

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И МОЩНОСТИ

В.А. ДАЙНЕКО, к. т. н., доцент; А.А. ЦХОВРЕБОВ, аспирант; В.В. ГУРИН, к. т. н., профессор; Д.В. БАТРАКОВ, студент (УО БГАТУ)

Одним из направлений энерго-сбережения является снижение энергоемкости стационарных и мобильных сельскохозяйственных машин. Основные причины их высокой энергоемкости следующие: несовершенство технологий и конструкций, большая мощность холостого хода, отсутствие эффективных автоматических устройств контроля, регулирования загрузки и отсутствие ограничителей холостого хода электроприводов.

В большинстве случаев сельскохозяйственные машины, особенно стационарные, загружены на 50-60%. Например, дробилки кормов перерасходуют около 48% электроэнергии на единицу перерабатываемой продукции из-за недогрузки. Процесс дробления — энергоемкий, поэтому необходимо регулировать подачу сырья и поддерживать постоянную нагрузку. В большинстве существующих измельчающих машин, оснащенных регуляторами загрузки, регулирование осуществляется по току обмотки статора асинхронного электродвигателя. При отклонениях питающего напряжения изменяется коэффициент мощности электродвигателя, поэтому ток статора не несет достоверной информации для системы автоматического регулирования загрузки.

Получить точную информацию о нагрузке можно только путем измерения нескольких параметров технологического процесса с последующей их обработкой средствами микропроцессорной техники и компьютерами.

Таким образом, разработка устройств измерения активной мощности и разработка алгоритмов для автоматических устройств регулирования загрузки является актуальной задачей.

Для ее решения был проведен анализ существующих аналоговых и цифровых средств измерения мощности и современных измерителей коэффициента мощности электроприводов [1,2,3].

В результате проведенных исследований разработаны измерительные преобразователи, предназначенные для определения среднеквадратического значения напряжений, токов и мощности, выполненные на современной элементной базе. Их применение в сочетании с микропроцессорами позволит реализовать достаточно простые и недорогие регуляторы загрузки для электроприводов различного назначения.

В простейших измерительных схемах токов и напряжений применяются выпрямители и усредняющие цепи, напряжение на выходе которых затем градуируется в единицах *RMS* (*среднеквадратического значения*). Удовлетворительные результаты в таких случаях получаются только при одной, неизменной форме сигнала, например, синусоидальной. Формы напряжения характеризуются *коэффициентом формы*, который определяется как отношение амплитудного значения сигнала к действующему. Многие типичные формы сигналов, такие как синусоидальные и треугольные, имеют относительно низкий (≤ 2) коэффициент формы. Импульсы с большой скважностью и прямоугольные импульсы имеют большой коэффициент формы.

Истинное (среднеквадратическое) значение напряжения определяется как

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V(t)^2] dt}, \quad (1)$$

где V_{RMS} — среднеквадратичес-

кое значение; T — продолжительность измерения; $V(t)$ — мгновенное значение напряжения.

Если возвести в квадрат обе части (1), то интеграл может быть аппроксимирован как текущее среднее значение

$$V^2_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t)^2] dt;$$

$$Avg[V(t)^2] = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t)^2] dt, \quad (2)$$

откуда

$$V_{RMS} = \sqrt{Avg[V(t)^2]}. \quad (3)$$

Выражение (3) определяет среднеквадратическое значение измеренного напряжения любой формы.

На этом принципе основана работа аналоговых преобразователей среднеквадратического значения напряжения и специализированных линейных интегральных схем.

Схема варианта такого устройства приведена на рис. 1.

В измерительной технике применяются специализированные аналоговые интегральные микросхемы, представляющие собой детекторы среднеквадратического значения напряжения (преобразователи RMS-DC). Такие микросхемы применяются в простых измерительных преобразователях и легко согласуются с входами различных автоматических регуляторов, так как их выходным сигналом является линейно изменяющееся напряжение. Недостатком аналоговых RMS-детекторов является большое время установления выходного сигнала при малых уровнях входных напряжений, что ограничивает их использование в быстродействующих устройствах.

При повышенных требованиях к точности и быстродействию преобразователей RMS применяют совре-

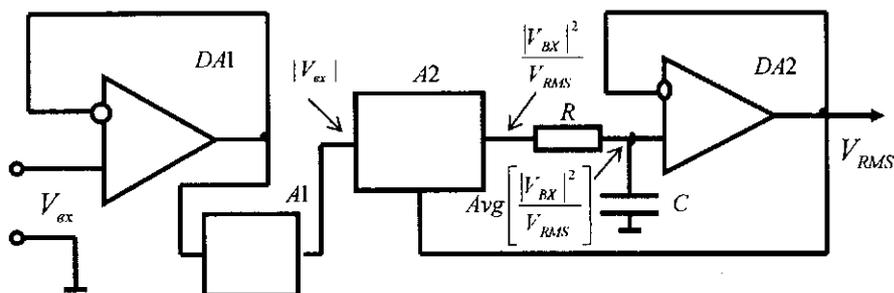


Рис. 1. Аналоговая схема вычисления среднеквадратического значения напряжения. DA1 – повторитель входного сигнала (буфер); A1 – устройство выделения абсолютного значения сигнала; A2 – квадратор/делитель; RC – фильтр; DA2 – буфер.

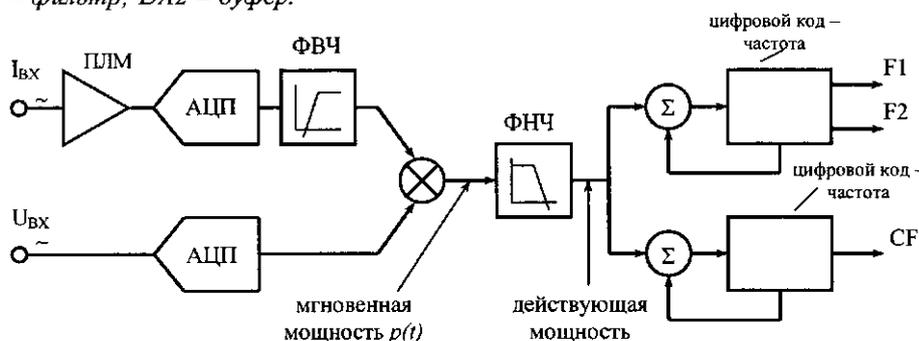


Рис. 2. Принцип действия микросхемы для измерения мощности AD7755.

менные цифровые микросхемы и DSP-процессоры [4]. В качестве примера рассмотрим применение микросхемы фирмы “Analog devices” типа AD7755.

AD7755 содержит аналоговые элементы только во входных аналого-цифровых преобразователях и в опорной цепи. Все остальные сигналы обрабатываются данной микросхемой в цифровой форме, что повышает производительность и точность измерений, а также стабильность работы в широком диапазоне температуры окружающей среды [4]. Принцип действия AD7755 поясняет блок-схема (рис. 2).

AD7755 выдает информацию о среднем значении действующей мощности на низкочастотных выходах F1 и F2. Частотный сигнал на выходе CF соответствует мгновенному значению действующей мощности.

Сигналы от цепей тока и напряжения преобразовываются двумя 16-битными сигма-дельта АЦП с граничной частотой преобразования 900 кГц. Фильтр верхних частот ФВЧ устраняет постоянную составляющую из токового сигнала.

Мгновенная мощность определяется перемножением сигналов тока и напряжения. Для выделения составляющей действующей мощности сигнал проходит через цифровой фильтр нижних частот. Корректные результаты обеспечиваются и для несинусоидальных токов и напряже-

ний при различных значениях коэффициентов мощности. Все сигналы обрабатываются и выводятся в цифровой форме.

Низкочастотные выходы AD7755 F1 и F2 организованы аккумулярованием информации о текущей активной мощности за некоторое время между выходными импульсами, поэтому выходная частота пропорциональна средней активной мощности. Полученная таким образом средняя активная мощность, в свою очередь, может использоваться для определения потребленной электроэнергии при помощи счетчика, подключенного к низкочастотному выходу. Так как длительность импульсов на высокочастотном выходе CF значительно меньше времени интегрирования, информация на этом выходе соответствует мгновенной активной мощности.

Определение коэффициента мощности основано на выделении информации о ее активности из сигнала мгновенной мощности путем низкочастотной цифровой фильтрации.

Рис. 3 иллюстрирует определение действующей мощности при $\cos \varphi = 1$ и при $\cos \varphi = 0,5$. Если напряжение и ток имеют синусоидальную форму, то мгновенная актив-

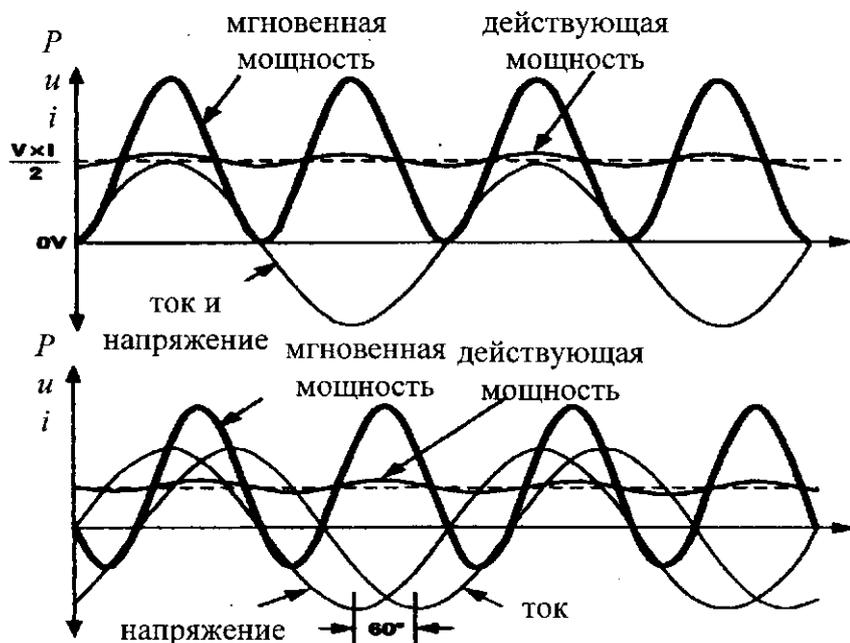


Рис. 3. Изменение постоянной составляющей сигнала мгновенной активной мощности при $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,5$.

ная мощность определится как произведение:

$$P = \left(\frac{U \times I}{2}\right) \times \cos(60^\circ). \quad (4)$$

Этот метод также справедлив для несинусоидальных тока и напряжения.

Кривые токов и напряжений можно разложить на отдельные гармонические составляющие. Используя преобразования Фурье, мгновенное значение напряжения можно выразить через следующее выражение:

$$u(t) = V_0 + \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 0} V_h \cdot \sin(h\omega t + \alpha_h), \quad (5)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения;

V_0 – среднее значение напряжения;
 V_h – среднеквадратическое значение напряжения h – гармоники;
 α_h – фазовый угол h – гармоники напряжения.

Аналогично для мгновенного тока:

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 0} I_h \cdot \sin(h\omega t + \beta_h), \quad (6)$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока;

I_0 – постоянная составляющая тока;
 I_h – среднеквадратическое значение тока h – гармоники;
 β_h – фазовый угол токовой гармоники.

Активную мощность P можно выразить через мощность первой гармоники P_1 и мощность h – гармоники P_h .

$$P = P_1 + P_h, \quad (7)$$

где $P_1 = V_1 \times I_1 \cos \varphi_1$,

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1,$$

и $P_h = \sum_{h \neq 1} V_h \cdot I_h \cos \varphi_h$, (8)

$$\varphi_h = \alpha_h + \beta_h.$$

Как видно из (8), гармоническая составляющая активной мощности образуется из гармонических составляющих кривых тока и напряжения. Коэффициент мощности вычисляется так же, как и для случая чисто синусоидального сигнала.

Входная полоса частот микросхемы составляет 14 кГц при использовании совместно с микросхемой кварцевого резонатора 3,5795 МГц.

Для частоты 50 Гц подавление

второй гармоники (100 Гц) внутренним цифровым фильтром AD7755 составляет -22 дБ.

Аналоговый вход токового канала V1 подключается к выходу преобразователя тока. Канал V1 содержит дифференциальный вход напряжения; вход VIP является положительным по отношению к входу VIN.

Максимальный амплитудный дифференциальный сигнал канала 1 должен быть не более ± 470 мВ (330 мВ для синусоидального сигнала); при больших значениях ощущается увеличение погрешности измерения мощности.

На входе токового канала имеется программируемая логическая матрица (ПЛМ), которая позволяет выбирать коэффициент усиления 1, 2, 8 или 16. Коэффициент усиления программируется подключением выводов G_0 , G_1 микросхемы к уровню логической "0" или "1" в соответствии с таблицей 1.

Канал напряжения (V2) имеет дифференциальный вход с максимальным входным сигналом ± 660 мВ.

На рис. 4 приведена принципиальная схема измерительного преобразователя мощности на микросхеме AD7755.

Вторичная обмотка трансформатора тока ТА подключена к входам VIP и VIN канала 1. Для компенсации синфазных помех общая точка шунта R5, R6 соединяется с "аналоговой землей" (AGND) микросхемы.

Выбором коэффициента трансформации ТА и сопротивлений шунта R5, R6 максимальное входное напряжение токового канала устанавливается на уровне ± 470 мВ/ k_i при максимальной нагрузке.

На входы V2N и V2P второго канала поступает сигнал с трансформатора напряжения TV, обеспечивающего гальваническую развязку от сети.

Дифференциальная схема канала напряжения устраняет синфазную помеху на входе. Входное напряжение может подаваться на входы V2N, V2P и через резистивный делитель напряжения, но выходные цепи микросхемы должны иметь гальваническую развязку от входных цепей. Максимальный дифференциальный входной сигнал (± 660 мВ) устанавливается выбором коэффициента трансформации TV или подстройкой резисторов входного деления напряжения.

Как уже упоминалось, информация об активной мощности выделяется на выходе цифрового фильтра низких частот микросхемы AD 7755. Частотная характеристика фильтра определяется выражением:

$$|H(f)| = \frac{1}{1 + (f/8.9)}, \quad (9)$$

где f – частота сети.

Для частоты $f = 50$ Гц ослабление второй гармоники цифровым фильтром составит -22 дБ.

Выделенная на выходе цифрового фильтра низких частот цифровая информация затем преобразуется в частоту.

Информация о средней активной мощности получается на выходах F1 и F2 в виде низкочастотных импульсов. Максимальные частоты на этих выходах приведены в таблице 2. Установка требуемой выходной максимальной частоты F1, F2 производится при помощи логических входов S1 и S0.

Выходные сигналы на F1 и F2 получают усреднением информации за сравнительно большой промежуток времени, в результате чего выходная частота пропорциональна средней активной мощности. Усреднение происходит в цифро-частотном преобразователе.

Выходная частота F1, F2 определяется выражением:

1. Выбор коэффициента k_i усиления для канала 1

G1	G0	Коэффициент усиления k_i	Максимальные дифференциальные сигналы
0	0	1	± 470 мВ
0	1	2	± 232 мВ
1	0	8	± 60 мВ
1	1	16	± 30 мВ

$$F_{1,2} = \frac{8.06 \cdot V_1 \cdot V_2 \cdot k_i \cdot F_{1-4}}{V_{оп}^2}, \quad (10)$$

где V_1, V_2 – дифференциальные среднеквадратические входные напряжения каналов тока и напряжения;

$k_i = 1, 2, 8$ или 16 – коэффициент усиления токового канала, зависящий от состояния логических входов G0, G1 программируемой логической матрицы;

$V_{оп}$ – опорное напряжение на входе REF ($2,5 \text{ В} \pm 8\%$);

F_{1-4} – одна из четырех возможных частот, выбираемых состоянием логических входов S0 и S1 (табл. 2).

Частотный выход CF предназначен для калибровки микросхемы AD 7755, при использовании ее в счетчиках электрической энергии. Выходная частота CF может быть установлена изменением логического состояния входов SCF, S1, S0 (табл. 3).

В схеме на рисунке 4 выход CF подключен к входу преобразователя “частота – ток”, который обеспечивает выходной токовый сигнал 4 – 20 мА.

Разработанный на основе микросхемы AD 7755 преобразователь мощности испытан совместно с преобразователем частоты FRS-550 в системе стабилизации загрузки дробилки зерна изменением скорости подачи зерна шнековым транспортером.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного литературного обзора обоснован выбор принципов построения и элементной базы измерительных преобразователей действующих значений тока, напряжения и мощности.

2. Разработан и испытан измерительный преобразователь активной мощности, имеющий следующие технические характеристики:

- основная погрешность измерения активной мощности в динамическом диапазоне 500:1 не превышает 1% на аналоговом выходе и 0,5% на частотном выходе;
- напряжение питания 5 В, потребляемый ток 25 мА;
- диапазон частот 40 Гц...1 кГц;
- диапазон температур -40...+85 °С.

3. Преобразователь мощности позволяет регистрировать электрическую энергию, потребляемую контролируемым электроприемником

2. Максимальные выходные частоты F1 и F2

S1	S0	Максимальная выходная частота, Гц
0	0	0,34
0	1	0,68
1	0	1,36
1	1	2,72

3. Максимальная частота на выходе CF

SCF	S1	S0	F ₁₋₄ (Гц)	CF _{MAX} (Гц)
1	0	0	1,7	43,52
0	0	0	1,7	21,76
1	1	1	13,6	5,57 кГц

при подключении к выходам F1, F2 электромеханического или электронного счетчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Мусин. Электропривод сельскохозяйственных машин и агрегатов. – М.: Агропромиздат, 1985, 239 с.

2. Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанковский, А.О. Горнов. Энергосбережение в электроприводе. – М.: Выс-

шая школа, 1985, 128 с.

3. А. Т. Птушкин и др. Автоматическое управление на мукомольных заводах. – М.: Колос, 1975, 288 с.

4. Электрические измерения интегральными микросхемами с импульсным выходом. Техническая информация Analog Devices. www.analog.com.

5. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Москва, 1982, 512 с.

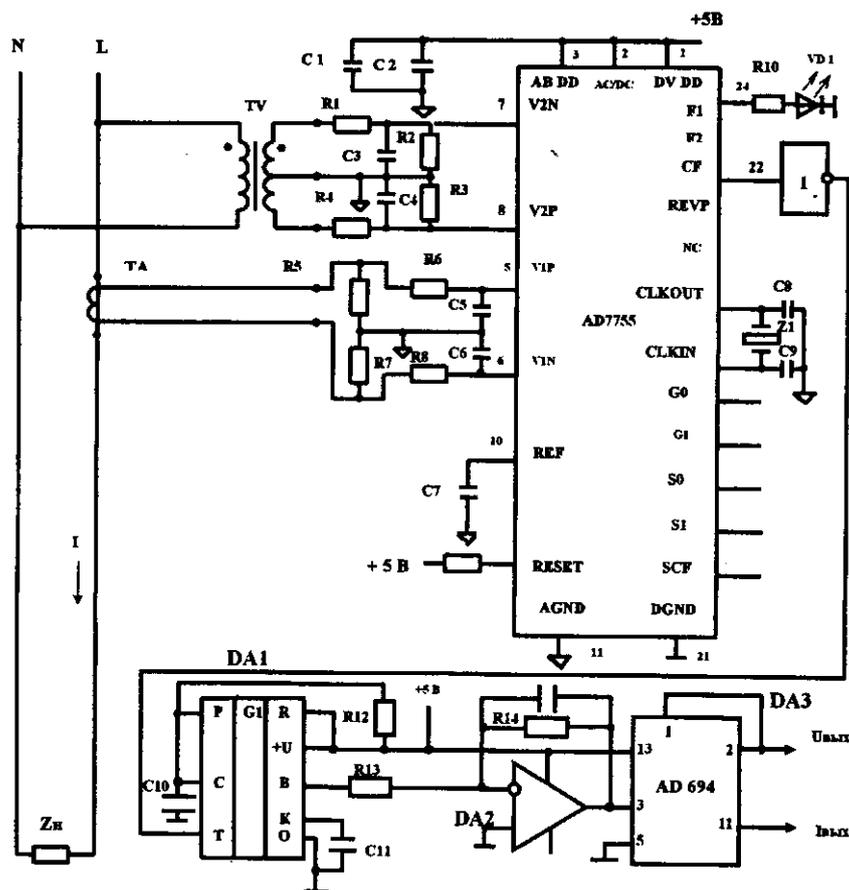


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного преобразователя мощности на микросхеме AD7755.