

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЁТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

А.В. Шолкин, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин

В последнее время в связи с удорожанием энергоносителей значительное внимание уделяется вопросам оперативного контроля потребления энергоресурсов. Одним из таких энергоресурсов является электроэнергия. Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью присущих товару специфических свойств и непосредственно участвует в создании других видов продукции, влияя на их качество. Поэтому законы экономики вынуждают потребителей и продавцов электроэнергии предъявлять все более жесткие требования к ее учёту и контролю потребления, что вызывает необходимость применения все более совершенных средств, предназначенных для сбора, обработки и оперативного контроля данных о потреблении электроэнергии.

В этой связи в последнее время получили распространение системы автоматизированного контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ), включающие в себя первичные измерительные преобразователи, устройства для хранения, транспорта и обработки информации. Но такие системы не решают в полной мере задач оперативного контроля и учета электроэнергии, так как ориентированы преимущественно на сбор информации только о суммарном расходе потребляемой электроэнергии за фиксированный временной интервал. Такие системы ориентированы на работу с серийно выпускаемыми счётчиками электроэнергии. В большинстве случаев такими счётчиками являются электросчетчики индукционного типа, имеющие для большинства бытовых потребителей и малых предприятий класс точности 2,0 – 2,5 с номинальным током 50 А.

Порог чувствительности по току для счетчиков этого типа и указанных классов точности в соответствии с ГОСТ 6570-96 составляет соответственно 0,5 % и 1,0 % от номинального тока. Такой порог не позволяет осуществить контроль электропотребления с нагрузкой, меньшей 0,25 А и 0,5 А для указанных классов, поскольку относительная погрешность измерения при таких токах не нормируется и может достигать 100 % и более. Или, в пересчете на мощность для сете-

вого напряжения 220 В, данным токам будет соответствовать пороговая мощность 55 Вт или 110 Вт, что во многих случаях может оказаться недопустимо большим значением.

Особенности функционирования серийно выпускаемых электросчетчиков, предназначенных для коммерческого учета потребления электроэнергии, не позволяют решать и другие задачи оперативного контроля, например, задачи выявления резкого повышения потребления электроэнергии, выявления утечек, обусловленных нарушением изоляции электропроводки и проч. Да и стоимость таких счетчиков не позволяет использовать их для точечного контроля энергопотребления. Отсюда вытекает необходимость разработки специализированных систем автоматизированного оперативного контроля и учёта электроэнергии (АСОКУЭ), которые были бы способны по определённому алгоритму и при минимальных аппаратных затратах решать подобные задачи. Рассмотрим известные технические решения, предназначенные для работы в среде АСОКУЭ.

Например, в [1] предлагается расход электрической энергии искать через экстремальные значения полной мгновенной мощности, когда скорость изменения последней минимальна, и, следовательно, минимальна погрешность определения фиксируемых значений. Из курса электротехники известно, что мгновенная мощность  $S(t)$  определяется соотношением

$$S(t) = U(t) \cdot I(t),$$

где  $U(t)$ ,  $I(t)$  – мгновенные значения напряжения и тока в контролируемой цепи в момент времени  $t$ . Из него следует, что для синусоидальных напряжений и токов будет справедливо следующее соотношение:

$$S(t) = 1/2 U \cdot I \cdot (\cos\varphi + \cos(2\omega t - \varphi)),$$

где  $U$ ,  $I$  – амплитудные значения напряжения и тока;  $\varphi$  – фазовый сдвиг между напряжением и током;  $\omega$  – угловая частота;  $t$  – время. Из данного выражения видно, что мощность  $S(t)$  принимает экстремальные значения, когда её составляющая  $\cos(2\omega t - \varphi)$  становится равной 1 или -1. Эти значения

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЁТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

чередуются через  $\pi$  радиан и определяются выражением

$$\omega t = (\pi \cdot i + \varphi) \cdot 0,5, \text{ где } i = 0, 1, 2, \dots \infty.$$

Вычислив два соседних экстремума мгновенной мощности, получим, что

$$S(t_1) = 1/2U \cdot I(\cos\varphi + \cos(\pi \cdot 0 + \varphi - \varphi)) = 1/2U \cdot I \cdot (\cos\varphi + 1),$$

$$S(t_2) = 1/2U \cdot I(\cos\varphi + \cos(\pi \cdot 0 + \varphi - \varphi)) = 1/2U \cdot I \cdot (\cos\varphi - 1),$$

где  $t_1, t_2$  – соответствующие соседним экстремумам моменты времени.

Сумма этих экстремумов даст нам амплитудное значение активной мощности, а разность – амплитудное значение полной мощности.

$$P = S(t_1) + S(t_2) = U \cdot I \cdot \cos\varphi.$$

$$S = S(t_1) - S(t_2) = U \cdot I.$$

Далее очевидно, что отношение суммы двух соседних значений экстремумов к их разнице даёт нам значение  $\cos\varphi$  в данной цепи:

$$\cos\varphi = (S(t_1) + S(t_2)) / S(t_1) - S(t_2).$$

Алгоритм нахождения мощности через экстремальные значения полной мгновенной мощности реализуется следующим образом. Циклически аналого-цифровым преобразователем находятся мгновенные значения тока и напряжения двух соседних экстремумов мгновенной мощности. Затем производится цифровое перемножение, т.е. каждая пара полученных значений преобразовывается в цифровой код. После этого производится цифровое суммирование двух соседних экстремумов.

Основным недостатком данного метода является то, что он не даёт объективную оценку всех параметров качества электрической энергии для оперативного контроля, так как в расчетах используются только значения максимумов мгновенной мощности электрической энергии. Кроме того, данный метод подходит только для сигналов синусоидальной формы и поэтому приводит к возникновению дополнительной погрешности при отклонении формы контролируемого напряжения и тока от синусоидальной.

В данной работе предлагается метод нахождения расхода электрической энергии путем прямого интегрирования мгновенной мощности, основанный, как и вышерассмотренный метод, на циклическом аналого-цифровом преобразовании мгновенных значений тока и напряжения, а также на пере-

множении тока на напряжение и суммировании полученных результатов. Обычно, при применении такого метода требуемая точность в широком динамическом диапазоне достигается за счет высокоразрядного АЦП. В данном же случае предлагается использовать несколько поддиапазонов вместо одного полного динамического диапазона. В этом случае разрядность используемого АЦП будет определяться уже не полным динамическим диапазоном контролируемых мощностей, а требуемой относительной погрешностью измерения. Действительно, большинство бытовых приборов и приборов широкого применения имеют номинальный ток 50 А и класс точности 0,5 – 2. Порог чувствительности по току для таких счетчиков и указанных классов в соответствии с ГОСТ 6570-96 составляет соответственно 0,3 – 0,5% от номинального тока [2]. Для достижения такой точности при мощностях нагрузки, близких к максимальному значению, достаточно применять 8-9 разрядное АЦП, поскольку в электрических сетях напряжение изменяется в ограниченном диапазоне и относительная погрешность измерения контролируемой мощности нагрузки будет сопоставима по величине с относительной погрешностью нахождения значений контролируемых токов. Пусть, например, нужно осуществить оперативный контроль расхода электроэнергии потребителей с нагрузкой от 0 до 50 А при напряжении сети не более 260 В с погрешностью 0,01 кВт·ч контроллером со встроенным АЦП. В этом случае при применении 8-разрядного АЦП при отсутствии переключения поддиапазонов измерения порог чувствительности по току не позволит осуществить оперативный контроль энергопотребления нагрузки с током потребления менее 0,25 А. То есть, при нагрузке мощностью менее 55 Вт контроль расхода электроэнергии не может быть осуществлен в принципе, так как относительная погрешность при таком расходе будет превышать 100 %.

Если выбирать поддиапазоны измерения так, чтобы контролируемое значение мощности было всегда близко к максимальному измеряемому значению тока, то можно ограничиться указанным числом разрядов встроенного АЦП. Но количество таких поддиапазонов будет крайне велико, так как АЦП будет обеспечивать требуемую точность преобразования только тогда, когда мощность нагрузки равна верхней граница поддиапазона. И наоборот, увеличивая разрядность АЦП, необходимая относительная погрешность будет

обеспечиваться уже при меньших (относительно выбранного поддиапазона) значениях контролируемых мощностей и, соответственно, количество поддиапазонов может быть сокращено. Из этого следует, что нужно выработать правило выбора оптимального количества поддиапазонов и разрядности АЦП. Либо, при заданной разрядности, правило вычисления требуемого количества поддиапазонов для заданного динамического диапазона и максимально допустимой относительной погрешности измерения.

Зависимость относительной погрешности измерения тока  $\delta$  (а значит, и контролируемой мощности) от его абсолютного значения при наличии нескольких поддиапазонов показана на рисунке 1.

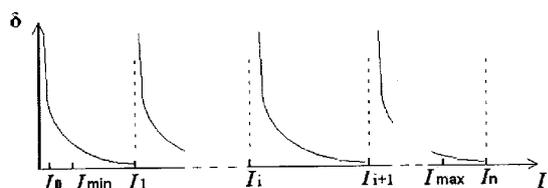


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности тока нескольких поддиапазонов

На нем через  $I_i, i = 1, \dots, n$  обозначена верхняя граница  $i$ -го поддиапазона контролируемого тока,  $I_{\max}$  – максимально возможное значение контролируемого тока, а  $I_{\min}$  – его минимальное значение, при котором обеспечивается максимально допустимое значение относительной погрешности оперативного контроля  $\delta_{\max}$ . Очевидно, что для всех поддиапазонов относительные погрешности на их границах должны быть одинаковы. При этом относительная погрешность  $\delta$  на верхней границе поддиапазона будет определяться разрядностью АЦП, а на нижней границе – требуемой точностью контроля. Нетрудно убедиться, что для соблюдения данного условия необходимо, чтобы соблюдалось соотношение  $K = I_{ni+1} / I_{ni}$ , где  $K$  – коэффициент перекрытия поддиапазонов. Тогда, если весь диапазон измерения разбить на  $n$  поддиапазонов, то

$$K = \sqrt[n]{I_n / I_o}, \quad (1)$$

$$I_i = I_{i-1} \cdot K, \quad (2)$$

$$I_n = I_o \cdot K^n, \quad (3)$$

где  $I_o$  – нижняя граница первого поддиапазона. Очевидно, что при этом должны соблюдаться условия:

$$I_o \leq I_{\min}, \quad I_n \geq I_{\max}. \quad (4)$$

Из рисунка видно, что на любом из поддиапазонов относительная погрешность максимальна на его нижней границе и будет равна

$$\delta_{\max} = \Delta I_i / I_{i-1}, \quad (5)$$

где  $\Delta I_i$  – абсолютная погрешность измерения тока, значение которой для выбранного  $i$ -го поддиапазона измерения постоянно и равно шагу дискретизации АЦП,  $I_{i-1}$  – значение контролируемого тока на нижней границе. При этом на верхней границе любого поддиапазона относительная погрешность будет минимальна и равна

$$\delta_{\min} = \Delta I_i / I_i. \quad (6)$$

Величина абсолютной погрешности измерения на  $i$ -м поддиапазоне связана с количеством разрядов АЦП  $t$  соотношением

$$\Delta I_i = I_i / M, \quad (7)$$

где  $M = 2^m$  – число дискретных значений тока, регистрируемого  $m$ -разрядным АЦП.

Тогда, подставляя (7) в (5) для случая  $i=0$  или  $i=n$ , и полагая в (4), что  $I_o = I_{\min}$  и  $I_n = I_{\max}$ , из (3) следует, что

$$n_o = \lg(I_{\max} / I_{\min}) / \lg(M \cdot \delta_{\max}). \quad (8)$$

При этом для нахождения границ каждого из поддиапазонов можно воспользоваться либо рекурсивным выражением (2), либо выражением

$$I_i = I_o \cdot K^i. \quad (9)$$

Для нахождения необходимого для расчета границ коэффициента перекрытия  $K$  удобнее воспользоваться не непосредственно выражением (1), а выражением

$$K = \delta_{\max} \cdot M. \quad (10)$$

Данное выражение можно легко получить, если подставить (7) в (5), выделить из полученного результата выражение для  $I_i / I_{i-1}$  которое, в свою очередь, подставить в (2) и разрешить его относительно  $K$ .

Поскольку, по смыслу количество поддиапазонов  $n$  должно быть всегда целым, а не дробным числом, перепишем (8) в виде

$$n = \text{Int} \left\lfloor \frac{\lg(I_{\max} / I_{\min})}{\lg(M \cdot \delta_{\max})} \right\rfloor. \quad (11)$$

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЁТА ПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ**

Очевидно, в общем случае  $n \geq n_o$ , поскольку  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  выбираются произвольно. Тогда в (4) точные равенства заменятся на неравенства, и фактический полный диапазон контролируемых токов будет превышать требуемое значение.

Следовательно, в общем случае либо верхняя фактическая граница диапазона может превысить требуемое значение  $I_{\max}$ , (вариант расчета 1), либо нижняя граница может оказаться меньше  $I_{\min}$  (вариант расчета 2):

$$1. I_o = I_{\min}, \quad I_n \geq I_{\max}. \quad (12)$$

$$2. I_o \leq I_{\min}, \quad I_n = I_{\max}. \quad (13)$$

Однако, если условие (5) заменить неравенством

$$3. \delta_{\max} \leq \Delta I_i / I_{i-1}, \quad (14)$$

или

$$\delta_{\max} \geq \Delta I_i / I_{i-1} \quad \text{при } i = 1 \quad (15)$$

то для выбора границ можно рассмотреть еще два варианта расчета 3 и 4, имеющих практический интерес:

$$3. I_o = I_{\max}, \quad I_o = I_{\min}, \quad \delta_{\text{факт}} \leq \delta_{\max}. \quad (14)$$

$$4. I_o = I_{\max}, \quad n_{\text{факт}} = n - 1. \quad (15)$$

Для первого варианта сначала из (11) находят  $n$ , затем из (10) –  $K$ , а затем, начиная с  $I_o = I_{\min}$ , находят с помощью (2) все промежуточные границы поддиапазонов.

Во втором варианте процедура расчета схожа, но после нахождения  $K$  принимают  $I_n = I_{\max}$ , и расчет границ поддиапазонов ведут «сверху вниз», с использованием рекурсивной формулы

$$I_{i-1} = I_i / K, \quad (16)$$

непосредственно следующей из (2).

В третьем варианте расчета границы диапазона сохраняют свое первоначально заданное значение, но снижается погрешность измерения внутри каждого из поддиапазонов, принимая максимальное значение на нижней границе каждого из них значение  $\delta_{\text{факт}} \leq \delta_{\max}$ , одинаковое для всех поддиапазонов. Для реализации данного варианта достаточно для расчета  $K$  использовать не выражение (10), а непосредственно (1), в котором величины  $I_o$  и  $I_n$  предварительно заменить на требуемые границы  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$ :

$$K = \sqrt[n]{I_{\max} / I_{\min}}. \quad (17)$$

При этом, в соответствии с (5), (7) максимальная фактическая относительная погрешность измерения контролируемого тока будет равна:

$$\delta_{\text{факт}} = K / M. \quad (18)$$

В четвертом варианте количество поддиапазонов берется на единицу меньше, чем находится из (11),  $K$  определяется из (10), и расчет границ начинает вестись, начиная с верхней границы  $I_n$ , как и для второго варианта.

Очевидно, что в данном случае для самого первого диапазона условие  $\delta_{\text{факт}} \leq \delta_{\max}$  может не соблюдаться, причем тем больше, чем больше меньше будет разность между  $n$  и  $n_o$ , вычисленным по (8) и (11). В большинстве случаев, когда разность  $(n - n_o)$  близка к единице, несоблюдение исходных требований по  $\delta_{\max}$  для малых значений контролируемых величин (когда выбран первый поддиапазон) может оказаться вполне приемлемым. Однако, если  $(n - n_o)$  близко к нулю, возрастание погрешности на малых мощностях может оказаться недопустимо большим. Поэтому в дальнейшем этот вариант расчета границ рассматриваться не будет.

Для пояснения полученных соотношений и выбора наиболее приемлемого для практического применения варианта расчета целесообразно выполнить процесс нахождения количества поддиапазонов и их границ по первым трем вариантам на конкретном примере. Пусть нужно осуществлять оперативный контроль с погрешностью определения расхода электроэнергии не более 0,5 % при максимальном токе  $I_{\max}$  до 50 А, что соответствует потребляемой мощности до 11 кВт. Зададимся при этом, что с такой же точностью желательно контролировать энергопотребление и при малых мощностях нагрузки, равных, например, 10 Вт, чему соответствует ток нагрузки, равный 0,0455А.

Предположим также, что оперативный контроль будет осуществляться встроенным в контроллер АЦП. Число разрядов такого АЦП положим равным 10, на сегодняшний день характерно для большинства дешевых контроллеров широкого применения. Тогда, в соответствии с (11), количество поддиапазонов будет равно

$$n = \text{Int}\{\lg(50/0,0455)\} / 1\text{d}(1024 \cdot 0,005) = 5.$$

При этом из (10) находим, что коэффициент перекрытия составит  $K = (1024 \cdot 0,005) = 5,12$ , а границы поддиапазонов, если поло-

жить  $I_0 = I_{\min}$  (вариант расчета 1), будут, в соответствии с (2) равны:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{\min} \cdot K = 0,23 \cdot 5,12 = 1,192 \text{ A} \quad (P = 50,6 \text{ Bm}); \\ I_2 &= I_1 \cdot K = 0,23 \cdot 5,12 = 1,192 \text{ A} \quad (P = 262,24 \text{ Bm}); \\ I_3 &= I_2 \cdot K = 1,192 \cdot 5,12 = 6,107 \text{ A} \quad (P = 1,3 \text{ к Bm}); \\ I_4 &= I_3 \cdot K = 6,107 \cdot 5,12 = 31,267 \text{ A} \quad (P = 6,9 \text{ к Bm}); \\ I_5 &= I_4 \cdot K = 31,267 \cdot 5,12 = 160,089 \text{ A} \quad (P = 35 \text{ к Bm}). \end{aligned}$$

Из данного примера видно, что максимальный ток пятого поддиапазона существенно превышает требуемое максимальное значение для контролируемого тока, то есть данный поддиапазон будет использоваться неэффективно.

Можно потребовать, чтобы, наоборот, максимальный ток пятого поддиапазона был равен заданному максимальному значению контролируемого тока. Тогда, если для нахождения границ воспользоваться выражением (18) и вариантом расчета 2, то их значения будут равны:

$$\begin{aligned} I_4 &= I_5 / K = 50 / 5,12 = 9,765 \text{ A} \quad (P = 2,15 \text{ к Bm}); \\ I_3 &= I_4 / K = 9,765 / 5,12 = 1,9 \text{ A} \quad (P = 0,42 \text{ к Bm}); \\ I_2 &= I_3 / K = 1,9 / 5,12 = 0,37 \text{ A} \quad (P = 81,4 \text{ м Bm}); \\ I_1 &= I_2 / K = 0,37 / 5,12 = 0,073 \text{ A} \quad (P = 16,06 \text{ м Bm}); \\ I_0 &= I_1 / K = 0,073 / 5,12 = 0,0142 \text{ A} \quad (P = 3,12 \text{ м Bm}). \end{aligned}$$

Как и предполагалось, при таком варианте диапазон расширился в сторону снижения нижней границы. Только теперь, в отличие от варианта расчета 1, такие мощности теоретически наблюдаться могут, но вот контролировать их со столькой высокой точностью совершенно нецелесообразно даже бытовым потребителям.

Чтобы сохранить значения крайних поддиапазонов, воспользуемся третьим вариантом расчета, когда границы полного диапазона сохраняются прежними за счет повышения сим точности измерения внутри каждого из поддиапазонов. Для данного варианта в соответствии с (1) получим, что  $K = 4,0568$ , и границы поддиапазонов будут равны:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{\min} \cdot K = 0,0455 \cdot 4,0568 = 0,185 \text{ A} \quad (P = 40,7 \text{ Bm}); \\ I_2 &= I_1 \cdot K = 0,185 \cdot 4,0568 = 0,749 \text{ A} \quad (P = 164,8 \text{ Bm}); \\ I_3 &= I_2 \cdot K = 0,749 \cdot 4,0568 = 3,038 \text{ A} \quad (P = 668,36 \text{ Bm}); \\ I_4 &= I_3 \cdot K = 3,038 \cdot 4,0568 = 12,324 \text{ A} \quad (P = 2,7 \text{ к Bm}); \\ I_5 &= I_4 \cdot K = 12,324 \cdot 4,0568 = 49,995 \text{ A} \quad (P = 11 \text{ к Bm}). \end{aligned}$$

При этом, в соответствии с (5), фактическая максимальная относительная погрешность измерения  $\delta_{\text{факт}}$  окажется равной 0,4 %.

Отсюда следует, что именно последний вариант наиболее целесообразно применять при проектировании приборов контроля, реализующих предложенную методику выбора границ поддиапазонов, поскольку в данном случае улучшение технических характеристик

устройства достигается не за счет необоснованного расширения границ области контролируемых значений мощности, а путем незначительного повышения точности контроля в заданном диапазоне, что более актуально.

Важно отметить, что, если бы эту задачу решать традиционным путем, то для этого потребовалось бы применение АЦП с числом разрядов, определяемым формулой:

$$m = \log_2 (I_{\max} / \Delta I_{\min}) = \log_2 (I_{\max} / I_{\min} \cdot \delta_{\text{факт}}).$$

Нетрудно убедиться, что для рассматриваемого примера число таких разрядов АЦП оказалось бы равным не менее 19. Такого числа разрядов микроконтроллеры широкого применения пока не имеют. Поэтому для реализации прибора контроля с традиционной архитектурой потребовалось бы применение либо специализированного микропроцессора, либо микропроцессора широкого применения, дополненного отдельным достаточно дорогим сигма дельта – АЦП и многоканальным прецизионным и также не дешевым аналоговым ключом. Однако, учитывая, что подобные АЦП имеют относительно низкое быстродействие, их применение повлекло бы за собой ограничение функциональности прибора контроля. В частности, такой прибор не смог бы (без применения дополнительных специальных схемотехнических решений) регистрировать кратковременные пиковые выбросы контролируемой мощности, обусловленные, например, искрением токоведущих жил, что для систем оперативного контроля может иметь важное значение.

## ВЫВОДЫ

При применении предложенного метода контроля электроэнергии обеспечивается существенное расширение динамического диапазона контролируемых мощностей без ограничения функциональных возможностей прибора контроля и без потери относительной погрешности измерения контролируемых электрических величин при использовании средств микропроцессорной техники широкого применения, имеющих наименьшую стоимость из всех возможных вариантов реализации устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кислюков В.А. Способ измерения энергетических параметров цепи синусоидального тока // Материалы 2-й международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул, 2001. – С.74-78.
2. ГОСТ 6570-96. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Общие технические условия.