

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

Федченко Т.В., студент; Левшов А.В., доц., к.т.н.

(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)

Известно несколько вариантов представления схемы замещения фотоэлектрического элемента: обобщенная (эквивалентная), с двойным экспоненциалом, упрощенная и идеализированная [1]. Наиболее рационально представляет реальный солнечный элемент, так называемая эквивалентная [2,3] схема замещения, показанная на рисунке 1.

Составными элементами схемы является: источник тока, диод, шунтирующее $R_{ш}$ и последовательное $R_{п}$ сопротивления. Источник тока моделирует процесс возникновения в элементе фототока I_{ϕ} под действием освещения. Диод включен в прямом направлении параллельно источнику тока. Под действием прямого смещения из-за наличия избыточных концентраций электронов в n – области элемента и избыточной концентрации дырок в его p – области через диод протекает некоторый ток $I_{д}$. Шунтирующие сопротивления фотоэлемента $R_{ш}$, возникает за счет наличия обратного сопротивления $n - p$ – перехода и различных проводящих пленок или загрязнений на поверхности элемента, оно также включено параллельно источнику тока. Последовательное сопротивление $R_{п}$ включено последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{н}$, его составляют сопротивление контактов (главным образом переходное сопротивление полупроводник - металл) и сопротивление самого полупроводникового материала из которого изготовлен фотоэлемент (сопротивление каждой из p – и n – областей элемента. На этом сопротивлении будет теряться часть Э.Д.С., развешаемой фотоэлементом [3].

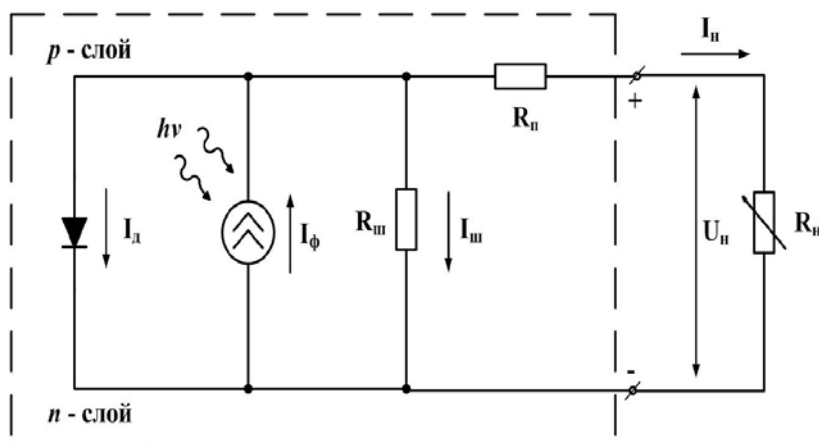


Рисунок 1 - Эквивалентная схема фотоэлемента

Выражение для определения тока нагрузки [4]

$$I_H = I_{\phi} - I_{O.H} \cdot \left[\frac{q}{e A \cdot k \cdot T} (U_H + I_H \cdot R_{п}) - 1 \right] - \frac{U_H}{R_{\phi}}, \quad (1)$$

где $I_{O.H}$ – обратный ток насыщения; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура фотоэлемента; A – диодный фактор; U_H – падение напряжение на сопротивлении нагрузки R_H .

Для нахождения параметров схемы замещения фотоэлемента требуются две вольт – амперные характеристики (ВАХ), такие как: *световая* (нагрузочная) и *темновая* ВАХ. На

рисунке 2 в одной системе координат представлены ВАХ для фотоэлемента. На нем сплошная кривая это нагрузочный участок световой характеристики (в квадранте–I); пунктирная кривая – темновая характеристика (в квадранте–II обратная ветвь, в квадранте IV– прямая ветвь).

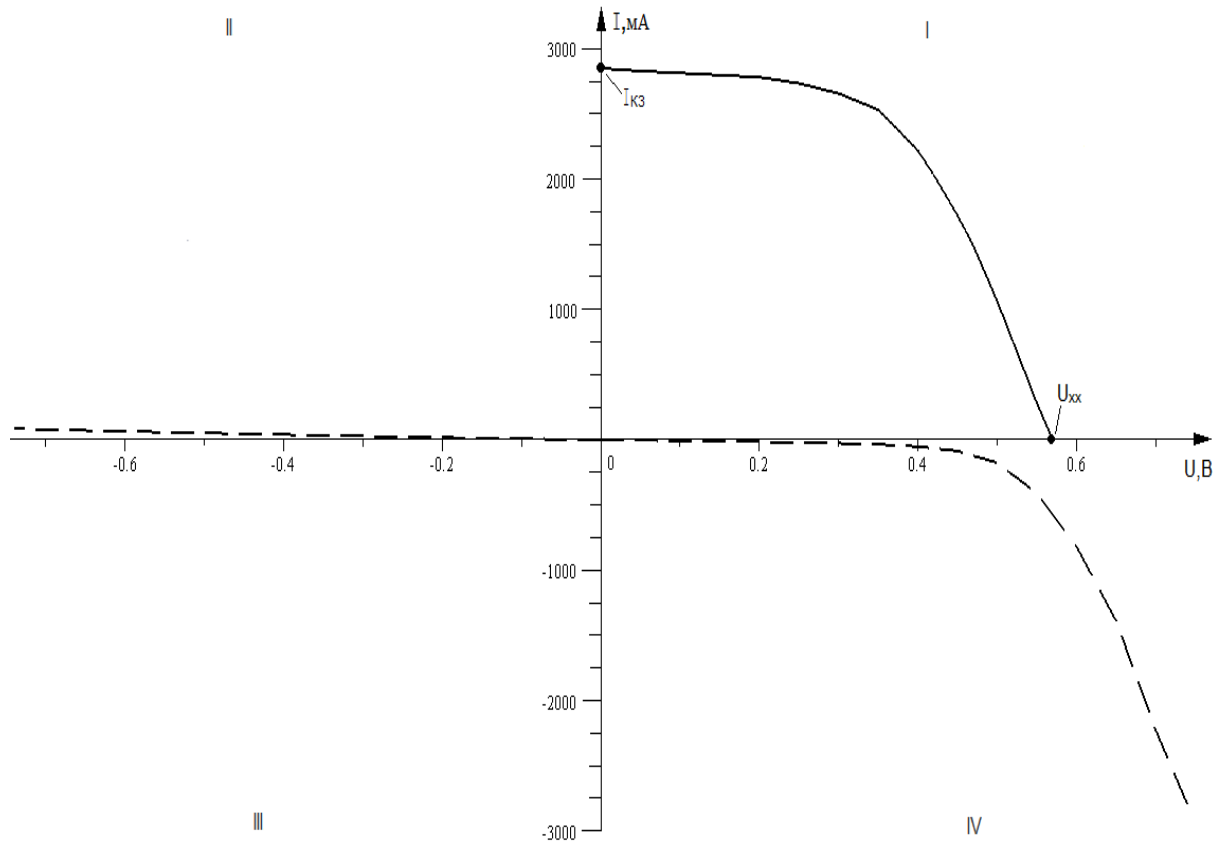


Рисунок 2 – Вольт – амперная характеристика ФЭ.

Фотоэлемент изучают уже на протяжении длительного периода времени и разработали ряд методик, позволяющих на основании *световой* и *темновой* ВАХ солнечных элементов рассчитать значения параметров схемы замещения: R_{II} , R_{III} , $I_{O.H}$ и коэффициент A .

Для нахождения последовательного сопротивления R_{II} , используют часть *световой* характеристики, расположенной в I квадранте, и ее продолжение (IV квадрант). Величина наклона этой прямой к оси токов характеризует последовательное сопротивление ФЭ. (смотри рисунок 3.б),

$$R_{II} = \left| \frac{\Delta U_{II}}{\Delta I_{II}} \right|, \quad (2)$$

где ΔU_{II} и ΔI_{II} измеряются в области, близкой к $U_{X.X}$.

R_{III} находим по обратной ветви *темновой* ВАХ, которая также представляет собой прямую линию. Степень наклона этой прямой к оси напряжений характеризует величину шунтирующего сопротивления фотоэлемента.(показано на рисунке 3.а)

$$R_{III} = \left| \frac{\Delta U_{OBR}}{\Delta I_{OBR}} \right|. \quad (3)$$

Обратный ток насыщения $I_{O.H}$ и коэффициент A находим по прямой ветви темновой ВАХ. Для этого воспользуемся *темновой* характеристикой диода и уравнением прямой в отрезках:

$$\ln (I_D + I_{O.H}) = \ln (I_{O.H}) + \frac{q}{A \cdot k \cdot T} \cdot U. \quad (4)$$

Это уравнение применяется при расчетах только в случае больших токов (когда $I_D \gg I_{O.H}$), а также рекомбинационного механизма протекания обратного тока насыщения через $n - p$ - переход [3].

Участок больших токов и напряжений (характерных для рабочей нагрузочной точки ФЭ) прямой ветви *темновой* ВАХ используется для построения зависимости $\ln I_D = f(U)$.

Тангенс угла наклона этой прямой равен $\frac{q}{A \cdot k \cdot T}$ (что позволяет рассчитать величину параметра A), а отрезок, отсекаемый на оси ординат, дает значение $\ln I_{O.H}$ (при определенной температуре).

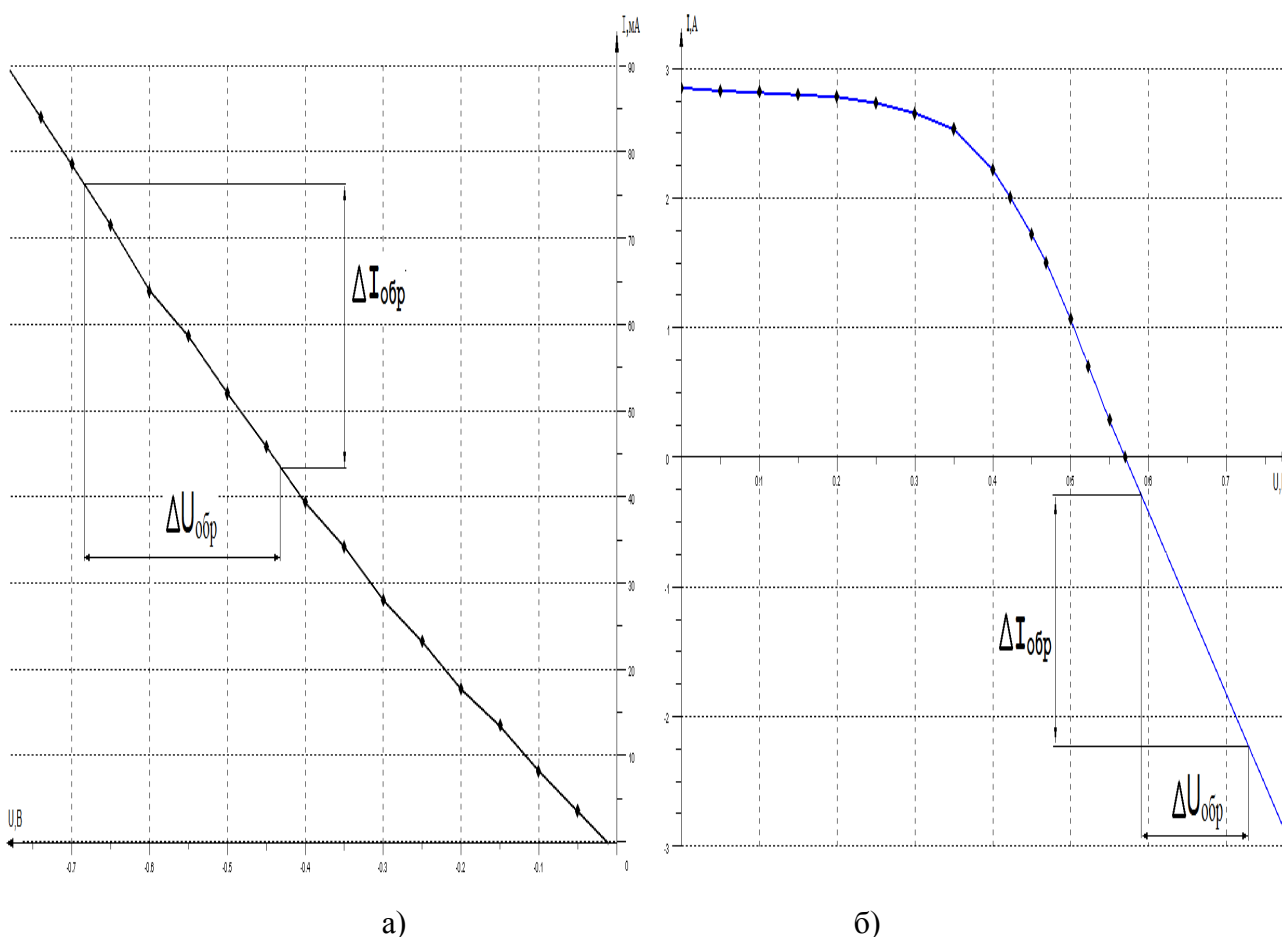


Рисунок 3- Обратная ветвь темновой и световой ВАХ

Для фотоэлемента на базе монокристаллического кремния площадью 98см^2 были найдены параметры схемы замещения, определенные по изложенной методике. В таблице 1 представлены результаты определения параметров схемы замещения.

Таблица 1- Параметры схемы замещения экспериментального образца.

R_D (Ом)	R_{SH} (Ом)	$I_{O.H}$ (А)	A
0.0615	7.5	$4.26 \cdot 10^{-3}$	3.5

В качестве *световой* характеристики использовалась зависимость полученная на заводе-изготовителе при стандартных условиях (STK). *Темновая* ВАХ была получена экспериментально при помощи рекомендаций, которые изложены в [5].

Экспериментальный образец имеет следующие технические данные: ток короткого замыкания $I_{KЗ}=I_{SC}=2850 \pm 25.6\text{мА}$; напряжения холостого хода $U_{ХХ}=U_{OC}=0.57 \pm 0.001\text{В}$;

коэффициент заполнения $FF=0.553\pm 0.01$; КПД фотоэлемента $Eff=9\pm 1.13\%$; напряжение при макс. мощности $U_M=0.375\pm 0.001$; ток при макс. мощности $I_M=2390\pm 25.6$ мА.

На основании данных таблицы 1 была получена моделируемая характеристика фотоэлемента, которая отличается от заводской в диапазоне напряжений $U=0.25 - 0.4$ В приблизительно на 23% (показано на рисунке 4). Отклонение напряжения холостого хода моделируемой характеристики от заводской составляет $\Delta U_{xx}=0.009$ В. На рисунке 4 пунктирная кривая – это заводская характеристика; сплошная кривая – моделируемая характеристика построенная на основе параметров схемы замещения (Таблица 1).

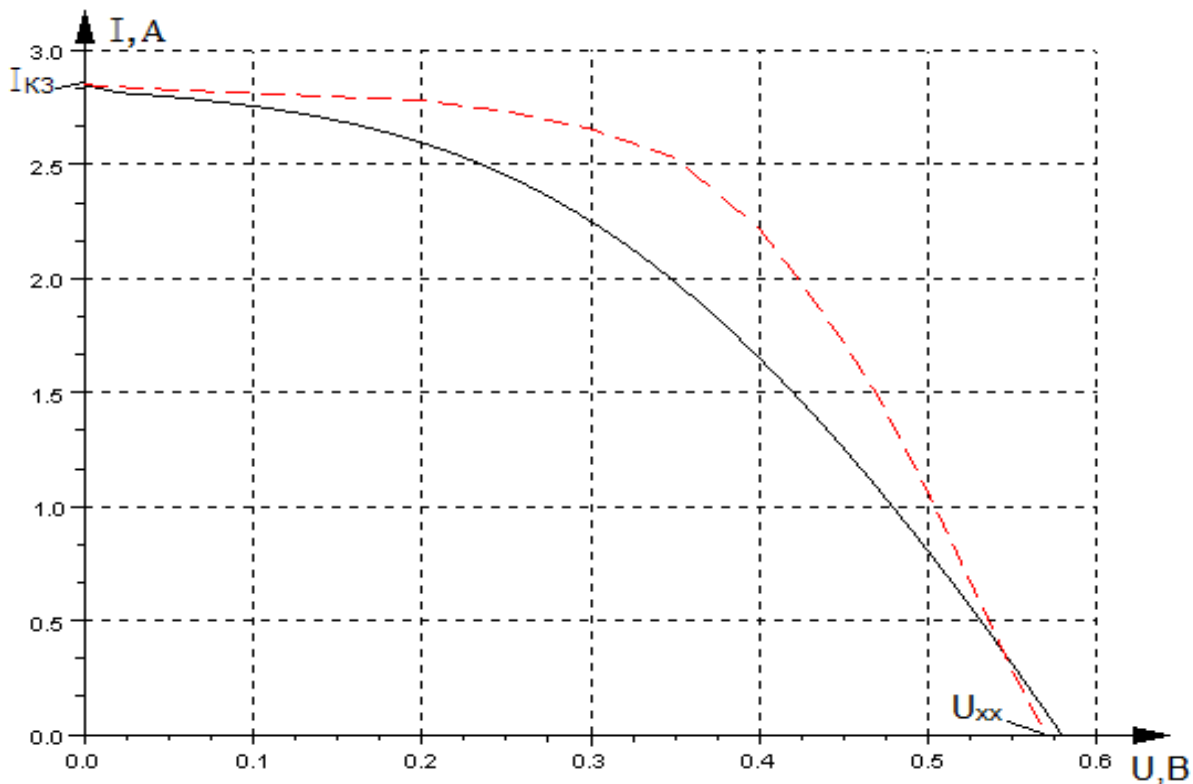


Рисунок 4 – ВАХ фотоэлемента

Перечень ссылок

1. Левшов А.В., Федоров А.Ю. Математическое моделирование фотоэлектрических систем в Matlab/Simulink // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та енергетика» № 1 (14) – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2013. – С. 153-158.
2. Глиберман А.Я., Зайцева А.К / Ред. П.А. Попов. Кремневые солнечные батареи. М – Л., Госэнергоиздат 1961. – 72С.
3. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985, 280 С.
4. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360С.
5. Лигачев В.А., Попов А.И. / Ред. А.И. Попов. Лабораторная работа “Спектральная чувствительность и вольт – амперная характеристика солнечного элемента” по курсу “Физика и технология приборов основе некристаллических полупроводников” - М.: изд-во МЭИ, 1999, – 15 С.