

## СЕКЦИЯ 5. ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.316.1.05

### ВЛИЯНИЕ РОСТА ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Р.В. Дейков, К.Б. Корнеев,  
Р. Осей-Овусу**

© Дейков Р.В., Корнеев К.Б., Осей-Овусу Р., 2024

***Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос влияния непрерывного роста плотности электрической нагрузки на городскую систему электроснабжения. Отмечено, что планируется изучить воздействие изменения плотности нагрузок на показатели качества электроэнергии, а также способы регулирования воздействий на разных уровнях электроснабжения.*

***Ключевые слова:** плотность, электрическая нагрузка, показатели, качество электроэнергии, электроснабжение.*

В ходе развития современных городских агломераций остро встает вопрос повышения урбанизации отдельных городских зон (районов). Многие города России с численностью населения более 400 000 человек стремятся попасть в список так называемых городов-миллионеров. Однако при планировании развития городов не всегда уделяется пристальное внимание совершенствованию городской энергосистемы. В большинстве случаев внимание приковано к улучшению качества жизни граждан: разгрузке путей транспортного сообщения, созданию зон отдыха, реставрации общественных объектов. Тем не менее, к сожалению, если не учитывать вопрос энергоснабжения и распределения мощностей, обеспечить население качественной электроэнергией для поддержания стабильной работы всех инфраструктур будет невозможно.

При росте городской агломерации требуется производить модернизацию энергосистемы городского энергоснабжения и предоставлять потребителям необходимое количество электроэнергии в периоды проведения реструктуризации энергосистемы, а с этим могут возникнуть определенные сложности.

Если рассматривать проблему в узком смысле, необходимо заострить внимание на проблеме увеличения плотности электрических нагрузок. Например, заменив несколько коттеджных домов одним многоэтажным зданием, мы получим резкий рост количества энерго-

потребителей с различными типами нагрузки (линейным и нелинейным) на сопоставимой занимаемой площади. К первому типу нагрузки (линейному) относятся лампы накаливания, нагревательные элементы и другие резистивные нагрузки, сопротивление которых не меняется при изменении величины тока или приложенного напряжения; ко второму (нелинейному) – более сложные устройства, сопротивление которых напрямую зависит от протекающего по ним тока или приложенного напряжения (это, например, офисное оборудование, персональные компьютеры, светодиодные светильники) [1].

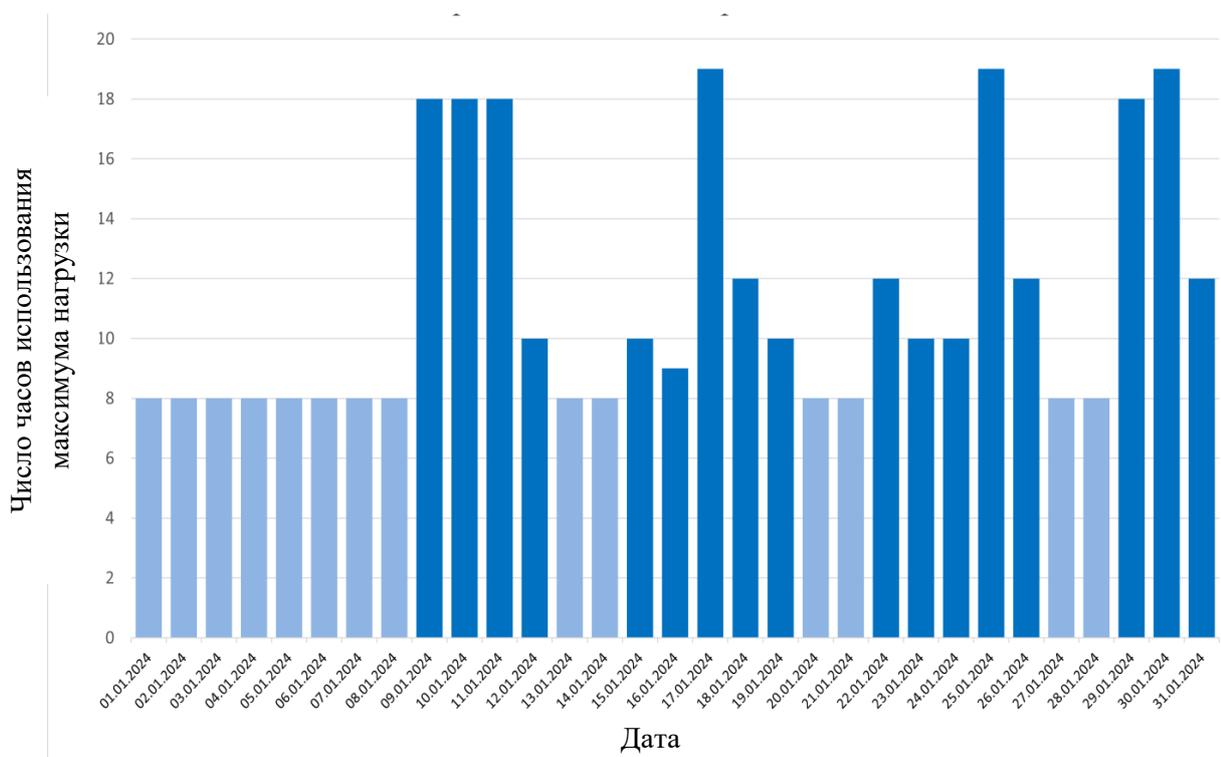
В тех случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10–15 %, каких-либо особенностей при эксплуатации системы электроснабжения не возникает [2]. При превышении указанного предела появляются различные проблемы, такие как возникновение большого числа нечетных гармоник третьего и более высших порядков в процессе перехода в «потребителе» напряжения от переменного к постоянному [3]. В свою очередь, увеличение несимметрии ведет к росту потерь в энергетическом оборудовании при передаче и потреблении электрической энергии, а также к сокращению срока службы оборудования.

Рассмотрим ситуацию, когда процентное соотношение такого типа нагрузки в определенной части энергосистемы возрастает в несколько раз. В этом случае практически гарантированы изменения в качестве электроэнергии, поскольку планы развития энергосистемы в основном устанавливаются на ближайшие пять лет, в то время как сроки постройки нескольких многоэтажных домов на месте обычных коттеджей составляют от полутора до трех лет. Следовательно, будет наблюдаться существенный прирост плотности электрических нагрузок, при этом энергосистема практически не имеет каких-либо резервов мощности для регулирования распределения нагрузок и обеспечения стабильного процесса жизнедеятельности населения.

Плотность нагрузки – расчетная характеристика, обуславливающая энергопотребление на единицу площади в данном регионе и естественным образом зависящая от координат [4]. Плотность нагрузки обычно определяют в периоды достижения максимумов в суточных графиках нагрузок; благодаря такому подходу нет необходимости осуществлять учет плотности в зависимости от временного промежутка.

На основании данных АО «АтомЭнергоСбыт» [5] в качестве примера была построена диаграмма (рисунок), показывающая зависимость часов максимума электрической нагрузки от даты (за январь 2024 г.). На диаграмме имеются участки, помеченные светлым оттенком, для которых в исходных данных не приведены характеристики часов использования максимума нагрузки. Эти даты соответствуют выходным и праздничным дням, для которых данный показатель не определяется.

К сожалению, в настоящее время невозможно найти населенный пункт с идеальной схемой электрической сети, где наблюдалось бы равномерное распределение нагрузок. Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод о том, что в любой городской сети существует дисбаланс распределения электрических нагрузок, который компенсируется введением дополнительных мощностей в энергосистему города.



Число часов использования максимума нагрузки в январе 2024 г. по Тверской области

При рассмотрении российских городских сетей было проведено сравнение с сопоставимыми по площади и количеству жителей населенными пунктами Европы. В соответствии с исследованием итальянского ученого А. Бакареле [6] итальянские городские распределительные сети характеризуются низкой протяженностью линий электропередач, преобладанием кабельных линий, потребителей на стороне низкого напряжения и высокой удельной мощностью. Такая «идеальная» распределительная сеть должна иметь радиальную структуру с подстанциями на сторонах низкого и среднего напряжения, при этом на бытовых потребителей приходится до 86 % от общей нагрузки электрической сети.

Компания Terna Driving Energy, являющаяся ведущим поставщиком электроэнергии Италии, проводит рационализацию электрических сетей в каждой провинции посредством замены воздушных линий электропередач кабельными, которые показывают положительные результаты при эксп-

луатации, так как эти линии более устойчивы, безопасны и эффективны. Кроме того, подобная практика помогает за счет сноса опор перевести занятые земли в годные для застройки или другого использования.

К сожалению, для большинства крупных городов России проведение работ, аналогичных выполняемым зарубежными коллегами, теоретически возможно, но для этого требуются существенные трудозатраты, так как необходимо обеспечить сразу несколько условий:

1) сохранение транспортного сообщения в процессе работ, соизмеримого с начальным;

2) сохранение бесперебойного обеспечения электроэнергией всех потребителей;

3) предотвращение конфликтов с другими городскими коммунальными сетями (водо- и газоснабжения, связь).

Однако главной трудностью подобных работ можно считать преобладание в городской черте сетей 0,4 и 6–10 кВ, что при изменении топографии распределительной сети (выборе новых участков для прокладки линий с целью снижения протяженности и повышении напряжения) не сможет обеспечить необходимые требования, связанные с качеством электроэнергии.

Первоочередной рекомендацией для городских сетей является переход на более высокий класс напряжения. Данное решение приведет к возможности роста потоков мощности, передаваемых по городской сети, а также целесообразности замены воздушных линий кабельными для повышения энергоэффективности. Однако данные работы актуальны только для городов, в которых наблюдается рост населения, т.е. расширение городской агломерации и стремление города к статусу «миллионера».

М. Хивяринен в своей диссертации [7] показал зависимость плотности электрической нагрузки от коэффициента плотности застройки. Финский автор получил выражение плотности электрической нагрузки для г. Хельсинки. Из этого выражения следует квадратичная зависимость плотности электрической нагрузки от коэффициента плотности застройки  $\varepsilon$  (отношение поэтажной площади наземной и надземной части здания к общей плотности территории, на которой оно располагается):

$$\sigma(\varepsilon) = 7,8058 \varepsilon^2 + 4,324 \cdot \varepsilon + 2,1083.$$

В целом города-миллионеры с высокой плотностью заселения (численность населения городской агломерации составляет более миллиона человек) характеризуются высокой плотностью электрических нагрузок (до 20–30 МВА/км<sup>2</sup> в центральных районах города) и большим количеством разнотипных потребителей, расположенных на ограниченной территории. Многие электроприемники относятся к первой категории, причем число таких приемников постоянно растет. К традиционным потребителям первой категории теперь добавились также вычислительные комплексы

крупных банков, организации, имеющие статус федерального значения, и специализированные производства.

Мегаполисы должны соблюдать высокий уровень интенсивности использования электроэнергии (киловатт·час на единицу площади). Указанный показатель зависит от удельных нагрузок, а также может быть задействован в оценке текущего энергопотребления и визуализации его изменения во времени. Применение для привязки территорий с растущей плотностью электрической нагрузки существующих кадастровых механизмов (например, кадастровой карты местности) способствует внедрению показателей развития городских районов в единую систему с возможностью средне- и долгосрочного планирования. Однако следует иметь в виду, что простота расчета показателя связана с необходимостью перехода от кадастровой площади (площади здания по плану) к полезной (общей площади помещений). Использование площади по плану приведет к завышению показателя в случае зданий многоэтажной жилой застройки, а также многоуровневых производственных цехов предприятий. Средняя оценка для жилого десятиэтажного газифицированного дома типовой застройки в г. 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 равен  $1,52 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{мес.} \cdot \text{м}^2)$ . Для современного жилого частного газифицированного дома данный показатель составил  $3,46 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{мес.} \cdot \text{м}^2)$  [8].

С энергетической точки зрения мегаполисы характеризуются более низкими, чем в малых городах, значениями энергопотребления на душу населения. Одна из причин этого – вывод за пределы города крупных промышленных предприятий. Свою роль играют и преобладание более энергоэффективной многоэтажной застройки, и применение когенерации, а также более низкие значения энергетических потерь (в частности, из-за меньшей протяженности тепловых и электрических сетей на душу населения).

Фактически рост плотности электрической нагрузки влечет за собой существенные изменения в показателях качества электроэнергии. Допустимое варьирование параметров электрической сети представлены в ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [9.]

Любое изменение параметров влияет на работу потребителей, а с увеличением их числа при застройке района случаи нарушения работы оборудования конечных потребителей. Для уменьшения числа возможных случаев нарушения работы оборудования качество электроэнергии должно обеспечиваться сразу в нескольких направлениях. Опишем эти направления.

*Внутреннее электроснабжение.* Данный тип подразумевает наличие подстанций, которые при возникновении каких-либо проблем с внешним источником электроснабжения смогут обеспечить население минимально необходимым количеством мощности соответствующего качества для поддержания стабильной работы жизненно важных объектов. Количество генерирующих подстанций должно быть не менее трех на город, мощность генераторов должна составлять не менее 15–20 % от мощности кольцевой системы электроснабжения. Кроме того, в случае с городами Российской Федерации необходима сеть модернизированных линий электропередач, позволяющая до минимума снижать потери в процессе работы.

*Внешнее электроснабжение.* Электроснабжение крупных промышленных центров и городов в значительной степени осуществляется от внешних источников через опорные питающие подстанции. Для обеспечения такого принципа питания вокруг городской агломерации разрабатывают сеть электроснабжения 220–330 кВ (возможно и более высокое напряжение до 750 кВ), которая представлена в виде кольца, гарантировать надежность электроснабжения.

*Собственное электроснабжение.* Необходимо учитывать возможные отключения по абсолютно разным причинам: от обрывов линий электропередач до проведения плановых пусконаладочных работ оборудования питающих подстанций. В таком случае потребитель должен иметь резерв запасенной мощности. Это, например, аккумуляторные батареи, которые хотя бы на время могут заместить основной источник питания.

Развитие современной электроэнергетики все больше и больше ориентируется на возможность накопления электроэнергии от основных и альтернативных источников для последующего использования. Применение источников накопления позволит производителям электроэнергии стабилизировать работу генерирующего оборудования, повысить надежность сетей и дополнительно нормализовать показатели качества электроэнергии у потребителей.

Согласно тенденциям, наблюдающимся при развитии городского градостроительства, плотность электрической нагрузки с каждым годом будет только расти, а при таком росте числа потребителей электроэнергии необходимо изучать его влияние на показатели качества электроэнергии и находить современные методы более равномерного распределения потребляемых мощностей, обеспечивая наименьшие затраты на корректировку городских электрических сетей.

### **Библиографический список**

1. Наумкин И.Б., Паскарь И.Н., Завьялов В.М. Влияние нелинейной нагрузки на качество электроэнергии // Вестник КузГТУ. 2015. № 4 (110). С. 75–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-nelineynoy-nagruzki-na-kachestvo-elektroenergii/viewer> (дата обращения: 19.02.2024).
2. Енин А.С., Корнеев К.Б., Узикова Т.И. Влияние нагрузок электрического освещения на качество электрической энергии // Вестник Тверского государственного технического университета. 2015. № 2 (28). С. 26–31.
3. Корнеев К.Б., Енин А.С., Михайлов Т.Г. Влияние энерго-сберегающих осветительных приборов на качество электрической энергии во внутренних сетях // Вестник Тверского государственного технического университета. 2017. № 1 (31). С. 158–162.
4. Афанасьев А.П. Особенности применения критерия поверхностной плотности нагрузки при выборе местоположения и мощности трансформаторных подстанций // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2020. № 1 (38). С. 9–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-kriteriya-poverhnostnoy-plotnosti-nagruzki-pri-vybore-mestopozheniya-i-moschnosti-transformatornyh/viewer> (дата обращения: 19.02.2024).
5. Часы для расчета величины мощности, оплачиваемой потребителем (покупателем) на розничном рынке. URL: <https://atomsbt.ru/raskrytie-informatsii/tver/chasy-dlya-rascheta/> (дата обращения: 20.02.2024).
6. Analysis of the Italian distribution system evolution through reference networks / A. Bracale [et al.] // Conference: Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). 2012. URL: [https://www.researchgate.net/publication/261200222\\_Analysis\\_of\\_the\\_Italian\\_distribution\\_system\\_evolution\\_through\\_reference\\_networks](https://www.researchgate.net/publication/261200222_Analysis_of_the_Italian_distribution_system_evolution_through_reference_networks) (дата обращения: 20.02.2024).
7. Нувярinen М. Electrical networks and economies of load density. Doctoral Dissertation. URL: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296583/isbn9789512296583.pdf> (дата обращения: 20.02.2024).
8. Корнеев К.Б., Осеи-Овусу Р. 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.
9. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

**THE INFLUENCE OF THE INCREASE  
IN THE DENSITY OF THE ELECTRICAL LOAD  
ON THE INDICATORS  
OF THE QUALITY OF ELECTRICITY**

**R.V. Deykov, K.B. Korneev,  
R. Osei-Ovusu**

***Abstract.** The article considers the issue of the impact of continuous growth of electric load density on the urban power supply system. It is noted that it is planned to study the impact of changes in load density on power quality indicators, as well as ways to regulate the influences at different levels of power supply.*

***Keywords:** electric load density, electric power, quality, indicators, power supply.*

Об авторах:

ДЕЙКОВ Роман Владимирович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: romadeikov@yandex.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: energy-tver@mail.ru

ОСЕИ-ОВУСУ Раймонд – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: orajmond2008@mail.ru

About the authors:

DEYKOV Roman Vladimirovich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: romadeikov@yandex.ru

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

OSEI-OWUSU Raymond – Postgraduate Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: orajmond2008@mail.ru