

РЕКОНФИГУРАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ЗАГРУЗКЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

К.Б. Корнеев, Раймонд Осеи-Овусу

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Корнеев К.Б., Осеи-Овусу Раймонд, 2020

Аннотация. Проблема надежного и эффективного электроснабжения муниципальных потребителей может быть решена за счет моделирования и прогностического планирования развития центров потребления. Анализ статистической и перспективной информации позволяет планировать внутригородскую сеть электроснабжения, выявлять формирующиеся кластеры потребителей, проводить политику энергосбережения применительно к распределительным сетям.

Ключевые слова: электроэнергетика, трансформаторная подстанция, планирование, кластеризация, моделирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-57-65

Развитие большинства населенных пунктов Центрального федерального округа РФ в настоящий момент ведется по экстенсивному принципу: путем точечной застройки в центральных районах городов, а также присоединением прилегающих к границам города земельных участков и возведением на них как малоэтажных, так и многоэтажных жилых домов. При этом для таких населенных пунктов схема электроснабжения была заложена еще в 1950–1970 гг., а новые здания и районы просто подключаются к существующим сетям. В связи с этим энергетики, для удовлетворения спроса на присоединение электрических мощностей, вынуждены увеличивать мощность на существующих силовых подстанциях, а также прокладывать линии напряжением 0,4 и 6(10) кВ к потребителям.

Тем не менее такой подход является изначально порочным, так как направлен не на оптимальное развитие энергосистемы населенного пункта, а на решение текущих задач подключения потребителей к электрическим сетям. К сожалению, прогнозирование нагрузок и планирование развития электросетевого комплекса городов осложнено тем, что генеральные планы городов достаточно регулярно пересматриваются, а также часто направлены на решение текущих задач, определяемых короткими экономическими циклами (Китчина и Жюгляра) [1]. В связи с этим ни о каком долговременном планировании речь идти не может. Таким образом, на настоящий момент сложилась ситуация, когда в пределах одного населенного пункта наблюдается значительный дисбаланс по нагрузке электрических подстанций и сетей, причем разница в нагрузке достигает трехкратной [2, 3]. В качестве примера можно рассмотреть карты технологических присоединений, в частности карту для Санкт-Петербурга (рис. 1).

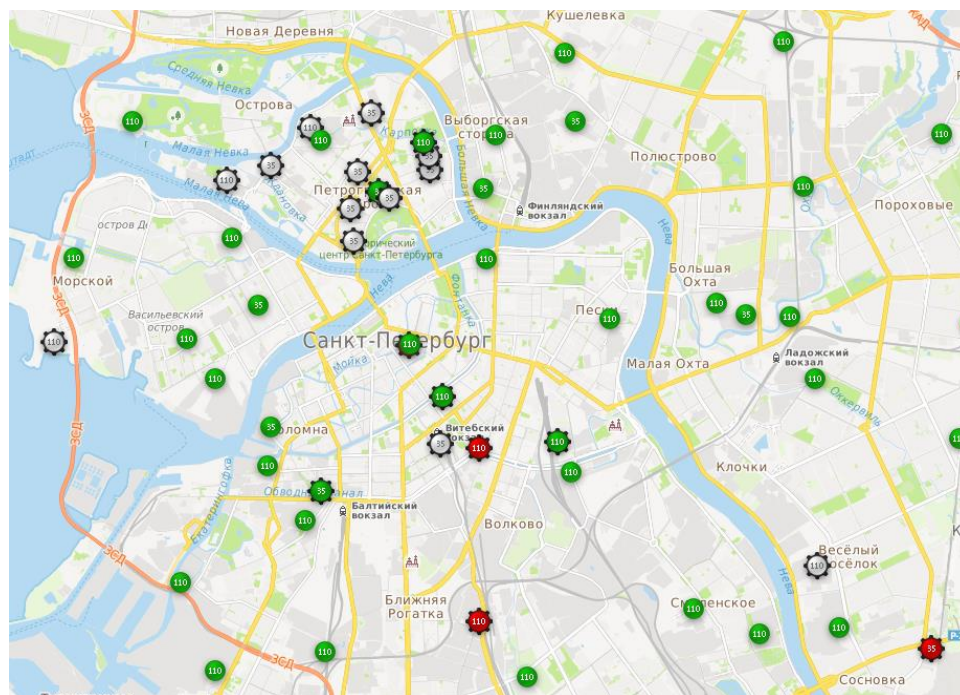


Рис. 1. Карта технологического присоединения Ленинградской области.
Район Санкт-Петербурга

Как видно на карте, в районах перспективной застройки планируется строительство и ввод в строй большого количества подстанций (например, на Петроградской стороне), в то же время для снижения загрузки подстанции 110 кВ в районе Витебского вокзала планируется строительство подстанции 35 кВ. С точки зрения снижения капитальных затрат это допустимый вариант, однако с точки зрения снижения потерь при передаче электрической энергии это малоэффективное решение [4–6]. Кроме того, постройка подстанций в районах существующей застройки сопряжена с необходимостью возведения здания подстанции в закрытом исполнении (так называемой подстанции глубокого ввода). Для таких подстанций возрастает стоимость капитального строительства, а также требуется детальная проработка вопросов дальнейшего развития электроснабжения района, что вызвано невысокой масштабируемостью данных подстанций с точки зрения присоединения новых абонентов.

Одним из существенных недостатков существующей системы оценки энергообеспеченности территорий населенных пунктов является расчет, построенный на центрах питания (подстанциях), для которых принимается территория покрытия, описываемая окружностью с радиусом, равным экономически целесообразной длине линии на соответствующем напряжении. По факту же оказывается, что линии, в первую очередь, кабельные, проложенные не по кратчайшему расстоянию между центрами питания, а в соответствии с градостроительными регламентами, существенно искажают форму территории покрытия. Рассмотренная в качестве примера карта территорий покрытия для города Твери (рис. 2) дает наглядное представление о форме этих зон. При этом стоит учитывать, что представленная карта дана для нормального режима, т. е. без учета оперативных переключений, приводящих к значительному смещению границ зон в случае возникновения аварий.

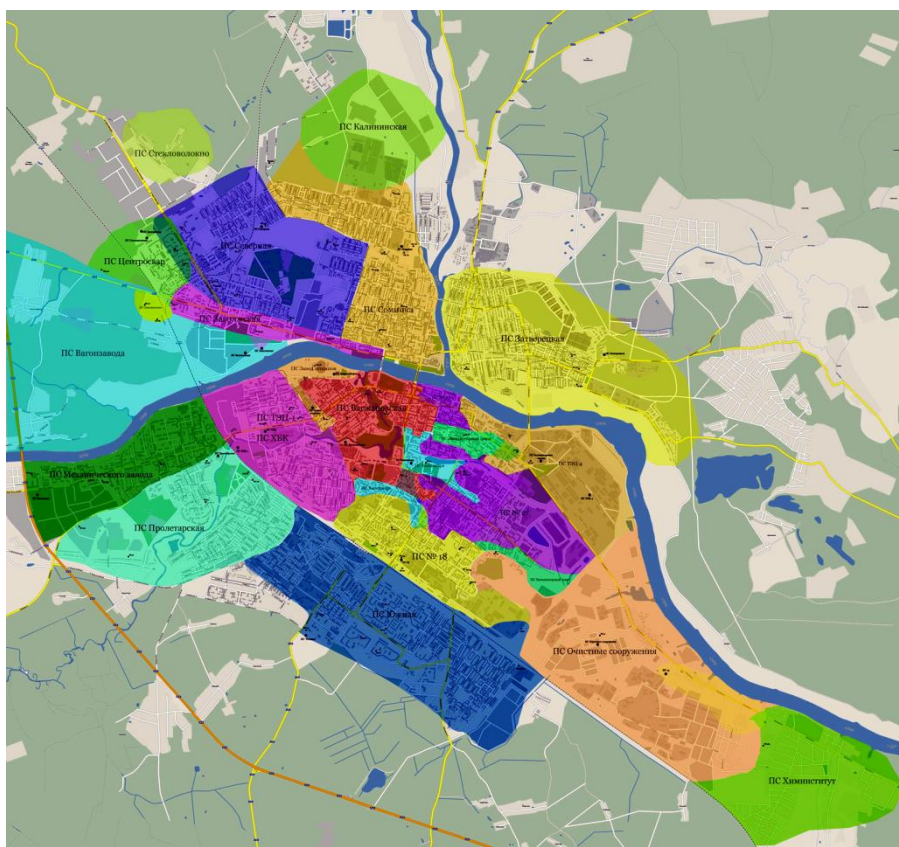


Рис. 2. Визуальное представление зон деятельности МУП «Тверьгорэлектро» по районам города (общая информация по территории обслуживания сетевой организации)

В связи с вышесказанным оптимальное расположение и мощность реконструируемых, а также вновь строящихся подстанций выходит на первый план [7]. Как уже говорилось выше, планирование места размещения ведется на основе заявок потребителей, а также наиболее крупных центров мощности, исходя из градостроительного плана. Тем не менее уже сейчас в большинстве городов, особенно крупных, наметился процесс выноса промышленных предприятий на окраину города, а то и в новые территориальные зоны, предназначенные для размещения промышленных объектов. Как правило, такие зоны закладываются с расчетом на присоединение достаточно больших мощностей, поэтому в этой статье данный вопрос не рассматривается. В то же время в частном секторе и многоквартирных жилых домах значительно возросло электропотребление, что ведет к повышению удельного показателя энергообеспеченности. Особенно заметно смещение энергопотребления из промышленного сектора и торгово-офисных комплексов наблюдалось в период самоизоляции, вызванной пандемией COVID-19 [8]. Таким образом, при перспективном планировании электроэнергетической системы населенного пункта должны учитываться не только нормальный и аварийные режимы, но также и различные форс-мажорные проявления, вызванные социальными и природными факторами.

Как видно из рис. 2, зона строительства в микрорайоне «Южный» (ниже выделенной синим территории на юге Твери) еще не имеет оценок, так как процесс подключения района застройки еще идет. При этом в данном районе формируется один из основных новых центров нагрузки, не предусмотренный градостроительными планами, созданными до 2015 г. [9], а также планами развития электроэнергетики города Твери [10]. Все это приводит к вопросу о необходимости среднесрочного планирования на основе текущих данных о расходах электроэнергии, а также планируемых подключениях нагрузок разных уровней мощности.

Таким образом, задача планирования нагрузки населенных пунктов, особенно таких, в которых ведется новое строительство, должна ориентироваться на какие-то нормируемые и отслеживаемые показатели. К таким показателям относятся мгновенные расходы электроэнергии и удельная электрическая нагрузка. Проблема мгновенных расходов состоит в том, что точка учета далеко не всегда совпадает как с зоной обслуживания подстанции, так и с местом расположения потребителя. Тем не менее широкое использование автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии позволит перейти к более точному позиционированию точек потребления, а также созданию единой карты нагрузок. В качестве универсального и достаточно легко интегрируемого в современные автоматизированные среды управления и администрирования технологическими процессами показателя целесообразно выбрать «Интенсивность использования энергии» (киловатт·час на единицу площади) [11]. В этом случае показатель будет зависеть только от удельных нагрузок, а также может быть использован для оценки текущего энергопотребления и визуализации его изменения во времени. Использование для привязки электропотребляющих территорий существующих кадастровых механизмов (например, кадастровой карты местности) способствует интеграции показателей развития территорий в единой системе с возможностью средне- и долгосрочного планирования.

Однако следует иметь в виду, что очевидная простота формулы для расчета показателя связана с необходимостью перехода от кадастровой площади (площади здания по плану) к полезной (общей площади помещений). Использование только площади по плану приведет к сильному завышению показателя в случае для зданий высокоэтажной жилой застройки, а также многоуровневых производственных цехов для предприятий. Средняя оценка для жилого десятиэтажного газифицированного дома типовой застройки в городе Твери, по данным за 2017–2019 гг., показывает, что удельный показатель, посчитанный для площади по плану, составляет $16,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{мес}\cdot\text{м}^2)$, в то время как посчитанный по общей площади составил $1,52 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{мес}\cdot\text{м}^2)$. Для современного жилого частного газифицированного дома данный показатель составил $3,46 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{мес}\cdot\text{м}^2)$. Эти показатели были получены при проведении энергетических обследований и составлении энергетических паспортов сотрудниками центра «Энергоэффективность» ТвГТУ. В целом, указанные показатели достаточно точно коррелируют с данными других населенных пунктов со зданиями сопоставимой этажности [12, 13].

Использование предложенного показателя позволяет сразу решить проблему выявления низкой энергетической эффективности в рамках реализации закона об энергосбережении, а также построить для населенного пункта динамическую карту распределения удельных нагрузок. В этом случае появляется возможность в режиме реального времени или же по усредненным за определенный отрезок времени удельным показателям выявить зоны повышенной или пониженной электрической нагрузки, определить динамику изменения в этих зонах, а также спрогнозировать изменение этих зон в зависимости от воздействия внешних факторов. Например, картина возрастания удельного показателя, полученная для праздничных и выходных дней, может быть экстраполирована на режим самоизоляции, характерный для весны 2020 г. А данные, полученные в последние две недели календарного года, достаточно точно описывают пиковое потребление для торгово-офисных помещений.

Полученные таким образом данные с учетом прослеживающейся возрастающей динамики для отдельных территорий (очищенные от сезонности, а также всплесков, вызванных авариями, социальными факторами и другими обстоятельствами) и должны использоваться для построения новых моделей электроснабжения городов. Тем не менее сложившаяся топология высоковольтных сетей в городах плохо поддается реконфигурированию, что предполагает большее внимание к мощности и маневренности подстанций, чем к их территориальному расположению. Одновременно следует обратить внимание на распределительную сеть напряжением 6–20 кВ, в которой в рамках

существующей непродуманной стратегии строительства жилого фонда и торгово-офисных центров формируются протяженные участки линий, соединенных последовательно, что ведет к возрастанию токов в головных участках линий, снижает их надежность и увеличивает потери в этих участках. Выявленные на ранних этапах признаки формирования новых центров нагрузки позволят спланировать оптимальную конфигурацию распределительной сети напряжением 6–20 кВ, а также предложить места строительства городских трансформаторных подстанций в целях обеспечения экономичного и надежного электроснабжения потребителей.

Для повышения эффективности распределительной сети напряжением 6–20 кВ в населенных пунктах предлагается на стадии проектирования осуществить построение карты (дополнительного слоя картографической информации) с учетом средних коэффициентов интенсивности использования энергии. Результаты такого построения могут быть в дальнейшем использованы для создания пространственной модели сети электроснабжения.

Пространственные данные сети и потребителей электрической энергии на исследуемой территории могут быть получены от отдела планирования электроснабжающей компании. Поскольку информация не всегда бывает актуальна, то должна быть проведена проверка сформированной карты для подтверждения достоверности данных во избежание критично высоких или низких показателей.

Следующие этапы отображают используемую методологию:

1. Определяется количество кластеров (зон электроснабжения) для достижения желаемых результатов. Как правило, количество зон совпадает с предполагаемым количеством трансформаторных подстанций.

2. Нагрузки в каждой зоне группируются с использованием метода кластеризации k-means [14].

3. Определяются центры нагрузки для всех кластеров с помощью метода весовых коэффициентов k-means.

4. Совмещаются расчетные центры нагрузки с существующей или проектируемой распределительной сетью низкого напряжения (0,4 кВ) с учетом анализа ближайших соседних кластеров.

Размещение трансформаторных подстанций наиболее близко к расчетной точке центра нагрузки (центроиду) является определяющим фактором для снижения технических потерь. Однако данное допущение работает только в том случае, если коэффициенты интенсивности использования энергии объектов различаются незначительно. При значительных (более чем в 3 раза) расхождениях необходимо вводить корректирующие весовые коэффициенты. С помощью вычисленных центроидов кластеров могут быть получены центроиды взвешенных нагрузок. Расчетные центры взвешенных нагрузок не обязательно могут быть местоположением трансформаторных подстанций. Расположение существующих конструкций может препятствовать размещению трансформаторных подстанций, поэтому необходимо проверять рассчитанные точки с привязкой к местности, что удобно выполнять в картографических кадастровых программах. Согласование расчетных центров нагрузки с существующими построенными воздушными линиями низкого напряжения позволит избежать любого нарушения землепользования, которое приведет к блокированию существующих конструкций, выплате компенсации, юридическим обязательствам, остановке проекта.

Для реализации предложенной концепции потребуется активное взаимодействие муниципальных электросетевых компаний, энерго сбытовых организаций, а также управлений кадастрового учета. Тем не менее данное взаимодействие позволит построить оптимальную, надежную и прогнозируемую модель электроснабжения потребителей [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монтгомери Дж. Новое богатство городов: динамика города и пятая волна. Нью-Йорк: Routledge, 2016. 436 с.
2. Оперативная коррекция графиков потребления электрической мощности в цикле планирования балансирующего рынка / Макоклюев Б.И., Полижаров А.С. [и др.] // *Электрические станции*. 2019. № 5. С. 36–44. DOI: 10.34831/EP.2019.1054.44171.
3. Вильмс Я., Федорович С., Качалов Н.А. Методы снижения потерь электроэнергии в распределительных системах // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Вып. 141. DOI: 10.1051/mateconf/201714101050.
4. Ле А., Кашем К.А., Негревицкий М. Снижение потерь электрической мощности в распределительных сетях с распределенными источниками. // *Австрало-азиатская университетская конференция по электроэнергетике*. 2005. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5435&context=eispapers> (дата обращения: 16.04.2020).
5. Стрбак Г., Джапик П. [и др.]. Стратегии снижения потерь в распределительных сетях. Лондон: Имперский колледж Лондона, 2018. 87 с. URL: <https://www.ukpowernetworks.co.uk/losses/static/pdfs/strategies-for-reducing-losses-in-distribution-networks.d1b2abf.pdf> (дата обращения: 24.04.2020).
6. Бассо Т.С. Системное воздействие на взаимосвязь распределенных ресурсов: текущее состояние и определение потребностей для дальнейшего развития. Технический отчет NREL/TP-550-44727. Национальная лаборатория Министерства энергетики США, Управление по энергоэффективности и возобновляемой энергии. Январь 2009. С. 44. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44727.pdf> (дата обращения: 12.04.2020).
7. Корнеев К.Б. Оптимизация конфигурации электрических сетей населенных пунктов // *Энергосбережение в электро-, теплоэнергетических и металлургических установках: сборник научно-практических трудов*. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014. С. 59–62.
8. Васильев А. Март-2020: электроэнергетика на развилке // *Электротехнический интернет-портал*. 21 апреля 2020. URL: <https://www.elec.ru/articles/mart-2020-elektroenergetika-na-razvilke/> (дата обращения: 29.04.2020).
9. Генеральный план города Твери. Решение Тверской городской Думы № 193 (394) от 25 декабря 2012 «Об утверждении генерального плана города Твери» (официальное издание). URL: <https://www.tver.ru/documents/gradostroitelstvo/> (дата обращения: 20.04.2020).
10. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Тверской области на период 2014–2018 годы (официальное издание). URL: <https://минтэкижкх.тверскаяобласть.рф/kollegialnye-organy/shtab-po-obespecheniyu-bezopasnosti-elektrosnabzheniya-tverskoy-oblasti-skhema-i-programma-perspektivnogo-razvitiya-elektroenergetiki-tverskoy-oblasti-na-period-2014-2018-g/> (дата обращения: 20.04.2020).
11. Интенсивность использования энергии (показатель). IBM TRIRIGA – интеллектуальное решение для управления недвижимостью и инфраструктурой. URL: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSFCZ3_10.6.0/com.ibm.tri.doc/wpm_metrics/r_energy_use_intensity_kilowatt_hours_gsf.html (дата обращения: 22.04.2020).
12. Постановление Правительства РФ от 23 мая 2006 г. № 306 «Об утверждении Правил установления и определения нормативов потребления коммунальных услуг и нормативов потребления коммунальных ресурсов в целях содержания общего имущества в многоквартирном доме» (с изменениями и дополнениями). URL: <http://base.garant.ru/12147362/> (дата обращения: 22.04.2020).
13. Ливчак В.И. Нормирование показателей годового электропотребления жилыми зданиями, в том числе на общедомовые нужды // *Журнал «АВОК»*. 2015. № 6. С. 46–51. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6193 (дата обращения: 20.04.2020).

14. Литвиненко Н., Мамырбаев О. [и др.]. Кластеризация методом k-средних в случае, когда k неизвестно // *Международная конференция по прикладной математике, вычислительной технике и системотехнике*. 2019. Вып. 24. DOI: 10.1051/itmconf/20192401013.
15. Корнеев К.Б., Долгополая Е.В., Осеи-Овусу Раймонд. Дифференцированные варианты надежности электроснабжения для городских распределительных сетей // *Энергосбережение в промышленности: материалы Международной научно-практической конференции*. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. С. 165–170.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРНЕЕВ Константин Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: Energy-tver@mail.ru

РАЙМОНД Осеи-Овусу – аспирант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: orajmond2008@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Раймонд Осеи-Овусу. Реконфигурация существующей электрической сети населенных пунктов на основе данных о загрузке потребителей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 57–65.

RECONFIGURATION OF EXISTING ELECTRIC NETWORK OF URBAN TERRITORIES BASED ON POWER CONSUMPTION DATA

K.B. Korneev, Raymond Osei-Ovusu
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The problem of reliable and efficient power supply to municipal consumers can be solved by modeling and prognostic planning of consumption centers development. Analysis of statistical and forward-looking information allows planning of intra-city power supply network, identifying of emerging consumer clusters, and pursue an energy-saving policy in relation to distribution networks.

Keywords: power supply industry, transformer substation, planning, clustering, modeling.

REFERENCES

1. Montgomery J. The new wealth of cities: city dynamics and the fifth wave. New York: Routledge, 2016. 436 p
2. Makollyuev B.I., Polizharov A.S. [et al.]. Operational correction of electric power consumption schedules in the balancing market planning cycle. *Elektricheskie stancii*. 2019. No. 5, pp. 36–44. (In Russian) DOI: 10.34831/EP.2019.1054.44171.
3. Wilms Ya., Fedorovich S., Kachalov N.A. Methods of reducing power losses in distribution systems. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Iss 141. DOI: 10.1051/mateconf/201714101050.
4. Le A., Kashem K.A., Negnevitsky M. Minimizing power losses in distribution systems with distributed resources. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2005. URL: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=5435&context=eispapers> (date of access: 16.04.2020).
5. Strbac G., Djapic P. [et al.]. Strategies for reducing losses in distribution networks. Imperial College London. February 2018. 87 p. URL: <https://www.ukpowernetworks.co.uk/losses/static/>

- pdfs/strategies-for-reducing-losses-in-distribution-networks.d1b2a6f.pdf (date of access: 24.04.2020).
6. Basso T.S. System impacts from interconnection of distributed resources: current status and identification of needs for further development. *Technical Report NREL/TP-550-44727*. National laboratory of the U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, January 2009. 44 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44727.pdf> (date of access: 12.04.2020).
 7. Korneev K.B. Optimization of the configuration of electric networks of settlements. *Energy saving in electric-, heat power- and metallurgical plants. Collection of scientific and practical works*. Tver: TvSTU, 2014, pp. 59–62. (In Russian).
 8. Vasiljev A. March-2020: fork in the electric power industry. *Electrotechnical Internet portal*. 21 April 2020. URL: <https://www.elec.ru/articles/mart-2020-elektroenergetika-na-razvilke/> (date of access: 29.04.2020). (In Russian).
 9. General plan of the city of Tver. The decision of the Tver City Council № 193 (394) on 25.12.2012 «On approval of the general plan of the city of Tver» (official). URL: <https://www.tver.ru/documents/gradostroitelstvo/> (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
 10. Scheme and program for the prospective development of the electric power industry in the Tver region (official). URL: <https://минтэкижкх.тверскаяобласть.рф/kollegialnye-organy/shtab-po-obespecheniyu-bezopasnosti-elektrosnabzheniya-tverskoy-oblasti-/skhema-i-programma-perspektivnogo-razvitiya-elektroenergetiki-tverskoy-oblasti-na-period-2014-2018-g/> (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
 11. Energy Use Intensity (kilowatt hours / GSF) metric. IBM TRIRIGA Version 10.6.0. URL: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSFCZ3_10.6.0/com.ibm.tri.doc/wpm_metrics/r_energy_use_intensity_kilowatt_hours_gsf.html (date of access: 22.04.2020).
 12. Decree of the Government of the Russian Federation of May 23, 2006 № 306 «On approval of the Rules for the establishment and determination of standards for the consumption of communal services and standards for the consumption of communal resources in order to maintain common property in an apartment building» (as amended). URL: <http://base.garant.ru/12147362/> (date of access: 22.04.2020). (In Russian).
 13. Livchak V.I. Regulation of annual electricity consumption in residential buildings including for common needs. *ABOK Journal*. 2015. No. 6, pp. 46–51. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6193 (date of access: 20.04.2020). (In Russian).
 14. Litvinenko N., Mamyrbayev O. [et al.]. Clusterization by the K-means method when K is unknown. *AMCSE 2018 – International Conference on Applied Mathematics, Computational Science and Systems Engineering*. 2019. Vol. 24. DOI: 10.1051/itmconf/20192401013.
 15. Korneev K.B., Dolgopolaya E.V., Raymond Osei-Owusu. Differentiated power supply reliability options for urban distribution networks. *Energy and resource saving in industry. Materials of the International scientific-practical conference*. Tver: Tver State Technical University. 2019, pp. 165–170. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

RAYMOND Osei-Ovusu – Postgraduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Osei-Ovusu Raymond. Reconfiguration of existing electric network of urban territories based on power consumption data // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 4 (8), pp. 57–65.

