

Я.В. АВДЕЕВ, студент гр. ЭПм-241 (КузГТУ)
Научный руководитель И.Н. ПАСКАРЬ, старший преподаватель
(КузГТУ)
г. Кемерово

КРЫШНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ: ОТ МИКРОГЕНЕРАЦИИ К ВЫЗОВАМ ДЛЯ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

На данный момент сфера электроэнергетики переживает глобальную трансформацию, вызванную необходимостью реализации концепции 3D (декарбонизация, диджитализация, децентрализация) и обеспечения энергетической устойчивости. Одним из ключевых трендов энергетики на данный момент является стремительный рост распределенной генерации (РГ), в частности, массовое внедрение крышных солнечных электростанций (крышных СЭС). К примеру, в недавнем прошлом в странах Европейского союза были разработаны программы, согласно которым с 2026 года вводится юридическое требование по оснащению солнечными панелями новых коммерческих зданий [1] – подобный мировой опыт наглядно демонстрирует, что солнечная энергетика становится неотъемлемым элементом городской электросетевой инфраструктуры.

Для Российской Федерации развитие современных энерготехнологий является стратегическим национальным приоритетом. Это прямо отражено в Стратегии научно-технологического развития (СНТР) РФ, направленной на достижение лидерства в областях, определяемых приоритетами научно-технологического развития. Конкретизируя, стоит упомянуть, что данная тематика соответствует пунктам 15Е и 21Б стратегии научно-технологического развития РФ [2].

Несмотря на очевидные позитивные эффекты для конечного потребителя в виде удешевления стоимости электроэнергии, практически полной независимости от ЕЭС России и декарбонизации, массовое внедрение крышных СЭС создает целый комплекс технических вызовов для городских распределительных сетей 6-10 кВ. К ним относятся: возникновение «обратных токов», снижение устойчивости работы инверторов при кратковременных просадках напряжения, ухудшение показателей качества электроэнергии, вызванное гармоническими искажениями кривой напряжения и тока от инверторов СЭС, а также осложнения работы релейной защиты. Все эти проблемы требуют разработки комплекса адаптационных мер. Таким образом, целью исследования данной и последующих статей является системный анализ ключевых вызовов для городской электросетевой ин-

фраструктуры от массового внедрения крышных СЭС и разработка адаптационных направлений в контексте приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации.

Крышная солнечная электростанция (Крышная СЭС) – это автономная система генерации электрической энергии, преобразующая солнечное излучение в переменный ток и размещаемая на кровле жилого, коммерческого или промышленного здания. Её ключевая задача – обеспечить частичное или полное энергоснабжение объекта-потребителя, сократив его зависимость от централизованной сети и снизив затраты на электроэнергию (рисунок 1).



Рис. 1. Крышная СЭС – общий вид

В основе работы любой солнечной электростанции основан на явлении фотовольтаики – процессе возникновения в солнечной панели электрического тока под воздействием падающего на нее солнечного света (фотозлектрический эффект). При попадании солнечного излучения на поверхность солнечного элемента происходит генерация отрицательно-заряженных частиц (электронов) – возникает постоянный электрический ток (DC). Состав типовой крышной СЭС представлен на рисунке 2. [3]

1. Солнечные панели – это генератор энергии, состоящий из солнечных элементов. Разделяются на классические кремниевые (монокристаллические, поликристаллические), тонкопленочные.

2. Инвертор – это электронное силовое устройство, которое преобразует постоянный ток в переменный, соответствующий параметрам сети (напряжение 230/400 В, частота 50 Гц). Задачи инвертора:

- преобразование постоянного тока (DC) в переменный (AC);
- синхронизация с параметрами сети;
- мониторинг выработки, управление системой;
- безопасность (защита от короткого замыкания, отключение при отсутствии сети).

Инверторы подразделяются на однофазные (преимущественно в бытовых системах до 5-10 кВт (подключаются к одной фазе 230 В)), трехфаз-

ные (для промышленных объектов, коммерческих зданий и домов с трёх-фазным вводом).

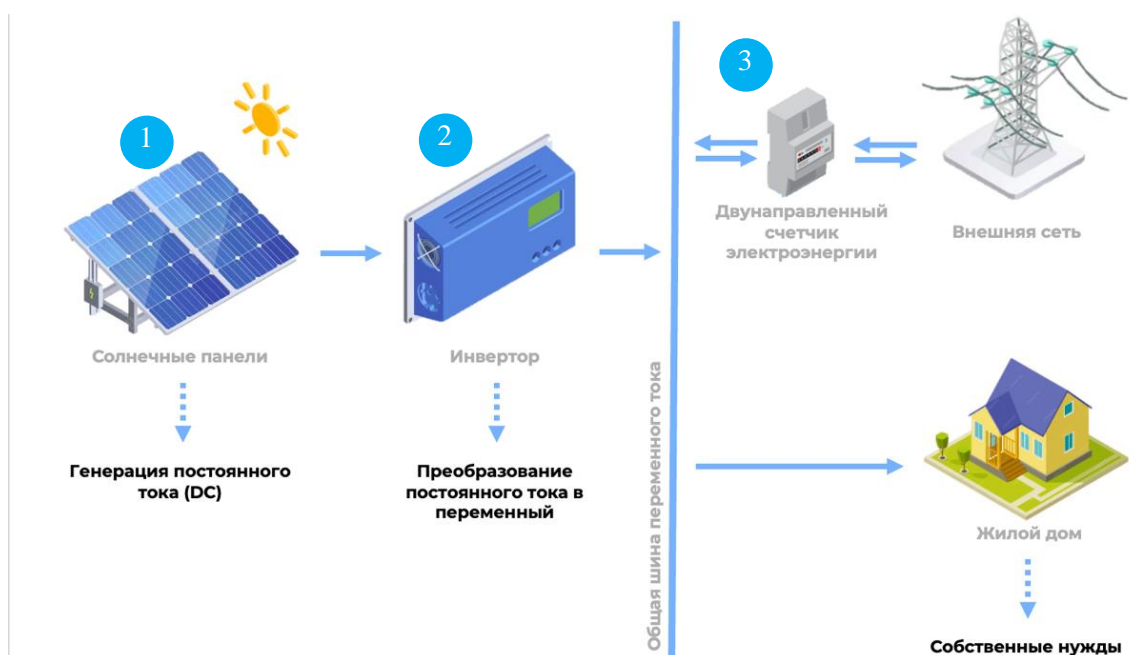


Рис. 2. Состав типовой крышной СЭС

3. Двухнаправленный счетчик электроэнергии – это прибор учёта, который измеряет не только потребление электроэнергии, но и отдачу избыточной энергии в сеть. Необходимость установки именно такого вида счетчика электроэнергии обусловлена тем, что в часы минимума нагрузки (10:00 – 16:00) выработка электроэнергии от крышных СЭС максимальна, в связи с чем, согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 2 марта 2021 г. № 299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации» излишки выработанной электроэнергии можно передавать обратно в сеть.

4. Электрощитовая часть – автоматы защиты УЗО, УЗИП, учетная система, система мониторинга.

Массовое распространение крышных солнечных электростанций в России является следствием действия нескольких взаимосвязанных факторов: от глобальных трендов до целенаправленных мер государственной поддержки. Эти факторы формируют мощный экономический и технологический импульс, превращая крышную генерацию из нишевого решения в перспективный сегмент энергорынка.

Ключевым фактором начала развития микрогенерации в Российской Федерации стало принятие в 2019 году Федерального закона № 471-ФЗ «О микрогенерации», который установил правовые основы для интеграции

объектов малой генерации в Единую энергосистему России. Основопологающим принципом данного ФЗ является механизм компенсации денежных средств за отпущенную в сеть электроэнергию. Владелец крышной СЭС, избыток генерации которой поступает во внешнюю сеть, получает за нее денежную компенсацию. Это превращает станцию из простого средства экономии в актив, генерирующий доход и имеющий четкий срок окупаемости.

Для конечного потребителя (домохозяйства или малого бизнеса) установка крышной СЭС является, прежде всего, инвестиционным проектом, окупаемость которого определяется несколькими параметрами:

- снижение затрат на электроэнергию – потребляя собственную, более дешёвую солнечную энергию, домохозяйство значительно сокращает объём покупки электричества из сети, что особенно актуально в условиях постоянного роста розничных тарифов;

- доход от генерации – механизм компенсации за излишки выработанной электроэнергии позволяет продавать невостребованную энергию, превращая потребителя (consumer) в активного участника рынка – прозьюмера (prosumer).

Помимо прямой экономической выгоды, крышные СЭС позволяют обеспечить:

- повышение независимости от ЕЭС России – владелец крышной СЭС в меньшей степени зависит от перебоев в централизованном энергоснабжении, что особенно актуально для удаленных и энергодефицитных регионов страны, а также для регионов, подверженным военным атакам на энергетическую сферу;

- экологический имидж и устойчивое развитие – использование «зелёной» энергии позволяет снизить углеродный след, что соответствует как глобальным трендам, так и растущему экосознанию граждан. В случае использования крышных СЭС бизнесом, это становится элементом корпоративной социальной ответственности (КСО).

Помимо всего вышесказанного, массовое внедрение крышных СЭС трансформирует пассивных потребителей в активных участников энергосистемы, что приводит к принципиальному изменению структуры перетоков мощности и возникновению ряда технических проблем для городских распределительных сетей 6-10 кВ. Наиболее острая проблема возникает в солнечные часы, когда генерация СЭС достигает пика, а потребление в жилом секторе минимально. Это приводит к появлению "обратных токов" - перетоку избыточной активной мощности из сетей 0,4 кВ в сети 6-10 кВ. В соответствии с законом Ома, поток мощности от низковольтной сети к питающему трансформатору 10/0,4 кВ вызывает повышение напряжения в узлах сети, достигающее максимума в наиболее удаленных от трансформатора точках. При высокой проницаемости (более 50-70%) уровень напря-

жения может превышать допустимые значения +10% от номинального, что нарушает требования ГОСТ 32144-2013 [4]. В то же время, при низкой проницаемости СЭС (до 30%) наблюдается снижение потерь активной мощности за счет компенсации потоков энергии от подстанции к потребителям, однако при высокой степени проникновения СЭС возникают дополнительные потери, связанные с передачей избыточной мощности обратно в сеть высшего напряжения, что создает парадоксальную ситуацию: чем больше генерации, тем выше могут быть суммарные потери в распределительной сети [5].

Продолжая блок о вызовах, которые ставит перед сетевой инфраструктурой внедрение крышных СЭС, стоит упомянуть о гармонических искажениях, исходящих от инверторов СЭС. При массовом использовании некачественных инверторов или при отсутствии фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) коэффициент нелинейных искажений (THD) может превышать установленные ГОСТ 32144-2013 пределы в 8%, что приводит к дополнительным потерям, перегреву трансформаторов и нарушению работы чувствительного энергооборудования. Также не стоит забывать о быстрых изменениях освещенности, вызванных прохождением облаков, которые приводят к резким скачкам генерации СЭС – до 70-80% от номинальной мощности за несколько секунд. Такие колебания вызывают значительные провалы и всплески напряжения в сети, нарушая нормальную работу других потребителей, подключенных к той же линии.

Таким образом можно сделать вывод, что массовое внедрение крышных СЭС в городской среде является перспективным направлением распределенной генерации, но при этом порождает целый комплекс технических вызовов для городских распределительных сетей. Для успешной интеграции необходим комплексный подход, сочетающий аппаратные решения, например, модернизацию сетевой инфраструктуры и внедрение «умных» инверторов с функциями Q(U) и LVRT, а также программные методы, в частности, использование цифровых двойников для моделирования и оптимизации режимов работы сети. Только такой путь позволит реализовать потенциал крышной генерации без ущерба для надежности и качества электроснабжения потребителей.

Список литературы:

1. Директива об энергетических характеристиках зданий (2010/31/EU) [Электронный ресурс]. URL: https://ingkomora.rs/storage/documents/literatura_strucni_ispiti/ee/02_EPBD%202010_31_EU.pdf (дата обращения: 06.11.2025).
2. Большие вызовы и приоритеты научно-технологического развития РФ / Официальный сайт научно-технологического развития РФ

[Электронный ресурс]. URL: <https://нтр.пф/challenges-priorities/?ysclid=mhocjsyxul838654694> (дата обращения: 06.11.2025).

3. Принцип работы сетевой СЭС. / Компания «Solartek». / URL: <https://sollartek.com/tpost/t5if3vtt31-printsip-raboti-setevoi-ses?ysclid=mhogq6cf64717579506> (дата обращения: 06.11.2025).

4. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

5. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2020. – Т. 63, № 1. – С. 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.

Информация об авторах:

Авдеев Ярослав Всеволодович, студент гр. ЭПм-241, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, avdeev.yaroslav.95@mail.ru

Паскарь Иван Николаевич, старший преподаватель, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, pin.egpp@kuzstu.ru