

ПОИСК ОДНОТИПНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ЭНЕРГООБЪЕКТА

А.С. Тавлицев, А.А. Суворов, Е.Д. Стаймова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*

Одной из важнейших потребностей при планировании и анализе режимов работы энергосистемы является прогнозирование величин и графиков нагрузок. В настоящей статье предложен алгоритм поиска однотипных графиков нагрузки на основе методов интеллектуального анализа данных. В качестве исходных данных служат усреднённые получасовые графики потребления активной и реактивной мощности. Предлагаемый алгоритм в первую очередь нацелен на предварительную обработку и группировку данных измерений при решении задачи идентификации статических характеристик нагрузки по напряжению, но также возможно выполнение исследований в области поиска типовых графиков нагрузки для выполнения проектных и перспективных расчётов. Результатом обработки данных будет массив меток принадлежности суточного графика к той или иной группе. В основе предлагаемого алгоритма лежит метод k -средних. Алгоритм апробирован на реальных данных, собранных с подстанции, питающей сборочный завод. В том случае, если в качестве исходных данных служит выборка графиков нагрузки за несколько лет, то можно поставить задачу прогнозирования конфигурации графика нагрузки. Исходными данными для решения этой задачи будет служить упорядоченный во времени массив меток принадлежности суточного графика нагрузки к тому или иному типу.

Ключевые слова: статическая характеристика нагрузки, суточный график нагрузки энергосистемы, статистически равновесное состояние нагрузки, комплексная электрическая нагрузка.

Введение

В рамках текущего оперативного управления режимом работы Единой энергосистемы в диспетчерских центрах Системного оператора имеются большие ретроспективные массивы данных с полчасовой дискретностью по всем крупным подстанциям и потребителям, а также есть массивы данных с секундной дискретностью за последние несколько недель. Эти секундные данные потенциально содержат в себе информацию о регулирующем эффекте нагрузки.

Существуют два основных подхода к оценке регулирующего эффекта нагрузки: измерительный, на основе данных измерений, и компонентный, на основе данных численного моделирования [1–9].

Измерительный подход для идентификации математической модели нагрузки, а также регулирующего эффекта, предполагает определение параметров и вида модели на основе обработки непосредственно измеренных значений мощности нагрузки. При этом возможно проведение как активного эксперимента (с принудительным изменением уровня питающего напряжения), так и пассивного эксперимента (наблюдение за текущими параметрами режима).

В основе компонентного подхода лежит численное моделирование режимов работы комплексного узла нагрузки, с учётом представления небольших нагрузок их реальными математическими моделями. Пассивный измерительный подход позволяет избежать дорогостоящих системных испытаний, а также трудоёмкого моделирования узлов

нагрузки. Однако точность такого подхода во многом зависит от временной дискретности и погрешности измерительных комплексов. Важно отметить две основные проблемы при обработке данных пассивных измерений: во-первых, это небольшая амплитуда колебаний питающего напряжения, а во-вторых, постоянное изменение состава и режима работы единичных электроприёмников. Последнее также характерно и в случае проведения активных экспериментов в энергосистеме.

Для извлечения из массивов данных измерений информации о виде и параметрах математической модели нагрузки необходимо выявить статистически равновесные состояния исследуемого объекта [10]. Этапы поиска статистически равновесных состояний нагрузки можно разделить на три этапа, как показано в таблице. В настоящей статье далее рассматривается алгоритм поиска однотипных суточных графиков нагрузки.

Обработка экспериментальных данных для однотипных графиков нагрузки может позволить решить проблему поиска интервалов времени, когда включенный состав и режимы работы единичных электроприёмников близки. Это позволяет увеличивать выборку данных измерений за счёт объединения информации для однотипных суточных графиков нагрузки. В результате появляется возможность создания алгоритмов автоматизированной оценки параметров математической модели нагрузки и величины регулирующего эффекта.

Этапы поиска статистически равновесных состояний нагрузки

Первый этап	Второй этап			Третий этап
Узел нагрузки	Сезон	День недели	Час или полчаса	Статистически равновесные состояния
Нагрузка 1; Нагрузка 2; ...;	Весна; Лето; Осень; Зима	Понедельник; Вторник; Среда; ...; Воскресенье	Интервал 1; Интервал 2; ...; Интервал M	Состояние 1; Состояние 2; ...; Состояние Y

**Актуальность и научная
значимость вопроса**

Выявление однотипных графиков нагрузки позволяет сформировать подход к решению нескольких задач, например: формирование статистической выборки данных измерений комплексной нагрузки для одного и того же включённого состава единичных электроприёмников или подбор оптимального тарифного плана покупки электроэнергии у электроснабжающей компании. Разработка соответствующих методов идентификации статистических характеристик нагрузки по данным телеизмерений обеспечивает возможность не только идентификации математической модели нагрузки, но и прогнозирования вида и параметров модели в будущем.

Типы подобия временных рядов

В качестве исходных данных для поиска «похожих» суточных графиков нагрузки приняты временные ряды усредненных на небольших интервалах времени внутри суток значений активной и реактивной мощности.

В зависимости от целей поиска однотипных графиков нагрузки, возможно выделить несколько типов подобия временных рядов похожих:

- 1) во времени;
- 2) по форме;
- 3) по структуре.

В первом случае ведется поиск временных рядов, в которых особые точки, а также интервалы убывания и возрастания, близки или точно соответствуют друг другу. Тогда близкие временные ряды будут отражать не только характерные особенности суточного цикла потребления, но и содержать в себе информацию о включенном составе электроприёмников и их загрузке в технологическом цикле, а также действиях регулирующей автоматики и персонала по изменению параметров электрического режима. Именно такой тип подобия будет рассмотрен далее.

Во втором случае интерес для анализа представляет именно поиск однотипных форм графиков нагрузки. Основное отличие от предыдущего случая заключается в необходимости нормирования суточных данных измерений, что позволяет отстроиться от конкретных численных значений. Этот тип подобия будет характерен для решения

задач прогнозирования электропотребления и выявления типовых графиков электропотребления.

В третьем случае выполняется поиск последовательностей с одинаковыми законами изменения, как глобальными (периодичность повторения), так и локальными. Этот случай будет характерен для задач анализа изменчивости суточных графиков нагрузки в разрезе нескольких лет.

Представление данных

Один из лучших способов кластеризации временных рядов – это кластеризация их не как временных рядов, а без учёта временной взаимосвязи между измерениями. Специфика рассматриваемой задачи и набор исходных данных в целом позволяют применить такой способ.

Пусть

$$P_j = \{p_1, p_2, \dots, p_T\} \text{ и } Q_j = \{q_1, q_2, \dots, q_T\},$$

$j \in N$ – суточные временные ряды активной и реактивной мощности, содержащие T отсчётов по времени; N – количество суточных графиков нагрузки для кластеризации. Значения временных рядов в каждый момент времени есть одномерные вещественные переменные p_i и q_i , $i \in T$. Для удобства описания и выполнения расчетов можно объединить суточные временные ряды активной и реактивной мощности:

$$D_j = P_j \cup Q_j = \{p_1, p_2, \dots, p_T, q_1, q_2, \dots, q_T\}.$$

Тогда $F(D_j, D_k)$, при $j \neq k$ и $k, j \in N$ есть некоторая функция, измеряющая насколько D_j отличается от D_k . В общем случае эта функция может не отвечать математическому определению метрики, например, при использовании алгоритма минимальной прыжковой стоимости [10].

**Алгоритм оценки подобия
суточных графиков**

Представим каждый временной ряд как некоторую точку в $2N$ -мерном пространстве, тогда в качестве алгоритма оценки подобия рядов D_j можно принять один из стандартных алгоритмов кластеризации данных, например, k -means [11, 12]. Алгоритм основан на минимизации суммарного расстояния V от точек кластеров до центра кластера:

$$V = \sum_{cl=0}^C \sum_{ind=0}^{K_{cl}} F(D_{ind}, D_{S_{cl}}) \rightarrow \min,$$

где C – число кластеров; K_{cl} – число точек отнесенных к кластеру с номером cl ; $D_{S_{cl}}$ – центр кластера cl , соответствует среднему графику нагрузки для данного кластера.

В качестве функции $F(D_j, D_k)$ оценки отличия между суточными графиками нагрузки используется Евклидово расстояние:

$$F(D_j, D_k) = \sqrt{\sum_i^T (p_{i,j} - p_{i,k})^2 + \sum_i^T (q_{i,j} - q_{i,k})^2}.$$

Одним из основных недостатков данного алгоритма является необходимость предварительной оценки числа кластеров и выбора начальных размещений кластеров.

Для решения первой проблемы выполнена серия расчётов с различным числом кластеров, и к дальнейшему рассмотрению принят тот случай, для которого изменение суммарного расстояния L от точек до центров своих кластеров ниже некоторого порогового значения ΔL :

$$\frac{L_s - L_{s-1}}{L_{s-1}} < \Delta L [\%],$$

где L_s – суммарное расстояние от точки до центра своего кластера при числе кластеров $s \in C$; $\Delta L [\%]$ – пороговое значение изменения суммарного рас-

стояния при увеличении числа кластеров (принято значение ΔL , равное 5 %).

Алгоритм выбора начальных приближений может быть основан на следующих идеях: выбор случайных точек данных в качестве начальных приближений или использование некоторого алгоритма выбора начальных приближений, например, *k-means++* [13]. Далее рассмотрены оба случая.

Практическая апробация алгоритма

В качестве объекта исследования для поиска типовых суточных графиков электропотребления принята подстанция 110 кВ, питающая промышленную нагрузку (сборочный конвейер в машиностроительной отрасли) с небольшой долей коммунально-бытовой и офисной нагрузки. Суточные графики средней мощности на получасовом интервале представлены на рис. 1 и 2. На рисунках «бледными» линиями показаны суточные графики нагрузки, а ярким цветом – усредненный суточный график нагрузки для каждого месяца. На рис. 2 видна особенность данного комплексного узла нагрузки, которая заключается в том, что для одного и того же дня недели существует несколько характерных графиков электропотребления. В пер-

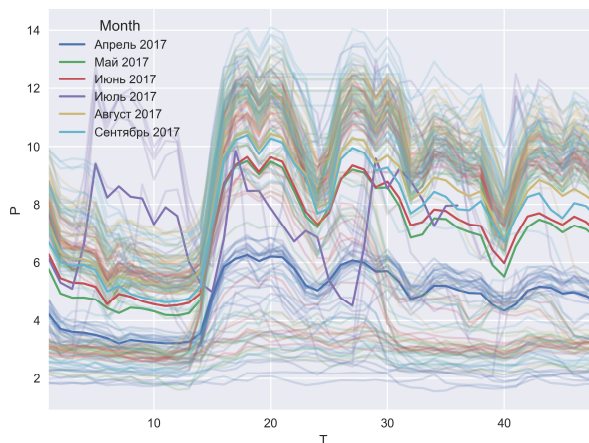
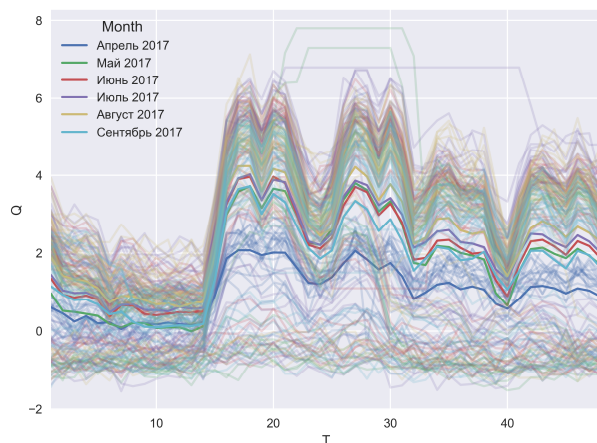


Рис. 1. Данные измерений за 6 месяцев

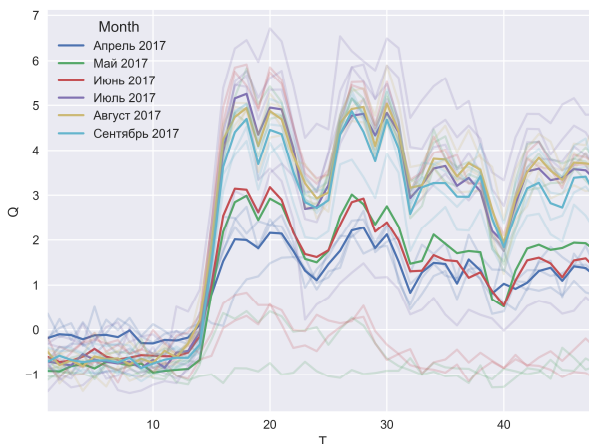
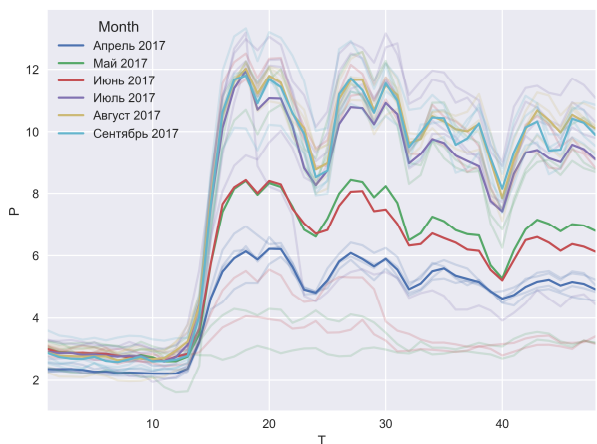


Рис. 2. Данные измерений за 6 месяцев, по понедельникам

вую очередь именно этот факт обуславливает необходимость автоматической группировки графиков электропотребления по типам.

Для визуализации полученного множества точек D_j в пространстве размерностью $2N$ в двух измерениях можно воспользоваться алгоритмом t -SNE (t -distributed Stochastic Neighbor Embedding), предложенным Д. Хинтоном в работе [14]. Основная идея алгоритма заключается в поиске такого отображения многомерного пространства в двумерное, чтобы расположенные далеко друг от друга точки были на плоскости удалёнными, а близко расположенные также отобразились бы как близкие. Результаты расчётов представлены на рис. 3.

На рис. 3, б видно, что при уменьшении количества суточных графиков нагрузки «исчезает» их явная группировка. Это обусловлено особенностью обработки данных алгоритмом t -SNE. Увеличение объема выборки позволяет нивелировать эту проблему.

Предварительно требуется определить следующие расчётные условия:

1. Необходимое число запусков алгоритма с

одним и тем количеством кластеров и алгоритмом выбора начальных приближений, чтобы достичь наилучшего разбиения выборки на кластеры.

2. Оптимальное количество кластеров в выборке, в соответствии с приятным значением ΔL .

Поиск оптимальных расчётных условий выполнялся для комбинации следующих алгоритмов кластеризации: классический k -means и алгоритм $minibatch$ k -means. Особенностью алгоритма $minibatch$ k -means является то, что исходный набор данных на каждом расчётном шаге представлен меньшим случайно выбранным подмножеством данных. В качестве алгоритмов выбора начальных приближений размещения кластеров рассмотрены следующие два: случайное размещение кластеров и алгоритм k -means++. Результаты расчётов представлены на рис. 4. На рис. 4, а вертикальная линия на графике описывает стандартное отклонение суммарного квадрата расстояний от точки до центра своего кластера по результатам серии расчётов. График описывает средний суммарный квадрат расстояний. Для дальнейшего расчёта выбраны следующие расчётные условия: 6 кластеров;

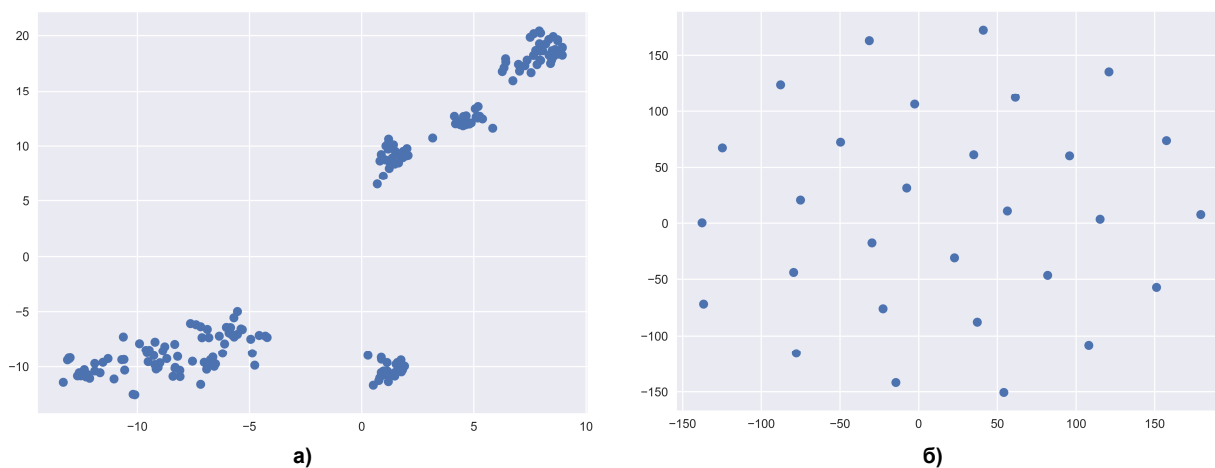


Рис. 3. Представление точек на основе алгоритма t -SNE, соответствующих графикам нагрузки: а – полная выборка; б – за один месяц

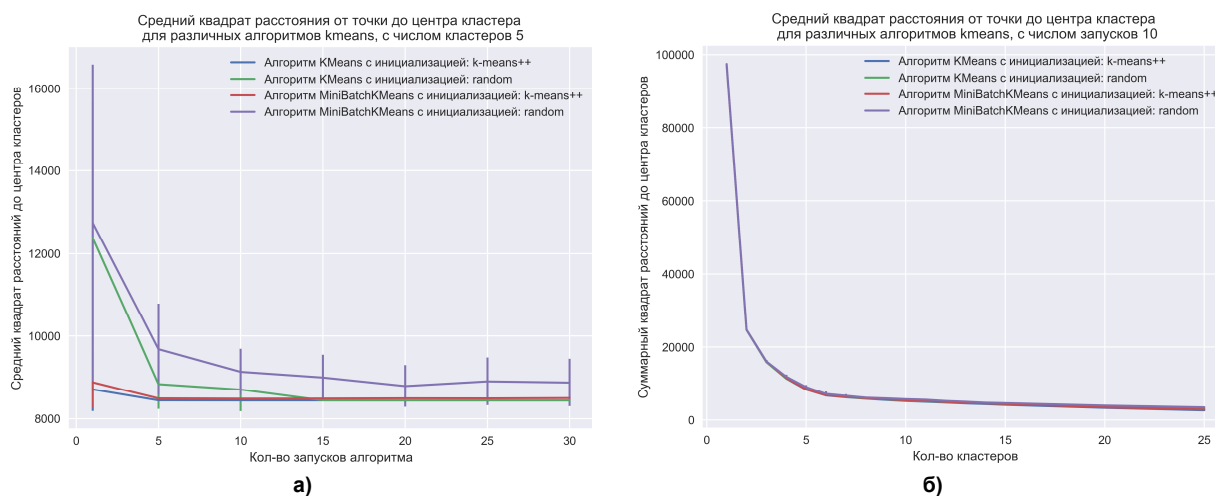


Рис. 4. Суммарный квадрат расстояний от точек до центров кластеров при различных условиях расчётов

20 запусков алгоритма кластеризации; алгоритм *k-means*, так как кластеризация по полной выборке занимает приемлемое количество времени (несколько секунд).

Результаты расчётов представлены на рис. 5–7. Видно, что результаты апробации алгоритма подтверждают возможность осуществления группировки суточных графиков нагрузки.

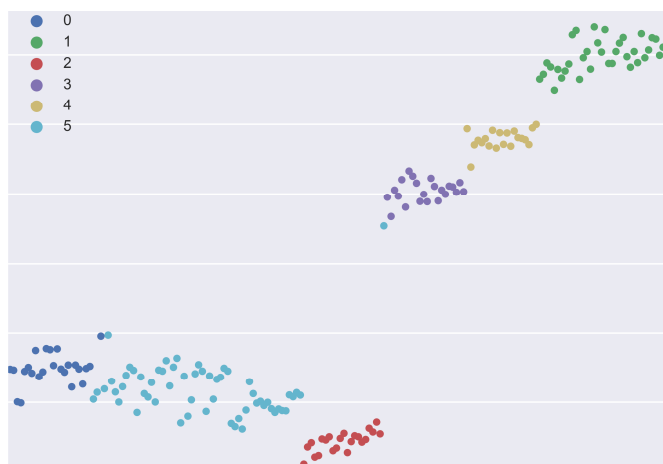


Рис. 5. *t-SNE* представление результатов кластеризации графиков нагрузки

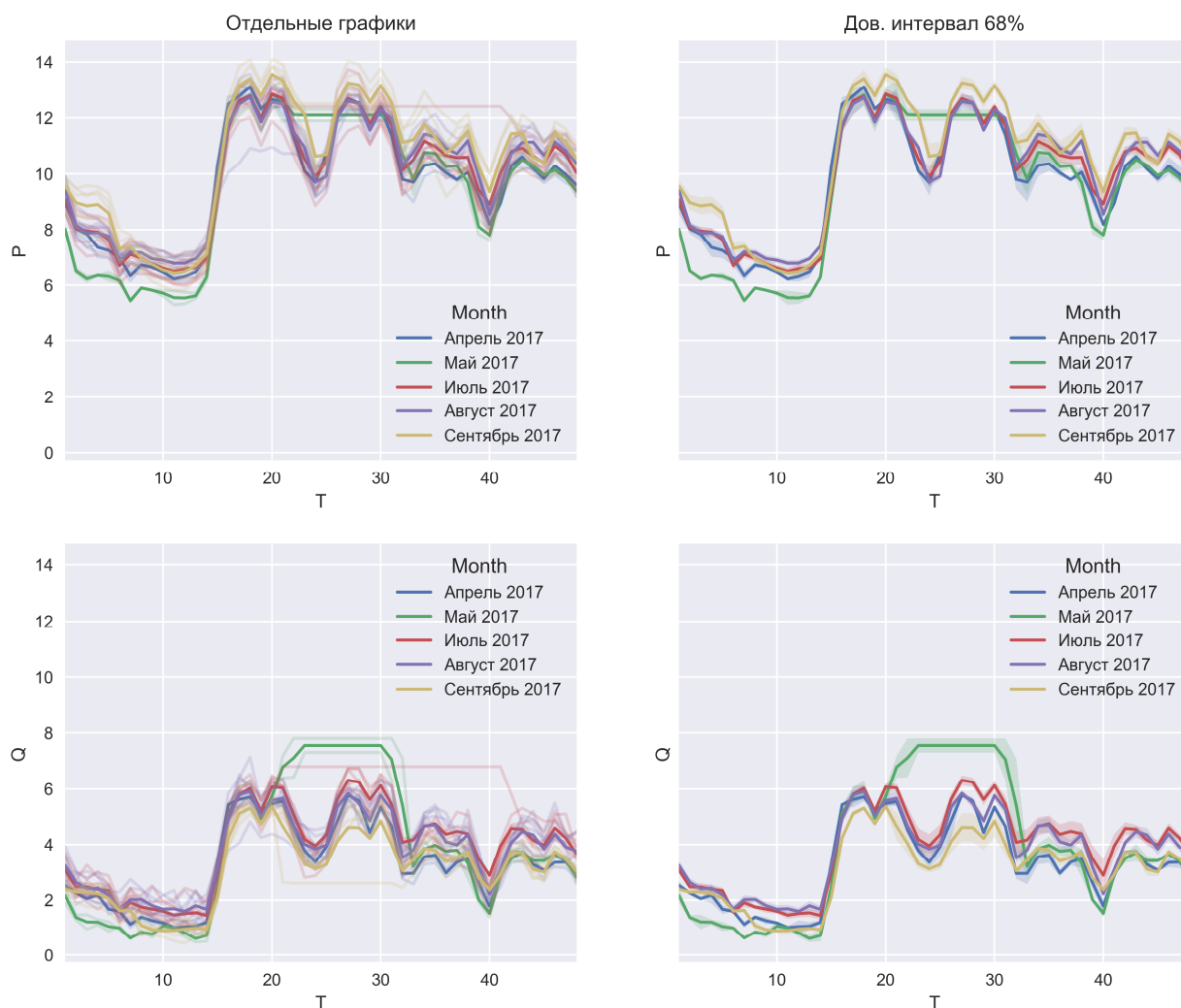


Рис. 6. Первая найденная группа графиков нагрузки с разбивкой по месяцам

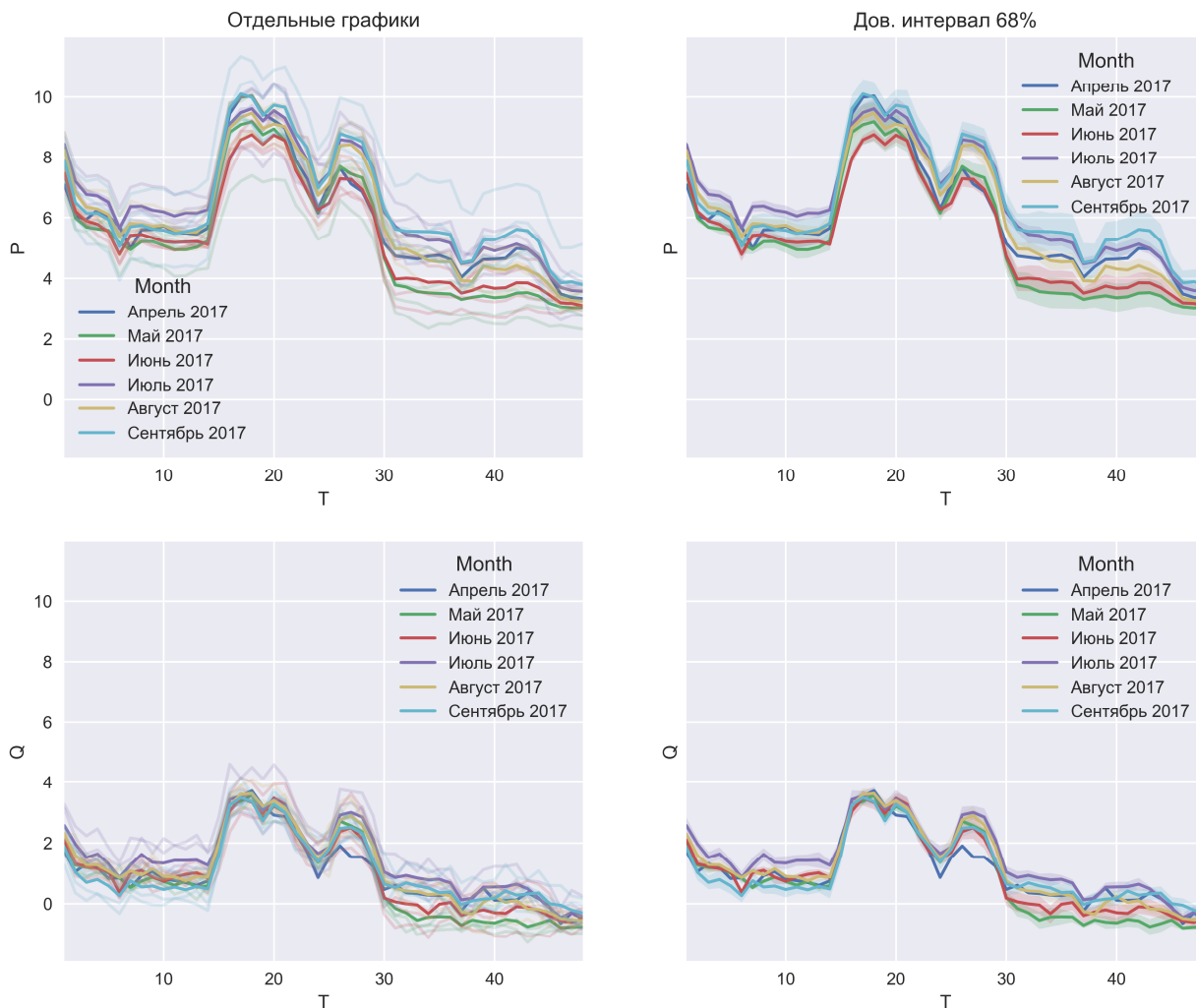


Рис. 7. Вторая найденная группа графиков нагрузки с разбивкой по месяцам

Заключение

В статье представлен алгоритм выявления однотипных графиков нагрузки с использованием статистических алгоритмов анализа данных. Эту идею можно использовать для автоматизированной оценки типовых графиков нагрузки по данным массивов телеизмерений. Данный подход позволяет оценить интервалы времени с близким включенным составом единичных электроприёмников и их уровнем загрузки в технологическом процессе в составе комплексного узла нагрузки.

В том случае, если важно оценить только форму графика нагрузки, без учёта конкретных значений активной и реактивной мощности, усреднённые значения суточного электропотребления можно представить в относительных единицах, где за коэффициент нормировки принято максимальное значение мощности в сутках.

Дальнейшее направление развития данной идеи классификации графиков нагрузки нацелено на настройку и апробацию алгоритма ЕМ-алгоритма разделения смеси распределений (в частности смеси гауссовых распределений).

Литература

1. W.G. C4.605. *Modeling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*. – 2014.
2. Панкратов, А.В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11–20. DOI: 10.14529/power150102
3. Экспериментальные исследования и получение статических характеристик нагрузки по напряжению узла электрической сети с комплексной нагрузкой / О.А. Бушуева, А.И. Кулешиов, А.Ю. Мурзин и др. // *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф.* – 2015. – С. 163–166.
4. Бердин, А.С. Определение результирующих характеристик нагрузки энергорайонов для выполнения расчетов электромеханических переходных процессов / А.С. Бердин, Д.И. Ближнюк, И.Б. Романов // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. – 2016. – № 1 (74). – С. 35–41.

5. Кондрашов, М.А. Применение кластерного анализа в задаче идентификации статических характеристик нагрузки / М.А. Кондрашов, А.Ю. Смирнова // Интеллектуальные энергосистемы: материалы V Международного молодежного форума. – Нац. исслед. Томский политехн. ун-т. – 2017. – С. 79–83.
6. Липский, А.М. Экспериментальное определение статических характеристик узлов нагрузок электрических систем / А.М. Липский, И.М. Аронович // Естественные и технические науки. – 2009. – № 3 (41). – С. 410–415.
7. Pankratov, A. Using static polynomial load models in “rastrwin” software package for power system studies / A. Pankratov, M. Kondrashov, S. Paul // MATEC Web of Conferences. Ser. “Smart Grids 2015”. – 2015. – P. 01039. DOI: 10.1051/mateconf/20153701039
8. Кондрашов, М.А. Кластеризация данных при идентификации статических характеристик нагрузки методом пассивного эксперимента / М.А. Кондрашов, А.В. Панкратов // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017». – Самара, 2017. – С. 275–278.
9. Drimirtiev, S.A. Complex Load Bus Static Load Characteristics Determination Using Passive Experiment Method / S.A. Drimirtiev, S.I. Semenenko, A.A. Suvorov // The seventeenth international scientific technical conference “Alternating current electric drive” – ACED 2018, Yekaterinburg, Russia, 26–30 March, 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341711
10. Тавлинцев, А.С. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 23–28. DOI: 10.14529/power170203
11. Serria, J. A Competitive Measure to Assess the Similarity Between Two Time Series / J. Serria, J.L. Arcos // Case-Based Reasoning Research and Development. – 2012. – P. 414–427. DOI: 10.1007/978-3-642-32986-9_31
12. Bishop, C. Pattern Recognition and Machine Learning / C. Bishop. – New York: Springer-Verlag. – 2006.
13. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multi variate observations / J. MacQueen // Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability. – 1967. – P. 281–297.
14. Laurens van der Maaten. Visualizing Data using t-SNE / Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton // Journal of Machine Learning Research. – 2008. – No. 9. – P. 2579–2605.

Тавлинцев Александр Сергеевич, магистр техники и технологии, старший преподаватель, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; a.s.tavlintsev@urfu.ru.

Суворов Антон Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; anton.suvorov@urfu.ru.

Стаймова Елена Дмитриевна, старший преподаватель, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; e.d.staymova@urfu.ru.

Поступила в редакцию 8 февраля 2018 г.

DOI: 10.14529/power180203

SEARCHING FOR TYPICAL LOAD SCHEDULE OF A POWER FACILITY

A.S. Tavlintsev, a.s.tavlintsev@urfu.ru,

A.A. Suvorov, anton.suvorov@urfu.ru,

E.D. Staymova, e.d.staymova@urfu.ru

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

One of the most important needs in planning and analyzing the operating modes of the power system is forecasting the quantities and load schedules. The paper suggests a search algorithm for the same type of load graphs based on data mining methods. The initial data is formed by the averaged half-hourly graphs of

consumption of active and reactive power. The proposed algorithm is primarily aimed at preliminary processing and grouping of measurement data when solving the task of identifying static voltage load characteristics, but it is also possible to carry out research in the area of searching for typical load schedules for design and prospective calculations. The result of the data processing will be an array of labels to link the daily chart with a particular group. The proposed algorithm is based on the k-means method. The algorithm is tested on real data collected from the substation feeding the assembly plant. If the initial data is the sampling of the load curves for several years, the task of predicting the configuration of the load graph can be set. The initial data for solving this problem will be an ordered array of timestamps for the assignment of the daily load graph to a particular type.

Keywords: static load characteristic, daily power grid load schedule, statistical equilibrium load state, complex electric load.

References

1. C4.605 W.G. *Modeling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*, 2014.
2. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11–20. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150102.
3. Bushueva O.A., Kuleshov A.I., Murzin A.Yu. et al. [The Experimental Studies and Determination of the Voltage Steady-State Load Characteristics in Electric Networks with Complex Load]. *State and Prospects of the Development of Electricity and Heat Technology (XVIII Benardos Readings). Materials of the International Scientific and Technical Conference*, 2015, pp. 163–166. (in Russ.)
4. Berdin A.S., Bliznyuk D.I., Romanov I.B. [Estimation of Resultant Load Characteristics for Transients' Studies]. *Izvestiya NNTS Edinoy energeticheskoy sistemy* [Bulletin of the United Power System], 2016, no. 1 (74), pp. 35–41. (in Russ.)
5. Kondrashov M.A., Smirnova A.Yu. [Application of Cluster Analysis in the Task of Identifying Static Load Characteristics]. *Materials of Intellectual Energy Systems of the V International Youth Forum*. National Research Tomsk Polytechnic University, 2017, pp. 79–83. (in Russ.)
6. Lipskiy A.M. Aronovich I.M. [Experimental Determination of Static Characteristics of Load Nodes of Electrical Systems]. *Natural and Technical Sciences*, 2009, no. 3 (41), pp. 410–415. (in Russ.)
7. Pankratov A., Kondrashov M., Paul S. Using Static Polynomial Load Models in “Rastrwin” Software Package for Power System Studies. *Materials of MATEC Web of Conferences. Ser. “Smart Grids 2015”*, 2015. DOI: 10.1051/mateconf/20153701039
8. Kondrashov M.A., Pankratov A.V. [Clustering Methods for Static Load Model Identification by the Passive Experiment Data]. *Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference “Electricity in the Eyes of Youth 2017”*, Samara, 2017, pp. 275–278. (in Russ.)
9. Drimitriev S.A., Semenenko S.I., Suvorov A.A. Complex Load Bus Static Load Characteristics Determination Using Passive Experiment Method. *The Seventeenth International Scientific Technical Conference “Alternating Current Electric Drive” – ACED 2018, Yekaterinburg, Russia, 26–30 March, 2018*. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341711
10. Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. Statistically Equilibrium States of Load in the Problem of Static Load Characteristics Identification. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170203.
11. Serria J., Arcos J.L. A Competitive Measure to Assess the Similarity Between Two Time Series. *Case-Based Reasoning Research and Development*, 2012, pp. 414–427. DOI: 10.1007/978-3-642-32986-9_31
12. Bishop C. *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, Springer-Verlag. 2006.
13. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability*, 1967, pp. 281–297.
14. Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton. Visualizing Data Using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, no. 9, pp. 2579–2605.

Received 8 February 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тавлинцев, А.С. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта / А.С. Тавлинцев, А.А. Суворов, Е.Д. Стаймова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 20–27. DOI: 10.14529/power180203

FOR CITATION

Tavlintsev A.S., Suvorov A.A., Staymova E.D. Searching for Typical Load Schedule of a Power Facility. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 20–27. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180203