

УДК 621.311

Выбор зарядных станций, согласованный с действующими системами электроснабжения многоквартирных домов и образовательных учреждений мегаполиса

СОЛУЯНОВ Ю.И.^{2,3}, ФЕДОТОВ А.И.¹, СОЛУЯНОВ В.И.^{3,2}, АХМЕТШИН А.Р.¹,
ЧЕРНОВА Н.В.²

¹КГЭУ, Казань, Россия

²Ассоциация "Росэлектромонтаж", Казань, Россия

³Татэлектромонтаж, Казань, Россия

Развитие индивидуального электротранспорта обуславливает необходимость оснащения электрозарядными станциями мест автомобильных парковок на территориях уже сложившихся и вновь строящихся городских микрорайонов. Их параметры и объемы электропотребления должны быть согласованы с пропускной способностью систем электроснабжения и учитывать суточные изменения нагрузки. Для оценки доступной располагаемой мощности в статье рассмотрены графики суточной нагрузки многоквартирных домов в рабочие и выходные дни. Проанализированы суточные профили мощности детских и средних образовательных учреждений, и выполнена оценка временных интервалов набора и сброса нагрузки. Показана возможность использования зарезервированной за аварийной нагрузкой мощности. Для использования при выборе параметров электрозарядных станций разработаны типовые удельные суточные графики нагрузки многоквартирных домов. Применение гармонического анализа к суточным профилям мощности показало, что для их аналитического описания достаточно четырех первых гармоник и постоянной составляющей, равной удельному суточному электропотреблению. Доказан закон нормального распределения гармонических коэффициентов, характеризующих удельный уровень гармоник. Показана статистическая идентичность профилей мощности многоквартирных домов Москвы и обоснована необходимость их разделения для рабочих и выходных дней.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гармонический анализ, удельная электрическая нагрузка, многоквартирные жилые дома, зарядная станция, типовые графики нагрузки

Развитие индивидуального электротранспорта обуславливает необходимость оснащения электрозарядными станциями (ЭЗС) [1, 2] мест парковок на территориях городских микрорайонов вблизи многоквартирных домов (МКД), дошкольных образовательных учреждений (ДОУ) и средних общеобразовательных школ (СОШ). На стадии проектирования городского микрорайона и отдельных его зданий типы ЭЗС, размещение, их количество могут быть легко учтены в системе электроснабжения. При их интеграции в уже существующую инфраструктуру приходится считаться с электрическими нагрузками и пропускной способностью распределительной электрической сети. Однако в обоих случаях необходимой информацией для оптимального выбора параметров ЭЗС являются суточные профили мощности объектов, оборудуемых парковочными местами для заряда электромобилей

(ЭМ). В первую очередь, это МКД, а также ДОУ и СОШ.

Режимы работы ЭЗС в значительной мере зависят как от дней недели (рабочие или выходные дни), так и от индивидуальных графиков электрической нагрузки (ГЭН) каждого объекта. Ниже рассмотрены режимы электропотребления МКД как в выходные дни на предмет оценки располагаемой мощности и продолжительности работы ЭЗС (когда отъезд и возврат ЭМ с мест придомовых парковок не привязан к рабочим часам), так и в рабочие дни (когда на заряд ЭМ ставятся преимущественно в вечерние часы). Поскольку для электроснабжения СОШ редко устанавливаются самостоятельные трансформаторные подстанции (ТП), а для ДОУ так и вообще применяются только в исключительных случаях [3, 4], то возможность установки служебных ЭЗС вблизи этих учреждений, подклю-

чаемых от их вводных распределительных устройств (ВРУ), должна проверяться не только по цепи питания, но и на шинах ТП (где суммируется мощность МКД с ДООУ или с СОШ) для оценки перегрузки действующей системы электроснабжения и располагаемой электроэнергии для заряда ЭМ.

Электрические нагрузки МКД на получасовых интервалах измерения подробно рассматривались в [5, 6], где выполнялась оценка максимальных значений мощности, однако собственно суточные ГЭН не анализировались. В [7] приведены соответствующие ГЭН по результатам измерений на нескольких МКД в разрезе рабочих и выходных дней, но недостаточная база не позволила их обобщить. При наличии типовых ГЭН выбор мощности трансформаторов питающих ТП, систем накопления электроэнергии [8], проектирование распределенной генерации [9] и интеллектуальной электрической сети, в том числе с элементами гексагональной структуры [10–13], становятся существенно более точными. Так, в [14–17] приведены данные о фактической загрузке трансформаторов 10/0,4 кВ, свидетельствующие об их существенном недоиспользовании. Поэтому актуальной является задача разработки обобщенных ГЭН различных объектов микрорайонов или получения оценочных параметров, позволяющих прогнозировать работу ЭЭС и выбрать их характеристики для удовлетворения потребностей населения в отношении зарядки ЭМ в удобное время.

Суточные ГЭН квартир МКД. Была сформирована выборка из 17 МКД Москвы с электроплитами от 11 до 18 этажей. Всего за сутки записывалось 23 графика электропотребления с получасовым усреднением, так как записи велись на уровне ВРУ, которых в некоторых МКД имелось по два. Рассматривался декабрь как самый нагруженный месяц года [6, 18], в отдельную группу выделялись рабочие дни, а выходные были раз-

биты на две подгруппы: субботы и воскресенья. Последнее сделано чтобы установить, есть ли между ГЭН значимая разница. По каждой из трех групп ГЭН предварительно усреднялись: в каждой группе/подгруппе по каждому ВРУ единовременные дискретные показания складывались и вычислялось их среднее значение.

На рис. 1–3 приведены среднесуточные удельные (отнесенные на одну квартиру (кв.)) получасовые ГЭН МКД. Конкретные дома обезличены и выделены цветом. Записи получены с квартирных приборов учета электроэнергии, запрограммированных с дискретностью получасового съема информации. Визуальный анализ ГЭН показывает, что для выходных дней характерен локальный максимум около 12.00. ГЭН близки по форме, но существенно отличаются значениями удельной нагрузки в любом сечении по времени наблюдения: точки нижнего ГЭН ниже на десятки процентов точек верхнего ГЭН за счет меньшего значения постоянной составляющей мощности.

При решении задачи сопоставления суточных ГЭН МКД необходимы критерии идентичности, так как желательно оперировать обобщенными зависимостями, исключив при установке ЭЭС предварительный длительный мониторинг электропотребления каждого здания. В [19] используются показатели, позволяющие провести сравнительную оценку ГЭН в целом: коэффициент неравномерности, коэффициент заполнения и коэффициент формы. Однако они не предоставляют достаточной информации о закономерностях суточного изменения нагрузки и, следовательно, о располагаемой мощности для ЭЭС в разное время суток.

Как видно из рис. 1–3, форма ГЭН в значительной мере одинакова, что свидетельствует о наличии общих закономерностей, которые позволят выявить более детальный анализ.

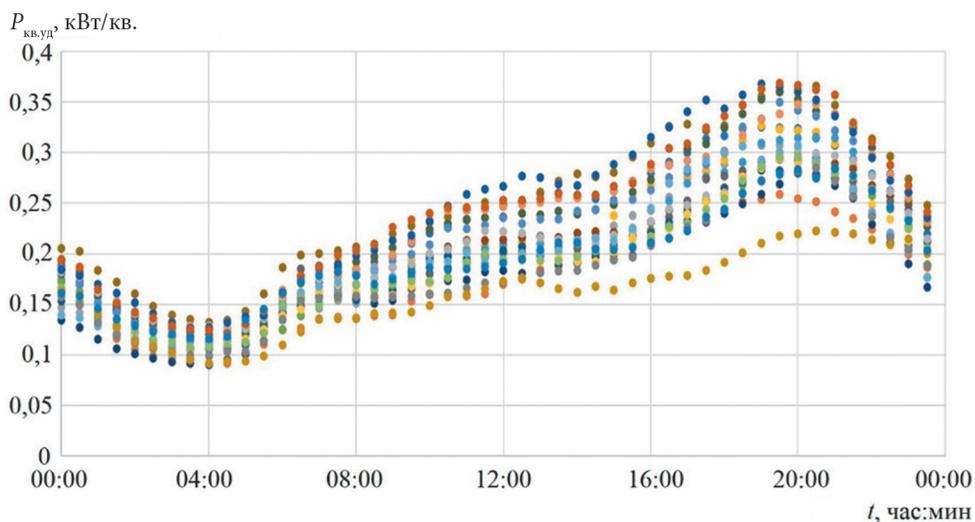


Рис. 1. Удельная нагрузка квартир (кВт/кв.) МКД Москвы за рабочие дни декабря 2022 г.

Fig. 1. Specific load of apartments in Moscow apartment buildings for working days in December 2022

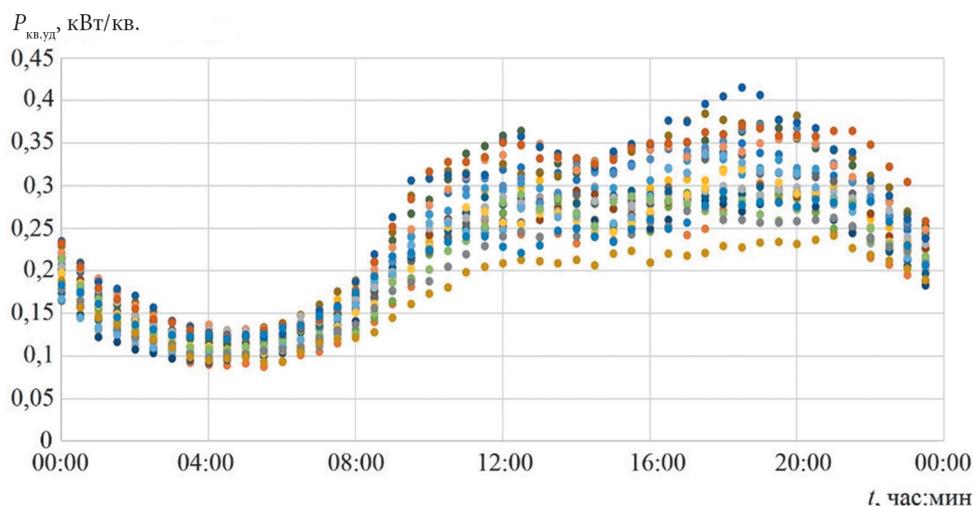


Рис. 2. Удельная нагрузка квартир (кВт/кв.) МКД Москвы за субботние дни декабря 2022 г.

Fig. 2. Specific load of apartments in Moscow apartment buildings for Saturdays in December 2022

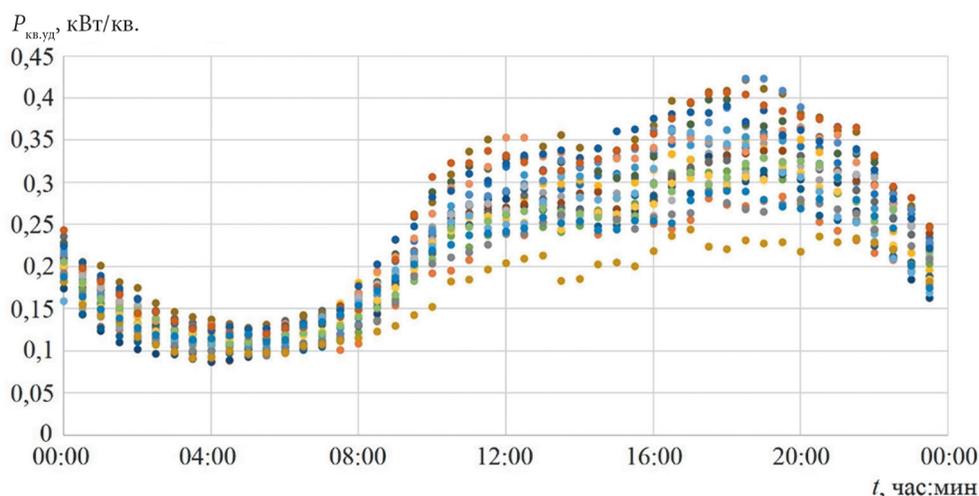


Рис. 3. Удельная нагрузка квартир (кВт/кв.) МКД Москвы за воскресные дни декабря 2022 г.

Fig. 3. Specific load of apartments in Moscow apartment buildings for Sundays in December 2022

Гармонический анализ суточных ГЭН квартир МКД. Предлагается использовать гармонический анализ суточных ГЭН, хорошо зарекомендовавший себя в задачах оценки качества электроэнергии по уровню гармонических составляющих напряжения. Для этого вычисляется коэффициент, аналогичный коэффициенту искажения кривой синусоидального напряжения [20]. Поскольку в суточных ГЭН всегда присутствует постоянная составляющая P_0 , называемая средней мощностью, соответствующая нулевой гармонике спектра, то данный коэффициент k_g , названный гармоническим коэффициентом, соотносится со средней мощностью и рассчитывается по формуле

$$k_g = \frac{1}{P_0} \sqrt{\sum_{n=1}^N P_n^2}, \quad (1)$$

где N – количество учитываемых гармоник.

Круговая частота ω_1 первой гармоники ($n = 1$), c^{-1} :

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{24 \cdot 3600}. \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что гармонические коэффициенты k_g не зависят от того, рассматриваются ли ГЭН всего МКД или пересчитаны на одну квартиру, так как используются их удельные значения. На рис. 4 представлена диаграмма гармонических коэффициентов k_g на примере выборки из 23 МКД Москвы.

Приведем результаты статистической обработки на примере субботних значений k_{g6} выборки МКД Москвы. Предварительно коэффициенты k_{g6} были проверены на выбросы по критерию Граббса [21, 22] (табл. 1).

Выборка не содержит выбросов. Базовые статистические показатели получившейся выборки (23 МКД):

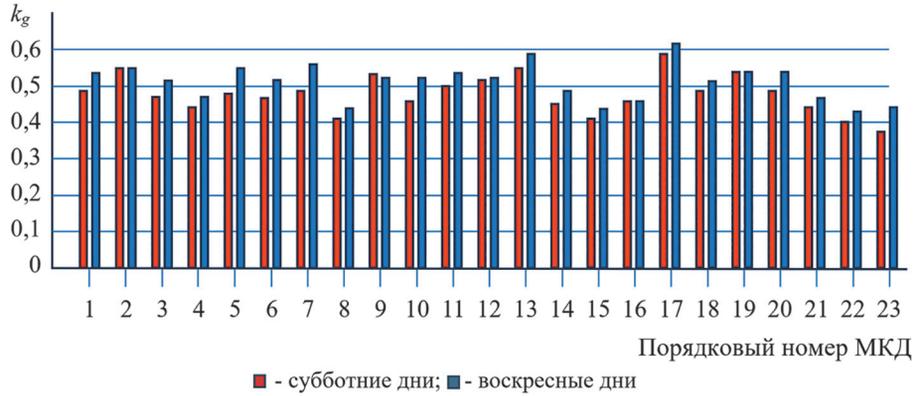


Рис. 4. Диаграмма гармонических коэффициентов выборки МКД Москвы
 Fig. 4. Harmonic coefficient diagram of a sample of apartment buildings in Moscow

Таблица 1

Проверка крайних значений выборки коэффициентов гармонических искажений k_{g6}
Testing the extreme values of the sample of harmonic distortion coefficients k_{g6}

Значение k_{g6} , отн.ед.	Критерий Граббса (p -value)
0,379	0,615 > 0,05
0,584	0,472 > 0,05

среднее значение $n_{cp} - 0,48$ кВт/кв.;
 среднее квадратичное отклонение $S_d - 0,05$ кВт/кв.;
 медиана $M_e - 0,48$ кВт/кв.;
 минимальное значение $n_{мин} - 0,38$ кВт/кв.;
 максимальное значение $n_{макс} - 0,58$ кВт/кв.;
 первый квартиль $Q_{25\%} - 0,20$ кВт/кв.;
 третий квартиль $Q_{75\%} - 0,45$ кВт/кв.
 На рис. 5–8 представлены графики и диаграммы, соответствующие нормальному закону распределения коэффициентов k_{g6} (табл. 2).

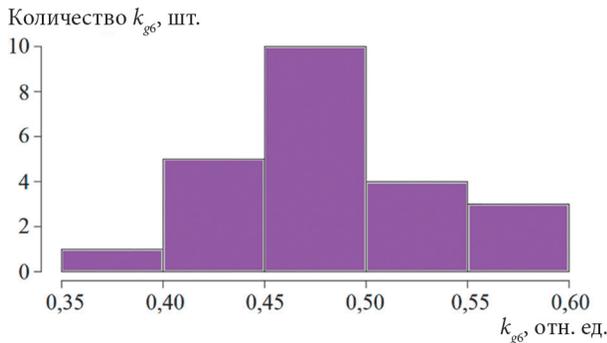


Рис. 5. Гистограмма распределения гармонических коэффициентов для субботних дней
 Fig. 5. Histogram of the harmonic coefficient's distribution for Saturdays

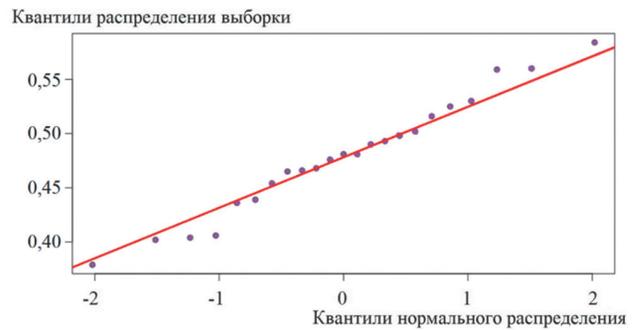


Рис. 7. Нормально-вероятностный график гармонических коэффициентов для субботних дней
 Fig. 7. Normal probability graph of harmonic coefficients for Saturdays

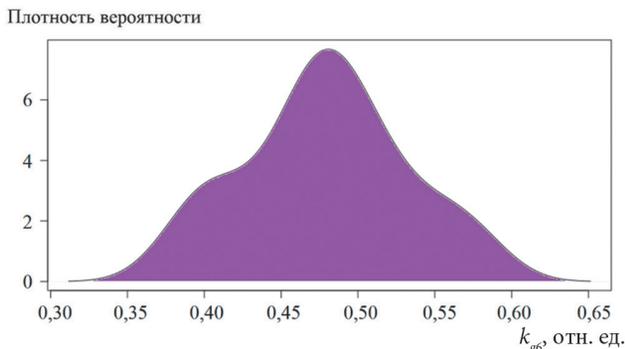


Рис. 6. Плотность распределения вероятности для субботних дней, полученная методом «ядерного сглаживания»
 Fig. 6. Probability density function obtained using the "kernel smoothing" method for Saturdays

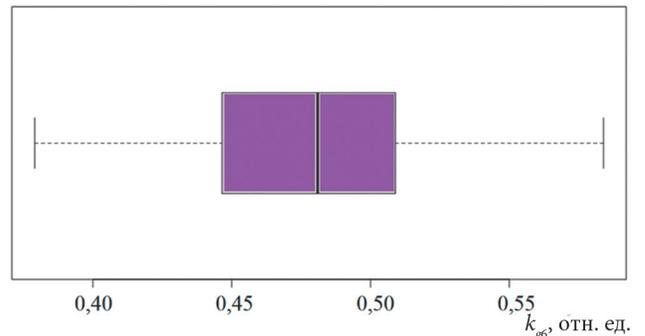


Рис. 8. Ящичная диаграмма коэффициентов гармонических искажений выборки МКД Москвы для субботних дней
 Fig. 8. Box plot of harmonic distortion coefficients of a sample of Moscow apartment buildings for Saturdays

Таблица 2

Результаты проверки гипотезы о нормальном распределении k_{g6} выборки МКД Москвы для субботних дней
Results of testing the hypothesis on the normality of the distribution of k_{g6} of the sample of apartment buildings in Moscow for Saturdays

Название теста	Шапиро–Уилка	Лилли–Форса	омега-квадрат	Андерсона–Дарлингга	хи-квадрат Пирсона
<i>p-value</i>	0,899 > 0,05	0,871 > 0,05	0,902 > 0,05	0,892 > 0,05	0,687 > 0,05

Табл. 2 подтверждает закон нормального распределения гармонических коэффициентов k_{g6} .

О репрезентативности выборки свидетельствуют величины: объем выборки 23 шт.; ее минимальный объем 20 шт.

Аналогичные расчеты были выполнены для МКД Москвы и по воскресным дням, подтвердившие нормальное распределение гармонических коэффициентов k_{g7} и репрезентативность выборок. В табл. 3 сведены результаты расчетов за субботу и воскресенье.

Среднее значение четырех коэффициентов (табл. 3) составляет 0,494; отклонения значений k_{g6} и k_{g7} 2,6 %. Это позволяет принять гипотезу об идентичности ГЭН МКД за выходные дни в пределах статистической погрешности и позволяет использовать типовые ГЭН за наиболее нагруженные выходные дни.

Типовые ГЭН МКД. Для удобства использования типовых ГЭН их следует задавать в аналитическом виде, для чего использован спектральный анализ экспериментально полученных суточных ГЭН МКД Москвы и Московской области (МО) за декабрь 2022 г. На рис. 9 приведен спектральный состав одного из таких графиков, где видно, что при исследовании можно ограничиться четвертой гармоникой (остальные пренебрежимо малы). Для всех ГЭН других обследованных МКД результат аналогичный.

На рис. 10 приведены ступенчатые обобщенные (типовые) суточные графики максимальной мощности, которые аппроксимированы гармоническими ря-

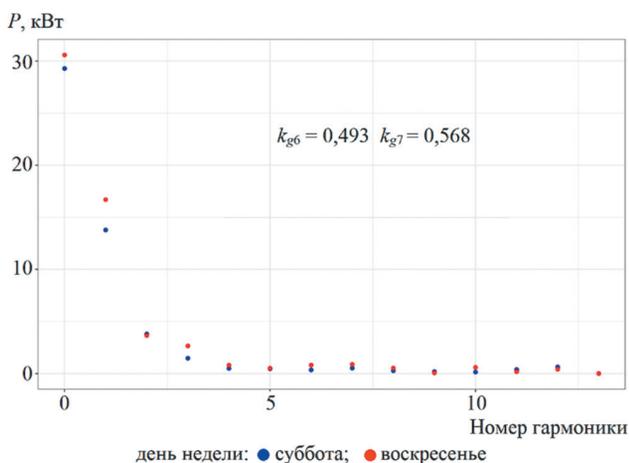


Рис. 9. Гармонический состав суточного ГЭН

Fig. 9. Harmonic composition of the daily load schedule

Таблица 3

Результаты расчета для среднего значения генеральной совокупности
Calculation results for the average value of the general population

Гармонический коэффициент	Среднее выборочное значение	Доверительный интервал для среднего значения генеральной совокупности
k_{g6}	0,479	0,456–0,502
k_{g7}	0,508	0,487–0,530

дами из четырех гармоник. Исходные графики получены выбором максимального значения мощности из всех ГЭН (рис. 1) на каждом получасовом интервале времени наблюдения. Аналитически типовые графики максимальной мощности задаются функциями:

для выходных дней (рис. 10,а):

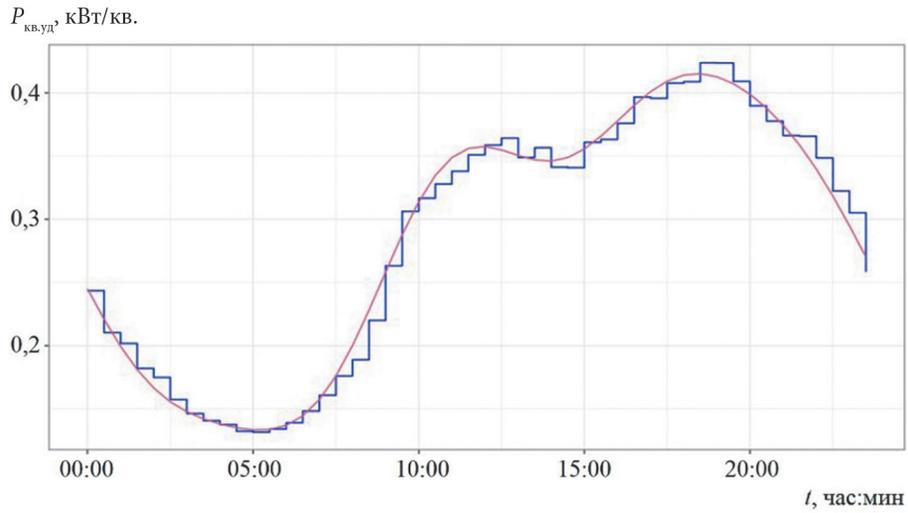
$$f(t) = 0,2862 + 0,1341 \cos(0,2618t + 1,9076) + 0,0348 \cos(0,5236t + 1,1926) + 0,0169 \cos(0,7854t - 2,3547) + 0,0087 \cos(1,0472t + 1,3178), \text{ кВт / квартира}; \quad (3)$$

для рабочих дней (рис. 10,б):

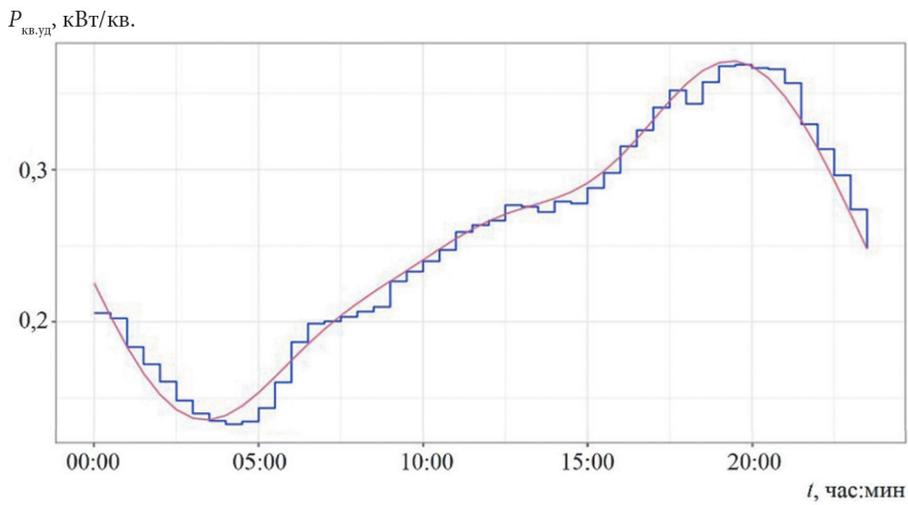
$$f(t) = 0,2532 + 0,0955 \cos(0,2618t + 1,7402) + 0,0380 \cos(0,5236t + 1,1832) + 0,0056 \cos(0,7854t + 2,4948) + 0,0030 \cos(1,0472t - 0,5862), \text{ кВт / квартира}. \quad (4)$$

Аналогичные расчеты были выполнены для ГЭН МКД МО. В качестве примера на рис. 11 представлены результаты измерений по 156 ВРУ за воскресные дни.

Все полученные обобщенные типовые графики удельной нагрузки квартир, аппроксимированные гармоническими рядами, представлены на рис. 12, где ГЭН 1–3 относятся к МКД МО, а пунктирные графики 4–6 – к МКД Москвы. Очевидное различие ГЭН рабочих и выходных дней, где они практически совпадают и достаточно использовать единый график 3 (рис. 12), свидетельствует о необходимости набора из двух типовых ГЭН для оценки располагаемой мощности для ЭЭС на рабочие и выходные дни недели. В то же время, однотипные ГЭН МКД Москвы и МО настолько близки (среднеквадратичная ошибка менее 5 %), что можно распространить (3) и (4) и на МКД МО.



a)



б)

Рис. 10. Обобщенные (типовые) суточные графики удельной нагрузки МКД для выходных (а) и рабочих (б) дней в месяц наибольшего электропотребления

Fig. 10. Generalized (typical) daily schedules of the specific load of apartment buildings for weekends (a) and working (б) days in the month of highest electricity consumption

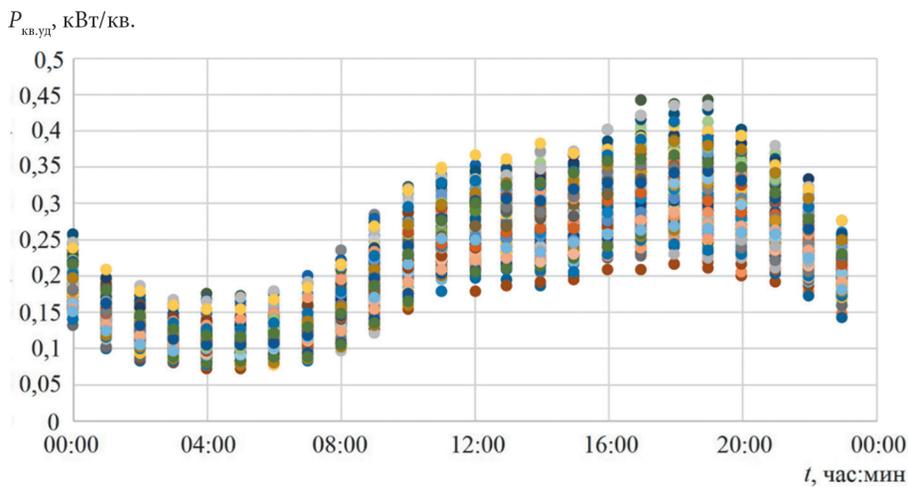


Рис. 11. Удельная нагрузка квартир МКД МО за воскресные дни декабря 2022 г.

Fig. 11. Specific load of apartments in Moscow region apartment buildings for Sundays in December 2022

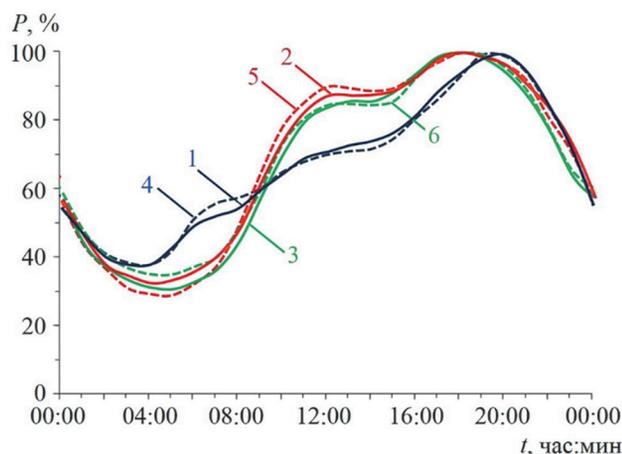


Рис. 12. Приведенные к одному максимуму типовые ГЭН квартир: 1, 4 – графики рабочего дня; 2, 5 – графики субботы; 3, 6 – графики воскресенья

Fig. 12. Typical apartment load charts reduced to one maximum: 1, 4 – working day schedules; 2, 5 – Saturday schedules; 3, 6 – Sunday schedules

Обсуждение результатов. На ГЭН выходных дней 2, 3 и 5, 6 (рис. 12) выражен дневной максимум нагрузки, отсутствующий на ГЭН рабочих дней 1 и 4. Относительно малая длительность ночного провала мощности может быть объяснена программируемым запуском мощной бытовой техники с целью использования более дешевого тарифа на электроэнергию. ГЭН рабочих дней 1 и 4 (рис. 12) могут считаться одинаковыми, описываемыми (4), так как их расхождение δ , оцениваемое (5), менее 5 %:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{48} \sum \left(\frac{\Delta P_n}{P_{sn}} \right)^2} 100\%, \quad (5)$$

где P_{sn} – среднее значение удельной мощности на n -й отсечке времени; ΔP_n – разница между значениями удельной мощности двух ГЭН.

Аналогичный результат получен для выходных дней для МКД Москвы и МО (может использоваться (3)). Обобщенные графики 3 и 4 (рис. 12) на этапе проектирования системы электроснабжения микрорайона дают возможность учитывать в пределах суток вариации потребляемой МКД мощности, что позволяет оценивать располагаемую мощность ЭЭС при максимальном электропотреблении МКД и доступную электроэнергию на различных интервалах времени.

Сравнение формул (3) и (4) показывает, что имеет место существенное отличие амплитуд первых гармоник на уровне 40 % и принципиальное отличие 3-й и 4-й гармоник, где изменились знаки фазового сдвига. Именно эти гармоники повлияли на форму графиков 1 и 4 (рис. 12), исключив из них локальный дневной максимум нагрузки. По суточным ГЭН (рис. 1–3 и 11) можно заметить, что изменяется уровень гармоник в сравнении с постоянной составляющей нагрузки, кото-

рую можно отождествить с удельным суточным электропотреблением. Количественная оценка такой зависимости представлена на рис. 13. Как видно из рис. 13, тренд изменения гармонического коэффициента показывает его снижение с ростом удельного среднесуточного электропотребления. Это означает соответствующее сжатие диапазона вариации суточной нагрузки МКД, что необходимо учитывать при проверке перегрузочной способности трансформаторов в аварийных режимах и оценке располагаемой электроэнергии на протяжении суток для ЭЭС.

Удельная максимальная нагрузка в выходные дни примерно на 10 % больше, чем в рабочие, а на отсечке 10:00 удельная нагрузка выше на 25 %. Качественно такой результат ожидаем, а в количественном отношении говорит о том, что в зимнее время, когда в выходные дни резко сокращаются поездки за город в сады и на дачи, медленные ЭЭС могут и не обеспечить потребности в подключениях владельцев ЭМ. Типовые графики позволяют рассчитать тип и количество ЭЭС в зависимости от количества квартир в МКД и прогноза роста частного электротранспорта.

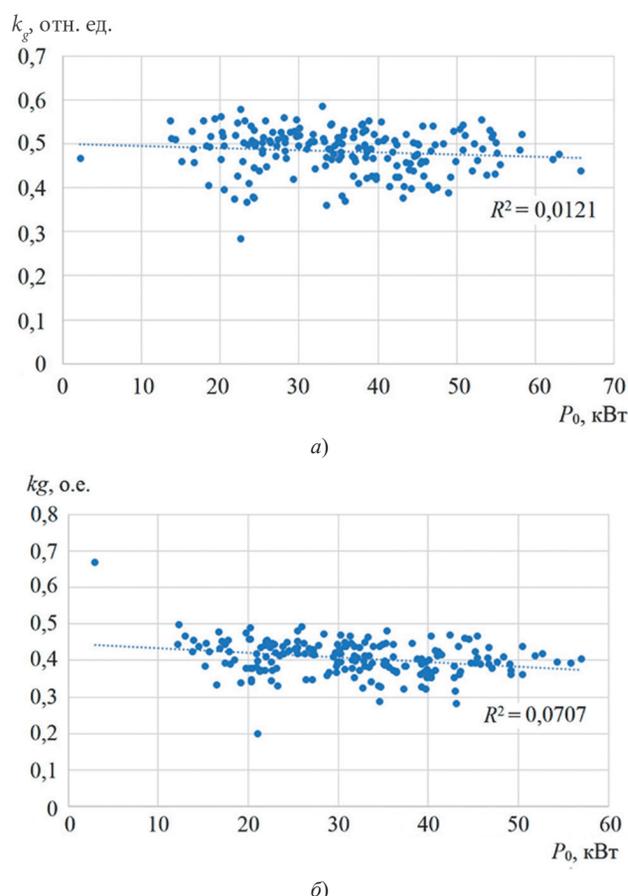


Рис. 13. Зависимость гармонического коэффициента за выходные (а) и рабочие (б) дни от удельного среднесуточного электропотребления

Fig. 13. Dependence of the harmonic coefficient for weekends (a) and working days (b) on the specific average daily electricity consumption

Полученные графики описывают изменение нагрузки квартир в декабре на примере Москвы и МО, когда имеет место максимальное электропотребление. На остальные месяцы они не распространяются: питающие трансформаторы и электрические сети выбираются по максимальной нагрузке, а для ЭЗС важная информация о доступности электроэнергии в разрезе наиболее нагруженных суток. Очевидно, что для южных регионов страны, где летом интенсивно и в массовом количестве используются кондиционеры, формулы (3) и (4) неприемлемы.

ГЭН ДОУ и СОШ. На рис. 14 в качестве иллюстрации приведены ГЭН за одни сутки ДОУ и СОШ Москвы. Визуальный анализ показывает их большое разнообразие по максимальной удельной мощности и форме, что предполагает отсутствие возможности по-

лучения типового ГЭН. Тем не менее, можно констатировать определенные закономерности ГЭН, которые имеют значение для прогнозирования режимов работы ЭЗС, питающихся либо через ВРУ ДОУ или СОШ, либо через ВРУ МКД, которые подключены к общей ТП с ДОУ или СОШ.

Для ДОУ рост нагрузки может начинаться уже с 05:00, в СОШ зафиксирован рост нагрузки с 06:00. Снижение нагрузки приблизительно до 50 % максимальной для ДОУ происходит в интервале 11:30–13:00, за исключением одного ДОУ с самой большой удельной нагрузкой. Для СОШ этот интервал смещен и ожидается шире: снижение нагрузки приходится на интервал 12:00–18:00. Таким образом, вечерняя максимальная нагрузка МКД в рабочие дни наступает, когда нагрузки ДОУ и СОШ менее 50 % дневного максимума.

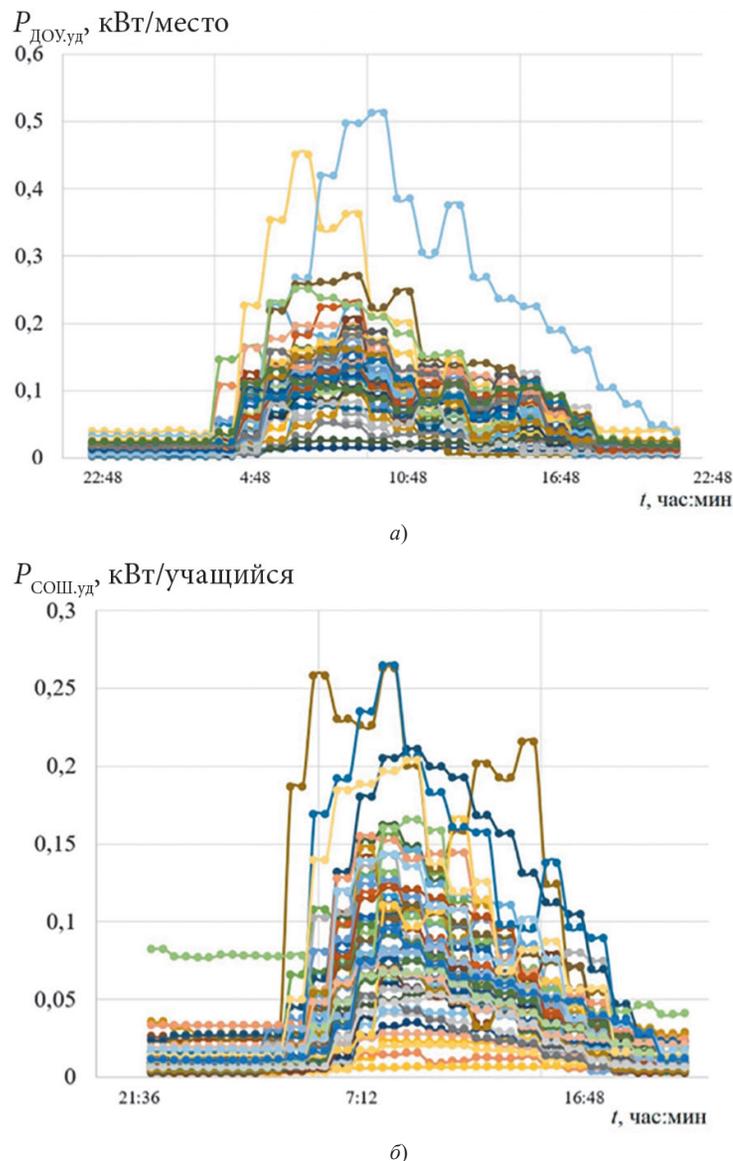


Рис. 14. Суточные графики удельной нагрузки: а – ДОУ и б – СОШ Москвы

Fig. 14. Daily graphs of specific load: a – preschool educational institutions in Moscow; б – secondary educational institutions in Moscow

Обсуждение результатов. Суточные графики изменения удельной мощности ДООУ и СОШ, несмотря на отсутствие выраженных общих закономерностей, имеют следующее применение. Во-первых, они позволили рассчитать (рис. 15) коэффициенты несовпадения максимумов нагрузки ДООУ и СОШ с МКД ($k_{\text{ДООУ}} = 0,35$ и $k_{\text{СОШ}} = 0,38$). Это означает, что по окончании рабочего дня, когда подключаются электромобили к ЭЗС на парковках МКД в часы их максимальной нагрузки, с ней на подстанции суммируется 35 %-я нагрузка ДООУ или 38 %-я нагрузка СОШ. В [23] приводятся большие значения коэффициентов: $k_{\text{ДООУ}} = 0,4$ и $k_{\text{СОШ}} = 0,4$.

Во-вторых, работа медленных ЭЗС, обслуживающих работников образовательных учреждений, не пересекается с максимумом нагрузки МКД. На рис. 16 приведен пример длительной зарядной сессии на ЭЗС номинальной мощностью 11 кВт, реализованной при начальном заряде аккумулятора ЭМ 23 %.

Пример. Рассмотрим технологию применения ГЭН на примере выбора ЭЗС для автомобилей сотрудников

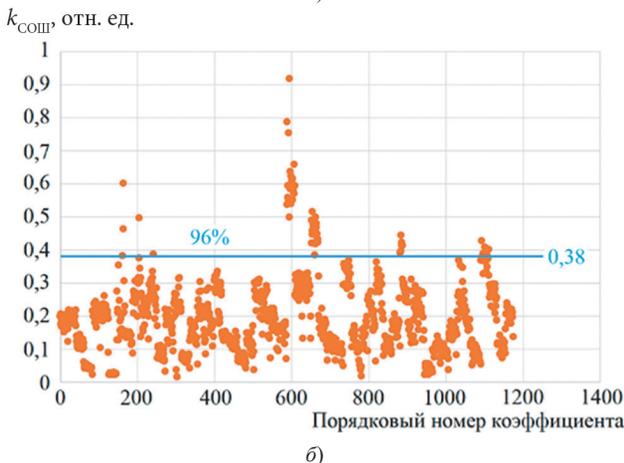
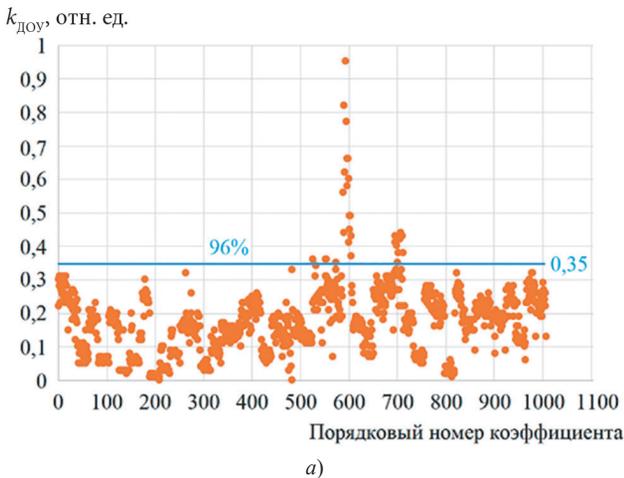


Рис. 15. Коэффициенты несовпадения максимумов нагрузки: а – сочетание МКД и ДООУ; б – сочетание МКД и СОШ

Fig. 15. Load maximum mismatch coefficients: а – combination of apartment building and children's educational institution; б – combination of apartment building and school educational institution

ДООУ. ЭЗС подключены к ВРУ ДООУ. В свою очередь, МКД и ДООУ подключены к общей ТП.

Исходные данные: общее количество квартир в МКД 1500, мощность общедомовых силовых нагрузок (ОДН) 200 кВт. По [23] вычисляем, что расчетная мощность МКД $P_{\text{МКД}} = 0,81(0,61 \cdot 1500) + 0,9 \cdot 200 = 920,15$ кВт. Для ДООУ примем число воспитанников 250, тогда расчетная суммарная нагрузка на ТП в часы максимума нагрузки МКД $P_{\Sigma} = 920,15 + 0,4(0,46 \cdot 250) = 966,15$ кВт. С учетом аварийной нагрузки мощность технологического присоединения 1100 кВт. Таким образом, расчетная располагаемая мощность в часы максимума нагрузки для ЭЗС равна 133,85 кВт.

Если теперь обратиться к (3), то для 1500 квартир в выходной день получаем максимальную нагрузку на ТП:

$$P = 0,42 \cdot 1500 + 0,9 \cdot 200 = 810 \text{ кВт}, \quad (6)$$

что в результате повышает располагаемую мощность для ЭЗС в вечерние часы до 244 кВт.

Электроэнергия, доступная для ЭЗС без учета ДООУ за каждые выходные сутки, составит

$$W_{\text{ЭЗС}} = (1100 - 0,2862 \cdot 1500 - 0,9 \cdot 200)24 = 11777 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (7)$$

В рабочие дни получаем максимальную нагрузку на подстанции

$$P = 0,38 \cdot 1500 + 0,9 \cdot 200 + 0,4(0,46 \cdot 250) = 796 \text{ кВт}, \quad (8)$$

которая ниже нагрузки выходного дня.

Учитывая ночное наружное освещение территории ДООУ, можно полагать, что всего доступно 11700 кВт·ч электроэнергии для ЭЗС.

Таким образом, установка двух медленных ЭЗС мощностью 2·11 кВт оставляет запас по мощности для быстрых ЭЗС, устанавливаемых на парковочных местах МКД, равный 222 кВт. В ночные часы он повышается до

$$\Delta P = 1100 - (0,13 \cdot 1500 + 0,9 \cdot 200) = 725 \text{ кВт}. \quad (9)$$

Системы управления ЭЗС, подробно описанные в [24], позволяют спланировать наиболее эффективные

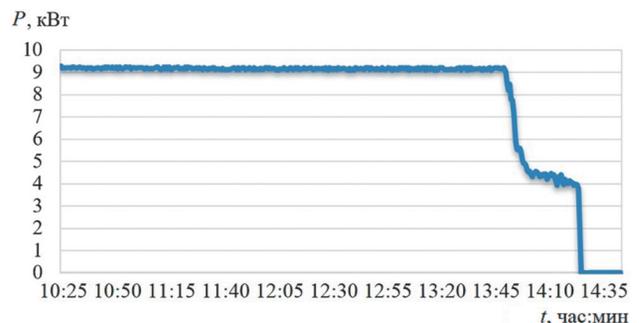


Рис. 16. График нагрузки медленной ЭЗС

Fig. 16. Load schedule of a slow electric charging station

режимы работы ЭЭС по известным значениям максимальной и минимальной доступной мощности и располагаемой суточной электроэнергии. В случае аварийной нагрузки ЭЭС автоматически отключаются.

Выводы. Действующие нормативные документы направлены на расчёт максимальной мощности жилых и общественных зданий, что необходимо при выборе проводников, ТП и коммутационного электрооборудования. Но они уже не в полной мере отвечают потребностям интенсивной интеграции зарядной инфраструктуры в системы электроснабжения городов, поскольку для выбора оптимального количества и мощности ЭЭС требуется информация о суточном изменении мощности в узлах их подключения.

Данные о минимальных нагрузках объектов позволяют выбрать номинальную мощность ЭЭС, а данные по суточному электропотреблению обеспечивают на стадии проектирования информацией, необходимой для оценки пропускной способности ЭЭС в конкретном микрорайоне.

Актуальность выполненных измерений суточных ГЭН МКД подкрепляется их сопоставлением с аналогичными ГЭН 30-летней давности [25–27]. Сравнение показывает значимое расхождение, что объясняется изменившимися характеристиками электропотребления и составом бытовых электроприборов. Исследования показали, что суточные графики удельной электрической нагрузки МКД практически совпадают в выходные дни. В рабочие дни суточные графики не имеют локального максимума, наибольшая нагрузка смещена на более позднее время. Это означает, что необходимо иметь два вида типовых суточных графиков удельной нагрузки. Они могут использоваться в регионах с климатическими условиями, близкими к условиям Москвы. Для южных регионов страны и Крайнего Севера требуются отдельные исследования.

Декабрьские измерения использовались для учета максимального электропотребления МКД, когда наиболее загружены питающие трансформаторы и наименьшая располагаемая мощность для ЭЭС. Анализ двухлетнего наблюдения за нагрузкой МКД [6] показывает, что в осенний период, накануне начала отопительного сезона, имеют место нагрузки, близкие к декабрьским, для которых пригодны полученные типовые ГЭН. В остальные времена года они ниже, что повышает располагаемую мощность для ЭЭС.

Типовые ГЭН МКД могут использоваться на стадии проектирования микрорайонов при расчете суммарной нагрузки на шинах ТП и распределительных пунктов, питающих МКД. Натурные измерения ГЭН ДОУ и СОШ показали, что при одинаковых базовых характеристиках объектов (количество воспитанников/учеников, площадь) максимальные значения нагрузок могут отличаться в 1,5–2 раза и более. Суммирование их нагрузок с типовыми ГЭН МКД возможно только расчетной постоянной мощностью с учетом коэффици-

ента несовпадения максимума нагрузки.

Типовые ГЭН вполне адекватно отображают динамику изменения нагрузки группы квартир на уровне МКД в течение суток. При этом следует иметь в виду, что они являются интегральной оценкой нагрузки на получасовых интервалах её измерения. В [28] показано, что пятиминутные интервалы осреднения фиксируют локальные набросы нагрузки, не проявляющиеся на получасовых интервалах. Однако на выбор трансформаторной мощности, электропроводок и оценку располагаемой мощности и энергии для ЭЭС они не влияют. В то же время, коммутационные аппараты должны согласовываться с такими всплесками.

При подключении ЭЭС к ВРУ уже эксплуатируемых ДОУ и СОШ в целях организации парковочных мест для их сотрудников ограничением по мощности служит сечение питающих линий. Поскольку по нормативам сечение выбирается с учетом работы противопожарных систем дымоудаления, то на эту величину всегда имеется резерв мощности. Для его использования системы управления ЭЭС должны гарантировать их отключение при срабатывании противопожарной сигнализации.

Для практического использования полученных результатов исследования необязательно их закрепление на уровне нормативных документов, поскольку они предназначены в первую очередь для согласованного с возможностями системы электроснабжения выбора количества и мощности ЭЭС и не касаются применяемых коммутационных аппаратов и цепей питания.

В статье использованы материалы научно-исследовательской работы, выполненной по заданию федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», договор № 32413301943–2/2024 от 03.04.2024 г. на «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по исследованию энергопотребления и определению расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки общественных и многофункциональных зданий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырин П.А., Халютин С.П. Производство систем электропитания для автономных электротранспортных средств в России. – Электричество, 2023, № 2, с. 13–26.
2. Чжан К., Коровкин Н.В., Тан М. Анализ спроса на зарядку электромобилей в Ланьчжоу (Китай). – Электричество, 2024, № 9, с. 52–59.
3. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. М.: ИНФРА-М, 2017, 416 с.
4. Маньков В.Д. Основы проектирования электроснабжения. Справочное пособие. СПб.: УМИТЦ Электросервис, 2010, 664 с.
5. Солуянов Ю.И. и др. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов в Республике Татарстан. – Электричество, 2021, № 6, с. 62–71.

6. **Солуянов Ю.И. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области. – Электричество, 2023, № 7, с. 52–65.

7. **Морсин И.А., Шведов Г.В.** Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов. – Промышленная энергетика, 2023, № 7, с. 22–29.

8. **Илюшин П.В.** Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2022, № 6(75), с. 64–74.

9. **Илюшин П.В.** Разработка схем выдачи мощности объектов распределенной генерации с учетом особенностей современных генерирующих установок. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 2(53), с. 28–35.

10. **Лоскутов А.Б. и др.** Интеллектуальные распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией. – Промышленная энергетика, 2013, № 12, с. 3–7.

11. **Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В.** Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре. – Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2016, № 3(114), с. 85–94.

12. **Лоскутов А.Б. и др.** Городские распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией. – Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2013, № 5(102), с. 309–315.

13. **Соснина Е.Н., Липужин И.А., Крюков Е.В.** Перспективы внедрения гексагональных распределительных электрических сетей. – Инженерный вестник Дона, 2013, № 4(27), с. 67.

14. **Надтока И.И., Павлов А.В.** Повышение точности расчёта электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами. – Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2015, № 2(183), с. 45–48.

15. **Таваров С.Ш. и др.** Метод прогнозирования и расчёта электрической нагрузки коммунально-бытовых потребителей в условиях неопределённости. – iPolytech Journal, 2023, т. 27, № 3, с. 565–573.

16. **Vyalkova S., Nadтока I., Korniyukova O.** Application of Neural Networks to Predict Power Consumption of a Megapolis. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2023, pp. 949–953, DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139236.

17. **Vyalkova S., Nadтока I.** Analysis of Hybrid Model Error of Short-Term Forecast of Energy Consumption in Moscow. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2021, pp. 802–806, DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446344.

18. **Солуянов Ю.И. и др.** Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков. – Электричество, 2024, № 4, с. 36–50.

19. **Соловьёва А.С., Шведов Г.В.** Сравнительный анализ зимних и летних графиков электрической нагрузки рабочих и выходных дней многоквартирных домов с электроплитами в системах электроснабжения крупных городов. – Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2023, т. 23, № 1, с. 27–37.

20. **Куликов А.Л., Севостьянов А.А., Илюшин П.В.** Оценка искажений напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий. – Электричество, 2024, № 5, с. 32–48.

21. **Гореева Н.М., Демидова Л.Н.** Статистика. М.: Прометей, 2019, 496 с.

22. **James G. et al.** An Introduction to Statistical Learning with Applications in R, 2nd ed. Cham, Springer, 2021, 612 p.

23. **СП 256.1325800.2016.** Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. М.: ФГБУ «РСТ», 2022, 168 с.

24. **Гвоздев Д.Б. и др.** Принципы интеллектуального управления зарядными станциями для электромобилей. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2022, № S1(24), с. 8–14.

25. **Тулчин И.К., Нудлер Г.И.** Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. М.: Энергоатомиздат, 1990, 480 с.

26. **Козлов В.А., Билик Н.И., Файбисович Д.Л.** Справочник по проектированию электроснабжения городов. Л.: Энергоатомиздат, 1986, 254 с.

27. **Козлов В.А.** Городские распределительные электрические сети. Л.: Энергониздат, 1982, 224 с.

28. **Надтока И.И. и др.** Влияние длительности интервала измерения электроэнергии на точность определения максимальной нагрузки по нагреву. – Промышленная энергетика, 2022, № 12, с. 21–25.

Поступила в редакцию [16.11.2024]
Принята к публикации [28.11.2024]

Авторы:



Солуянов Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, президент, Ассоциация «Росэлектромонтаж»; председатель совета директоров, АО «Татэлектромонтаж», Казань, Россия; info@roselmon.su



Федотов Александр Иванович – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова», Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия; fed.ai@mail.ru



Солуянов Владимир Иванович – начальник первого казанского монтажного управления, АО «Татэлектромонтаж»; старший научный сотрудник, Ассоциация «Росэлектромонтаж», Казань, Россия; vs@tatem.ru



Ахметшин Азат Ринатович – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия; ahmetshin.ar@mail.ru



Чернова Наталья Владимировна – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник, Ассоциация «Росэлектромонтаж», Казань, Россия; nv.chernova@list.ru

The Charging Station Choice Coordinated with the Existing Power Supply Systems of Apartment Buildings and Educational Institutions in a Megalopolis

SOLUYANOV Yuriy I. (Association "Roselectromontazh"; JSC Tatelectromontazh, Kazan, Russia) – President; Chairman of the Board of Directors, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

FEDOTOV Alexandr I. (Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia) – Professor of the Power Plants n.a. V.K. Shibanov Dept., Dr. Sci. (Eng.), Professor.

SOLUYANOV Vladimir I. (JSC Tatelectromontazh; Association "Roselectromontazh", Kazan, Russia) – Head of the First Kazan Installation Dept.; Senior Scientific Colleague.

AKHMETSHIN Azat R. (Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia) – Docent of the Power Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.).

CHERNOVA Natal'ya V. (Association "Roselectromontazh", Kazan, Russia) – Leading Researcher, Cand. Sci. (Eng.).

The development of individual electric vehicles entails the need to provide electric charging stations in parking lots in the territories of already established and newly built urban neighborhoods. Their parameters and power consumption volumes must be consistent with the capacity of power supply systems and take into account daily load variations. To assess the available power capacity, the article considers the daily load schedules of apartment buildings on working days and weekends. The daily load power profiles of children's and secondary educational institutions are analyzed, and the load increase and decrease time intervals are estimated. The possibility of using the capacity margin provided for the emergency load is shown. Typical specific daily load schedules of apartment buildings have been developed for use in selecting the electric charging station parameters. The application of harmonic analysis to daily power profiles has shown that the first four harmonic components and a constant component equal to the specific daily power consumption are sufficient for their analytical description. The normal distribution law of the harmonic coefficients characterizing the specific level of harmonics is proved. The statistical identity of the power profiles of apartment buildings in Moscow is shown, and the need to separate them for working days and weekends is justified.

Key words: : harmonic analysis, specific electrical load, multi-apartment residential buildings, electric charging station, typical load schedules

The article uses materials of a research work carried out on the assignment of the federal autonomous institution "Federal Center for Standardization, Standardization and Technical Conformity Assessment in Construction", contract No. 32413301943 – 2/2024 dated 04/03/2024 for "Research and development work on energy consumption research and determination of design electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles, integrated into the electrical installations of public and multifunctional buildings".

REFERENCES

1. Butyrin P.A., Halyutin S.P. *Elektrichestvo* – in Russ. (*Electricity*), 2023, No. 2, pp. 13–26.
2. Chzhan K., Korovkin N.V., Tan M. *Elektrichestvo* – in Russ. (*Electricity*), 2024, No. 9, pp. 52–59.
3. Opoleva G.N. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy i gorodov* (Power Supply to Industrial Enterprises and Cities). M.: INFRA-M, 2017, 416 p.
4. Man'kov V.D. *Osnovy proektirovaniya elektrosnabzheniya. Spravochnoe posobie* (Fundamentals of Power Supply Design. A Reference Guide). SPb.: UMITS Elektroservis, 2010, 664 p.
5. Soluyanov Yu.I. et al. *Elektrichestvo* – in Russ. (*Electricity*), 2021, No. 6, pp. 62–71.
6. Soluyanov Yu.I. et al. *Elektrichestvo* – in Russ. (*Electricity*), 2023, No. 7, pp. 52–65.
7. Morsin I.A., Shvedov G.V. *Promyshlennaya energetika* – in Russ. (*Industrial Power Engineering*), 2023, No. 7, pp. 22–29.
8. Ilyushin P.V. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* – in Russ. (*Electricity. Transmission and Distribution*), 2022, No. 6(75), pp. 64–74.
9. Ilyushin P.V. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* – in Russ. (*Electricity. Transmission and Distribution*), 2019, No. 2(53), pp. 28–35.
10. Loskutov A.B. et al. *Promyshlennaya energetika* – in Russ. (*Industrial Power Engineering*), 2013, No. 12, pp. 3–7.
11. Loskutov A.B., Loskutov A.A., Zyryin D.V. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* – in Russ. (*Proceedings of NNSTU a.n. R.E. Alekseev*), 2016, No. 3(114), pp. 85–94.
12. Loskutov A.B. et al. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* – in Russ. (*Proceedings of NNSTU a.n. R.E. Alekseev*), 2013, No. 5(102), pp. 309–315.
13. Sosnina E.N., Lipuzhin I.A., Kryukov E.V. *Inzhenermy vestnik Dona* – in Russ. (*Engineering Journal of Don*), 2013, No. 4(27), pp. 67.
14. Nadtoka I.I., Pavlov A.V. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* – in Russ. (*Proceedings of Universities. North Caucasian Region. Technical Science*), 2015, No. 2(183), pp. 45–48.

15. **Tavarov S.Sh. et al.** iPolytech Journal, 2023, vol. 27, No. 3, pp. 565–573.
16. **Vyalkova S., Nadtoka I., Korniyukova O.** Application of Neural Networks to Predict Power Consumption of a Megapolis. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2023, pp. 949–953, DOI: 10.1109/ICIEAM 57311.2023.10139236.
17. **Vyalkova S., Nadtoka I.** Analysis of Hybrid Model Error of Short-Term Forecast of Energy Consumption in Moscow. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2021, pp. 802–806, DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446344.
18. **Soluyanov Yu.I. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2024, No. 4, pp. 36–50.
19. **Solov'eva A.S., Shvedov G.V.** *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika – in Russ. (Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering)*, 2023, vol. 23, No. 1, pp. 27–37.
20. **Kulikov A.L., Sevost'yanov A.A., Ilyushin P.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2024, No. 5, pp. 32–48.
21. **Goreeva N.M., Demidova L.N.** *Statistika* (Statistics). M.: Prometey, 2019, 496 p.
22. **James G. et al.** *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, 2nd ed. Cham, Springer, 2021, 612 p.
23. **SP 256.1325800.2016.** *Elektroustanovki zhilyh i obshchestvennyh zdaniy. Pravila proektirovaniya i montazha* (Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Design and Installation Rules). M.: FGBU «RST», 2022, 168 p.
24. **Gvozdev D.B. et al.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2022, No. S1(24), pp. 8–14.
25. **Tul'chin I.K., Nudler G.I.** *Elektricheskie seti i elektrooborudovanie zhilyh i obshchestvennyh zdaniy* (Electrical Networks and Electrical Equipment of Residential and Public Buildings). M.: Energoatomizdat, 1990, 480 p.
26. **Kozlov V.A., Bilik N.I., Faybisovich D.L.** *Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya gorodov* (Handbook of Urban Power Supply Design). L.: Energoatomizdat, 1986, 254 p.
27. **Kozlov V.A.** *Gorodskie raspredelitel'nye elektricheskie seti* (Urban Electric Distribution Networks). L.: Energoizdat, 1982, 224 p.
28. **Nadtoka I.I. et al.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2022, No. 12, pp. 21–25.

Received [16.11.2024]

Accepted [28.11.2024]