

Л. М. Селиванов, В. А. Герасимов, А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Симон
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Метод оценки энергопотребления автономных электронных устройств и его аппаратная реализация

Разработан метод, позволяющий достаточно точно измерять ток и мощность потребления устройств с батарейным питанием. Данный метод основан на измерении заряда, отобранного цепями питания исследуемого устройства, и позволяет получать точные результаты как в широком диапазоне средних токов (средних мощностей) потребления устройства, так и в случаях, когда профиль тока потребления крайне неравномерен и мгновенное значение тока потребления меняется на несколько порядков в течение чрезвычайно малых интервалов времени. На основе данного метода разработан прибор для оценки энергопотребления автономных электронных устройств, использующий стандартные серийные электронные компоненты. Программное обеспечение прибора позволяет гибко менять параметры измерений, обеспечивая возможность адаптации к широкому спектру задач оценки энергопотребления испытываемых устройств. Описанный прибор позволил настроить программное обеспечение «умного замка» со сложным профилем энергопотребления и достичь заявленного срока работы более года.

Измерение малых токов, оценка профиля потребления, батарейное питание

В настоящее время все более широкое применение находят электронные устройства с батарейным питанием, спроектированные таким образом, что необходимость заменять или же заряжать батареи, питающие их, возникает довольно редко. Продолжительность работы многих устройств от одного заряда батареи составляет от нескольких дней до нескольких лет. Среди таких приборов стоит выделить элементы систем «умный дом» и интернета вещей, различные датчики систем пожарной и охранной сигнализации, транспондеры для беспроводной оплаты проезда по платным автодорогам.

Главным техническим приемом, позволяющим достичь весьма высокой продолжительности работы устройства на одном заряде батареи, является такой алгоритм работы, при котором основную часть времени устройство находится в ждущем режиме. Потребление тока в таком режиме может составлять единицы и десятки микроампер. Выход из ждущего режима с целью опроса датчиков, управления исполнительными устройствами и обмена данными, чаще всего через какой-либо цифровой радиоканал, возможен как по таймеру, так и по внешнему событию. Надежно предсказать частоту следования таких событий для теоретической оценки потребления, как правило, не представляется возможным. По-

требление устройства в активном режиме может превышать потребление в ждущем режиме в тысячи раз – например, при беспроводном приеме и передаче данных одно только потребление компонентов радиоканала обычно составляет десятки, а то и сотни миллиампер, причем рост тока потребления на порядки происходит буквально за несколько тактов микроконтроллера, т. е. за микросекунды.

В процессе разработки подобных приборов, особенно на этапе создания их программного обеспечения (ПО), обеспечение минимально возможного среднего потребления становится одной из центральных задач, а отладка такого ПО требует постоянного контроля среднего энергопотребления и оценки профиля мгновенного энергопотребления во времени [1]. Применение традиционных методов измерения соответствующих величин здесь весьма затруднено ввиду описанного крайне неравномерного профиля потребления. Применение специализированного оборудования порой невозможно ввиду его низкой распространенности и высокой стоимости – например, модульный анализатор питания N6705B фирмы Keysight стоит 9200 дол. США.

Выбор метода измерения потребления электронных устройств. Прибор, решающий описанные задачи, должен, как минимум, позволять вы-

полнение достаточно точных измерений среднего тока или мощности потребления устройств за достаточно длительные периоды времени – от нескольких секунд до нескольких минут.

Требуемая точность измерений, однако, достаточно невелика. Ввиду того, что конечная цель измерений – это оценка продолжительности работы устройства от одного заряда батарей, а емкость батарей заданного форм-фактора в различных ситуациях может значительно различаться, приемлемой можно считать ошибку 5–10 %. Востребованной функцией прибора является возможность визуализации значения мгновенного токопотребления, что крайне полезно на этапе отладки ПО устройства. Все вышеперечисленное привело к разработке прибора, осуществляющего подсчет заряда, перетекшего в виде тока в цепи питания прибора, методом, который не требовал бы применения быстродействующих АЦП высокого разрешения и точного аналогового тракта.

Типичный метод решения задачи подсчета перетекшего заряда реализован в элементной базе, применяемой для оценки уровня остаточного заряда батарей, чаще всего – литий-ионных и литий-полимерных. Наиболее совершенные интегральные микросхемы, решающие подобные задачи, достаточно дороги и представляют собой сложные цифро-аналоговые решения, фактически включающие в себя малопотребляющее микропроцессорное ядро с предустановленным ПО и требующее предварительной настройки. Существуют более простые решения, называемые «счетчиками кулонов». Можно утверждать, что идея «счетчика кулонов» в виде входного цифро-аналогового тракта присутствует в любом решении из области менеджмента батарей (рис. 1).

Ток I_H , протекающий от батареи или иного источника питания $+U_H$ в нагрузку, вызывает падение напряжения на низкоомном токовом шунте $R1$: $I_H R1$. Данное напряжение поступает на вход интегратора, построенного на ОУ $DA1$. Учитывая, что $R1 \ll R2$, через резистор $R2$ в конденсатор $C1$ и затем в выход ОУ начинает протекать ток, практически равный $I_H \frac{R1}{R2}$, в результа-

те чего конденсатор $C1$ заряжается, а напряжение на выходе ОУ опускается до уровня ниже, чем напряжение, поступающее к устройству.

С учетом общеизвестного соотношения, связывающего ток, протекающий через конденсатор, с напряжением на его обкладках, а также правила равенства потенциалов входов ОУ в линейном режиме, можно записать:

$$U_{C1}(t) = \frac{1}{C1} \int I_{C1}(t) dt = \frac{1}{C1} \int \frac{I_H(t) R1}{R2} dt = \frac{R1}{R2 C1} \int I_H(t) dt, \quad (1)$$

где U_{C1} – напряжение на выходе ОУ, измеренное относительно положительного полюса питания нагрузки (исследуемого устройства).

После того как напряжение на выходе интегратора, измеренное относительно положительного полюса питания устройства, опускается до порогового уровня $U_{оп}$, заданного источником опорного напряжения, компаратор $DA2$ формирует на своем выходе уровень логической единицы. Положительный фронт с выхода компаратора поступает на счетчик прямоугольных импульсов (например, на вход прерывания микроконтролле-

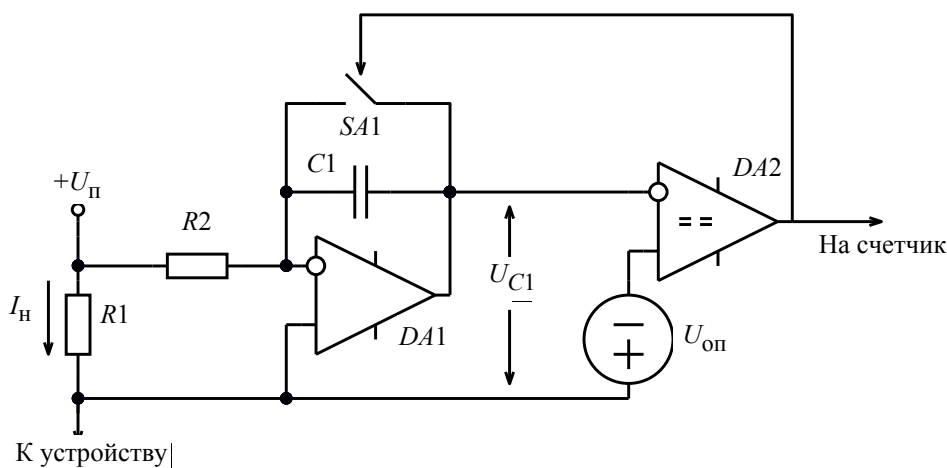


Рис. 1

ра) и разряжает конденсатор $C1$ при помощи ключа $SA1$. Цикл измерения окончен. При этом один импульс на выходе схемы связан с перетеканием из источника питания в нагрузку (исследуемое устройство) некоторого электрического заряда q . Согласно определению электрического тока,

$$I_H(t) = \frac{dq(t)}{dt}.$$

Подставив это выражение в (1), для

момента времени t_1 , когда справедливо равенство

$$U_{C1}(t) = U_{оп},$$

$$U_{оп} = q \frac{R1}{C1 R2} \quad \text{или} \quad q = \frac{U_{оп} C1 R2}{R1}.$$

Таким образом, подсчитав число импульсов на выходе схемы за некоторое время, можно судить о среднем токе потребления устройства за это время. График зависимости частоты следования этих импульсов от времени описывает профиль потребления устройства.

Устройство, использующее данный метод измерения [2], имеет существенные недостатки. Прежде всего, прибор для измерения токов должен позволять простую настройку своих параметров с целью адаптации к измерению токов разного диапазона – от единиц микроампер до сотен миллиампер. В описанном решении такая настройка затруднительна, поскольку, во-первых, для обеспечения наилучшего результата требуется менять значение напряжения на токовом шунте $R1$, что при практической реализации означало бы необходимость установки магазина сопротивлений, управляемого несколькими полевыми транзисторами с низким сопротивлением канала в насыщенном состоянии. Во-вторых, в описанном схемотехническом решении целый ряд параметров пагубно влияет на точность измерений – и напряжения смещения ОУ и компаратора, и точность источника опорного напряжения. В-третьих, измерения, сделанные при помощи данной схемы, носят сугубо дискретный характер, причем частота дискретизации связана с током потребления устройства: чем выше ток потребления, тем чаще следуют импульсы на выходе схемы. Это обстоятельство дополнительно затрудняет постобработку полученных данных и их визуализацию.

Конструкция прибора для измерения потребления электронных устройств. По описанным ранее причинам для оценки тока питания малопотребляющих устройств вместо классического подхода по созданию «счетчика кулонов» в [3] был предложен метод, гарантирующий более

непосредственные прямые измерения. Суть метода заключается в том, что исследуемое устройство питается не от источника питания через токовый шунт, а напрямую от некоторого «рабочего» конденсатора емкостью C . Емкость выбирается заранее исходя из соображений относительно диапазона среднего тока потребления устройства. Конденсатор предварительно заряжается до максимального напряжения U_{max} , приемлемого для питания устройства, затем коммутируется на цепи питания устройства и обеспечивает его работу в течение некоторого времени T , по прошествии которого напряжение на конденсаторе опускается до уровня U_{min} . С учетом среднего значения тока потребления для подобной системы справедливо соотношение

$$I_{cp} = C \frac{\Delta U}{\Delta t} = C \frac{U_{max} - U_{min}}{T}.$$

Для того чтобы в целях отладки программного обеспечения визуализировать профиль тока потребления устройства, необходимо регулярно измерять (оцифровывать) напряжение на рабочем конденсаторе. Для вычисления среднего значения тока, который отбирался устройством между соседними оцифровками напряжения на конденсаторе (с условными номерами $i-1$ и i), достаточно перейти от дифференциальной формы известного соотношения $I_H = C \frac{dU_C(t)}{dt}$ к конечным приращениям и для частоты дискретизации $(\Delta t)^{-1}$ записать:

$$I_{Hi} = C \frac{U_{Ci} - U_{C(i-1)}}{\Delta t}. \quad (2)$$

Важно подчеркнуть, что частота дискретизации, недостаточная для частотного состава профиля тока (слишком редкие оцифровки), при таком подходе не приведет к сколько-нибудь заметным ошибкам в оценке среднего тока потребления за продолжительный интервал времени, а лишь снизит разрешение в итоговой картине профиля потребления.

Для того чтобы с приемлемой точностью восстанавливать значения тока потребления, необходимо с адекватной точностью знать мгновенные значения напряжений на обкладках рабочего конденсатора и его емкость.

Первое не представляет каких-либо существенных затруднений. Ввиду того что ошибка по

току в 1–5 %, согласно конечной цели измерений, приемлема, а диапазон напряжения питания для исследуемых приборов составляет сотни милливольт, для измерения напряжения в аналоговом тракте достаточно использовать буферный ОУ с напряжением смещения не более 1 мВ и входными токами, много меньшими, чем характерные значения минимального тока потребления исследуемого устройства (не более нескольких наноампер). В настоящее время такие ОУ общедоступны. Достаточная разрядность АЦП составляет 10–12 бит, что типично для встроенного АЦП любого современного микроконтроллера общего назначения с ядром ARM Cortex M3 или M4.

Рабочую емкость, однако, следует определять с высокой точностью перед каждым циклом измерений. Более того, целесообразно сделать рабочую емкость внешним компонентом для прибора, чтобы пользователь мог свободно выбирать конденсаторы, исходя из своих представлений о диапазоне токов потребления устройства, его напряжения питания, типичной длительности циклов работы (временных интервалов, включающих в себя несколько периодов ждущего и активного режимов). Для определения точного значения рабочей емкости, подключенной к прибору, ее следует разрядить полностью или частично, а затем зарядить известным постоянным программируемым током $I_{\text{зар}}$ до некоторого уровня напряжения. Оцифровки напряжения на конденсаторе при этом в идеале должны ложиться на линейную зависимость напряжения от времени. Применив к полученным отсчетам метод наименьших квадратов, следует аппроксимировать полученную в виде массива данных зависимость

$U_C(t)$ функцией вида $U(t) = at + b$ и использовать коэффициент a для определения емкости по выражению

$$C = I_{\text{зар}}/a.$$

Коммутацию рабочей емкости на специальную нагрузку для ее полного или частичного разряда на программируемый источник зарядного тока $I_{\text{зар}}$ и на испытываемое устройство следует осуществлять с использованием электромагнитных или герконовых реле, так как типичные полевые и биполярные транзисторы в режиме отсечки в полном диапазоне режимов эксплуатации (особенно температур) допускают утечку не менее нескольких микроампер, что сравнимо с потреблением исследуемых устройств в ждущем режиме.

Для большей гибкости при работе с различными исследуемыми устройствами следует обеспечить диапазон рабочих напряжений конденсатора вплоть до 13.8 В (напряжение окончания заряда типичной свинцово-кислотной аккумуляторной батареи). Поскольку постобработка и визуализация профилей потребления устройств требуют сложного графического интерфейса, проще всего сделать прибор приставкой к персональному компьютеру, питающейся от коммуникационного порта USB, обеспечивающего до 2.5 Вт мощности питания для прибора и его нагрузок.

Все перечисленное позволило создать блок-схему прибора (рис. 2), которая включает в себя микроконтроллер МК, коммутационные реле K1–K3, управляемые электронными ключами, про-

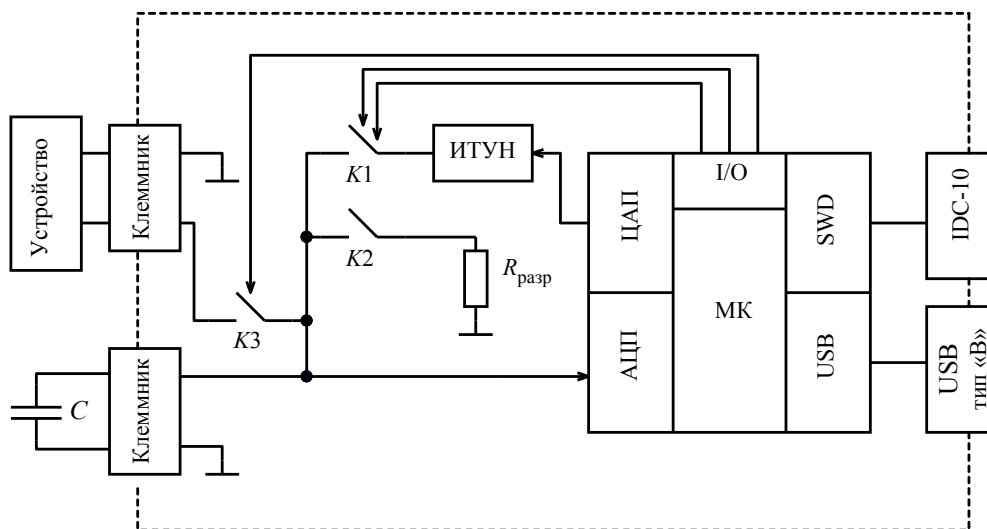


Рис. 2

граммируемый источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), ЦАП, резистор $R_{\text{разр}}$ для разряда рабочей емкости, буферный усилитель для постоянного подключения рабочей емкости к АЦП микроконтроллера, клеммы для подключения исследуемого устройства и рабочего конденсатора, коммуникационный порт USB, порт SWD для внутрисхемного программирования. На рис. 3 представлена электронная плата прибора.

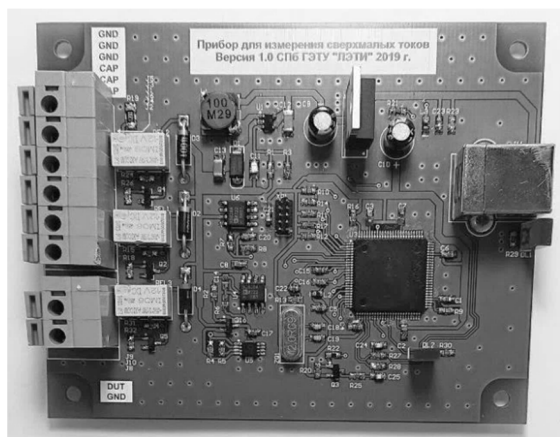
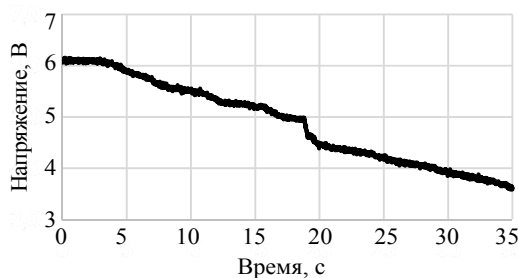


Рис. 3

Поскольку коммутация рабочей емкости на источник тока и на исследуемое устройство осуществляется независимыми нормально-разомкнутыми реле, такой прибор позволяет реализовать и режим постоянных измерений, когда источник зарядного тока подключается к емкости без отключения устройства.

При постобработке данных в ПК такой режим работы должен быть учтен одним из двух способов. Данные, полученные в интервалы времени, когда ИТУН подключен к рабочей емкости, могут быть исключены из анализа для вычисления тока потребления согласно (2). Альтернативно, выражение (2) для интервалов времени, когда емкость подзаряжается, может быть дополнено очевидным образом:

$$I_{\text{нi}} = C \frac{U_{\text{Ci}} - U_{\text{C}(i-1)}}{\Delta t} + I_{\text{ИТУН}},$$

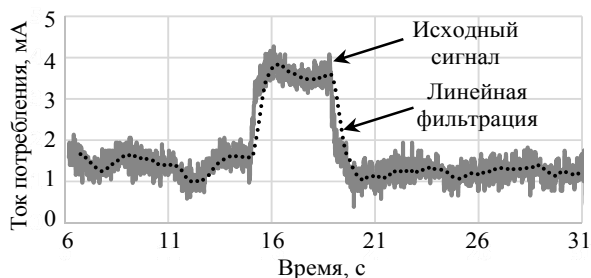


а

где $I_{\text{ИТУН}}$ – ток, установленный на источнике, подзаряжающем емкость.

Экспериментальные результаты. Примером электронного устройства с батарейным питанием и сложным профилем потребления, которое было исследовано разработанным прибором, может служить «умный замок», устанавливаемый на существующий механический дверной замок и позволяющий дистанционно отпирать и запирающий основной замок двери. Алгоритм работы такого устройства подразумевает минимальное энергопотребление в спящем режиме для достижения времени работы от одного комплекта батарей не менее года. В активном режиме ток потребления устройства многократно возрастает. У разработанного в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» «умного замка» существует два радиоканала: субгигагерцовый для связи с охранной панелью и Bluetooth для управления замком с помощью смартфона. В замке имеется исполнительный механизм в виде двигателя постоянного тока с редуктором и звуковой излучатель. Таким образом, профиль энергопотребления такого устройства сложен, а теоретическая оценка времени автономной работы может давать достаточно большую ошибку.

Описанный в статье прибор использовался для отладки ПО данного «умного замка». В качестве примера на рис. 4 приведены кривые разряда рабочего конденсатора (рис. 4, а) и профиль тока потребления (рис. 4, б) от момента включения замка до окончания инициализации и установки соединения по Bluetooth. На рис. 4, а приведено изменение напряжения на конденсаторе, от которого питается замок, в процессе проведения измерений. В середине графика в диапазоне от 15 до 20 с хорошо видна «ступенька» провала напряжения во время включения звукового сигнала, которая в пересчете на ток потребления представлена на рис. 4, б. Неравномерность сигнала (колебания тока потребления) определяется обменом данными по двум радиоканалам одновременно.



б

Рис. 4

Полученные прибором данные могут быть экспортированы в текстовый формат и дополнительно обработаны соответствующим внешним программным обеспечением.

Описанный прибор позволил успешно отладить программное обеспечение «умного замка» с достаточно сложным профилем потребления и достичь заявленного срока работы более одного года. Предложенный метод измерения может быть легко реализован и без создания микропроцессорного изме-

рительного прибора небольшими коллективами разработчиков при проектировании автономных устройств с батарейным питанием [4].

Работа выполнена в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218, договор № 03.G25.31.0256.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A review on mobile application energy profiling: taxonomy, state-of-the-art, and open research issues / R. W. Ahmad, A. Gani, S. H. Ab Hamid, M. Shiraz // J. Netw. Comput. Appl. 2015. Vol. 58. P. 42–59.

2. Janković S. P., Drndarević V. R. Microcontroller Power Consumption Measurement Based on PSoC // Telfor J. 2016. Vol. 8. № 1. P. 44–49.

3. Al-Shorman M. Y., Al-Kofahi M. M., Al-Kofahi O. M. A practical microwatt-meter for electrical energy measure-

ment in programmable devices // Measure Contr. 2018. Vol. 51. № 9–10. P. 383–395.

4. Герасимов В. А., Селиванов Л. М., Симон В. А., Ухов А. А. Метод измерения энергопотребления электронных устройств с батарейным питанием // Тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Новосибирск, 2018. Т. 3. Ч. 2. С. 146–149.

L. M. Selivanov, V. A. Gerasimov, A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Simon
Saint Petersburg Electrotechnical University

METHOD FOR ESTIMATING THE POWER CONSUMPTION OF AUTONOMOUS ELECTRONIC DEVICES AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION

A method providing accurate measurement of current and power consumption of battery-powered devices has been developed. This method is based on measuring the charge selected by the power supply circuits of the device being monitored, and allows accurate results to be obtained both in a wide range of average currents (average power) of the device consumption, and in cases where the consumption current profile is extremely uneven, and the instantaneous value of the consumption current changes by several orders of magnitude over extremely short time intervals. Based on this method, a device for evaluating the power consumption of autonomous electronic devices using standard serial electronic components has been developed. The instrument's software allows you to flexibly change the measurement parameters, allowing you to adapt to a wide range of tasks for evaluating the energy consumption of the devices being tested. The described device made it possible to configure the smart lock software with a complex energy consumption profile and achieve the stated service life of more than a year.

Small currents measurement, measurement of consumption profile, battery-powered equipment