления электроэнергии в связи с перепадами температуры наружного воздуха. Данная работа представ-

ляет интерес для специалистов энергосбытовых предприятий и гарантирующих поставщиков электроэнергии, занимающихся покупкой электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности, также исследователей в области обработки больших объемов данных и прогнозирования временных рядов.

**Keywords:** factor space, power consumption, short-term load forecast, delivery point cluster, time series, default provider, meteorological factor, daily load curve, wholesale electricity market, forecast precision.

Under the conditions of electricity and power market, the problem of short-term load forecasting comes to the fore. Currently a huge number of algorithms for predicting the volumes of electricity consumption have been created. But none of them can be called universal. Any algorithm for the short-term load forecasting is very demanding for the preliminary processing of statistical data. The important task in the preparation of the forecast for the next day is the selection and coding of the main factors which affect the volume of electricity purchases on the wholesale electricity market by default provider. This paper deals with the analysis of the degree of influence of meteorological conditions on the behavior of the time series of hourly electrical load of delivery point cluster agricultural producers in short-term. In terms of the default provider AO Altaykrayenergo, the relationship between the hourly volumes of electricity consumption and the outdoor temperature, the level of natural light, wind speed and other meteorological factors were investigated. The secondary factors which do not affect the time series of delivery point cluster electrical load in the short term have been separated. The seasonal changes of meteorological factors which influence on the mode of electricity consumption of delivery point cluster agricultural consumers are considered. It is proposed to use the dispersion of daily temperature as the inertia degree of changes of power consumption time series due to depending of the outdoor temperature. This paper is interesting for specialists of energy-retail enterprises and default provider who buy electricity on the wholesale electricity market as well as researchers of large data amount and forecasting time series.

**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.

**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.

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

### Введение

Временной ряд электрической нагрузки группы точек поставки электроэнергии (ГТП) является сложной зависимостью. Для прогнозирования данного временного ряда с высокой точностью необходимо учитывать влияние многих факторов. В большей степени поведение временного ряда потребления электроэнергии ГТП сельхозпроизводителей обусловлено сезонными и циклическими изменениями в течение года, недели, суток. Помимо временных факторов, погодные условия являются наиболее влиятельными экзогенными переменными, особенно при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки (short term load forecasting – STLF) [1].

Первым и важнейшим этапом STLF с помощью любого алгоритма является предварительная обработка статистических данных. Необходимо решить задачу выбора и оценки степени влияния на временной ряд каждого из факторов, с соответствующей статистической оценкой погрешности [2]. После определения оптимальной размерности факторного пространства можно переходить к непосредственному выбору прогнозной модели.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие таких областей информационных технологий, как искусственный интеллект, системы обработки больших объемов данных (Big Data) и глубокое машинное обучение. Рассмотренные информационные технологии являются высокоэффективным инструментом для решения широкого перечня задач, которые относятся к слабоформализуемым или неформализуемым [3]. Данные алгоритмы очень требовательны к качеству выборки статистических данных. Наличие в обучающей выборке закоррелированных факторов или шума резко ухудшает качество прогноза, полученного с помощью данных методов.

STLF ГТП сельхозтоваропроизводителей на следующие сутки связано с рядом трудностей:

- наличие ярко выраженных сезонных изменений;
- сильное зашумление временного ряда вследствие частых отключений на сетевом оборудовании 0,4-35 кВ, находящихся в сельской местности;
- резко нелинейная зависимость электрической нагрузки от температуры наружного воздуха и освещенности.

Наличие неопределенности и неоднородности предполагает при решении задачи STLF применение методов прикладной статистики [4].

**Целью** работы является анализ степени влияния метеофакторов на временной ряд электрической нагрузки ГТП гарантирующего поставщика второго уровня, включающих сельскохозяйственных потребителей электроэнергии.

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

- оценить степень влияния метеорологических факторов на поведение временного ряда потребления электроэнергии в краткосрочной перспективе;
- объединить несколько закоррелированных факторов в один для уменьшения размерности факторного пространства;
- определить способ учёта инерционности в процессе изменения объемов потребления электроэнергии ГТП в связи с перепадами температуры.

**Влияние температуры наружного воздуха на потребление электроэнергии.** В исследованиях [6, 7] доказано, что между временными рядами электрической нагрузки и температуры наружного воздуха существует сильная корреляционная связь. Для ГТП «Южная», входящей в состав АО «Алтайкрайэнерго», коэффициент корреляции между данными функциональными зависимостями:

$$r = \frac{\sum (T_i - \bar{T})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T})^2 \sum (E_i - \bar{E})^2}} = -0,94346, \quad (1)$$

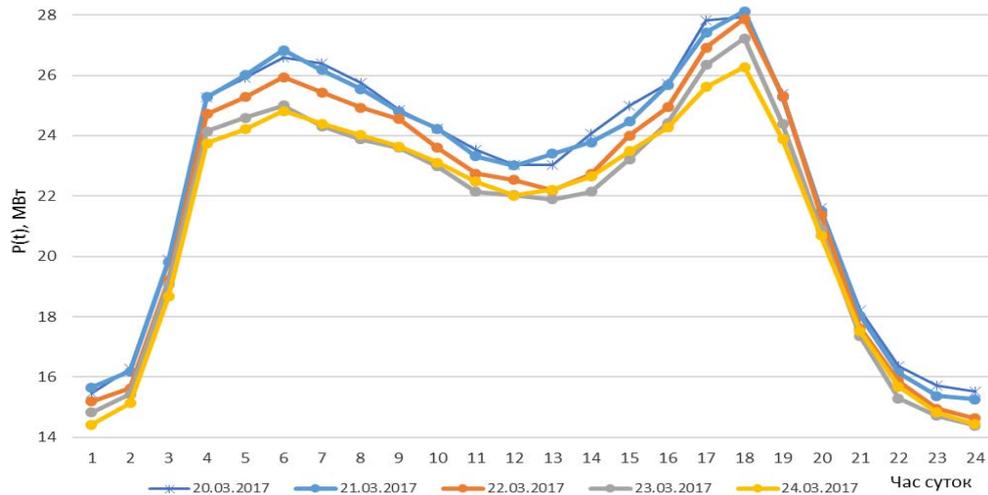
где  $T_i$  – среднесуточная температура наружного воздуха в городе Рубцовске в сутки  $i$ ;

$E_i$  – суточное потребление электроэнергии ГТП «Южная» в сутки  $i$ ;

$\bar{T}$ ,  $\bar{E}$  – выборочные средние.

Так как  $r < -0,8$ , любое изменение температуры наружного воздуха вызывает изменение электрической нагрузки ГТП. Данный факт является подтверждением теоретических предпосылок [5].

На рисунке 1 представлены суточные графики электрической нагрузки (СГЭН) ГТП «Кулундинская» с 20.03.2017 по 24.03.2017 г. при резком изменении температурного режима.



**Рис. 1. Суточные графики потребления электроэнергии ГТП «Кулундинская» с 20.03.2017 г. по 24.03.2017 г. при резком изменении температурного режима**

Потребители ГТП «Кулундинская» находятся в г. Славгороде. Для объективности, влияние других факторов на временной ряд в период с 20.03.2017 по 24.03.2017 г. было неизменным. Среднесуточная температура в понедельник 20.03.2017 г. составляла минус 13,3°С, при стабильном температурном режиме в предыдущие несколько суток. Во вторник 21.03.2017 г. началось потепление, которое продолжалось до 24.03.2017 г. Как мы видим из СГЭН рисунка 1, почасовая электрическая нагрузка ГТП в значительной степени зависит от температуры наружного воздуха. На рисунке 2 представлен график изменения температурного режима в городе Славгороде в период с 20.03.2017 по 24.03.2017 г.

На основании рисунков 1 и 2 можно сделать вывод, что процесс изменения потребления электроэнергии в связи с изменением температуры имеет некоторую инерционность, то есть изменения электрической нагрузки ГТП запаздывают по отношению к изменениям температурного режима. Благодаря этому свойству, временной ряд

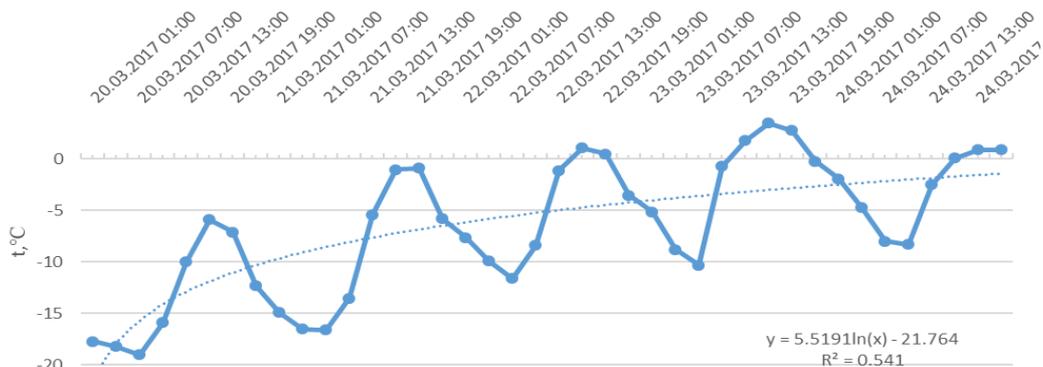
потребления электроэнергии не реагирует на кратковременные перепады температуры. Только значительные изменения температуры воздуха влияют на почасовые объемы потребления электроэнергии ГТП. Данный факт объясняет тем, что изменение температуры в зданиях и сооружениях, которая обуславливает режим работы климатического оборудования, запаздывает по отношению к изменениям температуры наружного воздуха.

Из вышеизложенного следует, что при STLF целесообразно учитывать инерционность изменения электрической нагрузки как дополнительный фактор, при помощи дисперсии выборки из 24 предыдущих значений температуры:

$$D = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (t_i - \bar{t})^2, \quad (2)$$

где  $D$  – дисперсия выборки из 24 последних значений временного ряда температуры наружного воздуха;

$t_i$  – температура наружного воздуха в час  $i$ ;



**Рис. 2. График изменения температурного режима в городе Славгороде в период с 20.03.2017 г. по 24.03.2017 г.**

$\bar{t}$  – выборочное среднее из 24 значений температуры наружного воздуха, предшествующих часу  $i$ .

Данный фактор учитывает величину и длительность перепада температуры. Если перепады температуры носят кратковременный характер, то рост дисперсии будет незначительным. В то же время рост дисперсии выражения (2) будет сигнализировать о том, что произошли значительные изменения температуры наружного воздуха.

Величина инерционности напрямую связана с наличием центрального отопления. При отключенном центральном отоплении потребители сильнее реагируют на изменение температуры. Следовательно, фактор наличия центрального отопления необходимо учитывать в процессе краткосрочного прогнозирования. Это особенно важно при STLF ГТП, включающих население и сельхозпотребителей, так как данные группы потребителей сильнее других реагируют на изменения температурного режима.

**Влияние освещенности на потребление электроэнергии.** Естественная освещенность, которая зависит от состояния неба, в значительной степени влияет на энергопотребление ГТП в светлое время суток. Облака разных ярусов в различной степени влияют на естественную освещенность. Значительное снижение освещенности наблюдается только при наличии дождевых облаков. На рисунке 3 представлены СГЭН ГТП «Власиха» при наличии и отсутствии дождевых облаков.

В состав потребителей электроэнергии ГТП «Власиха» в основном входят население и сельхозпроизводители, которые наиболее чувствительны к изменениям освещенности и наличию осадков. 18.04.2017 г. в светлое время суток наблюдался ливневый дождь, 19.04.2017 г. – незначительная облачность. Почасовая электрическая нагрузка ГТП в светлое время суток 18.04.2017 г. была выше в среднем на 10,55% в аналогичные часы 19.04.2017 г. Увеличение потребления электроэнергии в связи со снижением естественной освещенности наблюдается в весеннее, осеннее и зимнее время года. Однако в летнее время года, особенно в период экстремально высоких температур, наблюдается обратная ситуация. На рисунке 4 представлены СГЭН

ГТП «Власиха» в период экстремально высоких температур.

Среднесуточная температура воздуха 12.07.2018 г. и 13.07.2018 г. составляла 24°C. 12.07.2018 г. была ясная, безоблачная погода. 13.07.2018 г. наблюдалась сильная облачность и ливневый дождь. Из СГЭН на рисунке 4 видно, что почасовое потребление электроэнергии в светлое время суток 13.07.2018 г. снизилось на 2,7% по сравнению с потреблением 12.07.2018 г. при неизменном потреблении в темное время суток.

На основании вышеизложенного для ГТП, включающих население и сельхозпроизводителей, целесообразно использовать фактор наличия осадков (более 2 мм за 6 ч). Данный фактор позволяет учитывать увеличение электрической нагрузки при наличии дождевых облаков весной, осенью и зимой, а также уменьшение электрической нагрузки в летнее время вследствие отключения части климатического оборудования, невыхода сельхозтехники в поле, а также отсутствия необходимости полива сельскохозяйственных культур при наличии достаточного количества осадков.

**Влияние скорости ветра на потребление электроэнергии.** Важнейшим фактором, влияющим на потребление электроэнергии, является скорость ветра. Наиболее эффективно учитывать ветровую нагрузку в процессе STLF при помощи введения ветро-холодового индекса ( $WCT$ ) – способа измерения жесткости воздействия климатических условий. Ветро-холодовой индекс рассчитывается при помощи следующей эмпирической формулы:

$$WCT = 33 + (0,478 + 0,237\sqrt{v_B} - 0,0124v_B) \cdot (T - 33), \quad (3)$$

где  $WCT$  – ветро-холодовой индекс;

$v_B$  – скорость ветра, м/с;

$T$  – температура наружного воздуха, °C.

Ветро-холодовой индекс позволяет учесть сразу два метеорологических фактора при STLF, что дает возможность уменьшить размерность факторного пространства. Уменьшение размерности факторного пространства очень важно при использовании адаптивных алгоритмов аппроксимации и регрессии [6].

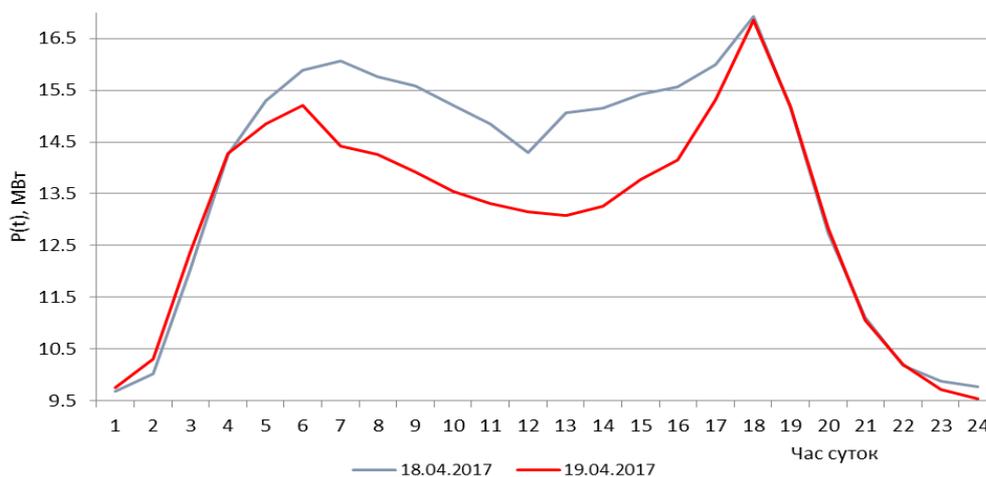


Рис. 3. СГЭН ГТП «Власиха» при наличии и отсутствии дождевых облаков

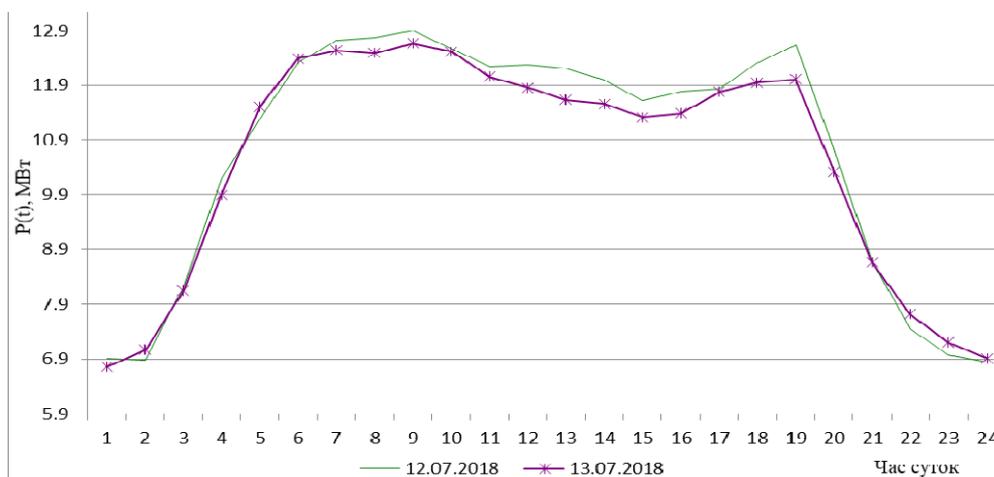


Рис. 4. СГЭН ГТП «Власиха» в период экстремально высоких температур

### Заключение

В ходе данного исследования было определено, что группа метеорологических факторов, наравне с внутренними циклическими изменениями, определяет поведение временного ряда почасовых объемов потребления электроэнергии ГТП в краткосрочной перспективе. Выявлено, что для ГТП населения и сельскохозяйственных потребителей при формировании STLF целесообразно использовать следующие факторы:

- ветро-холодовой индекс, который учитывает температуру наружного воздуха и скорость ветра;
- выборочную дисперсию температур и факт наличия центрального отопления, которые учитывают инерционность изменения электрической нагрузки ГТП в связи с перепадами температуры;
- факт наличия осадков, который учитывает увеличение потребления электроэнергии в зимнее, весеннее и осеннее время года и уменьшение потребления в период экстремально высоких температур при снижении естественной освещенности.

В ходе работы не удалось установить однозначного влияния на временной ряд потребления электроэнергии ГТП других метеорологических факторов. В работе [4] предлагается учитывать одновременно температуру наружного воздуха и влажность с помощью индекса температуры и влажности. Целесообразность использования данного индекса необходимо определить в ходе дополнительных исследований.

### 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. основные положения методики косвенного измерения тока в индукторе ТВЧ-установки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5. – С. 171-178.
3. Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интел-

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 kosvennoy 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-reguliruemyi 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.