

УДК 621.355.1

И.Б. Широков, доцент, канд. техн. наук**В.И. Косюк, канд. техн. наук****И.В. Скорик, студент***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, СевНТУ, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: shirokov@ieee.org***СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ**

Рассмотрены принципы построения системы контроля остаточной емкости аккумуляторной батареи. Метод контроля основан на анализе процесса заряда конденсатора известной емкости непосредственно от аккумуляторной батареи. Использование данного подхода позволяет добиться определения остаточной емкости аккумуляторной батареи с высокой точностью. Контроль остаточной емкости может производиться перманентно в процессе эксплуатации батареи. При этом не требуется производить пробный разряд батареи, что положительно сказывается на ее сроке службы.

Ключевые слова: батарея, емкость, конденсатор, микроконтроллер

В настоящее время автомобильная промышленность развита достаточно сильно. В мире в больших количествах выпускаются автомобили с двигателями внутреннего сгорания. Но с развитием науки и техники человечество постепенно переходит на производство электромобилей в силу того что автомобили с двигателями внутреннего сгорания оказывают негативное влияние на окружающую среду, имеют относительно низкую надежность, являются источником повышенной пожароопасности, обладают сравнительно низким КПД преобразования энергии. Эффективность преобразования энергии в таких автомобилях в 3...4 раза ниже по сравнению с электромобилями.

На электромобилях источником энергии для питания тяговых электродвигателей являются аккумуляторные батареи или химические источники тока (ХИТ). Если в обычных автомобилях ресурс пробега определяется достаточно просто путем оценки объема горючего в топливном баке, то в электромобилях для определения ресурса пробега необходимо знать остаточную электрическую емкость ХИТ. Это позволит оператору или водителю знать оставшееся количество часов работы или пробега до следующей зарядки ХИТ. Причем, как и в случае эксплуатации обычных автомобилей, величину остаточной емкости ХИТ необходимо контролировать не единожды перед началом его эксплуатации, а перманентно на протяжении всего цикла.

Даже при эксплуатации транспортного средства с двигателем внутреннего сгорания, когда ХИТ используется в основном для пуска двигателя, контроль остаточной емкости ХИТ является весьма важной задачей. При каждом пуске двигателя водитель транспортного средства должен иметь полное представление о ресурсе ХИТ. Отсутствие информации об этом параметре часто приводит к непредвиденным ситуациям негативного характера.

Тем не менее, в настоящее время системы контроля остаточной емкости ХИТ не устанавливаются на автомобилях. Очевидно, данная ситуация обусловлена отсутствием адекватных методов и устройств контроля, позволяющих операторам и водителям осуществлять оценку состояния ХИТ не в рамках его регламентного обслуживания, а в процессе эксплуатации.

Ситуации, описанные выше, являются не единственными, когда необходимо контролировать электрическую емкость ХИТ. Информация о состоянии ХИТ является достаточно актуальной при использовании бытовых электроприборов, например при организации электропитания домов, оснащенных системой «Smart Home». В этом случае правильная оценка остаточной емкости ХИТ позволит потребителю рационально организовать электропитание дома при возникновении аварийных ситуаций, причем наличие системы контроля состояния ХИТ позволит выполнить эту процедуру в полуавтоматическом или полностью автоматическом режиме.

Говоря об использовании ХИТ нельзя не упомянуть и об электропитании телекоммуникационного оборудования. Как правило, данный тип оборудования функционирует без непосредственного участия оператора. При этом перманентный дистанционный контроль остаточной емкости резервного источника питания непосредственно определяет показатели надежности всего телекоммуникационного оборудования и системы в целом.

Существуют методы контроля остаточной и потенциальной емкости ХИТ, подробно описанные в [1–3]. Данные методы позволяют достаточно точно периодически оценить состояние ХИТ, вести документирование всего процесса эксплуатации, делать прогнозы на срок его службы и т.п. Однако описанные методы предполагают определение состояния ХИТ исключительно во время регламентного обслуживания последних и, кроме того, предполагают совершение действий специально обученным

персоналом. Говорить же об участии эксплуатационников ХИТ в этих действиях не представляется возможным.

В работе [4] дано описание устройства измерения остаточной емкости ХИТ путем контроля процесса заряда конденсатора известной емкости при его параллельном подключении к источнику. Физика процесса контроля основана на использовании закона сохранения заряда, предполагающего уменьшение напряжения на паре — ХИТ плюс накопительный конденсатор по мере заряда последнего. Однако при контроле остаточной емкости тяговых и стартерных аккумуляторных батарей изменение этого напряжения настолько мало, что измерить его реально не представляется возможным.

Вместе с тем, сам процесс заряда конденсатора есть некоторый переходной процесс, занимающий определенное время. Длительность этого процесса определяется постоянной времени цепи заряда, которая зависит от емкости конденсатора, сопротивления соединяющих проводов, сопротивления коммутационного элемента и внутреннего сопротивления источника тока. В работе [5] дан подробный анализ составляющих внутреннего сопротивления ХИТ и методов их измерения. На основе проведенного в этой работе анализа, а также на основе теоретических и практических данных, приведенных в работах [1–3], был сделан вывод о том, что внутреннее сопротивление ХИТ и его остаточная емкость связаны между собой определенной зависимостью. Другими словами, контролируя внутреннее сопротивление ХИТ, можно оценивать его остаточную емкость. При этом внутреннее сопротивление источника тока будем контролировать, анализируя переходной процесс заряда конденсатора, подключаемого параллельно ХИТ.

Внутреннее сопротивление ХИТ состоит из двух величин: сопротивления поляризации r_p и омического сопротивления r_0 [2]. Сопротивление поляризации r_p при увеличении тока через ХИТ уменьшается. При больших зарядных или разрядных токах внутреннее сопротивление ХИТ будет стремиться к постоянной величине, численно равной омическому сопротивлению r_0 . Именно внутреннее омическое сопротивление источника тока адекватно представляет его остаточную электрическую емкость.

Если к ХИТ подсоединить конденсатор, то ток в цепи конденсатора будет изменяться от максимального до нуля и, соответственно, внутреннее сопротивление ХИТ будет изменяться от r_0 до $(r_0 + r_p)$. При этом кривая заряда конденсатора от ХИТ будет представлять собой сумму двух экспоненциальных зависимостей. Первая зарядная характеристика (быстрая), обусловленная большим начальным током заряда конденсатора, будет характеризоваться постоянной времени τ_1 равной:

$$\tau_1 = r_0 C,$$

где C — емкость заряжаемого конденсатора.

Напряжение на конденсаторе будет меняться согласно следующему уравнению:

$$U_C = E_0 (1 - e^{-t/\tau_1}),$$

где t изменяется от 0 до некоторого времени t_1 , E_0 — напряжение на ХИТ или его ЭДС.

При достижении напряжения заряда конденсатора примерно до величины $0,7E_0$ ток заряда значительно уменьшается и начинает включаться поляризационное сопротивление r_p . Этот процесс характеризуется уменьшением постоянной времени заряда конденсатора τ_2 , которая будет в этом случае равна:

$$\tau_2 = (r_0 + r_p)C, \quad (1)$$

и напряжение на конденсаторе далее будет меняться более медленно.

На рисунке 1 представлена осциллограмма реальной характеристики заряда конденсатора емкостью 4700 мкФ от стартерного свинцового аккумулятора с номинальной емкостью $Q = 60 \text{ А} \cdot \text{ч}$. На приведенном графике по оси абсцисс отложено время заряда конденсатора, представленное в мкс и умноженное на 100.

Анализируя кривую, приведенную на рисунке 1, можно утверждать, что при напряжении заряда конденсатора, равном $0,9E_0$, поляризационное сопротивление полностью включено и переходной процесс далее проходит с постоянной времени, определяемой соотношением (1).

Таким образом, для измерения остаточной емкости ХИТ необходимо измерить его внутреннее омическое сопротивление r_0 , которое будем оценивать, производя анализ переходного процесса заряда конденсатора от источника тока. При этом анализировать переходной процесс будем только лишь до момента времени, когда напряжение на конденсаторе достигнет величины $0,9E_0$. При этом будем

фіксувати час заряду конденсатора, коли напруга на його обкладках буде змінюватися від нуля до вказаної величини.

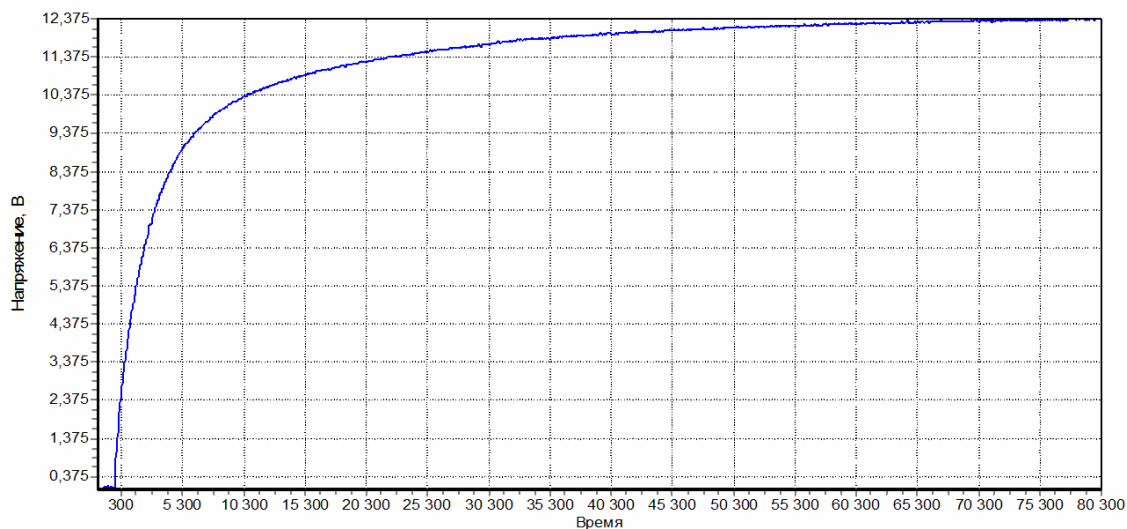


Рисунок 1 — Осциллограмма реальной характеристики заряда конденсатора

При этом остаточную емкость Q в ампер-часах химического источника тока будем вычислять по следующей формуле [4]:

$$Q = CE_0 / [(t_{ch} - t_{com})k], \quad (2)$$

где C — значение емкости заряжаемого конденсатора, Ф; E_0 — напряжение на измеряемом источнике тока или его ЭДС, В; t_{ch} — время заряда конденсатора от измеряемого источника до величины $0,9E_0$, с; t_{com} — время, компенсирующее увеличения времени заряда конденсатора за счет конечного значения сопротивлений подводящих проводов и входного коммутатора (определяется экспериментально), с; k — некоторый эмпирический коэффициент, устанавливаемый для каждого типа химического источника тока (для кислотных и щелочных негерметичных ХИТ $k = 4,4$), c^{-1} .

Для реализации указанного алгоритма измерения остаточной емкости химического источника тока CCS необходимо собрать устройство, принципиальная электрическая схема которого показана на рисунке 2.

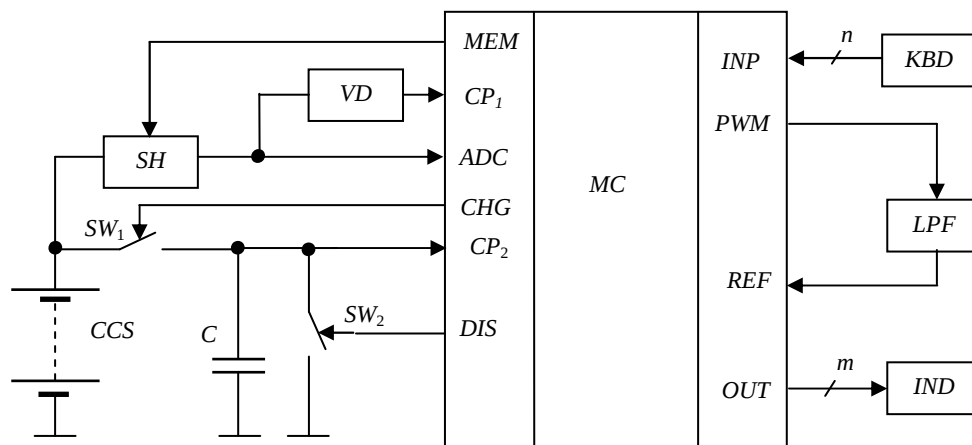


Рисунок 2 — Устройство для измерения электрической емкости ХИТ

Устройство состоит из конденсатора известной емкости C , электронных управляемых ключей SW_1 и SW_2 , устройства выборки/хранения SH , делителя напряжения VD с коэффициентом передачи, равным 0,9, пульта управления KBD , фильтра нижних частот LPF , индикатора IND и микроконтроллера MC . В состав микроконтроллера, помимо стандартных портов ввода/вывода и таймеров, входят модуль аналого-цифрового преобразователя ADC , модуль аналогового компаратора CP

и модуль широтно-импульсной модуляции *PWM*. Опорное напряжение модуля *ADC* подается на вход *REF*.

Рассмотрим принцип работы измерителя электрической емкости химического источника тока.

В исходный момент времени микроконтроллер поддерживает разомкнутое состояние электронных ключей заряда SW_1 и разряда SW_2 , входы управления которых подключены соответственно к выходам микроконтроллера *CHG* и *DIS*.

Процесс измерения инициируется вручную, нажатием соответствующей кнопки пульта управления или автоматически по заданной программе микроконтроллера. При поступлении соответствующей команды начала измерения, непосредственно перед процессом заряда конденсатора, микроконтроллер подает сигнал управления (выход *MEM*) в виде короткого импульса на управляющий вход устройства выборки/хранения. При этом происходит запоминание значения электродвижущей силы химического источника тока E_0 . Выходное напряжение устройства выборки/хранения подается через делитель напряжения *VD* на один из входов компаратора (вход CP_1) и на вход аналого-цифрового преобразователя (вход *ADC*).

После этого микроконтроллер формирует сигнал замыкания (выход *CHG*) электронного ключа SW_1 , и конденсатор известной емкости *C* начинает заряжаться. Одновременно с этим в микроконтроллере запускается таймер, начинающий отсчитывать временной интервал заряда конденсатора. Напряжение с обкладок конденсатора подается на другой вход компаратора (вход CP_2). При достижении напряжения величины $0,9E_0$ компаратор срабатывает, и микроконтроллер фиксирует временной интервал t_{ch} заряда конденсатора. Далее микроконтроллер вводит поправку t_{com} в этот временной интервал, обусловленную конечными сопротивлениями подводящих проводов и проходного сопротивления ключа SW_1 . Эта поправка вводится единожды при программировании микроконтроллера или может корректироваться обслуживающим персоналом с помощью пульта управления и индикатора при вводе системы в эксплуатацию. Значение $(t_{ch} - t_{com})$ вводится в модуль широтно-импульсного модулятора микроконтроллера, в результате чего на выходе *PWM* формируется импульсная последовательность, ширина импульсов которой обратно пропорциональна значению временного интервала $(t_{ch} - t_{com})$.

Указанная импульсная последовательность подается на вход фильтра нижних частот, выход которого соединен с входом опорного напряжения модуля аналого-цифрового преобразователя (вход *REF*). Фильтр нижних частот выделяет постоянную составляющую импульсной последовательности, в результате чего на входе *REF* формируется аналоговый сигнал постоянного тока, величина которого равна

$$U_{REF} = k_{PWM}(t_{ch} - t_{com}), \quad (3)$$

где k_{PWM} — коэффициент преобразования модуля широтно-импульсного модулятора с учетом прохождения сигнала через фильтр нижних частот, В/с.

Аналого-цифровой преобразователь осуществляет преобразование запомненного напряжения E_0 с учетом опорного напряжения модуля, определяемым выражением (3). При этом результат преобразования N_{ADC} будет определяться следующим соотношением:

$$N_{ADC} = k_{ADC}E_0/U_{REF}, \quad (4)$$

где k_{ADC} — коэффициент преобразования модуля аналого-цифрового преобразователя (величина безразмерная).

С учетом (3), получим:

$$N_{ADC} = k_{ADC}E_0/[k_{PWM}(t_{ch} - t_{com})]. \quad (5)$$

По полученному значению N_{ADC} микроконтроллер производит вычисление остаточной емкости химического источника тока по следующей формуле:

$$Q = CN_{ADC}/k_{CALC},$$

или

$$Q = Ck_{ADC}E_0/[k_{PWM}k_{CALC}(t_{ch} - t_{com})] = CE_0/[k(t_{ch} - t_{com})], \quad (6)$$

где $k_{PWM}k_{CALC}/k_{ADC} = k$ — упомянутый ранее эмпирический коэффициент.

Из выражений (4) и (5) видно, что математическая операция деления одной измеряемой величины (E_0) на другую измеряемую величину $(t_{ch} - t_{com})$ выполняется непосредственно в процессе аналого-

цифрового преобразования. Ресурсы микроконтроллера на выполнение этой операции деления не тратятся, что уменьшает объем требуемой памяти микроконтроллера, уменьшает погрешность измерения и увеличивает быстродействие выполнения данной операции. Дополнительную операцию деления $C/k = Ck_{ADC}/(k_{PWM}k_{CALC})$ мы будем приводить к простой операции умножения на некоторый коэффициент, поскольку все члены, входящие в это выражение не изменяют своего значения в процессе эксплуатации системы.

Вычисленное микроконтроллером значение остаточной емкости ХИТ выводится на блок индикации *IND*. После этого микроконтроллер на выходе *DIS* формирует сигнал управления ключом SW_2 , производя тем самым его открывание, в результате чего происходит разряд конденсатора *C* и система готова к последующим измерениям.

Таким образом, рассмотрен метод измерения остаточной емкости химических источников тока. Данный подход к проблеме, предполагающий анализ процесса заряда конденсатора известной емкости от источника тока при его параллельном подключении к последнему, позволяет контролировать остаточную емкость ХИТ как во время его регламентного обслуживания, так и перманентно во время эксплуатации автомобиля, системы электропитания и т.п. При этом для определения потенциальной и остаточной емкости ХИТ не требуется совершать его полный разряд. Для контроля состояния источника тока в этом случае нет необходимости применять «нагрузочные вилки», что положительно сказывается на долговечности самого ХИТ. Такая операция, как контроль плотности электролита исключена полностью, что открывает возможность контроля состояния герметичной необслуживаемой аккумуляторной батареи.

Сам процесс измерения на основе рассмотренного метода дает ничтожную потерю остаточной емкости самого ХИТ. Так для рассмотренного выше случая относительная потеря емкости составляет $3 \cdot 10^{-7}$ на каждый цикл. Практически такой величиной потери емкости можно пренебречь и использовать циклы контроля состояния аккумуляторной батареи достаточно часто в процессе эксплуатации системы.

При реализации описанного метода измерения остаточной емкости химического источника тока мы неизбежно сталкиваемся с одной существенной проблемой. Как было указано выше, время заряда конденсатора зависит не только от самой остаточной емкости ХИТ (или его внутреннего сопротивления), но и от сопротивления ключа SW_1 в открытом состоянии и, что особенно важно, от сопротивления подводящих проводов. С одной стороны влияние этих дополнительных сопротивлений можно компенсировать введением времени компенсации t_{com} (2). С другой стороны размещение измерителя остаточной емкости в кабине водителя предполагает использование достаточно длинных подводящих проводов, длина которых может достигать нескольких метров. При этом компенсировать влияние этих проводов достаточно проблематично, поскольку помимо выбора требуемой площади поперечного сечения провода, что само по себе уже достаточно серьезная проблема, необходимо при этом обращать внимание на его топологию. При таких длинах проводов, учитывая длительность переходного процесса, необходимо помимо учета омического сопротивления провода обращать внимание на его индуктивность.

Предлагается решить указанную проблему следующим образом. Сам измеритель остаточной емкости функционально разделим на два блока, как это показано на рисунке 3. Первый блок — выносной. Он состоит только из двух элементов: управляемого ключа SW_1 и заряжаемого конденсатора *C*. При этом указанный блок подключается непосредственно к зажимам аккумуляторной батареи. Длина соединительных проводов цепи заряда конденсатора выбирается минимальной и реально она не превышает нескольких сантиметров. При таких длинах сечение проводов можно выбирать равным нескольким квадратным миллиметрам, что не является проблемой с конструктивной точки зрения, и, что самое главное, индуктивностью проводов можно пренебречь. Сам выносной блок электроэнергию постоянно не потребляет, поэтому его можно от аккумуляторной батареи не отключать.

Второй блок — блок обработки и индикации *PU*. Он содержит все оставшиеся элементы, показанные на рисунке 2. Этот блок устанавливается в кабине водителя или оператора. Соединяются блоки четырехжильным кабелем, причем две жилы являются жилами питания всего электрооборудования транспортного средства.

Длина кабеля в этом случае может быть произвольной и достигать нескольких метров или даже десятков метров. При выборе сечения проводов в этом случае руководствуются общими соображениями.

При установке на автомобиле, оснащенном двигателем внутреннего сгорания, блок обработки целесообразно снабдить дополнительным входом, подключенным к замку зажигания. Проблема заключается в том, что получить достоверные данные об остаточной емкости ХИТ, используя описанный метод, можно только лишь с неработающим двигателем (когда нет зарядного тока батареи от генератора). При этом контроль состояния батареи осуществляется только лишь непосредственно перед моментом запуска двигателя, и после его запуска блок контроля временно прекращает свою работу. По большому счету при заведенном двигателе внутреннего сгорания величина остаточной емкости ХИТ не

является принципиальной. В случае установки описанной системы на электромобиль перманентный контроль остаточной емкости ХИТ является актуальной задачей, и блок обработки в процессе эксплуатации не отключается.

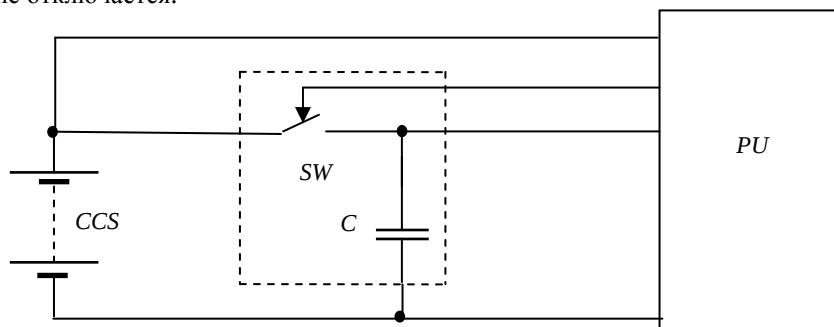


Рисунок 3 — Структурная схема системы контроля АКБ

Описанную систему можно использовать в любых приложениях, когда крайне необходимо контролировать имеющийся ресурс работы источника электропитания.

В дальнейшем будут проводиться исследования по отысканию более детальной взаимосвязи между электрической емкостью ХИТ и его внутренним сопротивлением. Кроме того планируется провести исследования по контролю остаточной емкости аккумуляторной батареи при работающем генераторе ее заряда. В результате этих исследований появится возможность производить перманентный контроль состояния ХИТ на автомобилях, оснащенных двигателями внутреннего сгорания.

Бibliографический список использованной литературы

1. Таганова А.А. Герметичные химические источники тока: элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации / А.А. Таганова, Ю.И. Бубнов, С.Б. Орлов. — СПб.: Химиздат, 2005. — 264 с.
2. Романов В.В. Химические источники тока / В.В. Романов, Ю.М. Хашев. — М.: Советское радио, 1978. — 153 с.
3. Вайлов А.М. Автоматизация контроля и обслуживания аккумуляторных батарей / А.М. Вайлов, Ф.И. Эйгель. — М.: Связь, 1975. — 87 с.
4. Пат. №86409 Украина, МПК (2009) G01R 31/36, G01R 27/26, H01M 10/48. Устройство для измерения электрической емкости химических источников тока / В.И. Косюк, И.Б. Широков; заявитель Косюк В.И. — № а200611285; заявл. 26.10.2006; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.
5. Широков И.Б. К вопросу об измерении сопротивления химических источников тока (ХИТ) / И.Б. Широков, В.И. Косюк // Электрохимическая энергетика. — 2009. — Т. 9. — № 1. — С. 44–48.

Поступила в редакцию 02.02.2011 г.

Широков І.Б., Косюк В.І., Скорик І.В. Система контролю залишкової ємності акумуляторної батареї

Розглянуто принципи побудови системи контролю залишкової ємності акумуляторної батареї. Метод контролю заснований на аналізі процесу заряду конденсатора відомої ємності безпосередньо від акумуляторної батареї. Використання даного підходу дозволяє визначити залишкову ємність акумуляторної батареї з високою точністю. Контроль залишкової ємності може проводитися перманентно в процесі експлуатації батареї. При цьому не потрібно проводити тестовий розряд батареї, що позитивно відображається на її терміні служби.

Ключові слова: батарея, ємність, конденсатор, мікроконтролер.

Shirokov I. B., Kosuk V. I., Skoryk I. V. A control system for the battery residual capacity

The system design principles of monitoring the accumulator battery residual capacity are considered. The monitoring method is based on the analysis of the charge process of the capacitor with known capacity directly from the accumulator battery. The use of the given approach allows for attainment of the determination of residual capacity of the accumulator battery with a high accuracy. The monitoring of residual capacity can be carried out permanently while the battery is in service. It is not required to do the battery test discharge in this case. This fact positively affects the battery service life.

Keywords: battery, capacity, capacitor, microcontroller