

Фотоэлектрические преобразователи

Лекция №3

Эффект фотоэлектричества



Антуан Анри Беккерель

фотоэлектрический эффект — фотоэффект Процесс полного или частичного освобождения заряженных частиц в веществе в результате поглощения фотонов.

Открыт в 1839 году

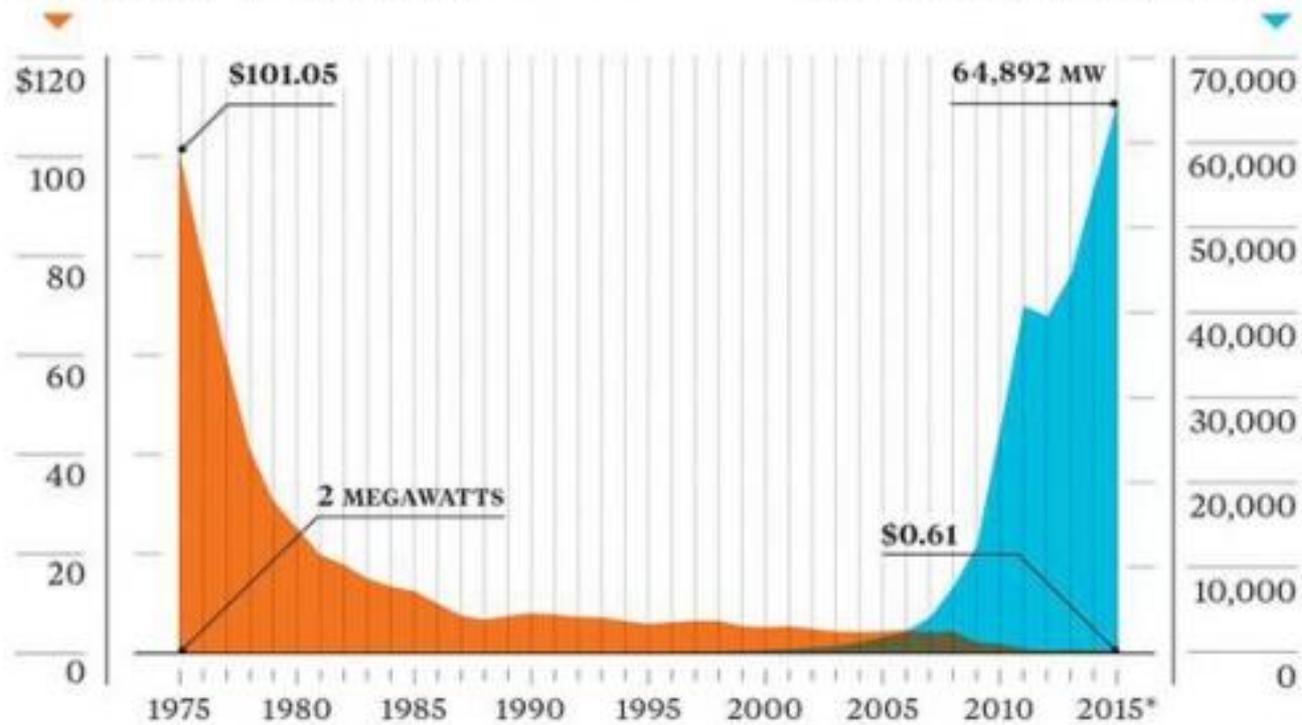
Первая фотогальваническая ячейка



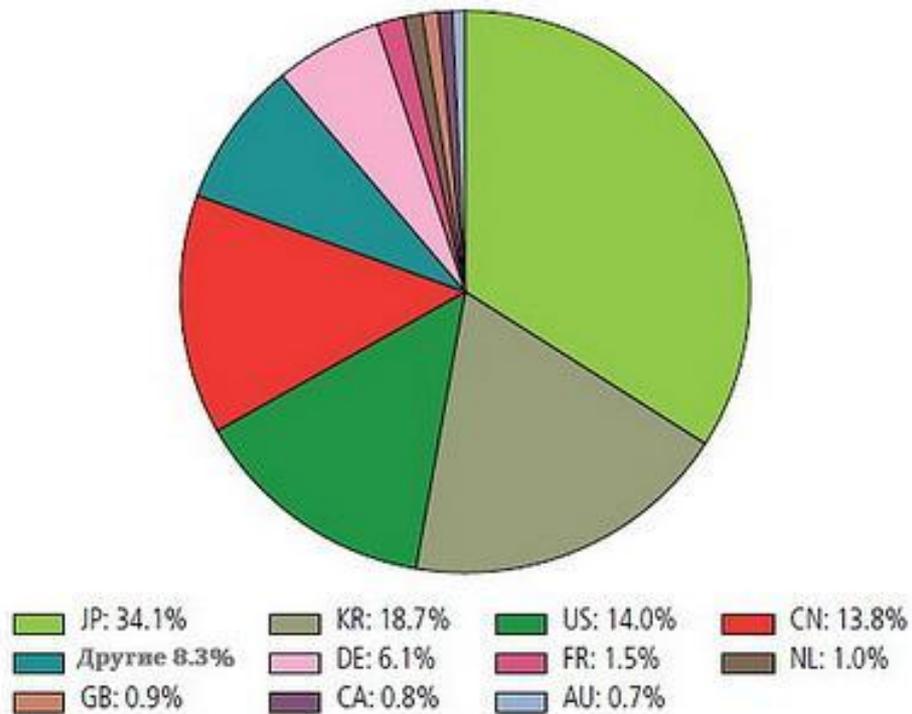
Произведена в 1954 г. американскими учёными Bell Labs для космической программы.

Развитие ФЭП

Price of a solar panel per watt



Доля патентов в области гелиоэнергетики (2011 год)



Доля солнечной энергетики в мире

год	Суммарная мощность, ГВт
2008	16
2009	23
2010	40
2011	70
2012	100
2013	138
2014	177
2015	277



Самые крупные солнечные электростанции в мире

Тораз,
Калифорния, США

580 МВт

На строительство объекта потребовалось 2 года и \$2,5 млрд.

Тораз улавливает лучи калифорнийского солнца посредством 9 млн. тонкопленочных солнечных модулей, сделанных из теллурида кадмия, и выдает 580 МВт электрической энергии



Самые крупные солнечные электростанции в мире

Star

Калифорния, США

579 МВт

Эта солнечная станция использует порядка 3,8 миллиона солнечных панелей. Около 20% из них установлены на базе шасси с системой слежения за Солнцем.

При мощности 579 МВт проект сможет давать достаточно электрической энергии, чтобы обеспечить потребности в электричестве 75,000 жителей ежегодно и тем самым уменьшить выброс загрязнений в окружающую среду, который эквивалентен тому, как если бы убрать с дорог 30 000 автомобилей



Самые крупные солнечные электростанции в мире

Solar Farm Elct
Калифорния, США

550 МВт

Solar Farm – солнечная ферма – большой проект в пустыне Мохаве в Калифорнии. Ее возведение происходило в два этапа, на площади более 6 кв. миль недалеко от Национального Лесного Парка. Эта солнечная электростанция имеет мощность в 550 МВт и состоит из 8.8 млн. до того не применявшихся тонкопленочных солнечных панелей из теллурида кадмия.



Самые крупные солнечные электростанции в мире

Longyangxia Dam
Хайнань, Китай

329 МВт

Строительство Longyangxia Dam прошло за поразительно короткое время — всего девять месяцев с начала 2013г. до тестовых испытаний в декабре.

Сочетание гидроэлектростанции и солнечной станции позволяет компенсировать неизбежные колебания мощности, получаемой от солнечных батарей, в течение дня. Данный факт предоставляет собой большое преимущество Longyangxia Dam по сравнению с другими, чисто солнечными электростанциями



Самые крупные солнечные электростанции в мире

Agua Caliente,
Аризона, США

290 МВт

Agua Caliente была запущена в апреле 2014 года и на тот момент претендовала на звание крупнейшей в мире солнечной фермы.

Солнечная электростанция мощностью 290 МВт в округе Юма, штат Аризона, использует 3-ю серию солнечных панелей из теллурида кадмия

Мощности достаточно для питания 230 тыс. домов в регионе.



Российская статистика

- ▶ Суммарная установленная электрическая мощность солнечных электростанций ЕЭС России на 1 января 2017 года составляет 75,2 МВт
- ▶ А также 58 проектируемых и строящихся ГЭС

Российская статистика

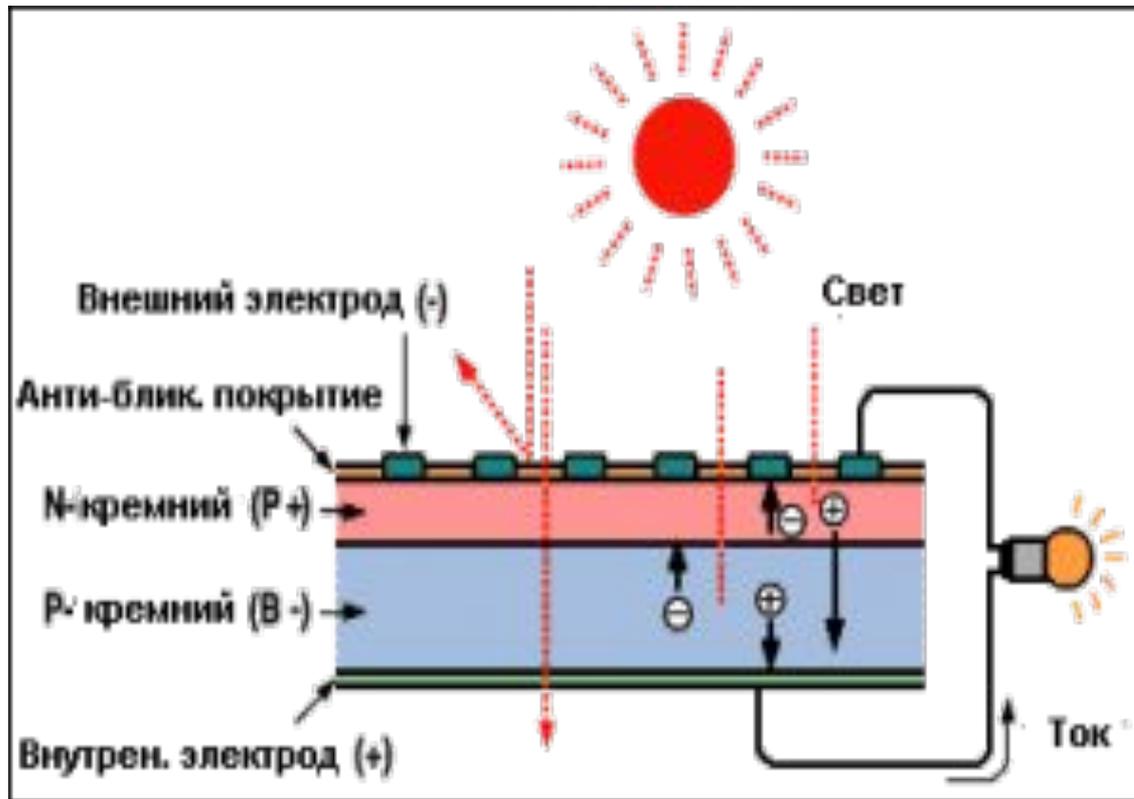
8 солнечных электростанций, работающих на энергосистему

№	Название	Установленная мощность, МВт	Область	Собственник
1	Сакмарская СЭС им. А. А. Влазнева	25,0	Оренбургская область	ПАО «Т Плюс»
2	Бурибаевская СЭС (1-я и 2-я очереди)	20,0	Республика Башкортостан	ООО «Авелар Солар Технолоджи»
3	Бугульчанская СЭС (1-я, 2-я и 3-я очереди)	15,0	Республика Башкортостан	ООО «Авелар Солар Технолоджи»
4	Кош-Агачская СЭС (1-я и 2-я очереди)	10,0	Республика Алтай	ООО «Авелар Солар Технолоджи»
5	Абаканская СЭС	5,198	Республика Хакасия	ПАО «Красноярская ГЭС»
6	Усть-Канская СЭС	5,0	Республика Алтай	ООО «Авелар Солар Технолоджи»
7	Переволоцкая СЭС	5,0	Оренбургская область	ООО «Авелар Солар Технолоджи»
8	СЭС ООО «АльтЭнерго»	0,1	Белгородская область	ООО «АльтЭнерго»

Российская статистика

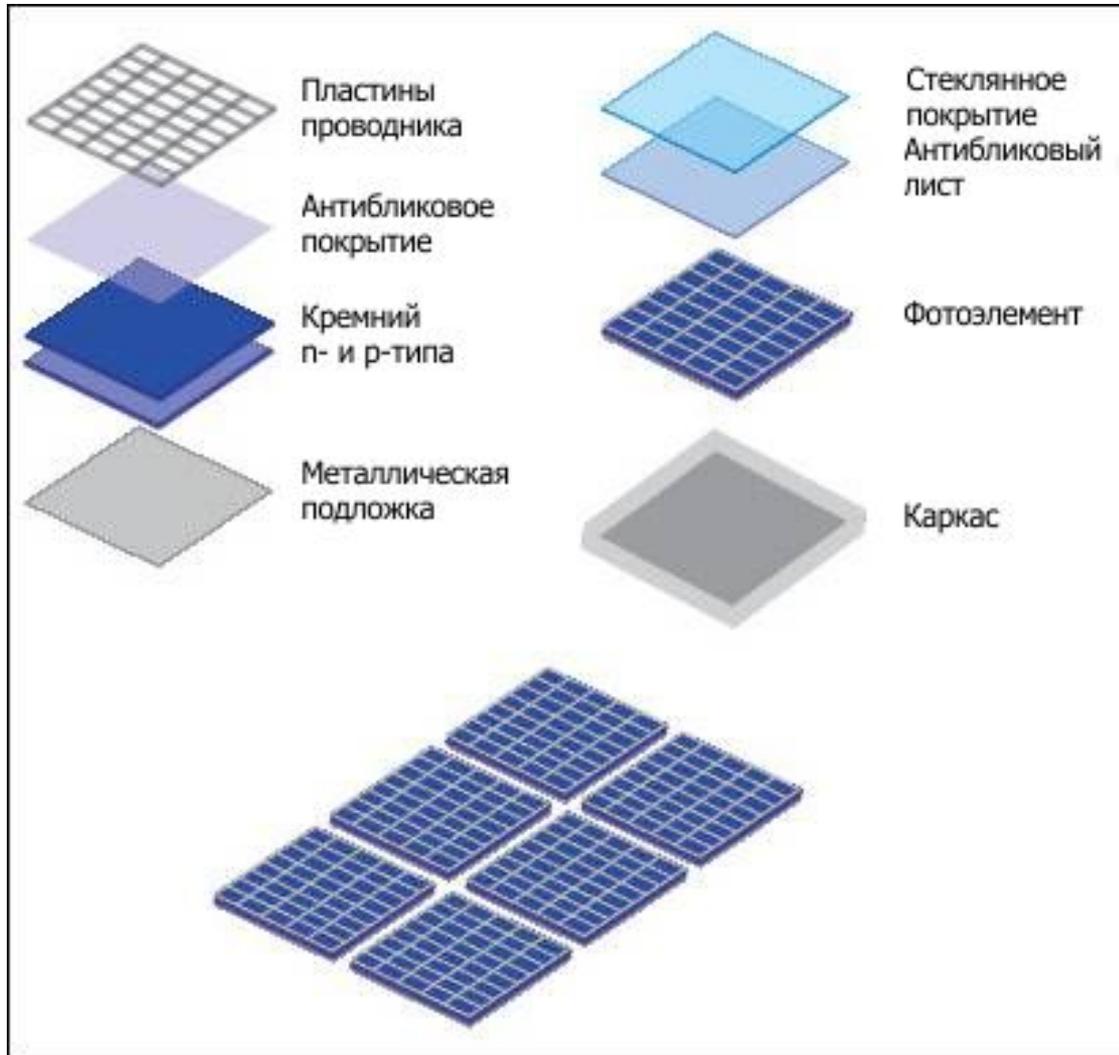
№	Название	Установленная мощность, МВт	Область	Собственник
1	СЭС ОУЛ Солар	31,55	Республика Крым	ЧАО «ОУЛ Солар»
2	СЭС Юпитер Солар	24,81	Республика Крым	ООО «Юпитер Солар»
3	СЭС Орион Солар	24,33	Республика Крым	ООО «Орион Солар»
4	СЭС Бета Солар	22,15	Республика Крым	ООО «Бета Солар»
5	СЭС Зета Солар	21,55	Республика Крым	ООО «Зета Солар»
6	СЭС Омао Солар	21,48	Республика Крым	ООО «Омао Солар»
7	СЭС Оузил Солар	21,23	Республика Крым	ООО «Оузил Солар»
8	СЭС Гамма Солар	20,98	Республика Крым	ООО «Гамма Солар»
9	СЭС Дельта Солар	20,85	Республика Крым	ЧАО «Дельта Солар»
10	СЭС Капелла Солар	20,56	Республика Крым	ООО «Капелла Солар»
11	СЭС Осприй Солар	20,33	Республика Крым	ООО «Осприй Солар»
12	СЭС Альфа Солар	20,05	Республика Крым	ООО «Альфа Солар»
13	СЭС Ориол Солар	19,64	Республика Крым	ООО «Ориол Солар»
14	СЭС Батагай	1,0	Республика Саха (Якутия)	РАО ЭС Востока
15	СЭС Менза	0,12	Забайкальский край	Правительство Забайкальского края

Принцип действия фотоэлемента

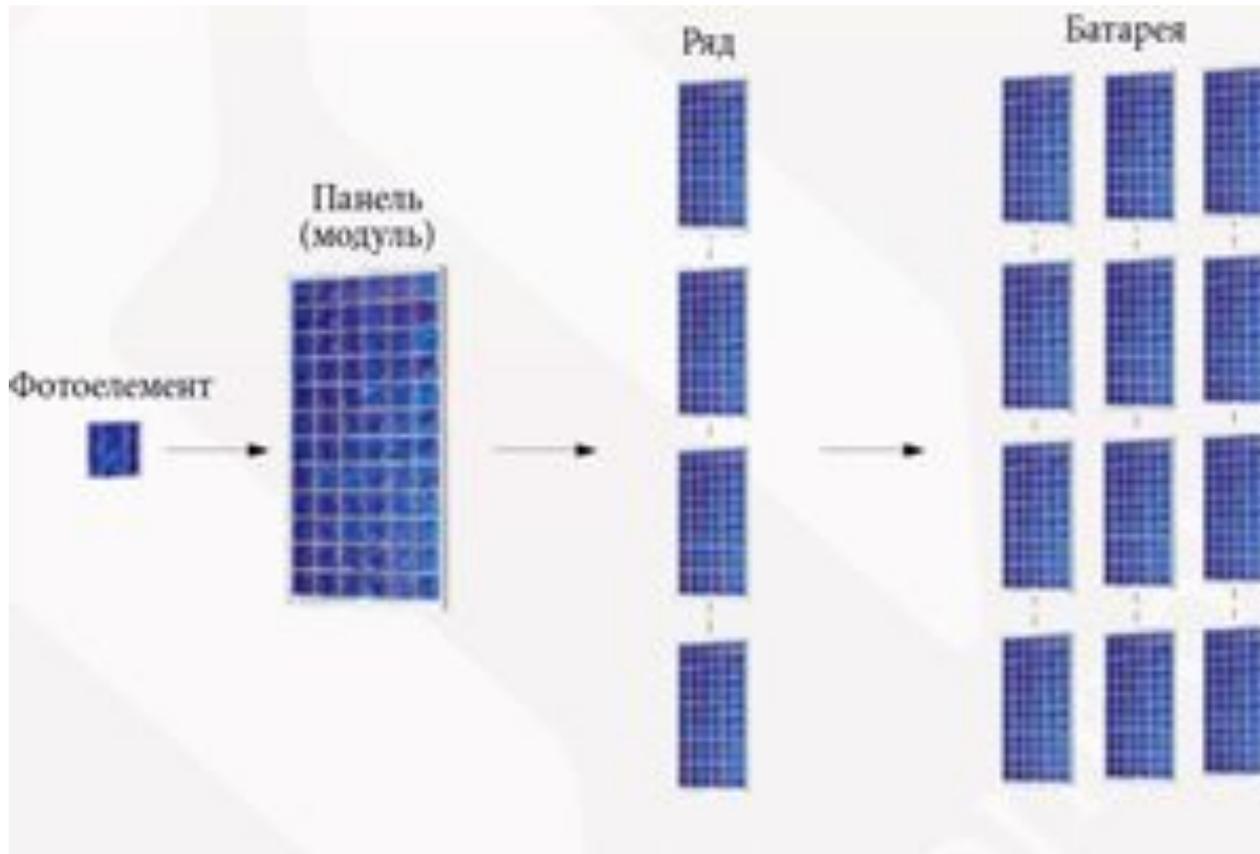


Носителями заряда являются электроны (-) и «дырки» (+)

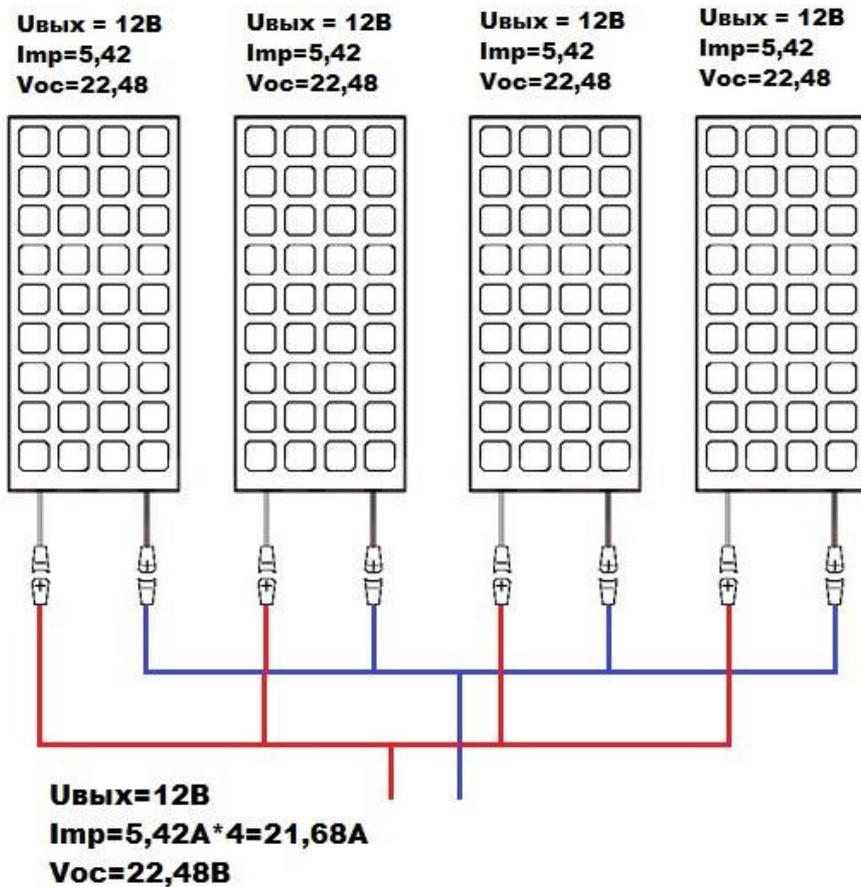
Элементы ячейки ФЭП



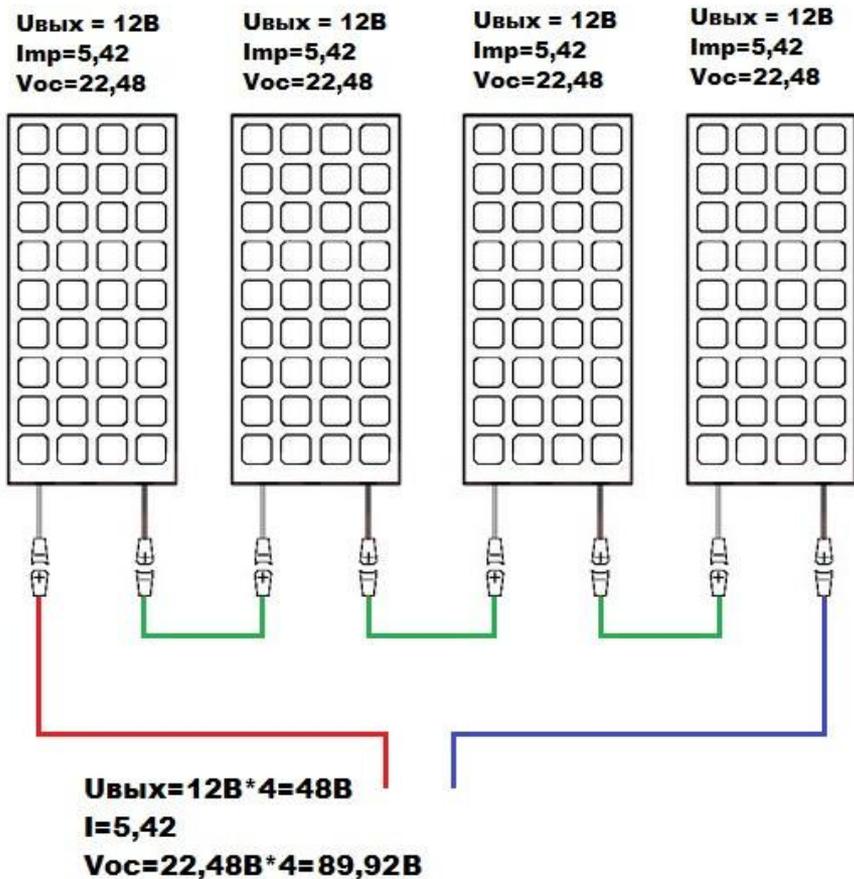
Классификация



Параллельное соединение панелей



Последовательное соединение панелей



Виды фотоэлектрических элементов

Вид фотоэлемента	КПД, выпускаемых в производственных масштабах ФЭ
Монокристаллические	17-22%
Поликристаллические	12-18%
Аморфные	5-6%
На основе теллурида кадмия	10-12%
На основе селенида меди-индия	15-20%
На основе полимеров	5-6%

Монокристаллические фотоэлементы



Монокристаллические кремниевые батареи представляют собой силиконовые ячейки, объединенные между собой. Для их изготовления используют максимально чистый кремний. После затвердевания готовый монокристалл разрезают на тонкие пластины толщиной 250-300 мкм, которые пронизывают сеткой из металлических электродов.



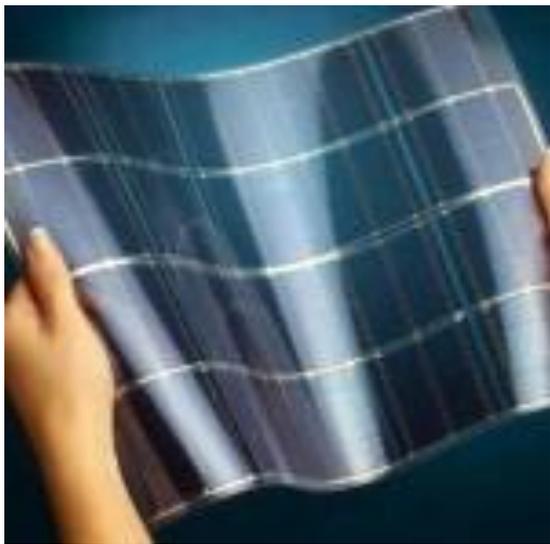
Поликристаллические фотоэлементы



Наиболее распространенный тип Фотоэлементов. Для получения поликристаллов кремниевый расплав подвергается медленному охлаждению. Такая технология требует меньших энергозатрат, следовательно, и себестоимость кремния, полученного с ее помощью меньше.

Внутри поликристалла образуются области с зернистыми границами, которые и приводят к уменьшению эффективности элементов

Аморфные фотоэлементы на основе кремния



Используется не кристаллический кремний, а силан или кремневодород. КПД таких батарей составляет всего 5-6%, но, несмотря на эти недостатки, они имеют и ряд достоинств:

- Показатель оптического поглощения в 20 раз выше, чем у поли- и монокристаллов.
- Толщина элементов меньше 1 мкм.
- В сравнении с поли- и монокристаллами имеет более высокую производительность при пасмурной погоде.
- Повышенная гибкость.

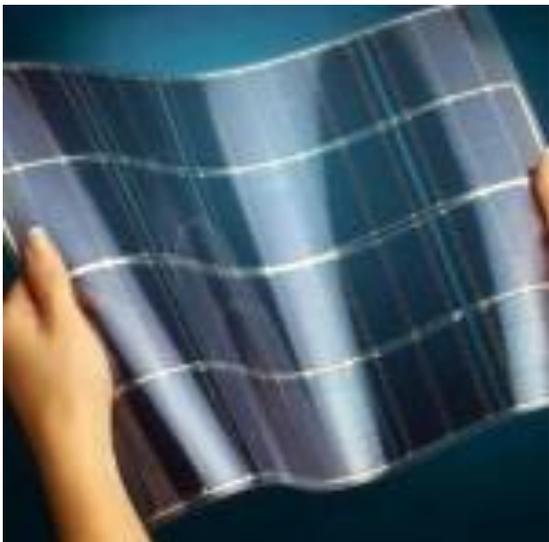
Фотоэлементы телурида кадмия



Сегодня батареи на основе CdTe являются одними из самых перспективных в земной солнечной энергетике. Кадмий является кумулятивным ядом, поэтому идут споры о токсичности таких батарей.

Значение КПД составляет порядка 11%, зато стоимость ватта мощности таких батарей на 20-30% меньше, чем у кремниевых.

Фотоэлементы на основе селена меди индия



- ▶ Обладают более высоким КПД (15-20%) по сравнению с кремниевыми, но и большей стоимостью.

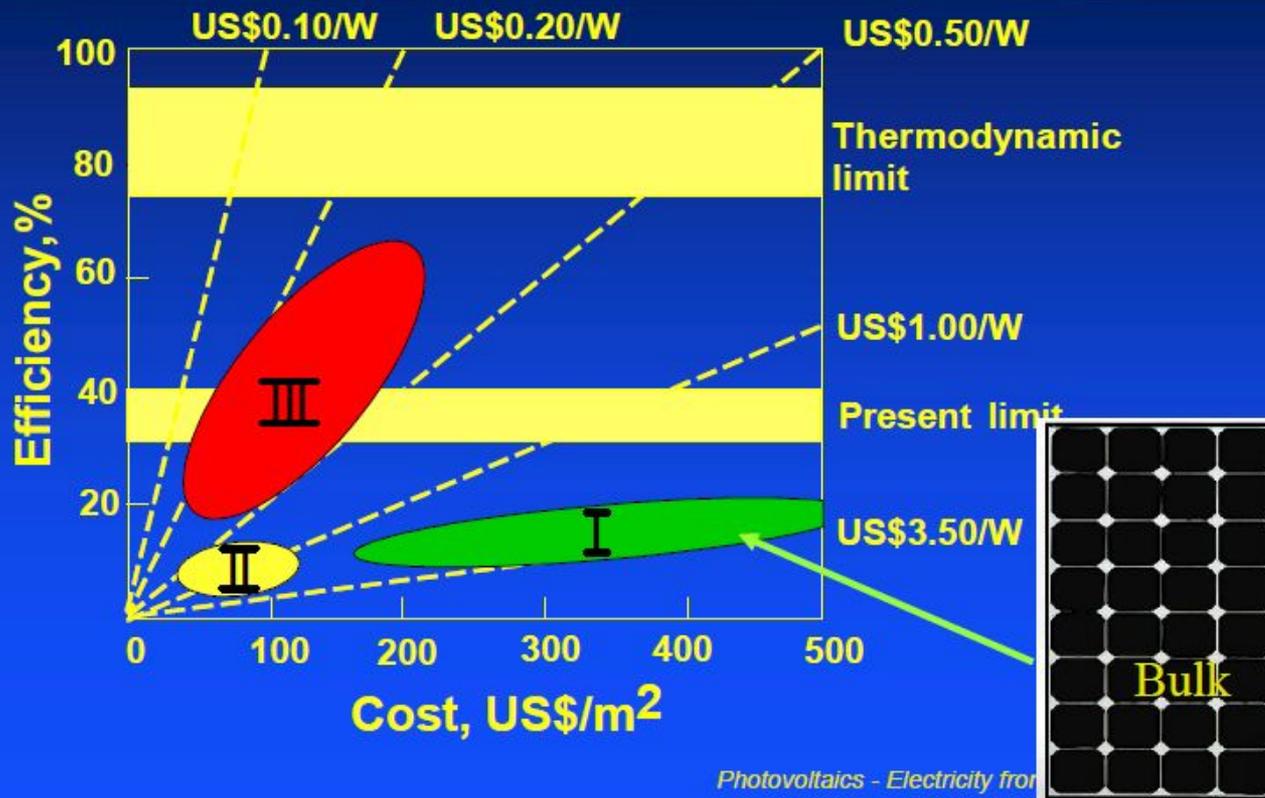
Фотоэлементы на основе полимеров

В качестве светопоглощающих материалов используются органические полупроводники. Полимерные солнечные батареи имеют КПД 5-6%.

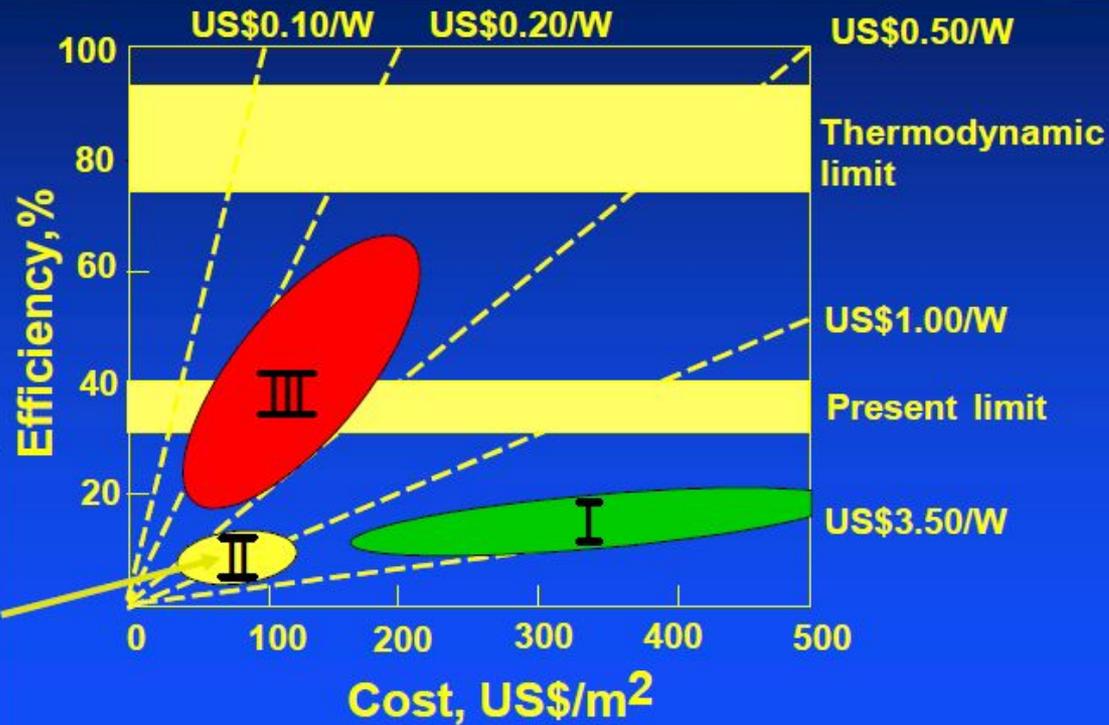
- ▶ Но их главными достоинствами считаются:
- ▶ Низкая стоимость производства.
- ▶ Легкость и доступность.
- ▶ Отсутствие вредного воздействия на окружающую среду.

Применяются полимерные батареи в областях, где наибольшее значение имеет механическая эластичность и экологичность утилизации.

Три поколения солнечных элементов



Три поколения солнечных элементов



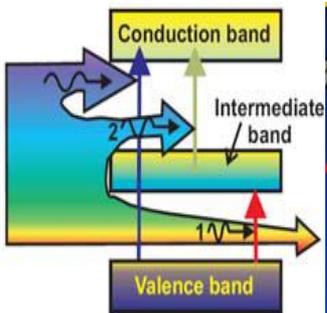
Thin-film



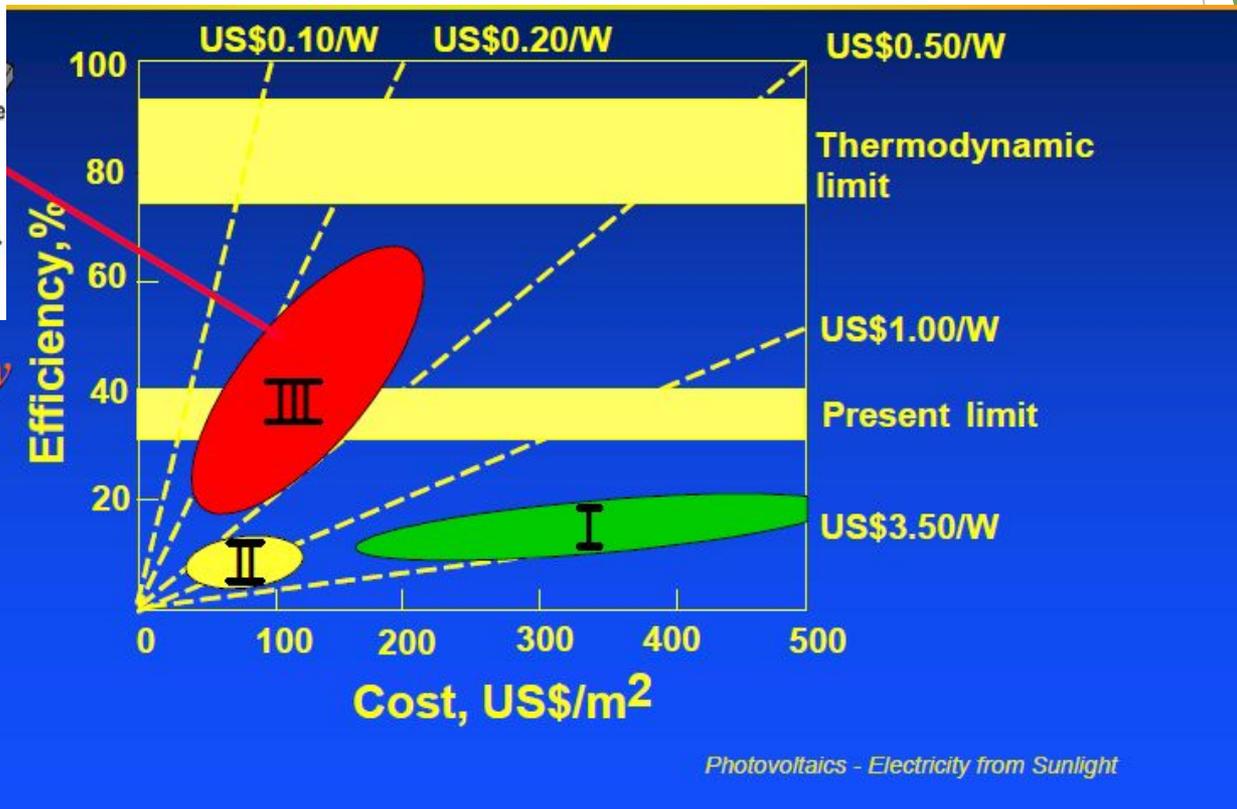
Includes dye, organic

Photovoltaics - Electricity from Sunlight

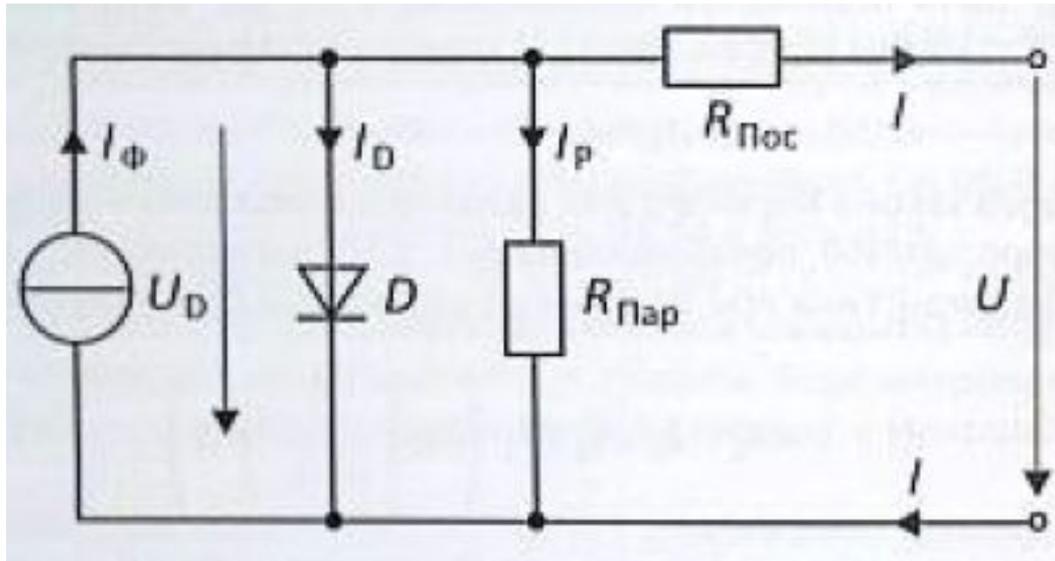
Три поколения солнечных элементов



- . high-efficiency
- . thin-film
- . abundant
- . non-toxic
- . durable



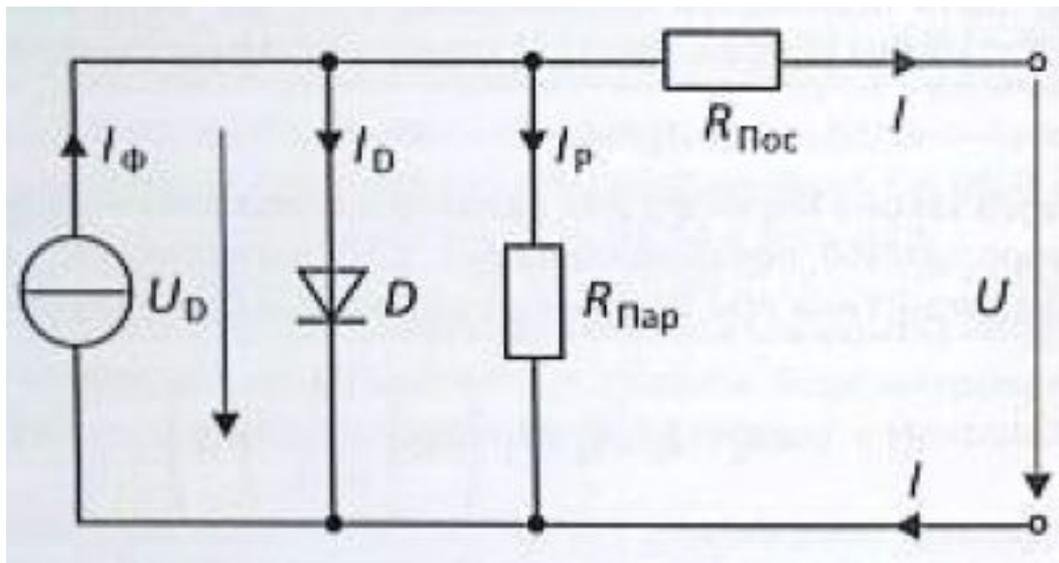
Электрическая схема замещения



Последовательное сопротивление - внутренне сопротивление фотоэлемента (0,5...1,0 Ом)

Параллельное сопротивление - шунтирующее сопротивление при возникновении токов утечки по краям фотоэлемента (200...300 Ом)

Электрическая схема замещения



$$I = I_L - I_D \left[e^{\frac{QU_{XX}}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U_{XX}}{R_{\text{пар}}}$$

I_D – ток насыщения диода;

Q – заряд электрона = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

A – постоянная сглаженного графика модуля;

K – постоянная Больцмана = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – температура

Напряжение холостого хода и ток короткого замыкания

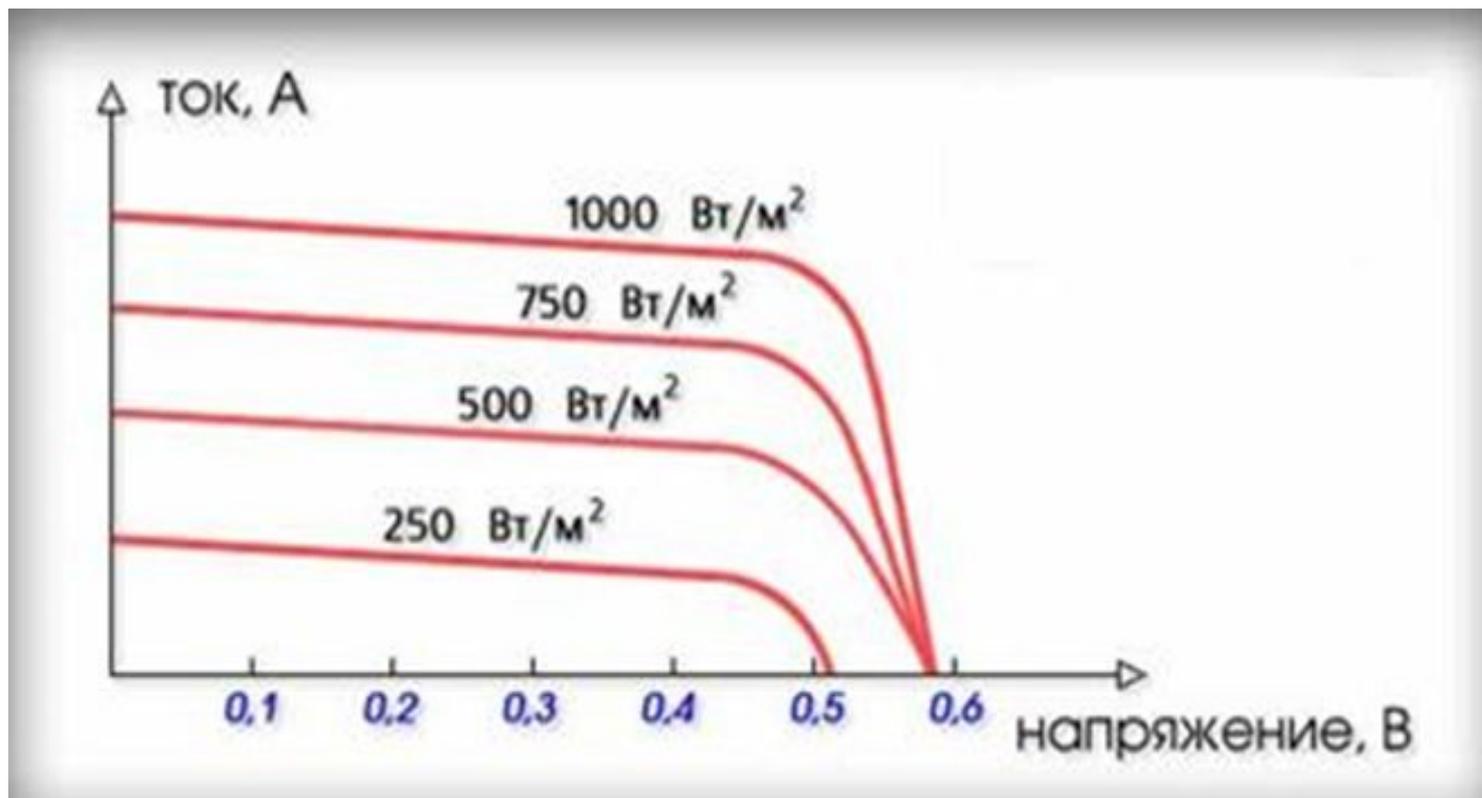
- ▶ Напряжение холостого хода

$$U_{xx} = A \cdot 0,026 \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_D} + 1 \right)$$

- ▶ Ток короткого замыкания

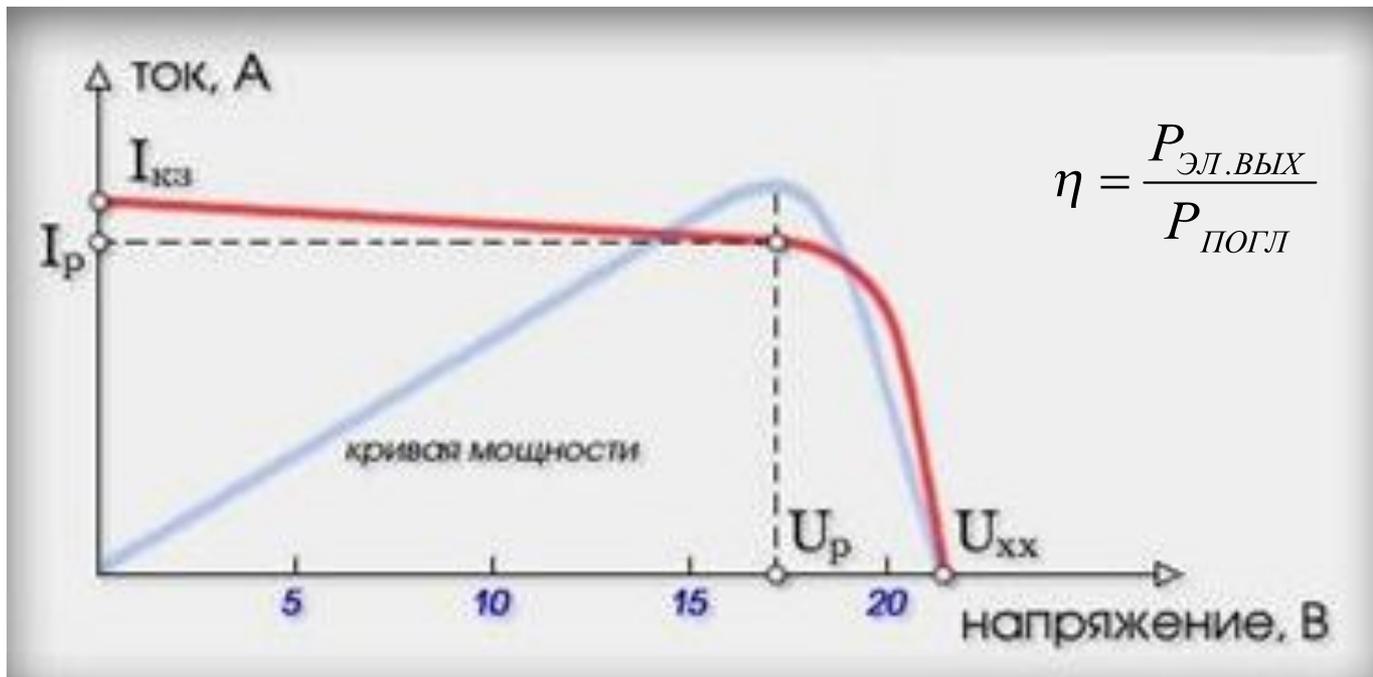
$$I = I_L$$

Вольтамперная характеристика



ВАХ сдвигается вниз или вверх в зависимости от Интенсивности солнечного излучения

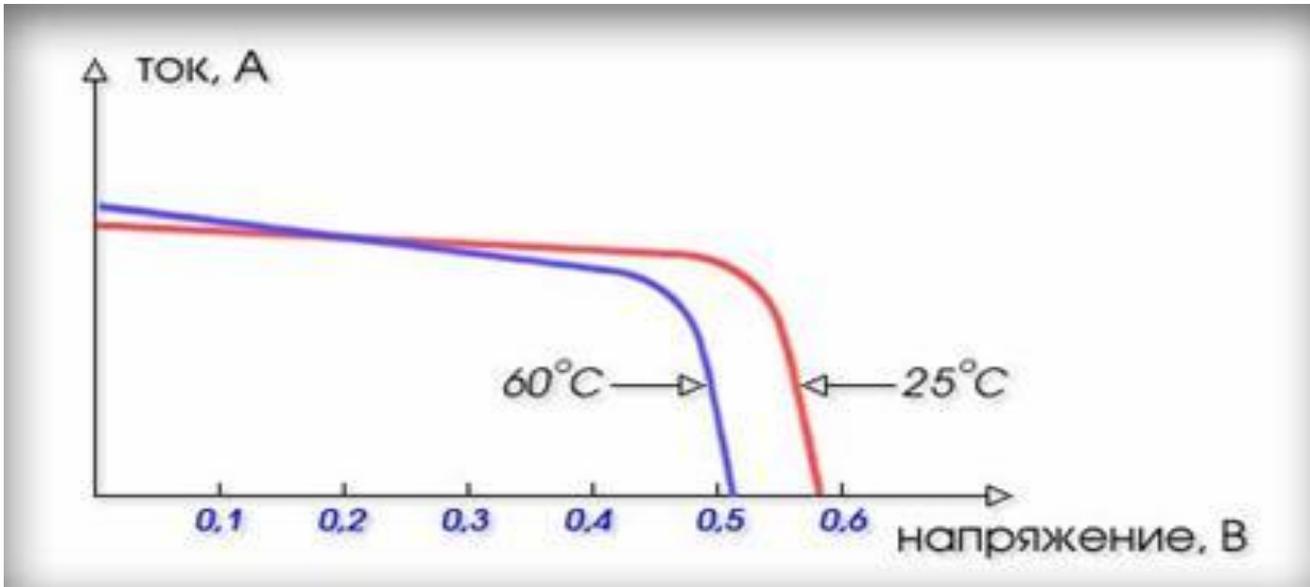
Энергетическая характеристика фотоэлектрического модуля



$$P=UI$$

Максимальная мощность генерируется в
точке перегиба ВАХ

Влияние температуры на ВАХ солнечного модуля



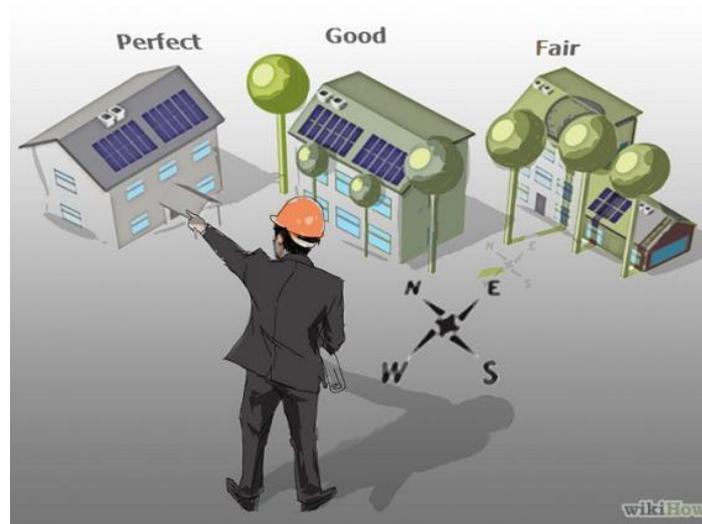
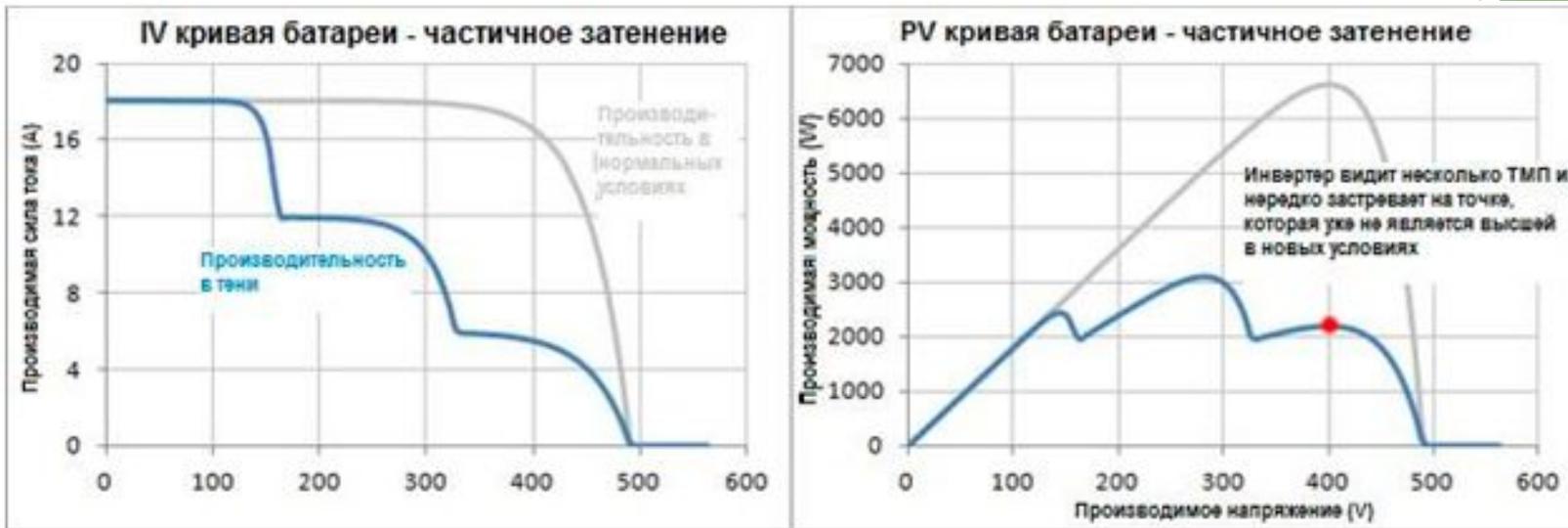
$$P = V \cdot I = I_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot V_0 (1 - \beta \cdot \Delta T)$$

$$P = P_0 \cdot [1 + (\alpha - \beta) \cdot \Delta T]$$

$\alpha = 0,5\%$ на $^{\circ}\text{C}$, а $\beta = 0,05\%$ на $^{\circ}\text{C}$

$$P = P_0 \cdot [1 - 0,0045 \cdot \Delta T]$$

Влияние затенения на ВАХ

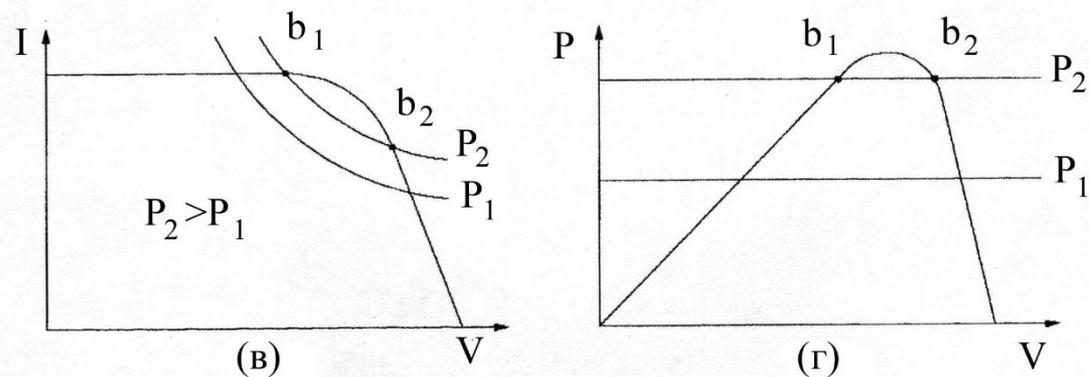
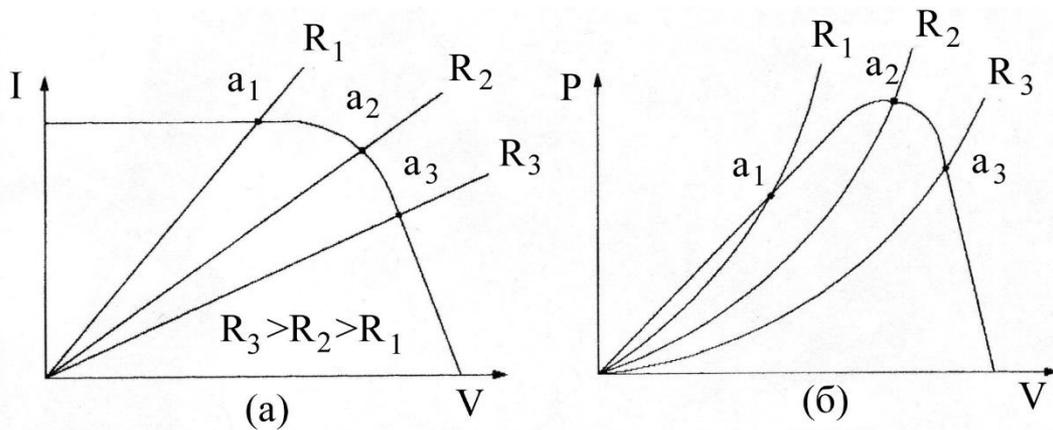


Влияние погодных условий на работу модуля

- ▶ Даже в самый пасмурный день мощность на выходе солнечной панели может составлять до 30% от номинальной.



Влияние величины нагрузки



Системы движения за положением солнца

- ▶ **Одноосные.** Привод осуществляет автоматическую ориентацию панели в одной плоскости (в течение дня)
- ▶ **Двуосные.** Привод осуществляет автоматическую ориентацию как в течение дня, с востока на запад, так и в течение года, при перемещении солнца с севера на юг

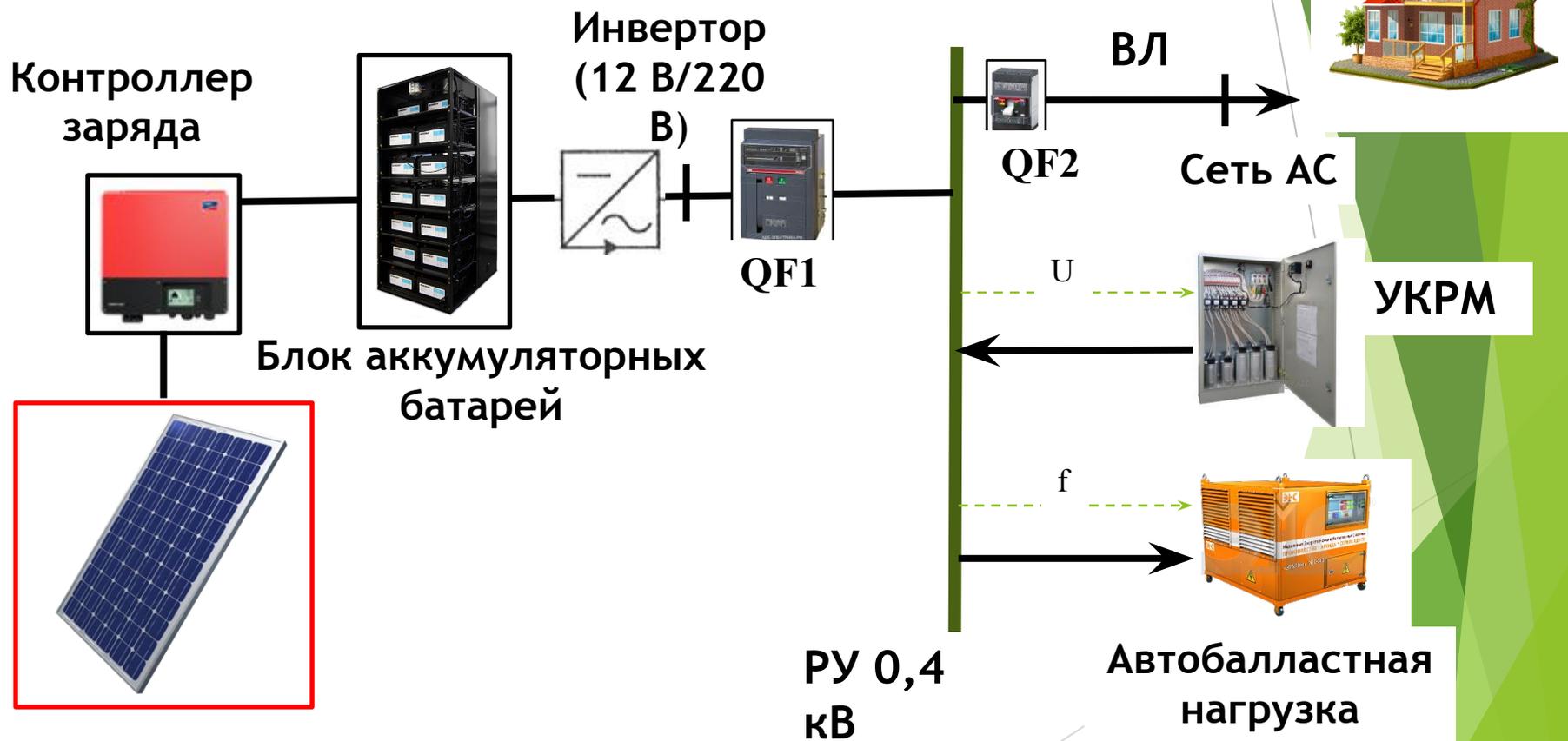
Повышают выработку электроэнергии на 40%



Варианты СЭС на базе ФЭП

- ▶ Солнечные батареи заряжают АКБ через контроллер заряда, а затем энергия через инвертор передаётся на нагрузку
- ▶ Солнечные батареи работают на инвертор, от которого питается нагрузка, а излишки идут на заряд аккумуляторов
- ▶ Гибридная система, включающая элементы обеих вышеперечисленных

Первый вариант



Второй вариант

СЭС

(DC; 12, 24 В)



Блок аккумуляторных
батарей



Контроллер
заряда

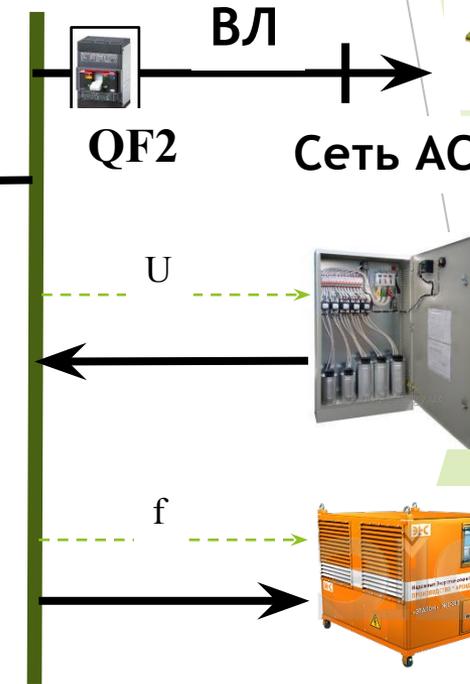
Инвертор
(12 В/220
В)



QF1



QF2



ВЛ

Сеть АС

U

УКРМ

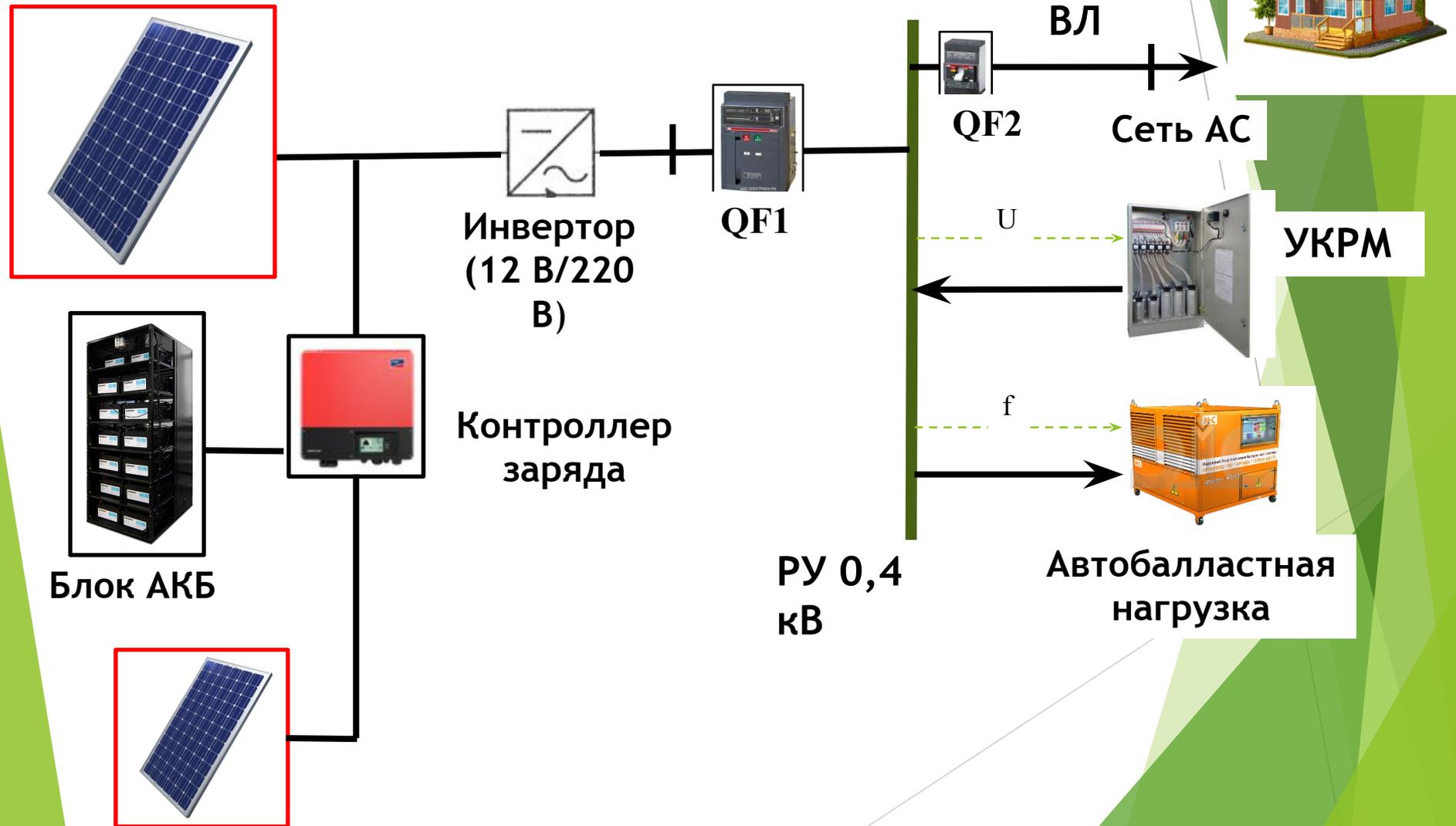
f

РУ 0,4
кВ

Автобалластная
нагрузка



Третий вариант



Солнечная мимикрия

SolarSkin



Солнечная мимикрия



Солнечная мимикрия



Солнечная мимикрия

