

Смотров Е.А., к.т.н., Савёлова Э.В., ст. преподаватель, Вершинин Д.В., инженер,  
Акшинцев Д.И., студент

## СОЗДАНИЕ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ СЧЕТЧИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые слова: измерение расхода электроэнергии, счетчик электрической энергии постоянного тока, датчик тока, датчик напряжения, погрешность измерения

В свете современных тенденций всеобщей экономии важным параметром эксплуатации и исследований электрических установок является измерение расхода электроэнергии. Особое значение это действие приобретает при исследовании систем на постоянном токе и в частности, электротранспортных средств (ЭТС), обладающих свойством обратимости (рекуперации) и могущих работать не только в двигательном режиме, но и в режиме генератора, что при торможении позволяет преобразовывать механическую энергию ЭТС в электрическую. Именно это свойство накладывает соответствующее требование к измерителю расхода (здесь и далее счетчику) электроэнергии – возможность измерения не только потребляемой, но и генерируемой ее составляющих.

Удельная характеристика ЭТС – расход энергии источника на единицу веса и пробега ЭТС является очень важным параметром, характеризующим эффективность регулирования приводов, качество кинематической цепи и позволяющим определить пробег при данной емкости аккумуляторной батареи (АБ). Применяемые косвенные методы – учет энергии переменного тока при заряде АБ [1] не обеспечивают требуемой точности и не позволяют провести отдельную оценку эффективности работы энергосилового (электроприводов) и энергонакопительной (рекуператора) установок.

Известный промышленный образец СКВТ – Ф610 создан для городского электротранспорта и рассчитан на номинальное напряжение 600,800,1500 и 3000В; номинальный ток 5,50, ... 7500А (трамвай, троллейбус), имеет вес до 1.5 кг, значительные габариты и стоимость, что делает его малоэффективным при исследовании легких ЭТС ( электровелосипед, электроскутер, гольф-машина и т.д.) с более низкими номинальными значениями тока и напряжения ( $I_n \leq 100A$ ;  $U_n \leq 120V$ ).

Учитывая все вышесказанное, для проведения качественного исследования энергозатрат легких ЭТС [2] возникла необходимость создания обратимого (двухканального) счетчика электроэнергии постоянного тока с широким диапазоном входных величин напряжения и тока, обладающего большей разрешающей способностью, а значит меньшей погрешностью измерений.

Функциональная схема разработанного счетчика энергии представлена на рис. 1.

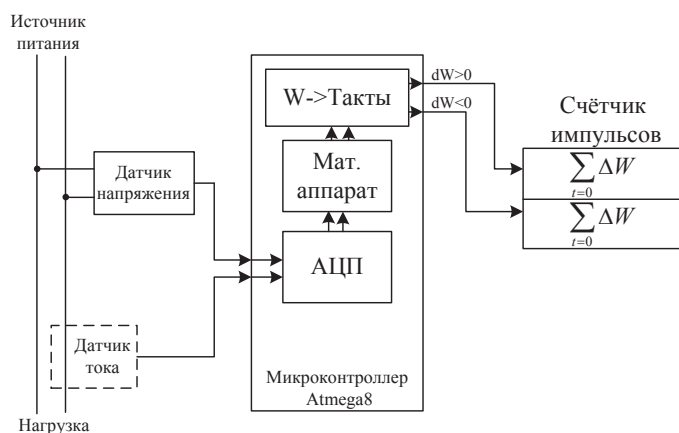


Рис. 1 - Функциональная схема разработанного счётчика энергии

Сигналы, пропорциональные измеряемому току и напряжению электрической цепи, поступают на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) программируемого микроконтроллера (в данном случае Atmega8), где осуществляются операции квантования, измерения, перемножения,

интегрирования, формирования импульсов, соответствующих приращению энергии за элементарные промежутки времени  $\Delta t$ , разделение и запись их в зависимости от знака в один из двух регистров памяти, данные из которых поступают в устройство хранения.

В качестве устройства хранения и индикации применен двухканальный счётчик импульсов с энергонезависимой памятью Yepoch H2-7EA3, что позволяет предотвратить потерю информации от предыдущих сессий работы со счетчиком или при отключении питания для сохранения результатов предыдущих измерений.

Более подробно алгоритм работы созданного счетчика рассмотрим на примере структурной схемы (рис. 2).

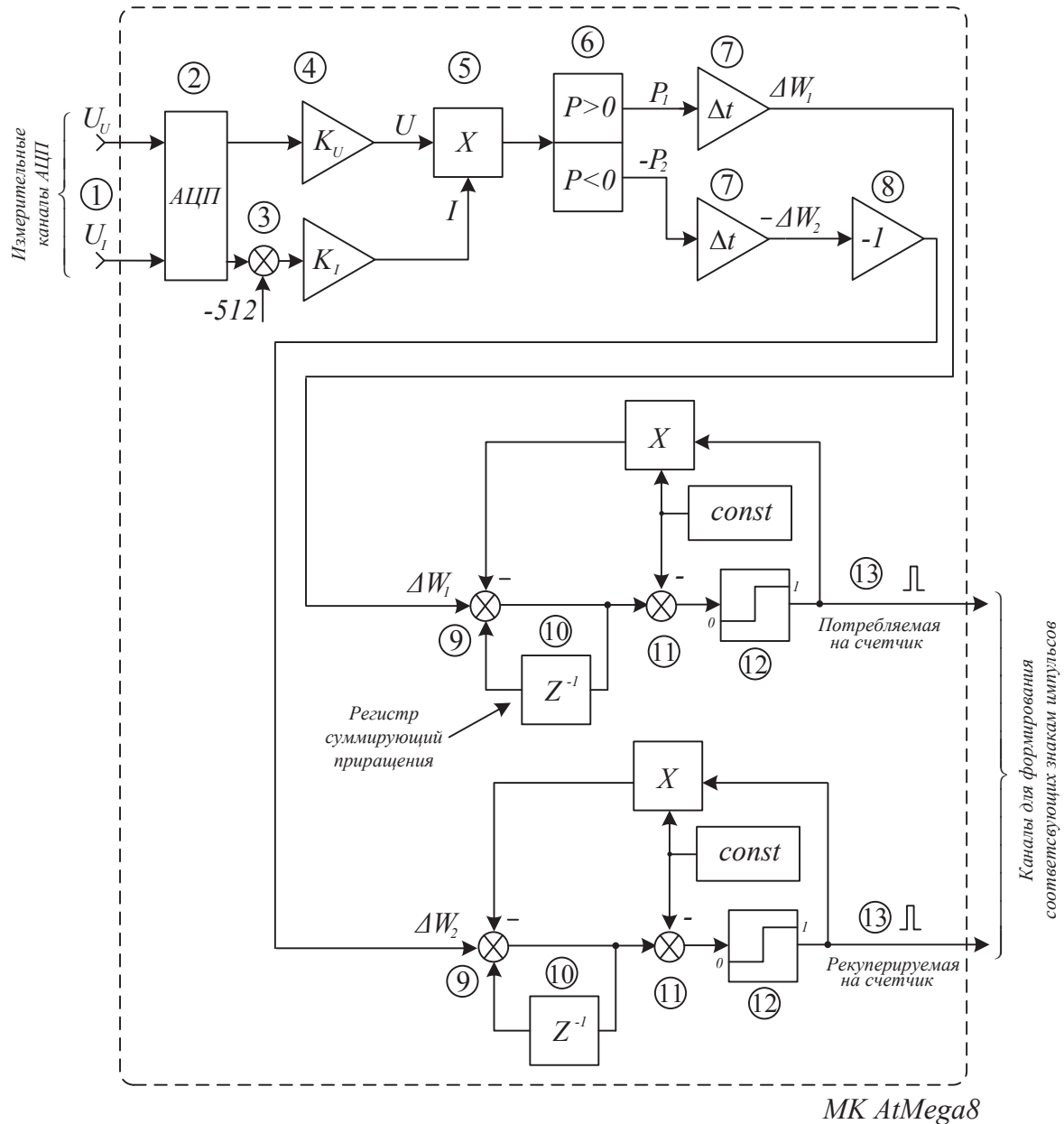


Рис. 2 - Структурная схема счётчика энергии

Пропорциональный напряжению на нагрузке сигнал снимается с резистивного делителя, току - измеряется датчиком тока HASS-50 с однополярным напряжением питания. На первом шаге оба сигнала поступают в АЦП, где преобразуются в двоичный код (шаг 2).

Направление и значение тока, действующего в цепи источника, определяется по значению выходного напряжения датчика  $U_{om}$ . Если оно больше половины выходной номинальной величины

( $\frac{U_{\text{выхн}}}{2} = 2,5 B$ ), то значение измеряемого тока  $> 0$ , и энергия потребляется нагрузкой, иначе – возвращается источнику (шаг 3). Напряжение  $\frac{U_{\text{выхн}}}{2}$  часто называют напряжением средней точки  $U_{\text{ср.т}}$ , т.к. ему соответствует нулевое измеряемое значение тока.

Далее (шаг 4) полученные в двоичном коде значения измеряемых величин путем умножения на масштабные коэффициенты приводятся к «реальным»:

$$U_{\text{нагр}} = U_{\text{АЦП}} \cdot k_U,$$

$$I_{\text{нагр}} = (U_{\text{дт}} - U_{\text{ср.т}}) \cdot k_I,$$

где  $k_U$  и  $k_I$  - масштабные коэффициенты по напряжению и току; перемножаются между собой (5) для получения значения мгновенной мощности, по знаку которой (6) выбирается регистр для записи потребляемых нагрузкой или возвращаемых источнику приращений энергии  $\Delta w$  за элементарные промежутки времени  $\Delta t$  (7).

На шаге 8 производится изменение знака с «-» на «+» очередного приращения возвращаемой в цепь электроэнергии.

Каждое приращение электроэнергии  $\Delta w$  увеличивает значение, хранящееся в одном из двух регистров памяти (10), его содержимое сравнивается с константой (шаг 11), равной единице измерения электроэнергии (для разработанного счетчика 1 дВт·ч), и если оно больше этой величины, то триггер (12) формирует единичный импульс, поступающий на один из двух каналов счетчика импульсов (шаг 13), каждый из которых содержит по 7 десятичных разрядов со встроенным гашением незначащих нулей слева, что упрощает восприятие подаваемой информации.

Этот же импульс условно обнуляет регистр памяти (10), содержимое которого уменьшается на величину учетной единицы измерения электроэнергии (шаг 9).

С целью уменьшения результирующей погрешности для измерения напряжения и тока используются специализированные приборы типа LV-25-P и HASS -50 на базе элементов Холла с гальванической развязкой силовой и измерительной цепей.

Среди наиболее характерных областей применения таких датчиков можно выделить:

- UPS и другое оборудование, использующее батареи (для контроля зарядного и разрядного токов);
- электромобили, транспортные преобразователи, системы контроля состояния батарей;
- системы городского электрического транспорта, системы управления и защиты тяговых двигателей (для контроля режимов работы);
- другие области применения, например, системы управления электроэнергией, коммутируемые источники питания.

Для каждого из выбранных датчиков одной из основных метрологических характеристик является точность преобразования, которая зависит от типа производимых преобразований, электрических параметров и параметров, зависящих от окружающей среды (окружающая температура и т. д.).

Определим погрешность и значение внешнего резистора при преобразовании номинального значения напряжения  $U_H = 120 B$  [5]. Расчет начнем с определения величины внешнего резистора  $R_1$ .

В техническом паспорте [3] на датчик LV-25-P указано: номинальный входной ток, эффективное значение  $I_{PN} = 10 \text{ мА}$ ; диапазон преобразования  $I_P = (0 \dots \pm 14) \text{ мА}$ ; входное внутреннее сопротивление  $R_P = 250 \text{ Ом}$  (при температуре  $T_A = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$$R_1 = (U_{PN} / I_{PN}) - R_P = (120 / 14 \times 10^{-3}) - 250 = 8321 \text{ Ом} = 8.32 \text{ кОм}$$

Номинальная мощность, рассеиваемая в  $R_1$

$$P = I_{PN}^2 \times R_1 = 10^2 \text{ мА} \times 8.32 \text{ кОм} = 0.83 \text{ Вт}$$

Выберем значение мощности, равное 4 Вт.

Полное сопротивление первичной цепи будет следующим:

$$R = R_p + R_1 = 250 + 8321 = 8.57 \text{ кОм}$$

Вычислим точность преобразования без учета  $R_1$ . В соответствии с техническим паспортом: точность преобразования при температуре  $+25^\circ\text{C}$  составляет  $\pm 0.9\%$  от  $I_{PN}$  при напряжении питания  $U_c = \pm 12 \dots 15 \text{ В}$ ; температурный дрейф выходного тока - максимум  $\pm 0.25 \text{ мА}$ ; коэффициент преобразования 2500:1000; входной ток  $I_{PN}$  в 10 мА должен создавать номинальный аналоговый выходной ток  $I_{SN} = 25 \text{ мА}$ .

Таким образом, значения погрешностей преобразования составляют:  
 точность при  $25^\circ\text{C}$ ,  $\pm 0.7\%$  от  $I_{PN}$   $\pm 0.7\%$   
 температурный дрейф выходного сигнала,  $\pm 0.25 \text{ мА} / 25 \text{ мА}$   $\pm 1.0\%$

Максимальная погрешность датчика без учета величины внешнего резистора  $R_1$

$$\delta_1 = (\pm 0.7\%) + (\pm 1.0\%) = \pm 1.7\%$$

На стабильность первичного тока, а значит, и на величину выходного сигнала влияет любое изменение от рабочей температуры величины как внешнего резистора  $R_1$ , так и входного внутреннего сопротивления  $R_p$ . Для примера выберем значение сопротивления  $R_1$  с точностью 0.5% и температурным дрейфом 50 ppm / °K. Входное внутреннее сопротивление обмотки датчика при рабочей температуре  $T_A = +85^\circ\text{C}$  250 Ом. По известной зависимости

$$R_{p\Delta t} = R_{pi}(1 + \alpha \Delta t),$$

где  $R_{p\Delta t}$  - значение сопротивления при конечной температуре,  $R_{pi}$  - значение сопротивления при любой другой температуре,  $\alpha$  - температурный коэффициент меди 0.004 Ом / °K,  $\Delta t$  - разность между температурами, определим  $R_p$  при  $T_A = +25^\circ\text{C}$  и  $T_A = +70^\circ\text{C}$ .

$$R_p \text{ (при } T_A = +70^\circ\text{C)} = R_{p\Delta t} / (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 250 / [1 + 0.004 \cdot (85 - 70)] = 236 \text{ Ом}$$

$$R_p \text{ (при } T_A = +25^\circ\text{C)} = R_{p\Delta t} / (1 + \alpha \cdot \Delta t) = 250 / [1 + 0.004 \cdot (85 - 25)] = 202 \text{ Ом}$$

Номинальная погрешность определяется точностью резистора  $R_1$   $\delta_H = 0.5\%$ . Погрешность, обусловленная температурным дрейфом выходного сигнала

$$\delta_{OT} = 50 \text{ ppm} / ^\circ\text{K} \cdot (70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \cdot 100\% = 0.225\%$$

Погрешность преобразования в зависимости от температурного изменения сопротивления первичной обмотки

$$\delta_T = [(R_p \text{ при } T_A + 70^\circ\text{C} - R_p \text{ при } T_A + 25^\circ\text{C}) / R] \cdot 100\% = [(236 - 202) / 8571] \cdot 100\% = 0.397\%$$

Полная погрешность, связанная с величиной  $R$

$$\delta_R = \delta_H + \delta_{OT} + \delta_T = 0.5\% + 0.225\% + 0.397\% = 1.12\%$$

Полная погрешность преобразования при номинальном напряжении  $U_H = 120 \text{ В}$  в пределах диапазона рабочих температур составляет:

$$\delta = \delta_1 + \delta_R = 1.70\% + 1.12\% = 2.82\%$$

При небольших напряжениях силового источника ( $\leq 100 \text{ В}$ ) допускается реализация датчика напряжения в виде резистивного делителя.

Полная погрешность (точность) преобразования датчика тока HASS-50-S указана в техническом паспорте [4] для номинального тока  $I_{PN}$  при окружающей температуре в  $25^\circ\text{C}$  и составляет  $< \pm 2\%$ , включает в себя погрешности начального выходного напряжения, нелинейности и от изменения рабочей температуры. На практике же сумма всех вышеперечисленных ошибок, как правило, больше теоретически заданной [5].

Из технической документации на датчик известно, что при окружающей температуре  $25^\circ\text{C}$ : величина начального выходного напряжения при  $I_p = 0$  составляет  $+2.5 \text{ В} \pm 10 \text{ мВ}$ ; коэффициент преобразования (задан изготовителем) – 10 мВ; нелинейность ( $0 \dots I_{PN}$ ) –  $< 1.0\%$  от величины  $I_{PN}$ , т.е. 30 мВ.

Полная погрешность при  $25^\circ\text{C}$ , равная сумме перечисленных составляющих  $\delta_1 = \pm 50 \text{ мВ}$  ( $\pm 0.67\%$ ).

В зависимости от рабочей температуры (от 25° С до + 70° С) дрейф начального выходного напряжения  $U_{OUT}$  при  $I_p = 0$   $\delta_{OUT} = \pm 45$  мВ или  $\delta_{OUT} = \pm 1.5$  % ( $< \pm 1$  мВ/°С). Погрешностью температурного дрейфа коэффициента преобразования ( $\delta_T = 0.1$  % от значения /°С) можно пренебречь ( $\pm 0.45$  мВ или  $\pm 0.015$  %).

Максимальная погрешность преобразования датчиком тока

$$\delta = \delta_1 + \delta_{OUT} = (\pm 0.67 \%) + (\pm 1.5 \%) = \pm 2.17 \%$$

Используемые для измерения датчики тока и напряжения обладают высокой помехоустойчивостью и перегрузочной способностью, характеризуются малым потреблением энергии, адаптированы к применению в микропроцессорных и микроконтроллерных системах. Они надежны в эксплуатации и характеризуются высокой точностью преобразования измеряемой величины, что значительно повышает точность измерения электрической энергии.

Таким образом, на основе популярных и сравнительно недорогих модулей создан надежный и малогабаритный прибор для измерения расхода электроэнергии при исследовании лёгких ЭТС (рис. 3) с возможностью за счет внутрисхемного программирования дальнейшего усовершенствования алгоритма измерения электрической энергии без изменения принципиальной схемы.



Рис. 3 – Внешний вид разработанного счётчика энергии (слева) рядом с промышленным образцом

В дальнейшем, разработанный алгоритм измерения вырабатываемой электроэнергии предполагается применить в микроконтроллерах ветряных двигателей и солнечных батарей.

#### Литература

1. М. Подорожанский. Проверка на дорогах. Первый тест электромобиля!// Авторевю. - 2011. - №19(481). - с.22-28.
2. Е.А.Смотров, Д.В.Вершинин, А.Ю.Сусленко Исследование характеристик лёгкого электротранспортного средства с электроприводом мотор-колесо// Электротехнические и компьютерные системы. - Киев: Техника. - 2011. - №03(79). - с. 119-122.
3. Датчик напряжения LV-25-P. – Режим доступа: [НТТР: //web.tvcom.ru/tvelem](http://web.tvcom.ru/tvelem)
4. Датчики тока HAS 50...600 – S/SP1. – Режим доступа: [НТТР: //web.tvcom.ru/tvelem](http://web.tvcom.ru/tvelem)
5. Изолированные датчики тока и напряжения: Характеристики - Применение - Расчеты. – Режим доступа: [НТТР: //web.tvcom.ru/tvelem/html/introduction.htm](http://web.tvcom.ru/tvelem/html/introduction.htm)
6. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/ Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина.- 6-е изд., перераб. И доп. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 480 с.: ил.