

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

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

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
г. Барнаул

Экономические и экологические требования, предъявляемые к предприятиям и организациям, всё более заставляют применять системы оперативного контроля энергоресурсов. Одним из таких энергоресурсов является электроэнергия.

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.

Одним из известных технических решений, предназначенных для работы в среде АСОКУЭ, является нахождения расхода электрической энергии через экстремальные значения полной мгновенной мощности, когда скорость изменения последней минимальна, и, следовательно, минимальна погрешность определения фиксируемых значений [1]. 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:

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

где U, I – амплитудные значения напряжения и тока; φ – фазовый сдвиг между напряжением и током; ω – 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 чередуются через π радиан и определяются выражением

$$\omega t = (\pi \cdot n + \varphi) \cdot 0.5, \text{ где } i=0, 1, 2, \dots, \infty$$

Вычислив два соседних экстремума мгновенной мощности, получим, что

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

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

где t_1 и 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 выполняется 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.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

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 перемножении тока на напряжение и суммировании полученных результатов. Обычно, при применении такого метода в системах оперативного контроля, требуемая точность в широком динамическом диапазоне достигается за счет высокоразрядного АЦП. Это, в свою очередь, приводит к недостаточно быстрой реакции на пиковое изменение уровня входного сигнала, также к значительному удорожанию таких систем. 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 1 – 2.5. Порог чувствительности по току для таких счетчиков и указанных классов в соответствии с ГОСТ 6570-96 составляет соответственно 1 – 2.5% от номинального тока. Для достижения такой точности при мощностях нагрузки, близких к максимальному значению, достаточно применять 7-8 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. 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 границе поддиапазона. Из этого следует, что нужно выработать метод вычисления требуемого количества поддиапазонов для заданного динамического диапазона и максимально допустимой относительной погрешности измерения при заданной разрядности АЦП.

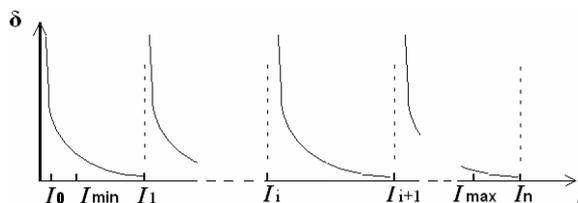


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности тока нескольких поддиапазонов

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

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 δ_{max} . Очевидно, что для всех поддиапазонов относительные погрешности на их границах должны быть одинаковы. При этом относительная погрешность δ 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 $K = I_{ni+1} / I_{ni} = \text{const}$, где K – коэффициент перекрытия поддиапазонов. Тогда, если весь диапазон измерения разбить на n поддиапазонов, то

$$K = \sqrt[n]{I_n / I_0}, \quad (1)$$

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

$$I_n = I_0 * K^n, \quad (3)$$

где I_0 – нижняя граница первого поддиапазона. Очевидно, что при этом должны соблюдаться условия:

$$I_0 \leq I_{min}, \quad I_n \geq I_{max}. \quad (4)$$

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 ΔI_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 m 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 $I_0 = I_{\min}$ и $I_0 = I_{\max}$, из (3) следует, что

$$n_0 = \lg(I_{\max}/I_{\min}) / \lg(M * \delta_{\max}) \quad (8)$$

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

$$I_i = I_0 * K^i, \quad (9)$$

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

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

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

$$n = \text{Int}\{\lg(I_{\max}/I_{\min}) / \lg(M * \delta_{\max})\} \quad (11)$$

Очевидно, в общем случае $n \geq n_0$, 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} , либо нижняя граница может оказаться меньше I_{\min} :

В данной работе границы диапазона сохраняют свое первоначально заданное значение, за счёт того, что снижается погрешность измерения внутри каждого из поддиапазонов, принимая на нижней границе каждого из них максимальное 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_0 и I_n предварительно заменить на требуемые границы I_{\max} и I_{\min} :

$$K = \sqrt[n]{I_{\max} / I_{\min}}, \quad (12)$$

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

$$\delta_{\text{факт}} = K / M. \quad (13)$$

Для пояснения полученных соотношений целесообразно выполнить процесс нахождения количества поддиапазонов 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 11кВт. 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.

Большинство дешёвых микроконтроллеров широкого применения, содержащих встроенное в контроллер АЦП, имеет разрядность АЦП равную 10, поэтому предположим, что оперативный контроль будет осуществляться именно таким микроконтроллером. Тогда, в соответствии с (11), количество поддиапазонов будет равно

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

Из (10) находим, что коэффициент перекрытия составит $K = (1024 * 0,005) = 5,12$.

Подставляя K в (3) и полагая, что $I_0 = I_{\min}$ находим верхнюю границу верхнего поддиапазона $I_5 = 160,089\text{А}$. При таком значении коэффициента перекрытия граница верхнего поддиапазона существенно превышает требуемое максимальное значение для контролируемого тока, то есть данный поддиапазон будет использоваться неэффективно. Можно полагать, чтобы, наоборот, максимальный ток пятого поддиапазона был равен заданному максимальному значению контролируемого тока $I_n = I_{\max}$. Тогда для нахождения нижней границы первого поддиапазона перепишем (3) в виде

$$I_0 = I_n / K^n \quad (14)$$

Как и предполагалось, при таком варианте диапазон расширился в сторону снижения нижней границы $I_0 = 0,0142\text{А}$. Такие мощ-

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ности контролировать со столько высокой точностью совершенно нецелесообразно даже бытовым потребителям. Данный поддиапазон также как и в первом случае будет использоваться неэффективно.

Чтобы сохранить значения крайних поддиапазонов, воспользуемся выражение (1). Тогда получим, что $K=4,0568$, и границы поддиапазонов будут равны. При этом, в соответствии с (5), фактическая максимальная относительная погрешность измерения $\delta_{\text{факт}}$ окажется равной 0,4%. В этом случае границы полного диапазона сохраняются прежними за счет повышения точности измерения внутри каждого из поддиапазонов.

Из всего выше сказанного следует, что при проектировании систем оперативного контроля электроэнергии целесообразно применять метод выбора границ поддиапазонов не за счёт неэффективного расширения границ области контролируемых значений мощности, а путем незначительного повышения точности контроля в заданном диапазоне, что более актуально. И если бы данную задачу пришлось решать традиционным пу-

тём, то исходя из формулы определения числа разрядов АЦП

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

Число таких разрядов равнялось бы не менее 19. Поэтому для реализации систем оперативного контроля потребовалось бы применение специализированных микропроцессоров или АЦП, что повлекло бы за собой удорожание таких систем.

Выводы

При применении предложенного метода контроля электроэнергии обеспечивается существенное расширение динамического диапазона контролируемых мощностей без потери относительной погрешности измерения контролируемых электрических величин при использовании микропроцессоров широкого применения и относительно малой стоимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислюков В.А. Материалы 2-й международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация (ИКИ-2001)». - Барнаул 2001 г., с.74.