

Универсальный преобразователь АЕМТ:

теория и методы измерения

Как правило, измерительные преобразователи предназначены для работы в цепях только постоянного или только переменного тока. Однако в зависимости от характера нагрузки ток в таких цепях может содержать нежелательные переменную или постоянную составляющие соответственно, и далеко не всегда их величинами можно пренебречь. Для получения полной информации о процессах в контролируемой цепи необходимо одновременно измерять параметры постоянного, переменного и пульсирующего тока. Данная задача может быть решена применением рассматриваемого в статье измерительного преобразователя АЕМТ.

Дмитрий Чупин, к. т. н.

dchupin@alektogroup.com

Олег Гордеев

gordeevoi@alektogroup.com

Для контроля параметров питающей сети требуется множество измерительных преобразователей тока, напряжения, мощности, частоты и т. п. Поскольку в промышленности для электропитания применяются цепи как переменного, так и постоянного тока, любой тип преобразователей имеет модификации, предназначенные для работы с каждым из типов цепей. Это обусловлено различием измеряемых параметров для каждого из типов цепей и, как следствие, различием принципов их измерения. Так, для определения параметров переменного тока требуется отфильтровать постоянную составляющую тока (напряжения), что неприемлемо при измерении параметров постоянного тока. В цепях постоянного тока обычно измеряют среднее значение тока (напряжения), что при применении в цепях переменного тока даст лишь сведения о величине его постоянной составляющей.

В связи с развитием микропроцессорной техники практически все современные измерительные преобразователи построены на принципе аналого-цифрового преобразования электрических величин и их последующей математической обработки. Представленные сегодня на рынке микроконтроллеры обладают высокоскоростными аналого-цифровыми преобразователями и большой вычислительной мощностью, что позволяет делать выборку мгновенных значений тока и напряжения одновременно, а затем проводить требуемую фильтрацию, вычислять средние и среднеквадратические значения тока (напряжения), активной (реактивной, полной) мощности, энергии и прочих сопутствующих параметров. Такой принцип измерения позволяет не привязываться к конкретному типу тока (переменному или постоянному) при проектировании измерительного преобразователя. В результате появляется возможность создать универсальную измерительную платформу, назначение и функции

которой потребитель способен сформировать самостоятельно.

Представителем таких приборов является измерительный преобразователь АЕМТ производства ООО «Фирма «Алекто-Электроникс». Устройство предназначено для измерений параметров в цепях постоянного (DC), переменного (AC) и пульсирующего тока (AC+DC). Преобразователь АЕМТ имеет два канала для определения тока и напряжения, каждый из которых выполняет измерение параметров трех групп (DC, AC и AC+DC) одновременно.

Преобразователь разрабатывался преимущественно для эксплуатации в составе щитов оперативного тока, а также для контроля и последующего анализа параметров однофазных сетей. Прототип АЕМТ проходил тестовые испытания в составе щита оперативного тока подстанции 150/20 кВ Коцеба (г. Ираклион, Греческая Республика). После проведения государственных испытаний и включения в Государственный реестр (рег. № 73607-18) первые серийные образцы преобразователей АЕМТ установлены на объектах территориального органа Федеральной службы судебных приставов в с. Азово и пгт Марьяновка (Омская область, Россия), где производился контроль и анализ параметров сети электропитания.

Разделение измеряемых преобразователем АЕМТ параметров на группы позволяет рассматривать его одновременно и как аналог стандартных измерительных приборов постоянного или переменного тока, и как прибор с гораздо более широкой областью применения.

К группе параметров DC относятся: значение постоянного тока I_{DC} , значение постоянного напряжения U_{DC} , мощность нагрузки P_{DC} , энергия W_{DC} , потребляемая нагрузкой (в ватт-часах), количество электричества Q , принятое или отданное аккумуляторной батареей (в ампер-часах).

При расчете данных параметров в первую очередь выполняется цифровая фильтрация переменной составляющей.

Для вычисления значений параметров постоянного тока на основе выборки из N мгновенных значений применяется общеизвестная формула [1]:

$$X_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k, \quad (1)$$

где X_{AV} — значение параметра X (в данном случае I_{DC} или U_{DC}); x_k — k -тое значение соответствующего параметра из выборки.

Мощность нагрузки P_{DC} рассчитывается как произведение значений тока и напряжения [1]:

$$P_{DC} = I_{DC}U_{DC} \quad (2)$$

Энергия W_{DC} потребляемая нагрузкой, вычисляется как:

$$W_{DC} = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{P_{DCk} \Delta t_p}{3600} \right), \quad (3)$$

где P_{DCk} — k -тое усредненное значение мощности; Δt_p — период усреднения мощности в секундах.

Количество электричества Q , принятое или отданное аккумуляторной батареей, вычисляются по формуле:

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{I_{DCk} \Delta t_I}{3600} \right), \quad (4)$$

где I_{DCk} — k -тое усредненное значение тока; Δt_I — период усреднения тока в секундах.

К группе параметров АС относятся: среднеквадратическое значение тока I_{AC} , среднеквадратическое значение напряжения U_{AC} , активная, реактивная и полная мощность нагрузки (P_{AC} , P_Q и P_S соответственно), энергия W_{AC} потребляемая нагрузкой (в ватт-часах), коэффициент мощности нагрузки PF , частота сети f .

В первую очередь выполняется цифровая фильтрация постоянной составляющей, после чего вычисляются требуемые параметры.

Среднеквадратические значения X_{RMS} (в данном случае I_{AC} и U_{AC}) определяются по формуле [1]:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k^2}. \quad (5)$$

Активная мощность нагрузки P_{AC} рассчитывается как среднее значение мгновенных мощностей выборки N [1]:

$$P_{AC} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (u_k i_k). \quad (6)$$

Реактивная мощность P_Q рассчитывается по схожей формуле:

$$P_Q = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (u_{\perp k} i_k), \quad (7)$$

где $u_{\perp k}$ — k -тое значение выборки напряжения, гармоники которого смещены по фазе на 90° .

Поясним физический смысл формулы (7). Как известно, через активную нагрузку (рис. 1а) протекает переменный ток i , начальная фаза φ которого равна начальной фазе напряжения u на этой нагрузке [1]. Причем мощность, поступающая от источника тока, полностью рассеивается на этой нагрузке и может быть вычислена по формуле (6). Нужно заметить, что, применяя формулу (6), мы вычисляем постоянную составляющую мощности p (рис. 1в).

Через индуктивную (рис. 2а) или емкостную (рис. 3а) нагрузку протекает переменный ток i , начальная фаза которого смещена на $\pm 90^\circ$ относительно напряжения u на нагрузке [1].

При этом мощность, поступающая в такую нагрузку, не имеет постоянной составляющей и, применяя для ее вычисления формулу (6), мы получаем ноль.

При смещении напряжения u по фазе на 90° , согласно формуле (7), соотношение тока i и напряжения u на рис. 2в и 3в сводится к соотношению на рис. 1в. Теперь реактивная мощность приобретает постоянную составляющую, что позволяет вычислять ее по формуле (6).

Через смешанную (активно-реактивную) нагрузку протекает переменный ток i , который можно представить в виде суммы активного i_a и реактивного i_r токов:

$$i = i_a + i_r, \quad (8)$$

Активный ток i_a имеет одинаковые начальные фазы с напряжением u на нагрузке (рис. 1б), его величина определяет значение активной мощности. Реактивный ток i_r смещен по фазе на $\pm 90^\circ$ относительно напряжения u на нагрузке (рис. 2б и 3б). Его величина определяет значение реактивной мощности. При вычислении мощности по формуле (6) мы получим результат в виде постоянной составляющей активной мощности. Поскольку реактивная мощность постоянной составляющей не имеет, то ее значение на результат не повлияет.

После смещения напряжения u по фазе на 90° , согласно формуле (7), оно и реактивный ток i_r будут иметь одинаковые начальные фазы. Реактивная мощность приобретет постоянную составляющую, которая может быть вычислена по формуле (6). Постоянная составляющая активной мощности при этом будет равна нулю и не окажет влияния на результат.

Применение формул (6) и (7) позволяет корректно измерять мощности как линейных, так и нелинейных нагрузок. Для этого в реализации формулы (7) используются цифровые фильтры, смещающие по фазе гармонические составляющие напряжения. Правомерность применения формулы (7) обсуждалась и доказана в [2].

Полная мощность P_S вычисляется из полученных ранее активной и реактивной мощностей:

$$P_S = \sqrt{P_{AC}^2 + P_Q^2}. \quad (9)$$

Энергия W_{AC} потребляемая нагрузкой, вычисляется по формуле (3), с учетом того, что

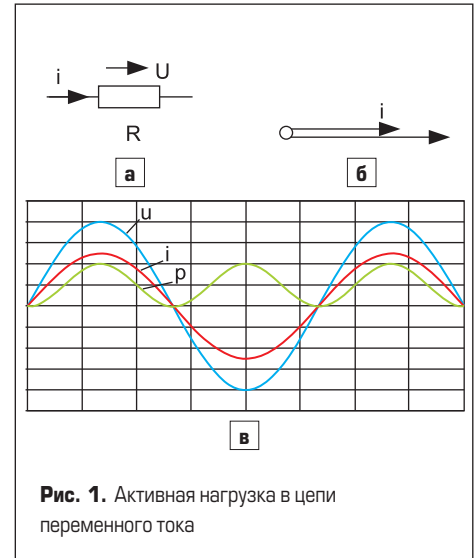


Рис. 1. Активная нагрузка в цепи переменного тока

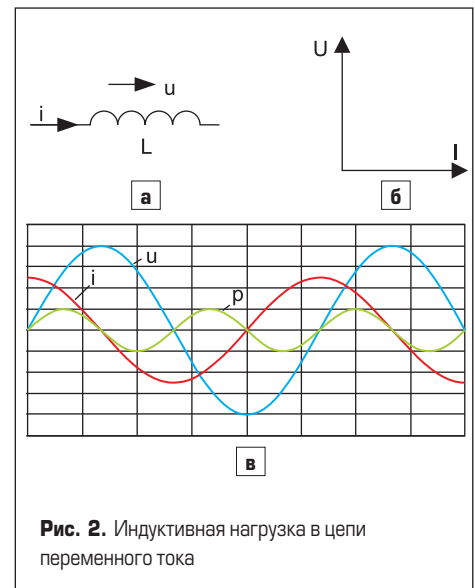


Рис. 2. Индуктивная нагрузка в цепи переменного тока

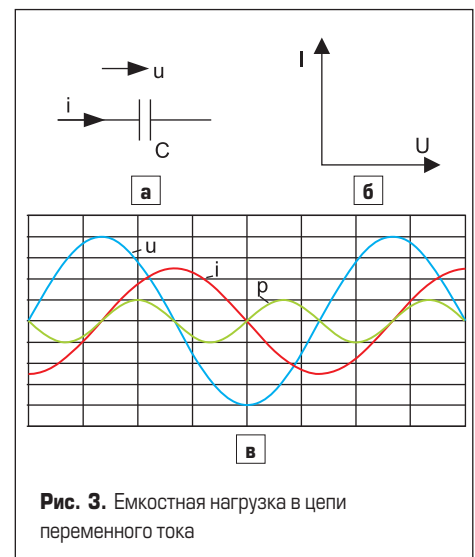


Рис. 3. Емкостная нагрузка в цепи переменного тока

вместо P_{DCk} подставляется P_{ACk} (k -тое усредненное значение мощности за период Δt_p).

К группе параметров AC+DC относятся: среднеквадратическое значение тока I_{AC+DC} и напряжения U_{AC+DC} , активная мощность нагрузки P_{AC+DC} и энергия, потребляемая нагрузкой W_{AC+DC} .

Все параметры этой группы вычисляются так же, как и аналогичные параметры группы AC, с той лишь разницей, что

предварительная фильтрация постоянной составляющей не выполняется. По сути своей это универсальный режим. Он пригоден для цепей и постоянного, и переменного тока. Так, в идеальных условиях, когда в сети переменного тока отсутствует постоянная составляющая, значения параметров I_{AC+DC} , U_{AC+DC} , P_{AC+DC} и W_{AC+DC} будут равны значениям параметров I_{AC} , U_{AC} , P_{AC} и W_{AC} соответственно. И наоборот, когда в сети

постоянного тока отсутствует переменная составляющая, параметры группы AC+DC полностью совпадут с показаниями аналогичных параметров группы DC.

Однако наиболее вероятный случай использования параметров группы AC+DC — измерение параметров питающей сети постоянного тока с нелинейной нагрузкой. Схема одной из таких нагрузок приведена на рис. 4.

Генераторы прямоугольных импульсов G1 и G2 поочередно открывают транзисторы VT1 и VT2, создавая переменный ток, протекающий через катушку индуктивности L1 (рис. 5). При этом в цепи источника тока GB1 тоже протекает переменный ток, обусловленный инерционностью реактивных элементов (рис. 6).

Напряжение на выводах нагрузки при этом имеет постоянную составляющую 12 В и незначительные пульсации (рис. 7).

В данном примере амперметр и вольтметр постоянного тока покажут 0 А и 12 В соответственно (средние округленные значения параметров). Такие же значения будут у параметров I_{DC} и U_{DC} преобразователя АЕМТ. Амперметр и вольтметр переменного тока покажут 1,7 А и 0 В соответственно (среднеквадратические округленные значения параметров без постоянной составляющей). Те же значения будут у параметров тока I_{AC} и напряжения U_{AC} группы AC. Достоверные же значения тока и напряжения (1,7 А и 12 В) будут у параметров I_{AC+DC} и U_{AC+DC} преобразователя АЕМТ.

Это касается и мощности нагрузки. В данном примере ваттметр переменного тока даст некорректные значения, поскольку мгновенные значения тока и напряжения не будут содержать информации о постоянной составляющей после фильтрации. Значение параметра мощности P_{AC+DC} преобразователя АЕМТ будет корректным.

Таким образом, используя параметры всех трех групп, потребитель имеет возможность получать информацию как о сигнале в целом, так и о его постоянной и переменной составляющих в отдельности. Это позволяет на основе преобразователя АЕМТ проектировать измерительные системы различного назначения, охватывающие весь спектр существующих конфигураций питающих сетей, будь то питание от подстанции, системы оперативного тока или альтернативные энергетические установки.

Литература

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: В двух частях. Ч. 1. М.: Высшая школа, 1996.
2. Зацепина В. И., Шилов И. Г. О погрешностях учета реактивной мощности с позиции нормализации качества электроэнергии // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2009. № 4 (18).

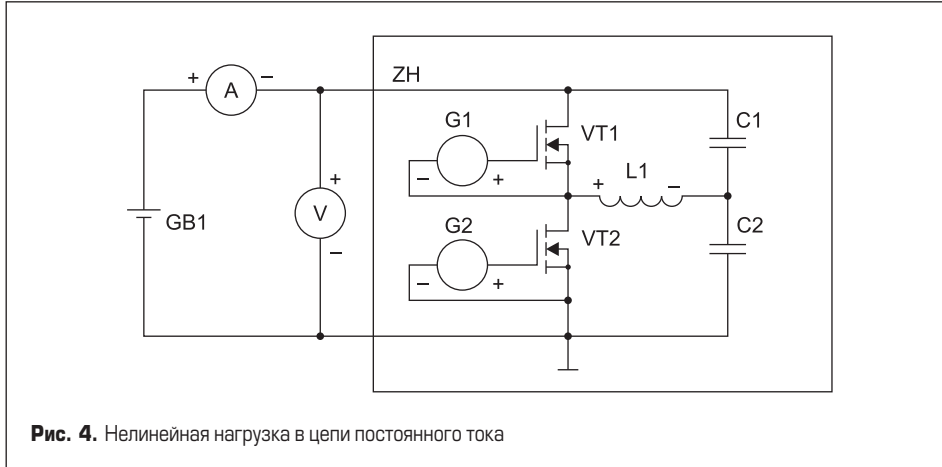


Рис. 4. Нелинейная нагрузка в цепи постоянного тока

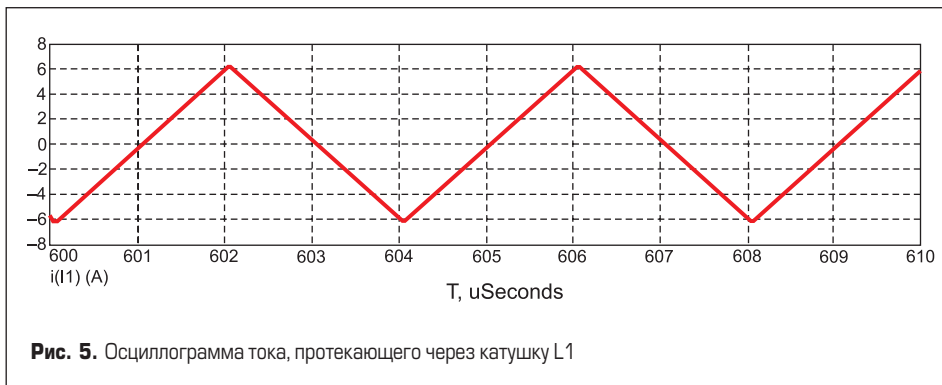


Рис. 5. Осциллограмма тока, протекающего через катушку L1

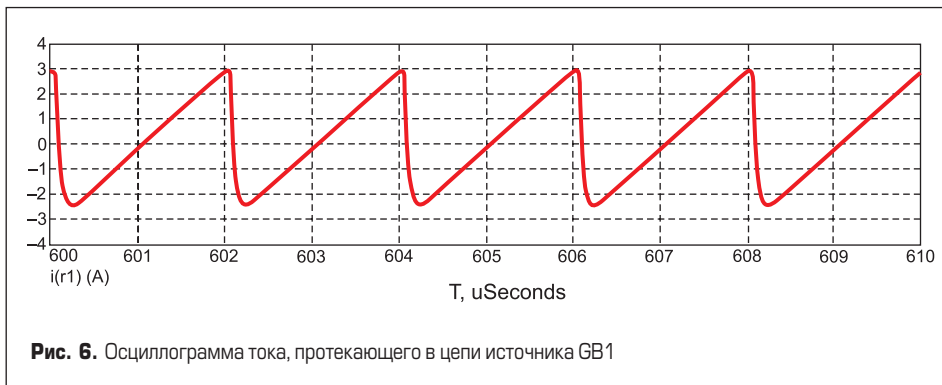


Рис. 6. Осциллограмма тока, протекающего в цепи источника GB1

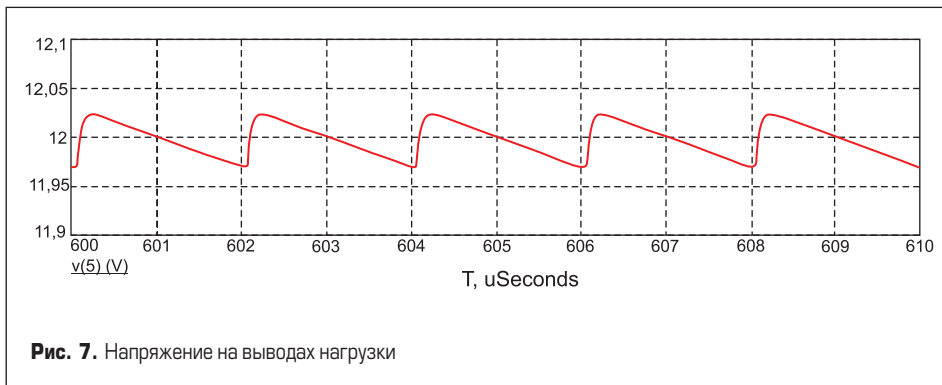


Рис. 7. Напряжение на выводах нагрузки