

УДК 621.472 (043)

**Р.В.Антипенко** (Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев),

**И.Н.Кирпатенко**, канд. техн. наук (Научно-производственное предприятие "Внедренческая экспериментальная лаборатория" (НПП "ВЭЛ"), Киев)

## **Устройство для физического моделирования вольт-амперной характеристики фотобатарей**

*В статье предлагается устройство, моделирующее вольт-амперную характеристику фотобатареи, в котором в качестве установки используется кремниевый фотодиод. В разработанном приборе ток фотодиода пропорционален току нагрузки, а напряжение нагрузки есть усиленное напряжение кремниевого фотодиода. Так как вольт-амперная характеристика фотодиода идентична вольт-амперной характеристике фотоэлемента, устройством реализуется вольт-амперная характеристика фотобатареи.*

*У статті запропоновано пристрій, який моделює вольт-амперну характеристику фотобатареї, де в якості установки застосовується кремнієвий фотодіод. У розробленому пристрої струм фотодіода пропорційний струму навантаження, а напруга навантаження являє собою підсилену напругу кремнієвого фотодіода. Оскільки вольт-амперна характеристика фотодіода ідентична вольт-амперній характеристиці фотоелемента, то пристрій реалізує вольт-амперну характеристику фотобатареї.*

**Введение.** Разработка устройств, работающих совместно с фотобатареями, обязательно содержит этап испытаний. Использование для этой цели фотобатарей часто бывает затруднительным, так как энергия, генерируемая фотобатареями, зависит от уровня освещенности, который, в свою очередь, определяется погодой. Для маломощных устройств (до 10 Вт) можно использовать источники искусственного освещения. Для приборов, работающих с мощностями в десятки-сотни ватт использование искусственного освещения неэффективно. В таких случаях для проведения испытаний используют устройства, моделирующие вольт-амперную характеристику (ВАХ) фотобатарей.

**Постановка задачи.** Известно устройство [1], использующее для моделирования ВАХ фотобатареи источник тока. Однако воспроизведенная таким устройством ВАХ фактически состоит из двух прямых и неудовлетворительно отображает ВАХ фотобатареи, особенно в окрестности точки отдачи максимальной мощности.

Для устранения этого недостатка было разработано устройство, использующее иной принцип. Используется тот факт, что ВАХ фотодиода фак-

тически есть ВАХ фотоэлемента. Задавая фотодиоду ток, пропорциональный току нагрузки, и подавая усиленное в нужном масштабе напряжение фотодиода на нагрузку, реализуется масштабированная ВАХ фотодиода, т.е. ВАХ фотобатареи. Если для этой цели использовать фотодиод диодного оптрона, то, управляя током светодиода, появляется возможность моделировать изменение освещенности фотобатареи [2].

### **Устройство для моделирования ВАХ фотобатарей.**

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 1. Резистор R1 представляет собой датчик тока нагрузки RL. На операционном усилителе DA1, транзисторах VT2, VT3, VT4, резисторах R2-R8 собран преобразователь тока нагрузки в ток фотодиода оптрона.

На транзисторе VT5 и резисторах R11-R13 собран управляемый генератор тока светодиода диодного оптрона. На операционном усилителе DA2, резисторах R9, R10 собран усилитель напряжения фотодиода оптрона, выходное напряжение которого через эмиттерный повторитель VT1 подается на нагрузку RL. Конденсаторы C1, C2 обеспечивают устойчивость устройства.

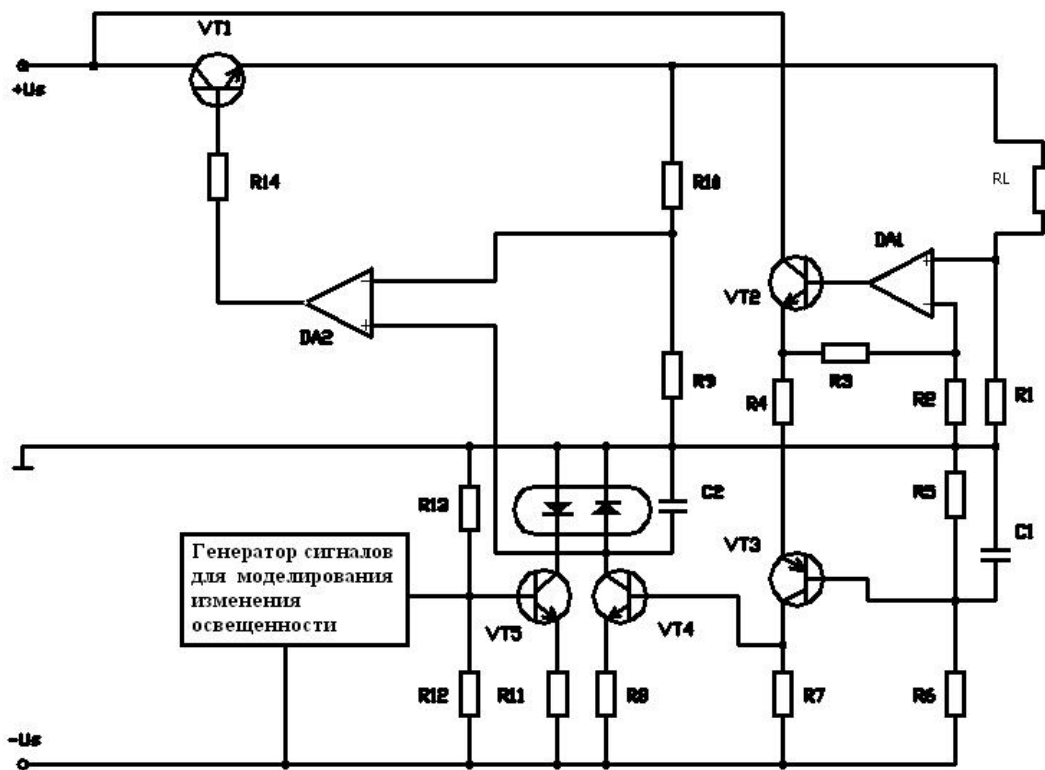


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная устройства для моделирования ВАХ фотобатареи.

Напряжение на нагрузке RL можно определить из уравнения:

$$U_{out} + U_s = K(U_d - \beta(U_{out} + U_s)), \quad (1)$$

где  $U_s$  – напряжение на датчике тока;  $U_{out}$  – напряжение на нагрузке;  $U_d$  – напряжение на фотодиоде оптрона;  $K$  – коэффициент усиления операционного усилителя без отрицательной обратной связи;  $\beta = \frac{R_9}{R_9 + R_{11}}$ .

Решив уравнение (1) относительно  $U_{out}$ , получим:

$$U_{out} = \frac{K}{1 + \beta \cdot K} \cdot U_d - U_s. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что напряжение на нагрузке не точно пропорционально напряжению на фотодиоде оптрона из-за наличия падения напряжения на датчике тока  $U_s$ .

Для определения влияния  $U_s$  на точность воспроизведения ВАХ фотобатареи выражение для  $U_s$ :

$$U_s = \frac{U_{out} \cdot R_l}{R_l}$$

необходимо подставить в выражение для  $U_{out}$ :

$$U_{out} + \frac{U_{out} \cdot R_l}{R_l} = K \left( U_d - \beta \left( U_{out} + \frac{U_{out} \cdot R_l}{R_l} \right) \right).$$

Отсюда получим коэффициент передачи по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{out}}{U_d} = \frac{K \cdot R_l}{(1 + \beta \cdot K)(R_l + R_l)} \approx \frac{R_l}{\beta(R_l + R_l)} = \frac{1}{\beta \left( 1 + \frac{R_l}{R_l} \right)}.$$

Из этого выражения видно, что погрешность воспроизведения ВАХ фотобатареи определяется соотношением сопротивления датчика тока и сопротивления нагрузки. Наибольшая погрешность существует при малых значениях сопротивления нагрузки, вблизи тока короткого замыкания.

В большинстве практических случаев точность воспроизведения ВАХ таким устройством

является достаточной. Но в случае необходимости можно скомпенсировать погрешность, вносимую датчиком тока и тем самым повысить точность воспроизведения ВАХ. Для компенсации влияния сопротивления датчика тока на точность воспроизведения ВАХ фотобатареи необходимо подать на неинвертирующий вход усилителя DA1 сигнал:

$$U_{\Sigma} = U_d + \beta \cdot U_s. \quad (3)$$

Теперь выходное напряжение можем определить, подставив (3) в (1):

$$U_{out} = \frac{K \cdot U_d}{1 + K \cdot \beta} - \frac{U_s}{1 + K \cdot \beta}.$$

Учитывая, что для операционного усилителя  $K \approx 50000 - 100000$ , можно записать:

$$U_{out} \approx \frac{U_d}{\beta} - \frac{U_s}{K \cdot \beta} \approx \frac{U_d}{\beta}.$$

Схема электрическая принципиальная прибора с улучшенной точностью воспроизведения ВАХ приведена на рис. 2.

В сумматоре, состоящем из операционного усилителя DA2 и резисторов R16-R19, осуществ-

ляется суммирование напряжения фотодиода оптрона с уменьшенным в  $\beta$  раз напряжением датчика тока ( $R_{10} = R_{11}$ ;  $R_9 = \frac{R_{12} \cdot R_{18}}{R_{12} + R_{18}}$ ).

Таким образом, реализуется соотношение (3), и на нагрузку подается напряжение, в точности пропорциональное напряжению фотодиода оптрона.

Приведенные схемные решения позволяют моделировать фотобатареи с максимальной отдаваемой мощностью до нескольких сотен Вт. Предельная величина максимальной мощности определяется параметрами транзистора VT1. Поскольку данное устройство аналоговое, уровень рассеиваемой транзистором VT1 мощности достаточно велик, причем наиболее тяжелый режим наблюдается в окрестности точки короткого замыкания, когда через силовой транзистор протекает максимальный ток и приложено максимальное напряжение. Режимом короткого замыкания, в сущности, и ограничивается максимальная мощность устройства. В случае необходимости

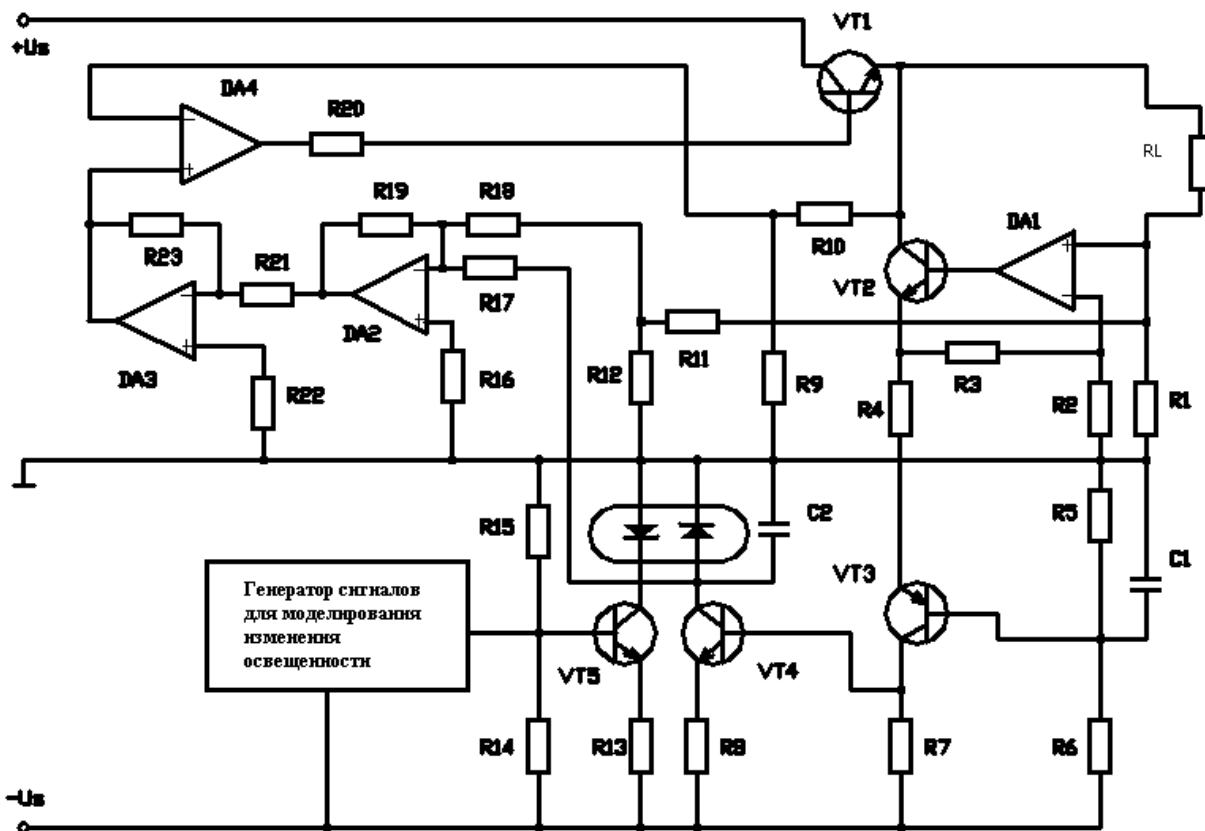


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная прибора для моделирования ВАХ фотобатареи повышенной точности.

моделирования фотобатарей с максимальной мощностью в единицы кВт целесообразно применить импульсный источник питания со следящей обратной связью по напряжению. Эта обратная связь должна уменьшать выходное напряжение источника питания при приближении рабочей точки к точке короткого замыкания таким образом, чтобы падение напряжения на транзисторе не превышало 3-5 В. Таким образом, для силового транзистора (или группы параллельно соединенных силовых транзисторов) создадутся оптимальные с точки зрения рассеиваемой мощности условия.

**Выводы.** В статье предложены два устройства, моделирующие ВАХ фотобатарей, основанные на использовании в качестве уставки фотодиодной части диодного оптрона. Первый вариант устройства, с более простой принципиальной схемой, воспроизводит ВАХ фотобатарей с некоторой погрешностью, зависящей от соотношения сопротивления нагрузки и датчика тока нагрузки.

Во втором варианте прибора скомпенсирована погрешность, вносимая датчиком тока, и тем самым повышена точность воспроизведения ВАХ фотобатарей.

Описанные несложные устройства позволяют проводить испытания и настройку приборов, питающихся от фотобатарей, в лабораторных условиях без использования фотобатарей и без дорогостоящих моделирующих устройств на основе сигнальных процессоров [3]. Также это устройство может быть применено в учебном процессе для проведения лабораторных работ по фотоэнергетике.

1. *Проектирование ключевых источников электропитания* / П. Четти – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
2. *Пат. 42410 А Україна*. МКВ G06G7/62. Пристрій для моделювання вольт-амперної характеристики: Пат. 42410 А Україна. МКВ G06G7/62/ Кирпатенко І.М. (Україна); Інститут електродинаміки НАН України. – №2001021157; Заявлено 19.02.2001; Опубл. 15.10.2001, Бюл. №9. – 4 с.
3. *Texas Instruments*, <http://www.ti.com>

**МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БІЗНЕС-ФОРУМ З ПИТАНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

**VII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2014**  
АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ

**4-7 листопада**



**ОРГАНІЗАТОР**  
Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України

**СПІВОРГАНІЗАТОР**  
Міжнародний виставковий центр

**ГАЛУЗЕВИЙ ПАРТНЕР**  
Українська Вітроенергетична Асоціація

Технічний партнер: *Reant Media*

**IEC**

**МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**  
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15  
"Лівобережна"  
☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86  
e-mail: [sv@iec-expo.com.ua](mailto:sv@iec-expo.com.ua)  
[www.iec-expo.com.ua](http://www.iec-expo.com.ua)  
[www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)