

ПРООН/ГЭФ

Проект №00077154

«Повышение энергетической эффективности жилых зданий
в Республике Беларусь»

Предварительный расчёт производительности солнечной станции
для экспериментального жилого многоквартирного здания
в городе Гродно.

Исполнитель:

Эксперт по вопросам внедрения солнечных

батарей в системах энергообеспечения в жилом секторе _____ А.В.Бедунько

Минск 2014

Оглавление

1. ОБЪЕКТ ВНЕДРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ.....	3
2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ.....	3
3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИЕЙ.....	6
4. БЫСТРАЯ ОЦЕНКА ОКУПАЕМОСТИ ПРОЕКТА.....	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15

1. ОБЪЕКТ ВНЕДРЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

здание	120-ти квартирный 10-ти этажный энергоэффективный жилой дом в г. Гродно
этажность	10 этажей
кол-во квартир	120
ориентация здания	ось север-юг
тип кровли	плоская, с выступающими лифтовыми шахтами
варианты расположения солнечных панелей	а) плоская кровля б) южный глухой торец здания
тип солнечной станции	сетевой (прямая генерация в электросеть здания)
планируемые основные потребители электроэнергии	а) тепловые насосы б) рекуперативная вентиляция

2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ

По месту установки солнечные панели разделены на две группы:

- 1) устанавливаемые на плоской крыше с возможностью выбора угла установки солнечных панелей по отношению к горизонту (102 панели)
- 2) устанавливаемые на глухом южном фасаде 90° к горизонту (196 панелей)

В соответствии со спецификацией предлагается использовать солнечные панели со следующими основными характеристиками:

- 1) номинальная мощность – 250 Вт (по STC)
- 2) тип панелей – 60P 6x10 (60 ячеек, материал ячеек – поликристаллический кремний)

Таким образом получаем установленную мощность солнечной станции:

- 1) на плоской кровле – 25 500 Вт
- 2) на глухом фасаде – 49 000 Вт

Исходя из установленной мощности оптимальным решением для преобразования постоянного тока в переменный будет сетевой трехфазный инвертор номинальной мощностью 25 кВт: один - для панелей, установленных на крыше; два – для панелей, установленных на фасаде (по 24,5 кВт на каждый инвертор).

Функционально солнечная станция состоит из трёх генерирующих блоков – трех инверторов, подключенных параллельно друг другу к сети (рисунок 1).

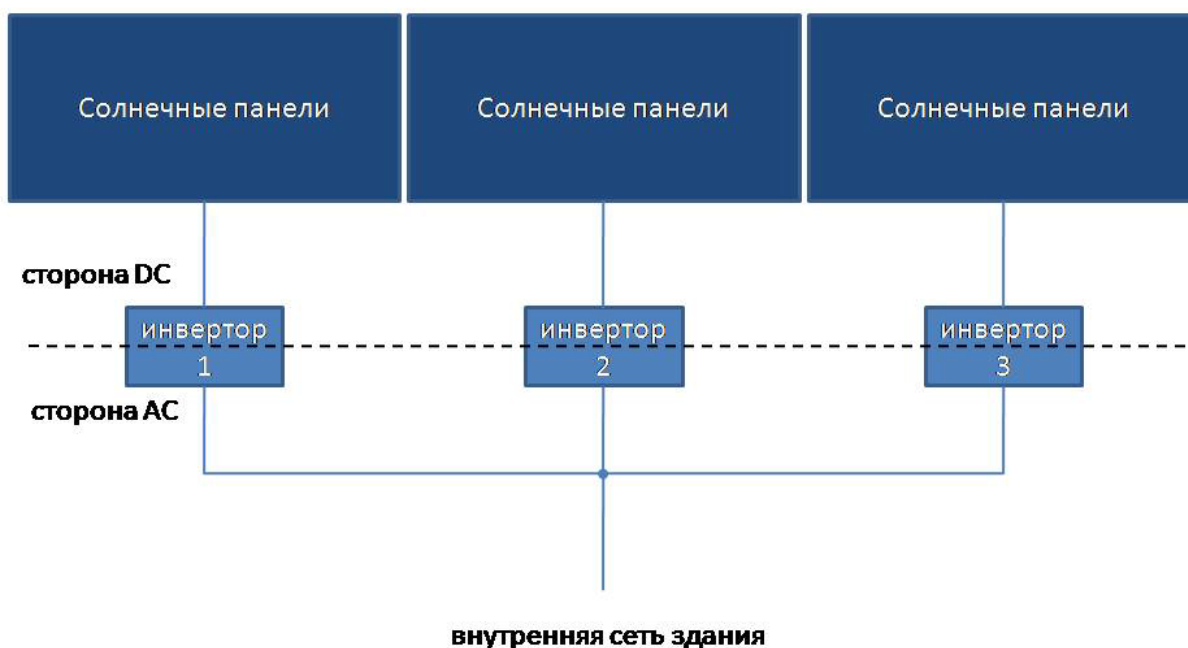


Рисунок 1 – Функциональное строение солнечной станции.

У инверторов такой мощности большинства производителей максимальное входное напряжение по входу со стороны солнечных панелей составляет 1000В, что позволяет разбивать панели на группы приблизительно по 5 кВт каждая (20 панелей). Схематично это изображено на рисунке 2.

Каждая группа формируется путем последовательного соединения панелей друг с другом:

а) суммарное напряжение группы панелей равняется сумме напряжений всех панелей

$$U_{гр} = U_1 + U_2 + \dots + U_{20}$$

б) сила тока остается неизменной и равняется току одной панели

$$I_{гр} = I_1 = I_2 = \dots = I_{20}$$

Такое техническое решение – набор группы по напряжению – позволяет добиться минимальных потерь на кабеле, что дает следующие преимущества:

- 1) небольшое количество кабелей: подключение группы панелей происходит 1 парой кабеля (плюс и минус);
- 2) возможность удаления группы солнечных панелей от инвертора на достаточные расстояния: удобство выбора места установки инвертора ввиду отсутствия жесткой привязки к месту установки панелей;
- 3) использование кабелей малого сечения: для подключения группы панелей к инвертору обычно достаточно кабеля сечением 4-6 мм²;
- 4) отсутствие длительного пограничного напряжения при включении на входе инвертора со стороны солнечных панелей: стартовое напряжение (напр. инвертор SMA – 188 В) 20

панелей суммарно набирают даже при рассеянном свете (по 9,8 В на каждую панель при номинальном рабочем напряжении панели около 30 В), что позволяет инвертору сразу перейти в режим генерации энергии;

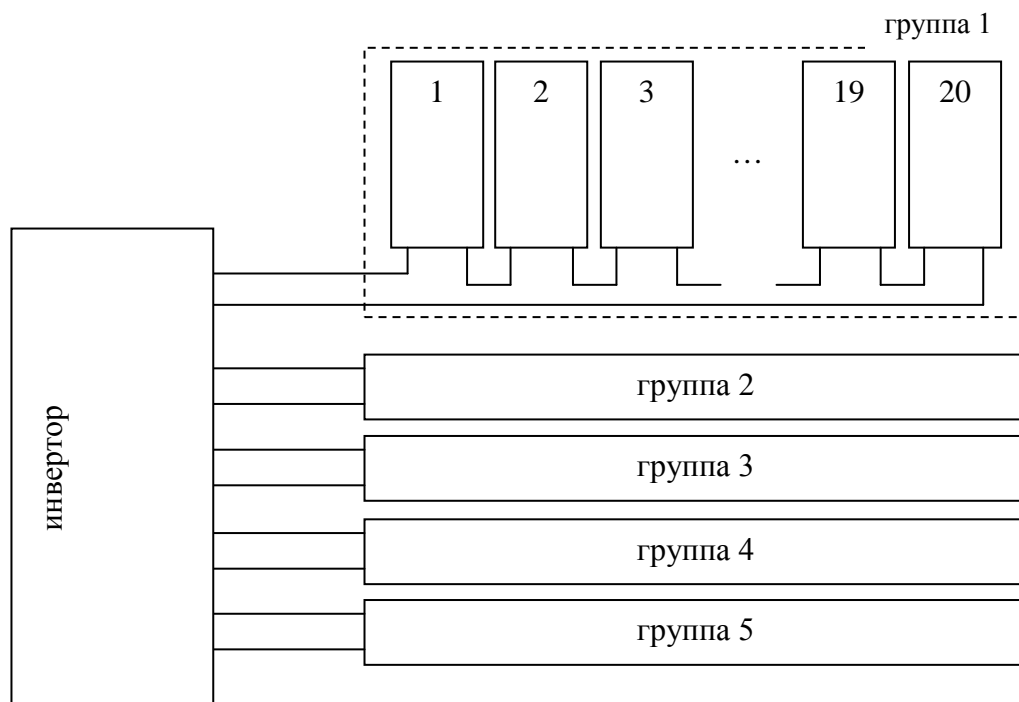


Рисунок 2 –Подключение групп панелей к инвертору.

3) использование кабелей малого сечения: для подключения группы панелей к инвертору обычно достаточно кабеля сечением 4-6 мм²;

4) отсутствие длительного пограничного напряжения при включении на входе инвертора со стороны солнечных панелей: стартовое напряжение (напр. инвертор SMA – 188 В) 20 панелей суммарно набирают даже при рассеянном свете (по 9,8 В на каждую панель при номинальном рабочем напряжении панели около 30 В), что позволяет инвертору сразу перейти в режим генерации энергии;

5) удобное подключение панелей: все панели в группе соединяются между собой заводскими кабелями с разъемами, их длины (обычно 0,9-1 м) хватает для соединения панелей как при горизонтальной установке, так и при вертикальной, два кабеля подключаются к крайним панелям группы.

Таким образом, мы получаем следующее распределение панелей по инверторам:

- инвертор 1: группа входов А - 3 x 20 панелей, группа входов В - 2 x 21 панели;
- инвертор 2: группа входов А - 3 x 20 панелей, группа входов В - 2 x 19 панелей;
- инвертор 3: группа входов А - 3 x 20 панелей, группа входов В - 2 x 19 панелей.

Примечание

Ввиду конструктивных особенностей строения инвертора рекомендуется в рамках одной группы входов подключать панели одинаковыми группами (одинаковое количество панелей установленных идентично). Такое подключение солнечных панелей даст максимальную производительность. Если возникает необходимость подключать неодинаковые группы, то необходимо их подключать на различные входные группы инвертора (А, В, С).

3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИЕЙ

Факторы, влияющие на выработку электроэнергии солнечной фотоэлектрической станцией, делятся на три группы:

1) факторы, влияющие на выработку электроэнергии солнечными панелями:

- ориентация по сторонам света;
- угол наклона солнечных панелей по отношению к горизонту;
- выбор места установки солнечных панелей исходя из возможных затенений от рядом находящихся объектов при движении солнца с востока на запад, взаимного затенения солнечных панелей впереди стоящим рядом последующего (особенно актуально при зимнем низком солнце);
- температурный режим места установки солнечных панелей.

2) потери на соединительных кабелях в сети постоянного тока (кабели, соединяющие солнечные панели и инвертор):

- длина соединительного кабеля;
- площадь сечения.

3) факторы, влияющие на режим работы и КПД инвертора:

- температурный режим работы инвертора (место установки);
- график загруженности инвертора;
- входное напряжение;
- максимальный паспортный КПД инвертора.

1) Факторы, влияющие на выработку электроэнергии солнечными панелями.

Ориентация по сторонам света и угол наклона влияют на фактический солнечный поток, проходящий через плоскость панели. Максимальный световой поток достигается при перпендикулярном падении солнечных лучей на плоскость солнечной панели. Таким

образом, меняя ориентацию по сторонам света и угол наклона, можно смещать акцент максимальной производительности в течение дня и в течение года.

Например, максимальная суммарная выработка солнечных панелей в течение дня достигается при ориентации панелей на юг. Изменяя ориентацию солнечных панелей в восточное или западное направление, получаем увеличение выработки в первой или второй половине дня соответственно, но получим уменьшение общей дневной выработки.

Для получения максимальной выработки в летнее время (для широты Минска) необходимо установить солнечные панели под углом в приблизительно 30° по отношению к горизонту. Для зимнего времени – **около 70°** . Такой угол максимизирует световой поток через плоскость солнечной панели в необходимое время года, но приведет к уменьшению суммарной годовой выработки. Оптимальным для всего года будет угол порядка 40° – это даст максимальную суммарную годовую выработку электроэнергии.

При этом стоит учитывать следующий момент: при повышении температуры модуля его КПД уменьшается, а, следовательно, падает и мощность (рисунок 3).

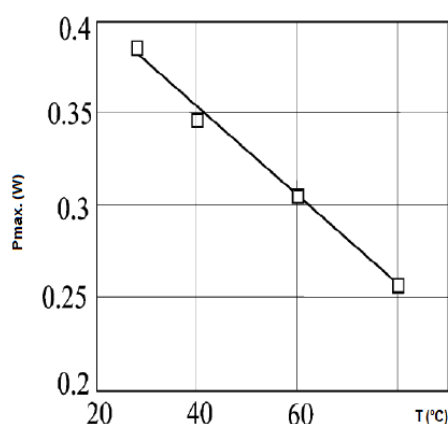


Рисунок 3 – График падения мощности модуля при нагреве.

При небольшом угле наклона солнечные модуль не будет получать достаточного обдува ветром, что приведет к повышенной рабочей температуре и пониженной эффективности. Положительный момент: зимой при ярком солнце производительность модуля может быть на 15-20% выше.

Примечание

Для повышения суммарной годовой выработки в рамках небольших солнечных станций рациональным будет использование креплений с возможностью ручной установки трёх углов наклона: зимнего, весенне-осеннего и летнего.

2) Потери на соединительных кабелях в сети постоянного тока.

Потери на кабеле прямо пропорциональны квадрату протекающего тока и сопротивлению проводника:

$$Q=I^2R$$

где I – сила протекающего тока,

R – сопротивление проводника.

В свою очередь сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально сечению:

$$R=\rho L/S$$

где ρ – удельное сопротивление металла,

L – длина проводника,

S – площадь сечения.

Таким образом, **чтобы уменьшить потери на соединяющих кабелях необходимо:**

- минимизировать ток (что решается через увеличение напряжения – последовательного соединения солнечных панелей в группе);
- использовать кабель из металла, у которого меньше удельное сопротивление (обычно используются медные кабели);
- минимизировать расстояние между панелями и инвертором – уменьшить длину кабелей (в отдельных случаях возможна установка инвертора сразу за панелями на их каркасе);
- при необходимости увеличивать сечение кабеля до необходимого уровня потерь.

Как правило, для большинства случаев хватает медного многопроволочного кабеля сечением 4-6 кв.мм. Использование такого кабеля даёт допустимый уровень потерь менее 1%.

3) Факторы, влияющие на режим работы и КПД инвертора.

В первую очередь инвертор имеет максимальный КПД, заложенный производителем. Ведущие мировые производители на данном этапе для инверторов номинальной мощностью имеют КПД в районе 97-98%.

Далее, в КПД инвертора зависит от уровня загрузки инвертора по отношению к номинальной мощности. Выход на оптимальный режим работы, как правило, достигается при загрузке инвертора от 20%.

Входное напряжение так же влияет на КПД инвертора. Максимальный КПД достигается при значении напряжения на входе равному паспортному параметру **rated**

input voltage. Ниже, на рисунке 4, показан типичный график (на примере инвертора фирмы SMA) зависимости КПД инвертора от текущей загруженности и входного напряжения.

Т.к. КПД инвертора ниже 100%, в результате своей работы часть электроэнергии переходит в тепло, которое через систему (активного или пассивного) охлаждения отдаётся в окружающую среду. При высокой окружающей температуре (например, установка в закрытом помещении с недостаточной вентиляцией, или в помещении с изначально повышенными температурами) охлаждения инвертора будет недостаточно. В случае перегрева различными производителями реализована одна (или сразу обе) следующие функции:

- 1) принудительное снижение выходной мощности для уменьшения выделения тепла;
- 2) отключение инвертора для нормализации температуры.

Поэтому следует устанавливать инвертор в прохладном помещении с достаточной вентиляцией. При необходимости устанавливается кондиционер, охлаждающий помещение с установленным в нем инвертором.

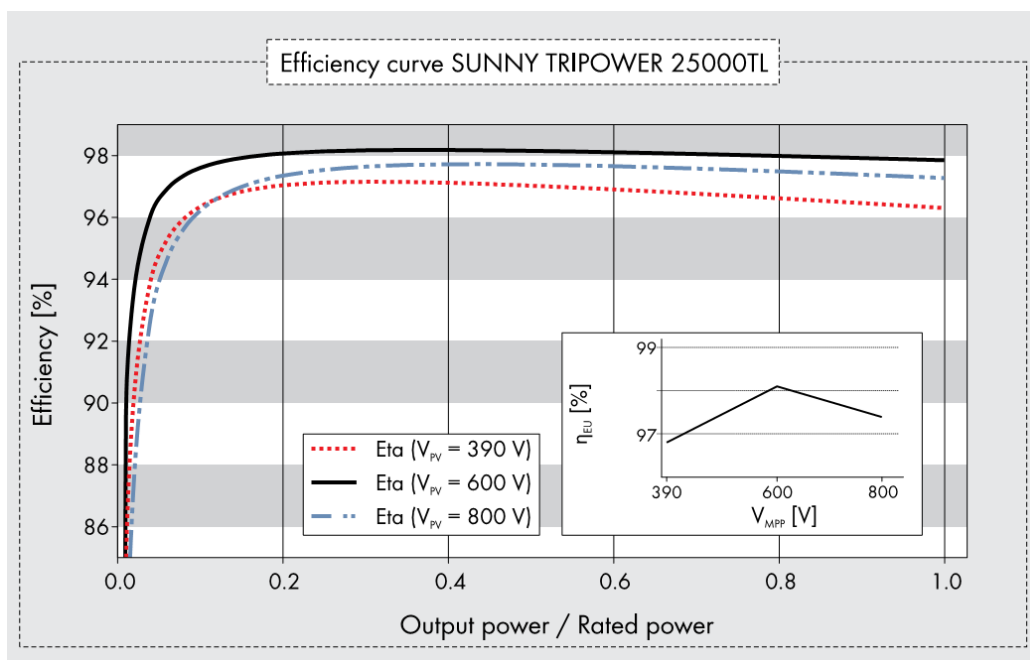


Рисунок 4 – График изменения КПД сетевого инвертора SMA.

На практике, рассчитать в ручную и учесть все факторы, влияющие на генерацию электроэнергии солнечной станцией, крайне сложно. Для упрощения решения таких вопросов используется компьютерный расчет и специальные программные средства. Большинство крупных производителей сетевых инверторов имеют свои внутренние программы для расчета оптимальной комплектации солнечной станции.

Для примера рассмотрим основные возможности программы SunnyDesignot SMA SolarAG.

Программа позволяет указать место установки солнечной станции и местные стандарты электросетей. Встроенная климатическая база даёт средние значения по солнечной инсоляции для данной территории и температурные режимы работы солнечных панелей (рисунок 5).

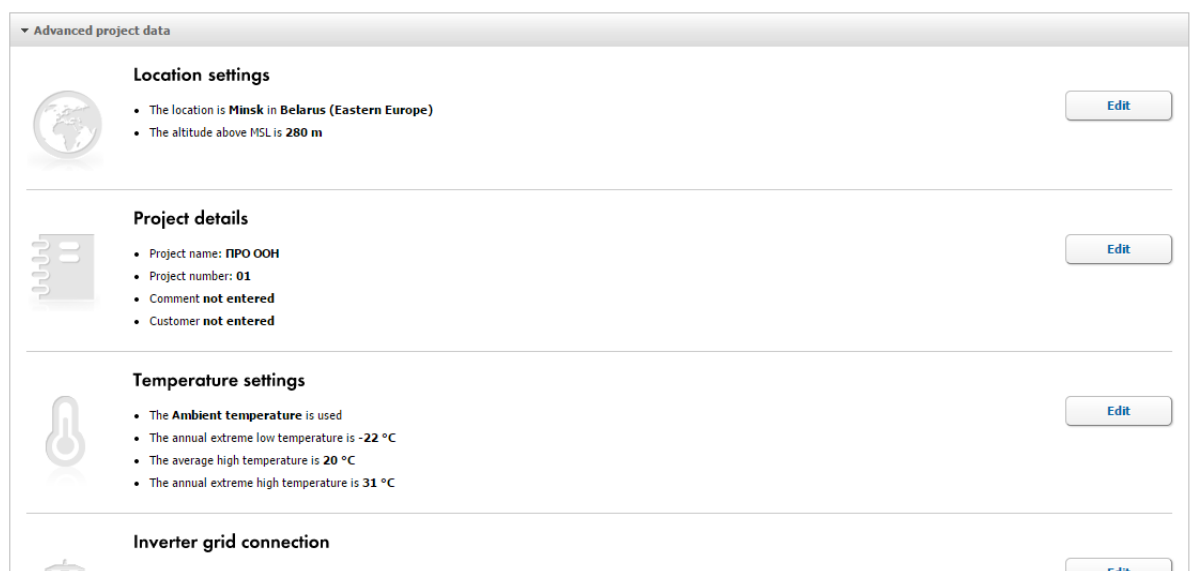


Рисунок 5 – Выбор места установки солнечной станции.

В базе данных программы занесены большинство крупных производителей солнечных панелей и весь их модельный ряд, что позволяет учитывать все особенности эксплуатации солнечных панелей в зависимости от места установки, ориентации по сторонам света, угла наклона (рисунок 6).

Configure PV system

You can enter the information for the planned PV system here. At least one PV array must be configured for this purpose by selecting the PV module type and the number of PV modules or the peak power. Once this is done, the inverter can be designed.

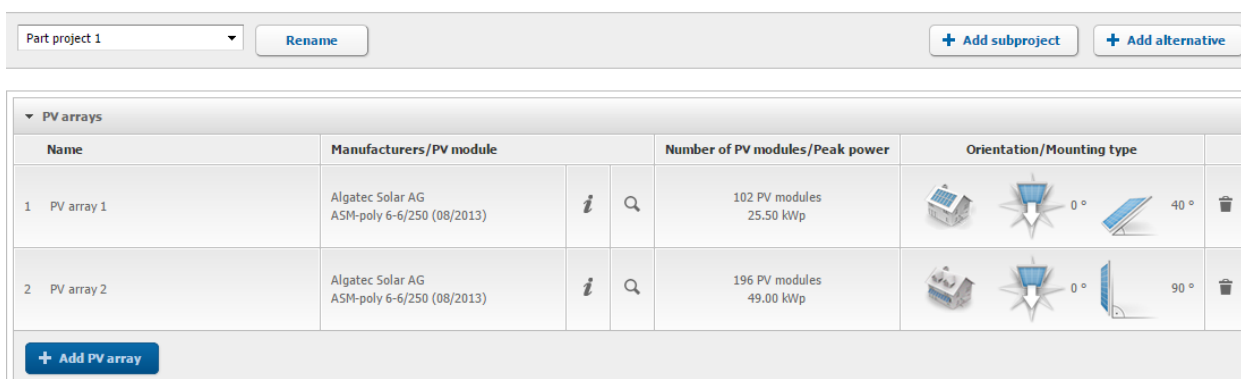


Рисунок 6 – Конфигурация массива солнечных панелей.

В примере введены солнечные панели из поликристаллического кремния мощностью 250 Вт в количествах, соответствующих проекту жилого многоквартирного здания в г. Гродно. Учтено расположение панелей и ориентировочный угол наклона.

Программа обладает функцией автоматического подбора наилучшего выбора инверторов для данного массива солнечных панелей. Так же инверторы и их загрузку возможно выбрать в ручном режиме. При расчете учитывается желательная максимальная выработка электроэнергии с учетом факторов, указанных выше.

На рисунке 7 показано распределение панелей, установленных на плоской крыше здания, с расчетом электрических характеристик и параметров загруженности инвертора. На рисунке 8 аналогично показаны второй и третий инвертор, к которым подключены солнечные панели, установленные на глухом южном торце здания.

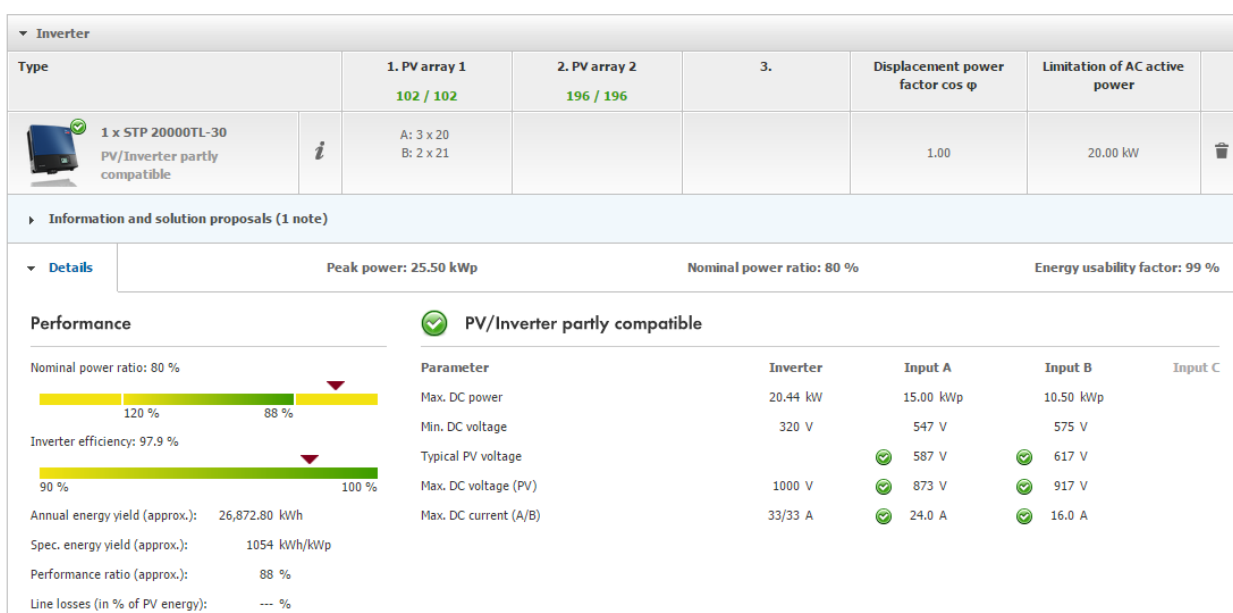


Рисунок 7 – Параметры работы солнечной станции, установленной на плоской крыше.

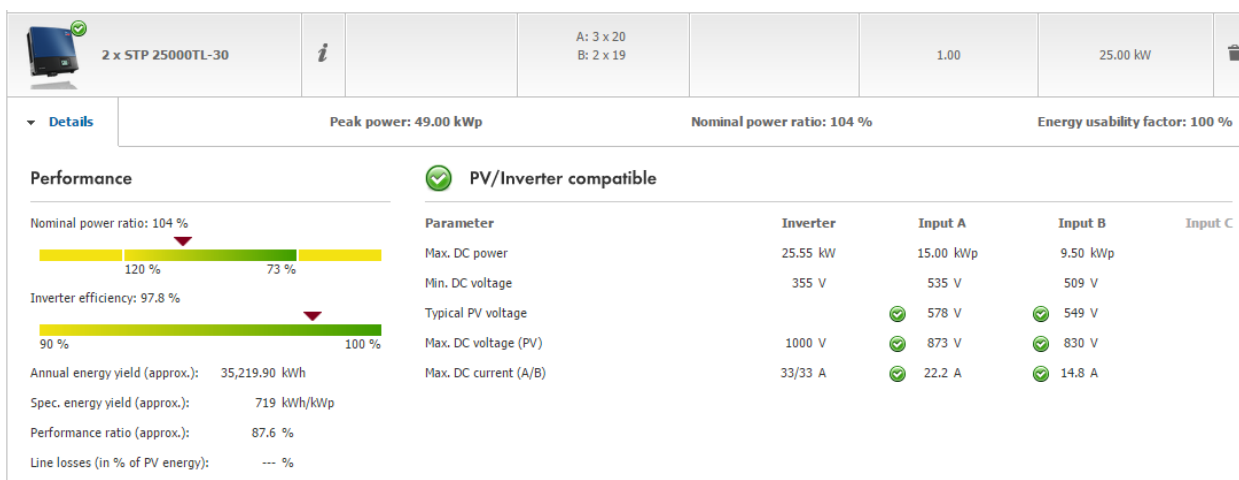


Рисунок 8 - – Параметры работы солнечной станции, установленной на торце здания.

Наиболее важным полученным параметром является коэффициент среднегодовой производительности. Он получается как отношение выработанной за год электроэнергии к установленной мощности солнечных панелей:

$$K_{гп} = kWh / kWp$$

где $K_{гп}$ – коэффициент годовой производительности,

kWh – количество выработанной за год электроэнергии (с учетом всех факторов), кВт ч,

kWp – установленная мощность солнечных панелей, кВт.

Фактически он показывает выработку электроэнергии в пересчет на количество часов работы солнечных панелей на номинальной мощности в год.

Для проектируемых солнечных станций получены следующие значения (таблица 1).

Таблица 1 – Значения годовой выработки электроэнергии проектируемыми солнечными станциями.

место установки	номинальная мощность	суммарная годовая выработка	коэффициент годовой производительности
крыша	25,5 кВт	26 872,8 кВт ч	1054
фасад	49 кВт	35 219,9 кВт ч	719

Как видно из таблицы, эффективность солнечной станции, установленной на крыше, приблизительно на 30% выше, чем станции, установленной на фасаде здания.

Для панели, установленные на фасаде, угол наклона изменить нельзя, т.к. это уменьшит % заполнения площади, увеличит ветровую нагрузку и ухудшит внешний вид здания. Для панелей, установленных на крыше, можно программно проверить различные варианты установки угла наклона, для получения оптимальной годовой выработки электроэнергии. В таблице 2 показана связь угла наклона и коэффициента производительности солнечных панелей.

Таблица 2 – Соотношение угла наклона и производительности солнечной станции.

угол наклона, °	коэфф. годовой производительности, кВт ч/кВт
90	723
80	823
70	921
60	990
50	1034
45	1047

угол наклона, °	коэфф. годовой производительности, кВт ч/кВт
40	1054
35	1056
30	1052
20	1027
10	977
0	904

Из таблицы видно, что **оптимальным углом наклона** солнечных панелей будет угол в **35° по отношению к горизонту**. В этом случае мы получаем максимальную годовую производительность.

4. БЫСТРАЯ ОЦЕНКА ОКУПАЕМОСТИ ПРОЕКТА

Наиболее простым решением будет оценка стоимости проекта за 1 Вт. Исторически сложилось, что производители солнечных панелей и каркасов для их монтажа продают оборудование, указывая стоимость за 1Вт или 1 кВт. Например, розничная стоимость солнечной панели европейского производства составляет 1,1-1,2 долл. за 1 Вт. Это значит, что солнечная панель этой категории мощность 250 Вт будет стоить:

$$250 * 1,1 = 275 \text{ долл. за 1 панель}$$

Аналогично каркас для крепления – 0,3-0,4 долл. за 1 Вт установленной мощности солнечных панелей. Цена инверторов варьируется от дополнительного функционала и особенностей строения, но и их цену тоже можно привести к долларам за 1 Вт номинальной мощности. Например, инвертор SMA STP 25000TL-30 (25 кВт) имеет розничную стоимость 6 350 долл. – 0,254 долл. за 1 Вт. Таким образом, стоимость оборудования за 1Вт составит:

$$1,1+0,3+0,254 = 1,654 \text{ долл. за 1 Вт установленной мощности}$$

Стоимость монтажа можно ориентировочно взять 0,5 долл. за 1 Вт. Итого получаем стоимость солнечной станции 2,154 долл. за 1 Вт. Стоимость всей станции составит приблизительно 160 тыс. долл.

Далее рассчитаем выработку 1 Вт солнечных панелей с учетом деградации солнечных модулей примерно 0,8% в год (паспортная величина). Данные по проектируемой солнечной станции собраны в таблице 3.

Таблица 3 – Производительность проектируемой солнечной станции

год эксплу- атации	Производительность солнечной станции		Финансовая прибыль станции*	Производительность 1 Вт установленной мощности	
	крыша	фасад		крыша	фасад
	кВт ч	кВт ч	долл.	Вт ч	Вт ч
1	26 712,58	34 949,15	8 416,83	1 047,55	713,25
2	26 497,15	34 667,30	16 765,77	1 039,10	707,50
3	26 281,73	34 385,46	25 046,84	1 030,66	701,74
4	26 066,30	34 103,61	33 260,04	1 022,21	695,99
5	25 850,88	33 821,76	41 405,35	1 013,76	690,24
6	25 635,46	33 539,91	49 482,79	1 005,31	684,49
7	25 420,03	33 258,06	57 492,35	996,86	678,74
8	25 204,61	32 976,22	65 434,03	988,42	672,98
9	24 989,18	32 694,37	73 307,84	979,97	667,23
10	24 773,76	32 412,52	81 113,77	971,52	661,48
11	24 558,34	32 130,67	88 851,82	963,07	655,73
12	24 342,91	31 848,82	96 521,99	954,62	649,98
13	24 127,49	31 566,98	104 124,28	946,18	644,22
14	23 912,06	31 285,13	111 658,70	937,73	638,47
15	23 696,64	31 003,28	119 125,24	929,28	632,72
16	23 481,22	30 721,43	126 523,90	920,83	626,97
17	23 265,79	30 439,58	133 854,68	912,38	621,22
18	23 050,37	30 157,74	141 117,59	903,94	615,46
19	22 834,94	29 875,89	148 312,62	895,49	609,71
20	22 619,52	29 594,04	155 439,77	887,04	603,96
21	22 404,10	29 312,19	162 499,04	878,59	598,21
22	22 188,67	29 030,34	169 490,44	870,14	592,46
23	21 973,25	28 748,50	176 413,96	861,70	586,70
24	21 757,82	28 466,65	183 269,60	853,25	580,95
25	21 542,40	28 184,80	190 057,36	844,80	575,20
за 25 лет	603 187,20	789 174,40		23 654,40	16 105,60
Всего:	1 392 361,60			39 760,00	

*при расчете финансовой прибыли взят тариф на электроэнергию 0,1365 долл. за 1 кВт ч (Промышленные и приравненные к ним потребители с присоединенной мощностью до 750 кВА, декларация об уровне тарифов на электрическую энергию, отпускаемую республиканскими унитарными предприятиями электроэнергетики ГПО "Белэнерго", зарегистрирована приказом

Департамента ценовой политики Министерства экономики Республики Беларусь от 27.02.2014 №4). На данный момент тариф для населения ниже выбранного, но тенденция показывает, что в ближайшие годы вместе с отказом от перекрестного субсидирования тарифы сравняются.

Если бы станция не была разделена на два блока с разной производительностью, то, анализируя расчетную прибыль на 1 Вт мощности, был бы определен срок, в течение которого она стала бы равной стоимости 1 Вт своей изначальной стоимости. В нашем случае производительность частей станции разная, поэтому посчитаем её окупаемость с точки зрения суммарной годовой выработки.

Как видно из таблицы, суммарная прибыль от солнечной станции на 21 год превышает её стоимость. Получаем **расчетную окупаемость станции в 21 год**.

С учетом того, что стоимость оборудования бралась розничная, и в рамках тендера она снизится на 15-20%, можно предположить, что срок окупаемости сократится на 3-4 года.

Примечание.

В случае организации продажи электроэнергии в сеть по установленному тарифу для возобновляемых источников энергии (использование энергии солнца) с учетом повышающего коэффициента 2,7, действующего первые 10 лет, срок окупаемости составит при розничных ценах на оборудование:

8 лет – 176 671 долл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из расчетов, приблизительная окупаемость внедряемых солнечных панелей для экспериментального энергосберегающего многоквартирного дома в г. Гродно составляет приблизительно 20 лет. Точный срок рассчитать сложно ввиду климатических изменений, неизвестной точной цены стоимости оборудования и монтажа системы, сложно прогнозируемой динамики изменения тарифов на электроэнергию на 20 лет вперед. Внедрение солнечных панелей на нужды энергосберегающего дома – это больше эксперимент по возможности интеграции в рамках жилых домов различных источников энергии и их совместного использования для уменьшения потребления от сети. Если посмотреть с такой точки зрения, то проектируемая солнечная станция за 25 лет своего функционирования выработает 1 392,361 МВт ч электроэнергии.