

УДК 621.311

Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков

СОЛУЯНОВ Ю.И.¹, ФЕДОТОВ А.И.², АХМЕТШИН А.Р.², ЧЕРНОВА Н.В.¹¹Ассоциация "Росэлектромонтаж", Казань, Россия²КГЭУ, Казань, Россия

При строительстве коттеджных поселков значительные затраты приходятся на системы внешнего и внутреннего электроснабжения. В то же время нормативные данные по удельным электрическим нагрузкам объектов индивидуального жилищного строительства либо отсутствуют, либо не имеют достаточного экспериментального обоснования. Статья посвящена разработке научно-обоснованных значений удельных электрических нагрузок коттеджных поселков. Для ряда коттеджных поселков в городской и сельской местности Республики Татарстан исследовано электропотребление объектов индивидуального жилищного строительства за летний и зимний периоды. Статистический анализ данных электропотребления показал, что для 15 % общего количества коттеджей характерны нетипичные электрические нагрузки, увеличивающие расчетную мощность, что необходимо учитывать при проектировании электроснабжения таких объектов. Среднее значение максимальной получасовой электрической нагрузки 85 % коттеджей поселков является важной характеристикой, позволяющей уточнить нагрузки подстанций и мощности силовых трансформаторов. Установлено, что средние электрические нагрузки для объектов индивидуального жилищного строительства в сельской местности выше, чем в городской черте. Полученные графики удельных расчетных электрических нагрузок и коэффициентов одновременности позволяют разработать нормативный документ для проектирования электрических сетей коттеджных поселков.

Ключевые слова: объекты индивидуального жилищного строительства, удельные электрические нагрузки, электропотребление, электроснабжение, проектирование электрических сетей

Ежегодно в Российской Федерации возводится 232–440 тыс. объектов индивидуального жилищного строительства (ОИЖС) средней площадью порядка 140 м². Доля ОИЖС в общем объеме ввода жилья за последние 5 лет стабильно превышает 40 % (рис. 1), а в первом полугодии 2023 г. составила 58 % (52,1 млн м²) [1]. Строительство идет опережающими темпами, так как к 2030 г. объем ввода ОИЖС запланирован свыше 50 млн м² в год. По данным Федеральной службы государственной статистики наибольший объем ввода ОИЖС приходится на долю Московской области (13 % всего ввода в стране), Краснодарского края (7 %), Ленинградской области (5 %), Республик Татарстан (4 %) и Башкортостан (3 %).

В столичных агломерациях наиболее распространен формат коттеджных поселков (КП). В южных регионах комфортные климатические условия способствуют проживанию в индивидуальных домах. В Республиках Татарстан и Башкортостан популярны собственные дома. Суммарно на пятерку лидеров приходится треть

ОИЖС, на десятку лидеров – 45 % [2]. По данным АО "ДОМ.РФ" опрос Всероссийским центром изучения общественного мнения россиян в 2021 г. по идеальному жилью показал, что в ОИЖС предпочли бы жить 68 % семей (41,6 млн семей). Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года», Федеральный проект «Развитие жилищного строительства на сельских территориях и повышение уровня благоустройства домовладений» способствуют развитию строительства ОИЖС. В количественном отношении объем ввода ОИЖС вырос с 232 тыс. домов в 2018 г. до 440 тыс. в 2022 г.

Доступность индивидуального жилья в значительной мере определяется его стоимостью. По данным РИА РЕЙТЕР на 2022 г. только 11,5 % российских семей могут быть отнесены к семьям со средним достатком. и при сопоставлении текущих и плановых показателей по вводу нового ОИЖС очевидна необходимость поиска путей удешевления стоимости 1 м² ОИЖС.

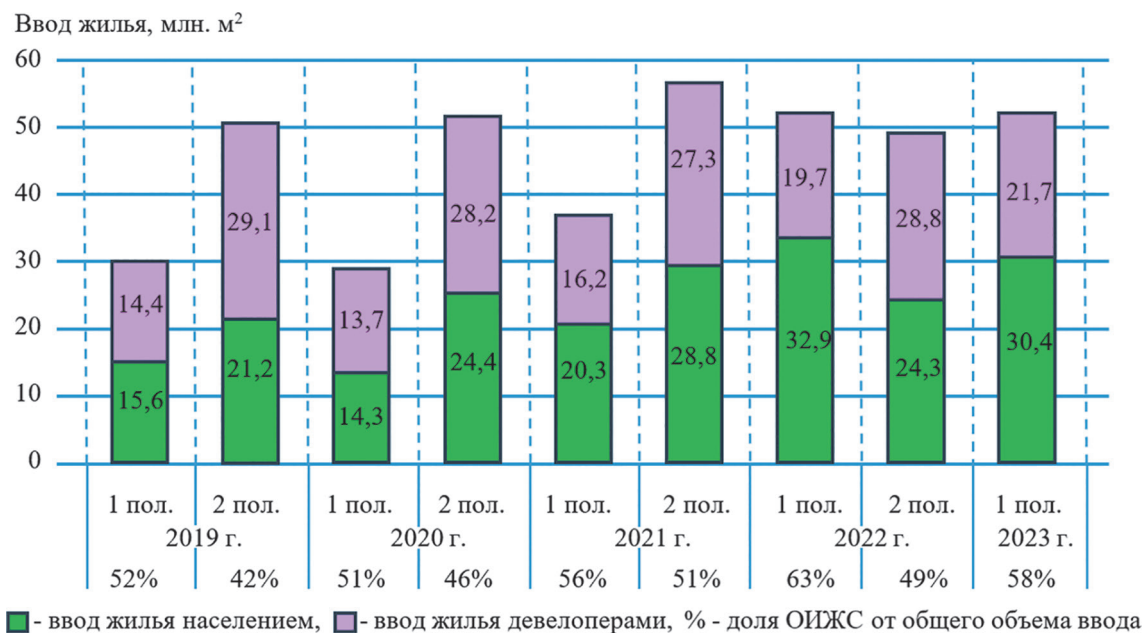


Рис. 1. Динамика ввода ОИЖС по полугодиям за последние 5 лет [1]

Fig. 1. Dynamics of commissioning of individual housing construction projects by half-year over the past 5 years [1]

Одним из направлений снижения затрат является технически грамотное проектирование систем внешнего и внутреннего электроснабжения КП. В последние годы появились публикации, посвященные исследованиям электрических нагрузок многоквартирных жилых домов (МКД). Актуальные данные по удельным электрическим нагрузкам МКД получили научные коллективы в Новочеркасске [3–6], Казани [7], Москве [8–11] на основе исследования суточных графиков электрической нагрузки (ГЭН), а также в Челябинске [12]. Однако по ОИЖС характеристики регионального фактического электропотребления неизвестны. Причем здесь важным фактором, влияющим на электропотребление, является вид отопления. По данным ПАО «Россети» зимой 2022 г. были зафиксированы значительные перегрузки в КП Московской области, превышающие проектные значения, за счет массового использования индивидуальных электрообогревателей. Приведенные в [13] значения электрических нагрузок ОИЖС ориентировочные. Проблемой проектирования систем электроснабжения КП, отвечающих требованиям энерго- и ресурсосбережения, является отсутствие соответствующей информационной базы по удельным электрическим нагрузкам.

В Республике Татарстан при поддержке АО «Сетевая компания» (Казань) специалистами Ассоциации «Росэлектромонтаж» проведены исследования электропотребления ОИЖС коттеджных поселков, расположенных в городской и сельской местности. Цифровая трансформация в электроэнергетике, внедрение интеллектуальных приборов учета электроэнергии [14–18] позволяют проводить мониторинг фактических электрических нагрузок, на основе которого раз-

рабатывать и принимать региональные нормативы. Согласно Федеральному своду правил [19] регионы РФ имеют право самостоятельно утверждать нормативные значения удельных электрических нагрузок при проектировании непромышленных объектов.

Приведенные ниже подходы к обработке данных и полученные результаты могут послужить методической основой для аналогичных работ других научных коллективов. Тем более, что КП весьма разнообразны по общей площади участка и площади собственно дома. В настоящем исследовании такие строительные характеристики не выделялись, рассматривались КП, где площадь участка составляла 600–1000 м², а площадь дома – не более 300 м².

Необходимость проведения исследований электропотребления ОИЖС обусловлена также изменением стоимости технологического присоединения к электрическим сетям, возросшей в соответствии с Федеральным законом от 16.02.2022 № 12-ФЗ «О внесении изменения в статью 23.2 Федерального закона «Об электроэнергетике». Так, в Москве стоимость технологического присоединения за 15 кВт составит 63 840 руб. (4256 руб. за 1 кВт). Тем самым стимулируется снижение мощности, указываемой в заявке на технологическое присоединение, при том, что в любой момент впоследствии она может быть изменена в сторону повышения. Однако для электроснабжающих компаний именно на такие случаи должны быть надежные ориентиры по оценке суммарной электрической нагрузки КП для адекватного выбора питающих электрических сетей на стадии их проектирования. Ими могут стать значения удельных электрических нагрузок ОИЖС. На примере Республики Татарстан

показано, какие особенности выявились при определении их значений.

Оценка электропотребления ОИЖС городских коттеджных поселков (ГКП). Логично предположить, что специфика ОИЖС, связанная с приусадебными территориями, накладывает отпечаток на значение и закономерности распределения электрических нагрузок между домами. Иными словами, некорректно рассматривать многоквартирный дом как квартиру в жилом доме. Как следствие, это предполагает необходимость обоснования соответствующих значений удельных электрических нагрузок ОИЖС. Также ставится задача определения суммарной удельной электрической нагрузки для групп коттеджей, по которой должны выбираться распределительные электрические сети внутри посёлков. Применительно к МКД в [8, 9] было показано, что максимальное суточное электропотребление квартир и их максимальные электрические нагрузки коррелируют между собой, что существенно упрощает сбор исходной информации для последующего расчета удельных электрических нагрузок любого совокупного количества квартир. Предварительно в [20] было показано, что каждый из коррелируемых параметров подчиняется закону нормального распределения. С этой целью проведен анализ данных месячного электропотребления ОИЖС ряда ГКП за зимний период (табл. 1).

Сравнивая данные табл. 1 с аналогичными данными МКД [7–9], можно отметить, что максимальное месячное электропотребление ОИЖС и МКД не совпадает. Это свидетельствует об ином составе электрических нагрузок ОИЖС.

Проверим гипотезу о нормальности распределения выборок 1–7 (табл. 1) с помощью расчетных тестов. Стандартная проверка [21, 22] проводится при уровне значимости 0,05 с помощью тестов Шапиро–Уилка, Лиллиефорса (модифицированный тест Колмогорова–Смирнова), Андерсона–Дарлинга, омега-квадрат (ω^2 , критерий нормальности Крамера-фон Мизеса) и χ -квадрат Пирсона. Нулевая гипотеза H_0 применяемых

тестов заключается в том, что случайная величина, выборка которой известна, распределена по нормальному закону. Альтернативная гипотеза H_1 – в том, что закон распределения не является нормальным. Для всех тестов такого рода принимается утверждение, что если p -value не превышает заданного уровня значимости (обычно 0,05), то тест не отвергает нулевую гипотезу о нормальности распределения данных в выборке. Т.е., если p -value > 0,05, то распределение среднего электропотребления является нормальным [21, 22].

Для части ОИЖС с возможностью снятия получасовых графиков ГКП 1 (71 объект) и ГКП 2 (62 объекта) были записаны значения электрической нагрузки на длительном интервале наблюдения – в течение трех зимних месяцев. Были выбраны сутки с максимальным электропотреблением (как и для МКД [7–9]) и подвергнуты первоначальной статистической обработке. В результате гипотеза о наличии нормального распределения не была подтверждена. После исключения ОИЖС с максимальным суточным электропотреблением (для ГКП 1 – свыше 25,6 кВт·ч, 12 объектов; для ГКП 2 – свыше 28,0 кВт·ч, 10 объектов) для оставшихся 83 % объектов была подтверждена гипотеза о наличии нормального распределения для суточного максимального электропотребления (табл. 2).

Использованный приём альтернативен статической обработке измерений в МКД, где отбраковывались только квартиры с низким уровнем месячного электропотребления, что косвенно свидетельствует о наличии в части ОИЖС нетипичных электроприемников.

Оценка максимальной электрической нагрузки ОИЖС ГКП. Рассматривались те же ГКП 1 и ГКП 2: за зимние сутки с максимальным электропотреблением фиксировалась максимальная электрическая нагрузка каждого коттеджа. Первичная статистическая обработка выборок не подтвердила гипотезу о нормальном распределении максимальных электрических нагрузок ОИЖС. После исключения 15 % коттеджей с наибольшей электрической нагрузкой для оставших-

Таблица 1

Основные показатели по месячному электропотреблению ОИЖС ГКП
Main indicators of monthly electricity consumption of individual housing construction projects
in urban cottage settlements

ГКП	Объем выборки, шт.	Среднее значение электропотребления	Среднеквадратичное отклонение	Медиана	Минимальное значение	Максимальное значение
		кВт·ч в месяц				
1	95	388,60	220,66	334,40	76,39	1069,96
2	88	391,64	280,32	293,35	24,40	1402,00
3	369	282,31	130,37	260,10	81,33	786,08
4	416	510,01	548,72	270,5	91,00	2978,00
5	72	355,19	383,84	244,5	100,00	2668,00
6	160	204,59	142,45	175,67	34,00	985,00
7	129	176,46	148,60	142,00	32,75	1122,00

Таблица 2

**Проверка нормальности распределения
электропотребления**
**Checking the normality of power consumption
distribution**

Название теста	Значение <i>p-value</i>	
	ГКП 1	ГКП 2
Шапиро–Уилка	0,1359 > 0,05	0,068 > 0,05
Лиллиефорса	0,6317 > 0,05	0,302 > 0,05
Омега-квадрат	0,5245 > 0,05	0,102 > 0,05
Андерсона–Дарлингга	0,3642 > 0,05	0,078 > 0,05
χ -квадрат Пирсона	0,6718 > 0,05	0,423 > 0,05

ся выборок подтверждено нормальное распределение максимальных электрических нагрузок, что видно из диаграмм (рис. 2 и 3). Количественные данные приведены в табл. 3.

В табл. 4 приведены аналогичные значения электрической нагрузки, полученные для МКД Москвы и Московской области (МО) [8, 9].

Сравнение данных табл. 3 и 4 показывает принципиальное отличие электрических нагрузок коттеджей и квартир в МКД. При этом наблюдается идентичность объектов для МКД по Москве и МО (табл. 4) и их различие по двум близким коттеджным поселкам (табл. 3).

Аналогично, если для МКД отсекались только квартиры с низким электропотреблением и в результате имело место нормальное распределение их максимальной электрической нагрузки, то применительно к ОИЖС для этого потребовалось исключить 15 % индивидуальных потребителей с наибольшей электрической нагрузкой, что опять подтверждает различный характер электрических нагрузок ОИЖС и квартир МКД.

Оценка максимальной электрической нагрузки ОИЖС сельских коттеджных поселков (СКП). Были рассмотрены 7 коттеджных поселков в сельской местности Республики Татарстан: СКП 1 – 126 объектов (летом охвачено измерениями 312 объектов); СКП 2 – 338; СКП 3 – 116; СКП 4 – 155; СКП 5 – 80; СКП 6 – 103; СКП 7 – 60 объектов. Получасовые графики электрических нагрузок записывались в течение трех летних и зимних месяцев. Приведем результаты расчетов для СКП 1. Первичная проверка не позволила определить закон распределения максимальных электрических нагрузок P_{max} за период наблюдения (рис. 4).

После исключения выбросов из пилотной выборки (19 объектов значениями выше 12,66 кВт/сутки – 15 % всей выборки) полученные результаты представлены на рис. 5 и 6.

Для подтверждения нормальности распределения данных P_{max} сформированной ограниченной выборки СКП 1, полученной в результате исключения выбро-

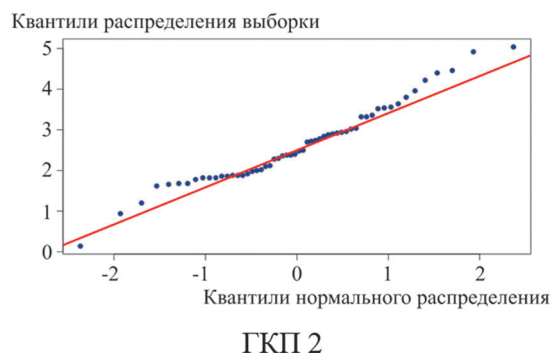
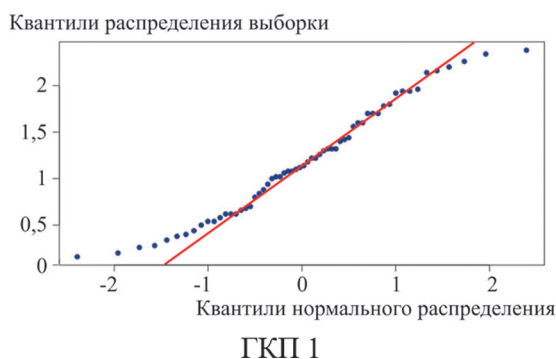


Рис. 2. Графики квантиль-квантиль выборок коттеджей после отбраковки выбросов

Fig. 2. Quantile-quantile plots of cottage samples after rejecting outliers

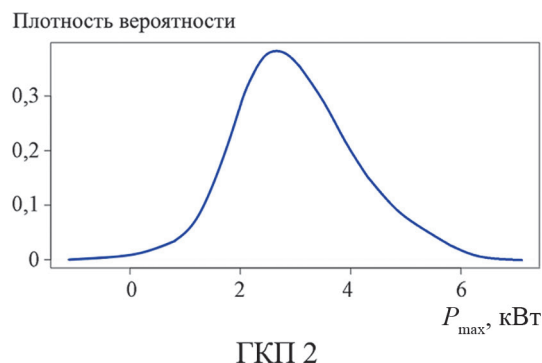
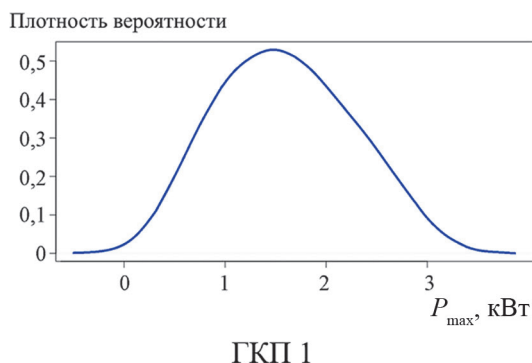


Рис. 3. Плотности распределения вероятностей, полученные методом "ядерного сглаживания" для выборок после отбраковки выбросов

Fig. 3. Probability distribution densities obtained by the "kernel smoothing" method for samples after rejecting outliers

Таблица 3

Среднее выборочное значение и доверительный интервал (95 %) для среднего значения генеральной совокупности ГКП за наиболее загруженные сутки
Sample mean and confidence interval (95%) for the mean value of the general population of urban cottage settlements for the busiest days

ГКП	85 %-я выборка, шт.	Среднее выборочное значение, кВт/коттедж	Доверительный интервал для среднего значения генеральной совокупности, кВт/коттедж
1	60	1,178	1,022–1,334
2	53	2,611	2,351–2,872

Таблица 4

Среднее выборочное значение и доверительный интервал (95 %) для среднего значения генеральной совокупности МКД
Sample mean and confidence interval (95 %) for the population mean of multi-apartment residential buildings

Регион	Объем выборки, шт.	Среднее выборочное значение, кВт/кв	Доверительный интервал для среднего значения генеральной совокупности, кВт/кв
Москва	24	0,425	0,404–0,446
МО	152	0,413	0,403–0,423

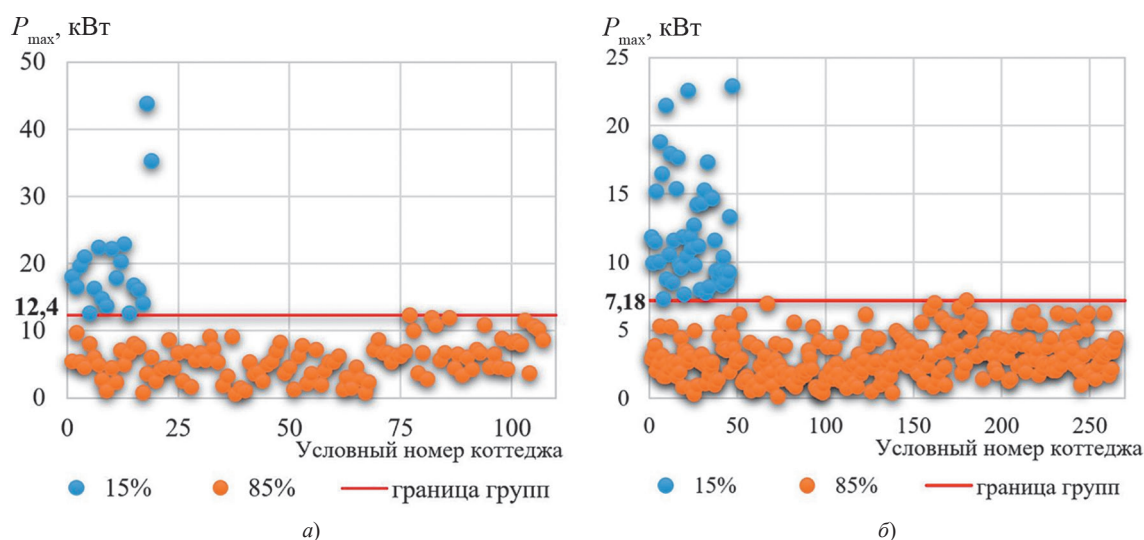


Рис. 4. Точечная диаграмма максимальной получасовой электрической нагрузки пилотной выборки СКП 1 в разрезе зимнего (а) и летнего (б) периодов года

Fig. 4. Scatter diagram of the maximum half-hour electrical load of a pilot sample of rural cottage village No. 1 in the context of winter (a) and summer (b) periods of the year

сов, были выполнены расчетные тесты для зимнего периода (табл. 5).

Плотность вероятности распределения максимальной электрической нагрузки (рис. 5,б), диаграммы рис. 6, как и расчетные тесты (табл. 5), полностью подтверждают соответствие данных оставшихся 85 % выборки нормальному закону распределения.

Расчеты по остальным посёлкам показали, что для СКП 3, 4, 6 и 7 также имеет место нормальное распределение максимальной электрической нагрузки для 85 % выборки после исключения выбросов от 15 % ОИЖС с максимальной пиковой электрической нагрузкой. Результаты расчетов по пяти посёлкам сведены в табл. 6 и 7.

Сравнение табл. 3 и 7 свидетельствует о принципиальном отличии электрических нагрузок ОИЖС в городской и сельской местности (в последней они существенно выше).

Для двух поселков (СКП 2 и 5) исключение коттеджей с максимальной электрической нагрузкой из статистического анализа не позволило определить закон распределения электрической нагрузки. Анализ суточных ГЭН показал, что в СКП 5 для большого количества ОИЖС присутствует значительная постоянная составляющая электрической нагрузки вне зависимости от времени суток, что видно на примере сравнения СКП 1 и 5 (рис. 7). В рассматриваемых поселках имеет место одновременное использование газового и элект-

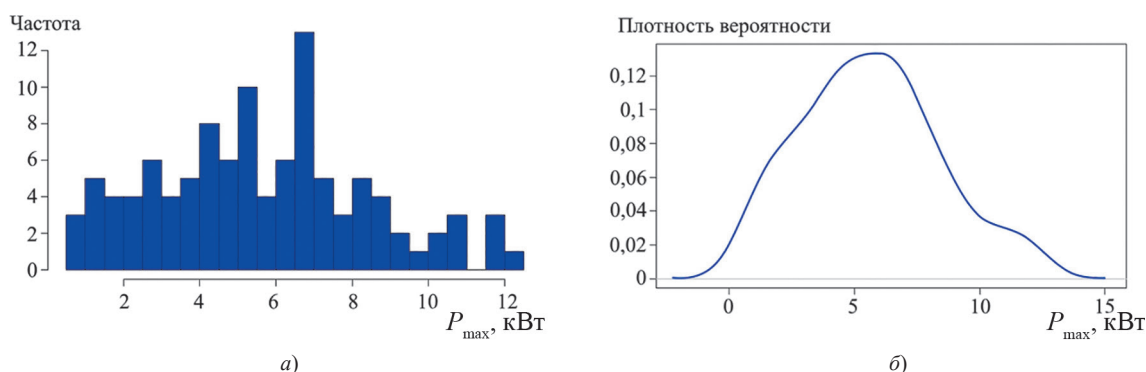


Рис. 5. Гистограмма распределения максимальной электрической нагрузки (а) и плотность распределения вероятности, полученная методом "ядерного сглаживания" (б) выборки СКП 1 после исключения выбросов для зимнего периода

Fig. 5. Histogram of the distribution of the maximum electrical load (a) and the probability density function obtained by the "kernel smoothing" method (b) of the sample of rural cottage village No. 1 after excluding emissions for the winter period

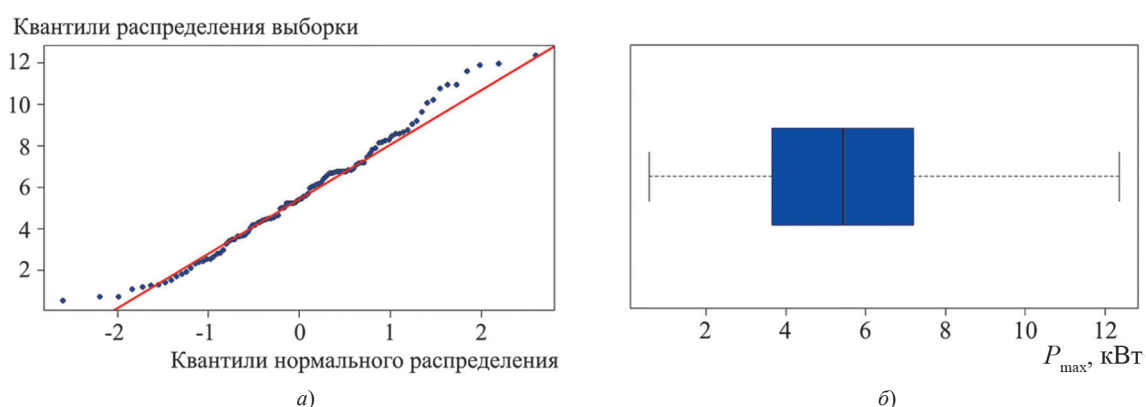


Рис. 6. Графики квантиль-квантиль выборки (а) и ящичная диаграмма (б) максимальной электрической нагрузки СКП 1 после исключения выбросов для зимнего периода

Fig. 6. Sample quantile-quantile plots (a) and box plot (b) of the maximum active power of rural cottage village No. 1 after excluding emissions for the winter period

Таблица 5

Проверка нормальности распределения P_{\max} выборки

Checking the normality of the P_{\max} distribution of a sample

Название теста	Значение p -value
Шапиро-Уилка	0,105 > 0,05
Лиллиефорса	0,777 > 0,05
Омега-квадрат	0,664 > 0,05
Андерсона-Дарлингга	0,423 > 0,05
χ -квадрат Пирсона	0,785 > 0,05

трического отопления. Следует отметить, что в [13, 19] такие объекты разделяют на разные группы по удельной электрической нагрузке.

На рис. 8 приведены максимальные получасовые электрические нагрузки в течение периода наблюдений для группы 85 и 15 % выборок. Видно, что уровень электрических нагрузок ОИЖС в зимний период для всех рассматриваемых СКП значительно выше, чем в

летний. Для региона Среднего Поволжья следует признать этот результат ожидаемым.

На рис. 9 показан диапазон изменения удельных электрических нагрузок относительно общей средней максимальной электрической нагрузки пяти СКП за зимний период года, где 85 % ОИЖС имеют нормальное распределение максимальной электрической нагрузки внутри группы. Среднее значение электрических нагрузок поселков соответствует 8,82 кВт. Вместе со среднеквадратичным отклонением ($\pm 1,91$ кВт) оно дает представление о диапазоне изменения максимальных электрических нагрузок СКП Республики Татарстан.

Среднее значение максимальной получасовой электрической нагрузки и ее среднеквадратичное отклонение 85 % ОИЖС являются важной характеристикой, позволяющей уточнить электрическую нагрузку подстанций, а также мощность их силовых трансформаторов, питающих данные поселки. Полученные результаты уже могут быть использованы для обоснования приближенной методики оценки предельной электрической нагрузки КП. Для этого достаточно использо-

Таблица 6

Базовые статистические показатели распределения максимальной электрической нагрузки коттеджей за период наблюдения

Basic statistical indicators of the distribution of maximum electrical load of cottages during the observation period

СКП	n_{cp}	S_d	M_e	n_{min}	n_{max}	Д	$Q_{25\%}$	$Q_{75\%}$
	кВт/коттедж							
1	5,61	2,79	5,43	0,58	12,36	11,78	3,66	7,19
3	4,77	1,71	4,78	0,59	8,38	7,79	3,93	5,89
4	4,61	1,78	4,54	0,89	8,44	7,55	3,58	5,79
6	4,0	1,84	3,94	0,34	7,92	7,58	2,88	5,05
7	5,75	3,03	5,42	0,2	14,08	13,88	3,24	7,33

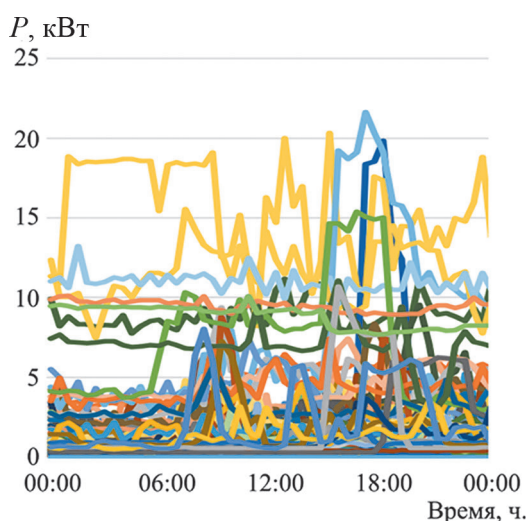
Примечание: n_{cp} – среднее значение, кВт/коттедж; S_d – среднеквадратическое отклонение, кВт/коттедж; M_e – медиана, кВт/коттедж; n_{min} – минимальное значение, кВт/коттедж; n_{max} – максимальное значение, кВт/коттедж; Д – диапазон изменения значений, кВт/коттедж; $Q_{25\%}$ – первый квартиль, кВт/коттедж; $Q_{75\%}$ – третий квартиль, кВт/коттедж.

Таблица 7

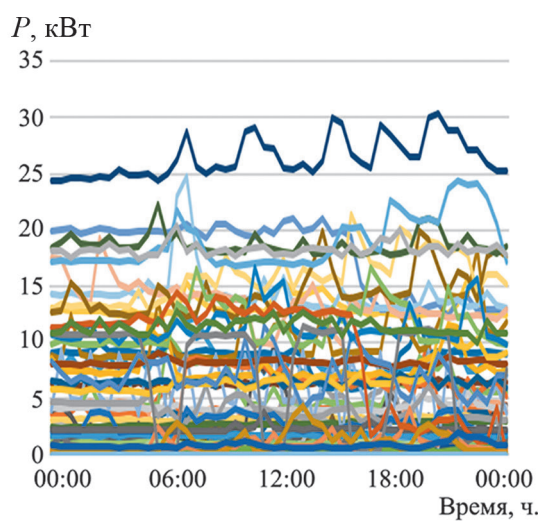
Среднее выборочное значение и доверительный интервал (95%) для среднего значения генеральной совокупности СКП

Sample mean and confidence interval (95%) for the mean value of the general population of rural cottage settlements

СКП	85 %-я выборка, шт.	Среднее выборочное значение, кВт/коттедж	Доверительный интервал для среднего значения генеральной совокупности, кВт/коттедж
1	107	5,613	5,079–6,147
3	99	4,609	4,254–4,965
4	132	4,767	4,472–5,061
6	87	5,107	4,425–5,790
7	60	5,746	4,964–6,527



а)



б)

Рис. 7. Суточные графики электрической нагрузки ОЖИС: а – СКП 1; б – СКП 5

Fig. 7. Electrical load daily graphs of individual housing construction objects: а – in rural cottage village No. 1; б – in rural cottage village No. 5

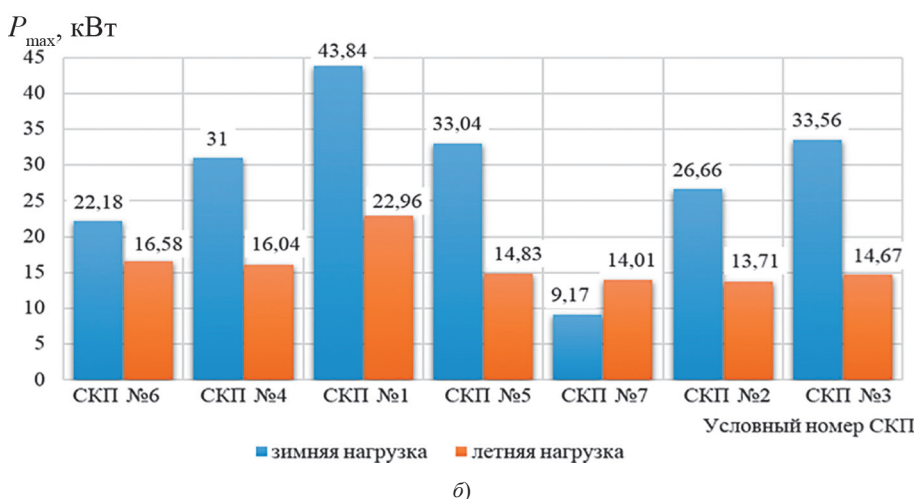
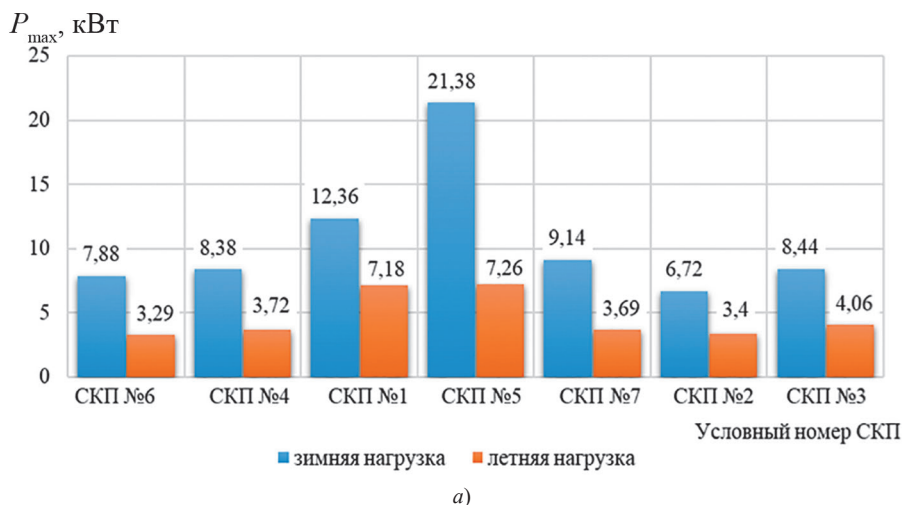


Рис. 8. Диаграмма максимальной электрической нагрузки группы 85 % (а) и группы 15 % (б) объема выборок коттеджей за зимний и летний периоды

Fig. 8. Diagram of the maximum electrical load of the 85 % group (а) and the 15% group (б) of the sample volume of cottages for the winter and summer periods

вать данные рис. 9, которые следует применить к 85 % общего количества ОИЖС, а для оставшихся 15 % коттеджей руководствоваться нагрузками на рис. 10. Очевидно, что результат будет завышен, так как максимальные электрические нагрузки ОИЖС не совпадают во времени.

Расчет удельной электрической нагрузки коттеджей с учетом её одновременности. Рассмотрим определение удельной электрической нагрузки для совокупности ОИЖС на примере застроек СКП 1, 3, 6 и 7, для чего используем их зимние суточные ГЭН. Для каждого поселка формировались группы от 3 до 10 коттеджей в группе – с шагом 1, после 10 – с шагом в 10 коттеджей в группе. Для каждой группы генерировалось по 300 комбинаций коттеджей (300 по 3, 300 по 4 и т.д.). ГЭН коттеджей каждой комбинации группы суммировались за весь период наблюдения данных. По суммарному ГЭН коттеджей каждой комбинации были определены сутки с максимальным потреблением

комбинации группы коттеджей. За эти сутки была найдена максимальная удельная электрическая нагрузка $P_{уд. max}$ в каждой комбинации группы коттеджей (рис. 11). Для каждой сформированной группы рассчитывалось среднее значение электрической нагрузки, и из всех групп выбиралось её максимальное значение. Тем самым создаётся некоторый запас по мощности, так как дни с максимальной электрической нагрузкой групп не совпадают. На рис. 12 представлены точечные графики максимальных электрических нагрузок (любая комбинация электрических нагрузок ОИЖС не выше этих значений).

Использование средних значений электрической нагрузки групп приводит к точечным графикам (рис. 13).

Сравнение рис. 12 и 13 показывает, что переход к средним значениям удельных нагрузок $P_{уд. ср}$ кратно снижает расчетную нагрузку, однако ведет к кратковременным перегрузкам проводников. Для гарантированного запаса по мощности можно принять в качестве

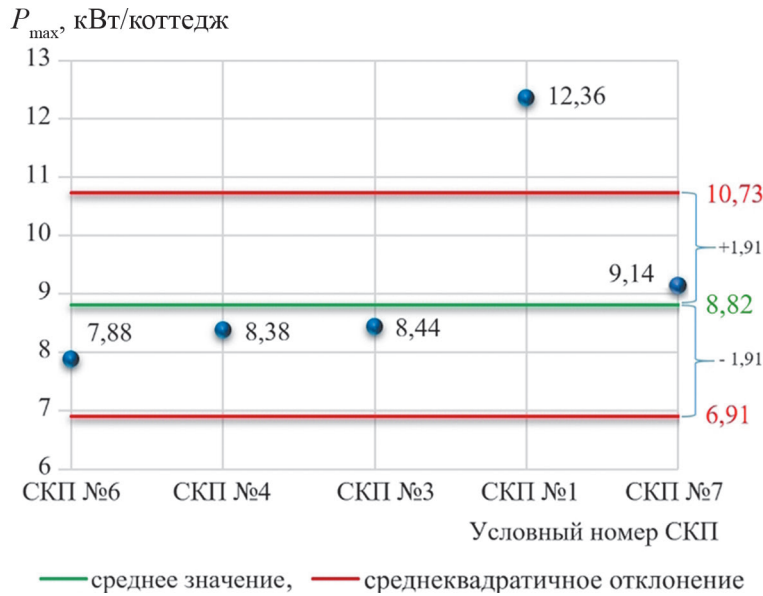


Рис. 9. Диапазон изменения электрических нагрузок 85 % ОИЖС СКП за зимний период

Fig. 9. Range of changes in electrical loads of 85 % of individual housing construction objects in rural cottage settlements in winter

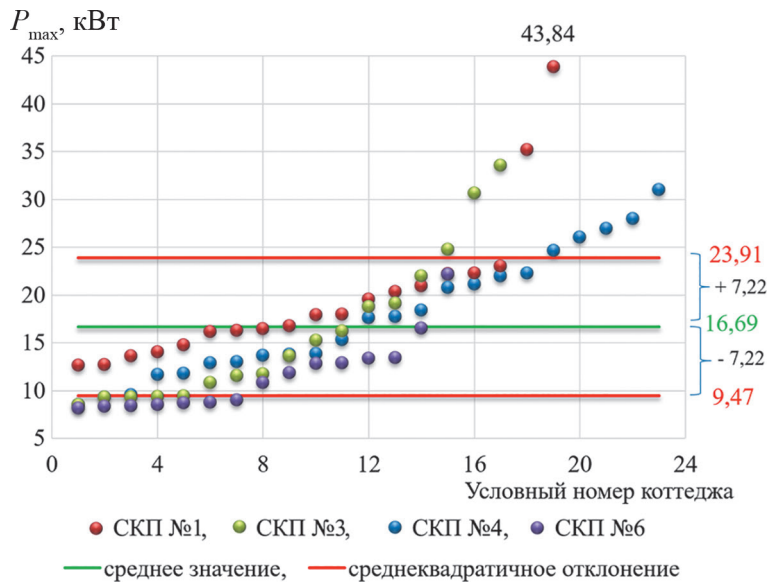


Рис. 10. Точечная диаграмма максимальных электрических нагрузок СКП для 15 % выборок ОИЖС

Fig. 10. Scatter plot of the maximum capacity of rural cottage settlements for 15% of samples of individual housing construction projects

нормативных значения максимальной электрической нагрузки СКП 3 (рис. 14).

На рис. 14 кривая 3 соответствует значениям удельных нагрузок, приведенным в [12] для ОИЖС с электрическими плитами мощностью до 10,5 кВт. Сопоставление кривых 2 и 3 показывает, что при количестве коттеджей 20 и более они практически совпадают. При их меньшем количестве натурные измерения приводят к бóльшим значениям, что можно объяснить и наличием в рассматриваемой выборке нетипичных электрических нагрузок ОИЖС, не учитываемых в данной позиции использованным документом. Например,

это могут быть коттеджи с электрическими саунами (в [13, 19] они выделены в отдельную категорию), которые проявляют себя в выборках как отдельные «выбросы» электрической нагрузки.

Аналитически зависимость 3 удельной нагрузки P_0 от количества коттеджей n (рис. 14) описывается формулой

$$P_0 = 27,607n^{-0,513} \quad (1)$$

(при коэффициенте достоверности аппроксимации $R = 0,9835$).

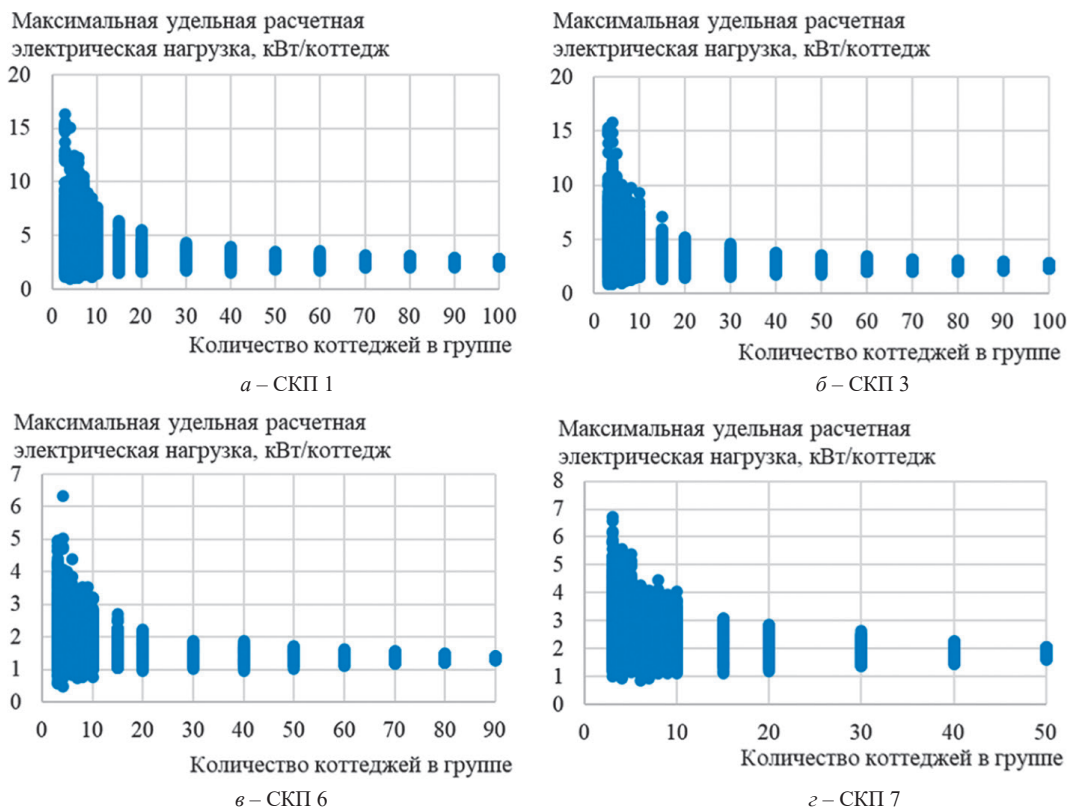


Рис. 11. Максимальные удельные расчетные электрические нагрузки групп коттеджей за сутки максимального электропотребления

Fig. 11. Maximum specific electrical loads of groups of cottages per day of maximum power consumption

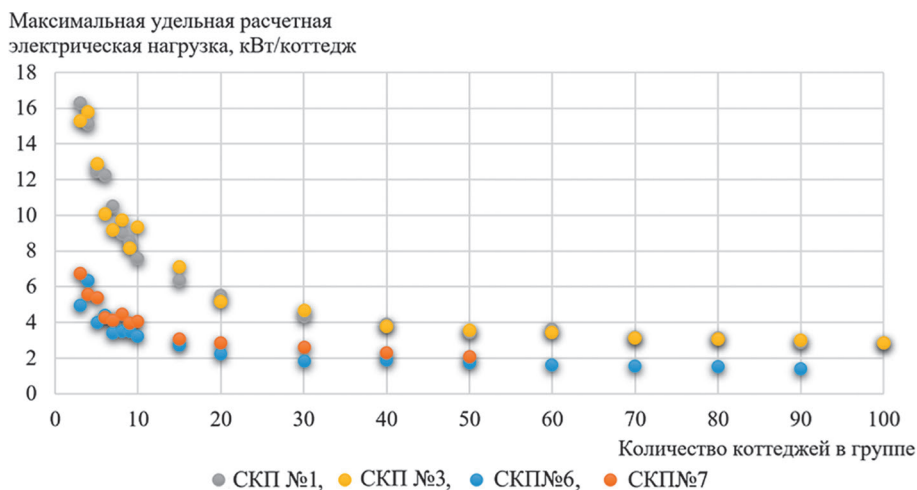


Рис. 12. Точечные графики максимальных электрических нагрузок групп коттеджей за сутки максимального электропотребления

Fig. 12. Dot graphs of maximum electrical loads of cottages groups per day of the maximum power consumption

Если воспользоваться (1) для 50 коттеджей, то расчетная электрическая нагрузка СКП составит $3,71 \cdot 50 = 185,5$ кВт, что потребует установки двух трансформаторов мощностью 160 кВ·А.

Другой подход к учету сдвига во времени графиков электрической нагрузки основан на использовании коэффициентов разновременности максимумов электрической нагрузки. Покажем механизм их расчета на примере ГКП 1 и ГКП 2. Из пилотной выбор-

ки формировались группы с количеством коттеджей (размер группы) от 3 до 50 с шагом в 1 коттедж. Для групп каждого размера генерировалось по 10 000 комбинаций коттеджей (например, 10 000 комбинаций по 3 коттеджа в группе). Для каждой комбинации рассчитывался коэффициент одновременности. Затем определялся средний коэффициент одновременности k_s для групп каждого размера и его 95 %-й уровень k_{95} . Расчет проводился для наиболее загруженных суток периода

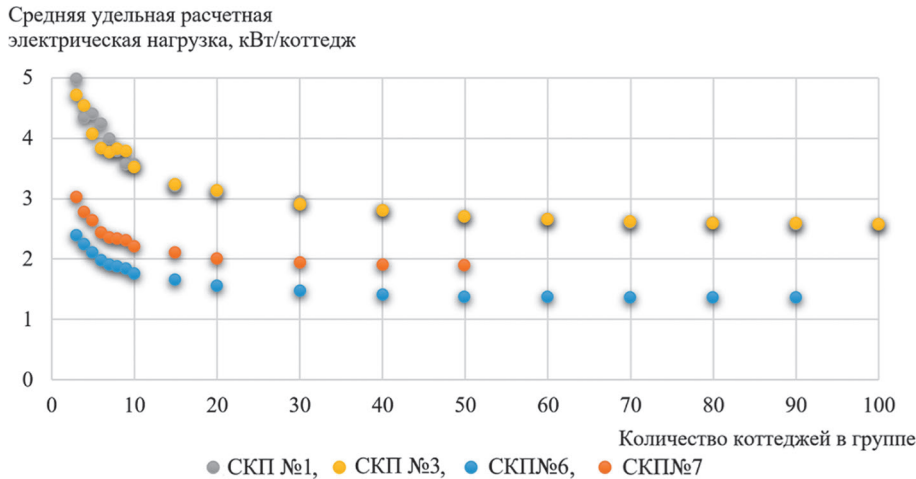


Рис. 13. Средние значения максимальных удельных расчетных электрических нагрузок групп коттеджей

Fig. 13. Average values of the maximum specific calculated electrical load of groups of cottages

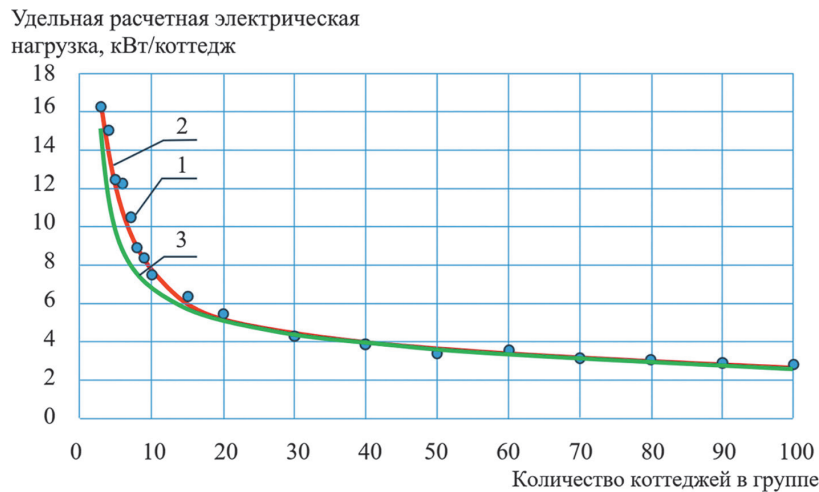


Рис. 14. Удельные расчетные электрические нагрузки: 1 – результаты измерений; 2 – огнивающая натуральных измерений; 3 – непрерывная аппроксимация значений по [12]

Fig. 14. Values of specific design electrical loads: 1 – measurement results; 2 – envelope of full-scale measurements; 3 – continuous approximation of values according to the [12]

наблюдения ГКП. На рис. 15 представлены результаты расчетов.

Как видно из рис. 15, исключение 5 % выбросов с максимальной электрической нагрузкой ожидаемо повлияло на результат: коэффициент одновременности повысился. При этом повышение оказалось существенным на уровне 20 % в начальной части (до 10 коттеджей) и на уровне 15 % для 50 коттеджей. Графики для коэффициента k_{95} поселков ГКП 1 и ГКП 2 в конечной части отличаются на 8 %, а в средней части (20 коттеджей) – на 10 %. Универсальность использования коэффициентов одновременности максимумов электрической нагрузки состоит в том, что их можно использовать независимо от состава электрической нагрузки. Неудобство такого метода в приложении к ОИЖС заключается в том, что база, к которой они применяются, заранее неизвестна. Так, одинаковые зна-

чения коэффициентов могут соответствовать разным численным значениям максимальной электрической нагрузки. Если использовать заявляемую мощность технологического присоединения, то можно получить оценку «сверху» суммарной электрической нагрузки.

Методику определения суммарной расчетной мощности с использованием коэффициентов неодновременности продемонстрируем также на группе из 50 коттеджей. В качестве базисной принимаем среднюю мощность 8,82 кВт (рис. 9). Она вычислена для 85 % ОИЖС, тогда для 85 коттеджей, используя минимальный коэффициент одновременности коэффициента $k_{95} = 0,59$ поселка ГКП 2 (рис. 15) получим расчетную мощность $P_{85} = 8,82 \cdot 42 \cdot 0,59 = 218,6$ кВт. Для оставшейся группы из 15 коттеджей используем рис. 10, по которому принимаем среднюю удельную нагрузку 16,69 кВт. По нижнему графику рис. 15 на-

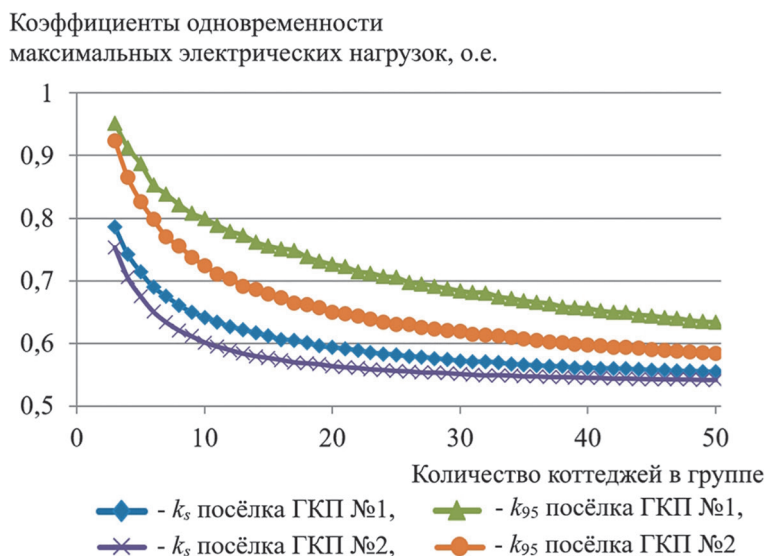


Рис. 15. Коэффициенты одновременности максимальных электрических нагрузок

Fig. 15. Simultaneity coefficients of maximum electrical loads

ходим коэффициент одновременности $k_s = 0,58$. Расчетная мощность равна $P_{15} = 16,69 \cdot 8 \cdot 0,58 = 77,4$ кВт. Суммарная расчетная мощность равна 296 кВт, что потребует установки двух трансформаторов мощностью 250 кВ·А.

Обсуждение результатов. Тот факт, что распределение максимальных электрических нагрузок КП между ОИЖС на длительном интервале наблюдения не подчиняется закону нормального распределения, можно объяснить наличием нетипичных электрических нагрузок. Подтверждением служит подход к рассмотренным выборкам, где последовательно по нисходящей исключались из статистической обработки электрические нагрузки, начиная с максимальной. В результате для исследованных двух ГКП и семи СКП (за исключением двух, сочетающих газовое и электрическое отопление) было получено, что после исключения «сверху» 15 % ОИЖС максимальные электрические нагрузки оставшихся 85 % коттеджей подчиняются закону нормального распределения.

Можно сформулировать стратегию по реализации системы внутреннего электроснабжения ОИЖС. Заранее неизвестно, какая электрическая нагрузка будет заявлена собственниками в договорах на технологическое присоединение. Здесь можно воспользоваться результатами статистической обработки значений максимальной электрической нагрузки (рис. 9) и принять, что электрическая нагрузка каждого коттеджа равна 11 кВт (по рис. 9 – 10,73 кВт). Соответственно все шлейфы от магистральной линии, включая мачтовые трансформаторы, если для распределительной сети внутри КП используется напряжение 10 кВ, выполняются на эту электрическую нагрузку, и для 85 % ОИЖС этого будет достаточно. Для остальных 15 % (и небольшой части коттеджей первой группы) необходимо уве-

личить сечение проводников шлейфов (и мощность мачтовых трансформаторов в сети 10 кВ) уже по конкретным заявкам собственников.

Расчет нагрузки при выборе мощности силовых трансформаторов КП и питающих линий следует выполнять с использованием (1). Применение методики, основанной на использовании коэффициента одновременности, дает завышенный результат, так как приходится использовать для всех коттеджей одно значение базисной мощности, принимаемой с определенным запасом. В приведенных выше примерах расчетная нагрузка СКП с использованием коэффициентов одновременности составила 160 % в сравнении с рассчитанной по удельной электрической нагрузке.

Отсылку в [13] для ОИЖС площадью менее 150 м² к нормативным значениям удельных электрических нагрузок для МКД можно объяснить только отсутствием у разработчика достоверных исходных данных. Сопоставление средних значений электрических нагрузок ОИЖС рассмотренных поселков ГКП 1 и ГКП 2 с квартирами в МКД (табл. 3 и 4) показало, что их электрические нагрузки не идентичны. Однако количество обследованных ГКП недостаточно, чтобы сделать окончательные выводы.

Измерения электрических нагрузок показали, что для ОИЖС в сельской местности состав электрических нагрузок меняется в силу другого жизненного уклада собственников. Средние значения электрических нагрузок для них существенно выше, чем для ОИЖС в городской черте. Отсюда следует важный вывод о необходимости проведения более широких исследований КП для выяснения необходимости введения в нормативные документы градации удельных электрических нагрузок ОИЖС по условиям застройки КП в городской черте или в сельской местности.

Для выбора сечения питающих линий электропередачи и номинальной мощности силовых трансформаторов КП целесообразно использовать значения удельных электрических нагрузок (рис. 14). Они учитывают и наличие «выбросов» у отдельных ОИЖС. Использование средних значений удельных электрических нагрузок (рис. 13) для выбора электропроводок требует дополнительных исследований, включающих анализ суточных графиков электрических нагрузок, их повторяемость и оценку термической стойкости проводников, работающих с кратковременной перегрузкой.

Выводы. В регионах Среднего Поволжья электрические нагрузки ОИЖС городских и сельских КП в зимний период года в 1,5–2 раза выше, чем в летний, и именно они должны служить основой при разработке нормативных значений удельной мощности. Распространять этот результат на другие регионы можно, предварительно выполнив сравнение летнего и зимнего месячного электропотребления, так как для южных областей РФ ситуация может быть обратной.

Сравнение электропотребления КП в городской и сельской местности по наиболее загруженным суткам выявило, что удельная мощность в 2–3 раза выше для ОИЖС в сельской местности, что косвенно свидетельствует о другом жизненном укладе, выражающемся в наличии иных (или более мощных) электротехнических устройств. Учитывая ограниченную выборку городских КП, целесообразность выделения в нормативных документах двух самостоятельных групп ОИЖС для городской и сельской местности требует дополнительной проверки.

Сопоставление средних значений электрических нагрузок ОИЖС в городской черте с аналогичными для квартир МКД выявило их превышение в 2–4 раза. Отсюда следует, что и при малом количестве коттеджей их электрические нагрузки нельзя рассчитывать по нормативам МКД.

Для 85 % электрических нагрузок коттеджей установлен нормальный закон распределения. Средняя нагрузка ОИЖС в сельской местности соответствует уровню 8,82 кВт. Вместе со среднеквадратичным отклонением ($\pm 1,91$ кВт) это дает представление о диапазоне изменения максимальных электрических нагрузок. Предложено к использованию значение 11 кВт для выбора проводников и защитных аппаратов на вводах ОИЖС. Питающие электрические сети, включая трансформаторы 10/0,4 кВ, должны выбираться по удельным электрическим нагрузкам групп коттеджей, задаваемых формулой (1), учитывающей неодновременность максимальных нагрузок ОИЖС.

Актуально провести измерения электрических нагрузок КП в других регионах РФ и с другими индивидуальными строительными характеристиками. Ассоциация «Росэлектромонтаж» готова оказывать методическую поддержку научным коллективам, приступившим к таким исследованиям.

1. **Загородная** аналитика [Электрон. ресурс], URL: <https://www.cian.ru/stati-dolja-izhs-v-obschem-obeme-vvoda-zhilja-vyroslo-do-58-332131/> (дата обращения 10.01.2024).
2. **Ввод** жилья топчется на месте [Электрон. ресурс], URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6209834> (дата обращения 10.01.2024).
3. **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.
4. **Надтока И.И. и др.** Влияние длительности интервала измерений потребления электроэнергии на точность определения максимальной нагрузки по нагреву. – Промышленная энергетика, 2022, № 12, с. 21–25.
5. **Надтока И.И. и др.** Анализ основных закономерностей в электропотреблении жилой части многоквартирных домов в Московском регионе. – Промышленная энергетика, 2023, № 11, с. 21–27.
6. **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.
7. **Солуянов Ю.И. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов в Республике Татарстан. – Электричество, 2021, № 6, с. 62–71.
8. **Солуянов Ю.И. и др.** Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области. – Электричество, 2023, № 7, с. 52–65.
9. **Солуянов Ю.И. и др.** Результаты статистического анализа электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы. – Электрические станции, 2023, № 2(1099), с. 22–28.
10. **Морсин И.А., Шведов Г.В.** Формирование электрических нагрузок на шинах вводного распределительного устройства современных многоквартирных домов. – Промышленная энергетика, 2023, № 7, с. 22–29.
11. **Соловьева 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.
12. **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.
13. **РД 34.20.185-94.** Инструкция по проектированию городских электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1999, 31 с.
14. **Майоров А.В.** Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № S2 (13), с. 2–7.
15. **Carroll P. et al.** Household Classification Using Smart Meter Data. – Journal of Official Statistics, 2018, vol. 34, No. 1, DOI: 10.1515/jos-2018-0001.
16. **Khomichev V.A., Shvedov G.V.** Probabilistic-Statistical Analysis of the Maximum Electrical Load of Apartment. – 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, 2023, DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086879.
17. **Proedrou A.** Comprehensive Review of Residential Electricity Load Profile Models. – IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 12114–12133, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050074.
18. **Жилкина Ю.В.** Концепции интернета вещей как способ мотивации к энергосбережению. – Электрические станции, 2020, № 2 (1063), с. 23–26.

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

20. Солюянов Ю.И. и др. Анализ фактических электрических нагрузок объектов индивидуального жилищного строительства. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2021, № 5(68), с. 60–65.

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

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

Поступила в редакцию [31.01.2024]
Принята к публикации [29.02.2024]

Авторы:



Солюянов Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», 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



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

Elektrichestvo, 2024, No. 4, pp. 36–50

DOI:10.24160/0013-5380-2024-4-36-50

Analysis of Specific Electrical Loads of Cottage Settlements

SOLUYANOV Yuriy I. (Association "Roselectromontazh", Kazan, Russia) – President, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

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

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.).

During the construction of cottage settlements, significant costs are incurred for external and internal power supply systems. At the same time, regulatory data on the specific electrical loads of individual housing construction facilities are either missing or do not have sufficient experimental justification. The article addresses the problem of developing scientifically grounded values of specific electrical loads in cottage settlements. For a number of cottage settlements in urban and rural areas of the Republic of Tatarstan, the power consumption by individual housing construction facilities in summer and winter periods has been studied. A statistical analysis of power consumption data has shown that 15% of the total number of cottages are characterized by atypical electrical loads of individual housing construction facilities and increase the design capacity, which must be taken into account in designing the power supply of such facilities. The average value of the maximum half-hour electrical load of 85% of cottages in settlements is an important characteristic to be used for specifying the loads of substations and the capacity of power transformers. It has been determined that the average electrical loads for individual housing construction facilities in rural areas are higher than in urban areas. By using the obtained curves of specific design electrical loads and load coincidence factors it is possible to develop a regulatory document for designing the electric networks of cottage settlements.

Key words: individual housing construction facilities, specific electrical loads, power consumption, power supply, design of electrical networks

REFERENCES

1. **Zagorodnaya analitika** (Suburban Analytics) [Electron. resource], URL: <https://www.cian.ru/stati-dolja-izhs-v-obschem-obeme-vvoda-zhilja-vyrosla-do-58-332131/> (Date of appeal 10.01.2024).
2. **Vvod zhil'ya topchetsya na meste** (Housing Commissioning is Stalling) [Electron. resource], URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6209834> (Date of appeal 10.01.2024).
3. **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.
4. **Nadtoka I.I. et al.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2022, No. 12, pp. 21–25.
5. **Nadtoka I.I. et al.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2023, No. 11, pp. 21–27.
6. **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, ICIEAM 2023, 2023, pp. 949–953, DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139236.
7. **Soluyanov Yu.I. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 6, pp. 62–71.
8. **Soluyanov Yu.I. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2023, No. 7, pp. 52–65.
9. **Soluyanov Yu.I. et al.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2023, No. 2(1099), pp. 22–28.
10. **Morsin I.A., Shvedov G.V.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2023, No. 7, pp. 22–29.
11. **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.
12. **Tavarov S.Sh. et al.** *iPolytech Journal*, 2023, vol. 27, No. 3, pp. 565–573.
13. **RD 34.20.185-94.** *Instruktsiya po proektirovaniyu gorodskih elektricheskikh setey* (Instructions for the Design of Urban Electric Networks). M.: Energoatomizdat, 1999, 31 p.
14. **Majorov A.V.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2019, No. S2 (13), pp. 2–7.
15. **Carroll P. et al.** Household Classification Using Smart Meter Data. – *Journal of Official Statistics*, 2018, vol. 34, No. 1, DOI: 10.1515/jos-2018-0001.
16. **Khomichev V.A., Shvedov G.V.** Probabilistic-Statistical Analysis of the Maximum Electrical Load of Apartment. – 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, 2022, DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086879.
17. **Proedrou A.** Comprehensive Review of Residential Electricity Load Profile Models. – *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 12114–12133, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050074.
18. **Zhilkina Yu.V.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2020, No. 2 (1063), pp. 23–26.
19. **SP 256.1325800.2016.** *Elektrostanovki 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.
20. **Soluyanov Yu.I. et al.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2021, No. 5(68), pp. 60–65.
21. **James G. et al.** *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, 2nd ed. Cham, Springer, 2021, 612 p.
22. **Goreeva N.M., Demidova L.N.** *Statistika* (Statistics). M.: Prometey, 2019, 496 p.

Received [31.01.2024]
Accepted [29.02.2024]