

## **Влияние несинусоидальности напряжения и тока на работу электронных счетчиков электроэнергии**

**Киселев В.В.**, начальник отдела ВНИИМС, к.т.н.

**Пономаренко И.С.**, заведующий лабораторией МЭИ (ТУ), к.т.н., доц.

Широко применяемые в настоящее время счетчики электроэнергии разработаны и испытаны с определением их метрологических характеристик, исходя из начальной предпосылки, что напряжение в сети синусоидальное (или очень близкое к нему). На этой основе определены их алгоритмы работы и конструктивное исполнение. Однако, в реальных электрических сетях качество электрической энергии, в том числе несинусоидальность напряжения (и тока), во многих случаях в значительной мере не соответствует требованиям ГОСТ 13109-97. В качестве примера, на рис. 1 и 2 приведены осциллограмма кривой напряжения и ее спектральный состав на шинах 35 кВ тяговой подстанции в одном из крупных городов России, от которой, помимо электрифицированного транспорта, питаются также другие потребители.

Совершенно очевидно, что показания счетчиков электроэнергии при наличии значительных высших гармонических составляющих в напряжениях и токах измеряемой сети будут отличаться от показаний этих же счетчиков в случаях, когда в сети нет искажений и «присутствует» только одна «чистая» первая (основная) гармоника 50 Гц. Разность между показаниями счетчика для случаев, когда в напряжениях и токах измеряемой сети нет высших гармоник, и когда они появляются, строго говоря, нельзя назвать погрешностью счетчика. Мы здесь не будем останавливаться подробно на этом методологическом аспекте. Важно то, что потребитель предполагает, что он оплачивает полезную активную и

---

\*) Авторы выражают признательность В.С.Штиллерману за ценные замечания, высказанные им при подготовке данной публикации.

реактивную энергию по первой гармонике, и ожидает, что именно эти показания и выдает ему счетчик. Вместо этого счетчик учитывает и высшие гармонические составляющие напряжения и тока в сети, которые, как правило, являются вредными для потребителя и системы электроснабжения, и выдает показания о значении потребленной (отпущенной) электроэнергии с учётом этих высших гармоник. Поэтому назовем условно эту разность между показаниями счетчика при «чистой» сети и при наличии в сети высших гармоник напряжения и тока **коммерческой погрешностью счетчика (КПС).**

Значение этой КПС зависит от конструкции счетчика, алгоритмов его работы, характеристик несинусоидальности электрической энергии в сети. В настоящее время все большее распространение получают электронные счетчики электроэнергии, и эта тенденция, судя по всему, будет только усиливаться. Поэтому, данная работа направлена на исследование электронных счетчиков электроэнергии, а именно – на определение влияния характеристик несинусоидальности электрической энергии в сети на показания этих электронных счетчиков, а также на значение КПС.

Экспериментально исследовались следующие типы электронных счетчиков:

а) трехфазные:

- АВВ Альфа А1Т-3-00С1-Т («АВВ Метроника», г. Москва);
- АВВ Евро Альфа ЕА 05 RАТ-Р3-3 («АВВ Метроника», г. Москва);
- ЦЭ-6805-В («Энергомера», г. Невинномысск);
- СЭТ3а-01-01 (Рязанский приборный завод, г. Рязань);
- СТЭ-560 («МЗЭП», г. Москва).

б) однофазные:

- «Меркурий-20002 («ООО «ИНКОТЕКС», г. Москва);
- СЭБ-2А.00.2 (з-д им. Фрунзе, г. Нижний Новгород);
- СЭБ-2А.05.2 (з-д им. Фрунзе, г. Нижний Новгород);

Среди трехфазных счетчиков имеются двух- и трехэлементные, измеряющие энергию (мощность) только активную, активную и реактивную одновременно, и другие.

Однофазные счетчики измеряют только активную энергию (мощность).

В качестве эталонного средства измерений при испытаниях применялся калибратор (генератор эталонных сигналов) «ЭРИС-КЛ.01», имеющий сертификат Госстандарта России об утверждении типа и внесенный в Госреестр средств измерений РФ. Калибратор «ЭРИС-КЛ.01» может воспроизводить с нормированной погрешностью однофазные и трёхфазные сигналы напряжения и тока с любым необходимым набором (составом) высших гармонических составляющих и других характеристик. Исследуемые счетчики электроэнергии подключались к калибратору, а их показания при различном составе гармонических составляющих сигналов напряжения и тока, соответствующем реальной электромагнитной обстановке в сетях энергоснабжения, регистрировались (снимались) с использованием телеметрических выходов этих счетчиков.

Наиболее простой частью исследования оказалось определение зависимости между показаниями счетчиков активной электроэнергии и характеристиками несинусоидальности (высших гармоник) электроэнергии в сети.

Прежде всего, следует отметить, что исследовались стационарные, т.е. неизменные во времени процессы. Поэтому, для определения показаний счетчиков достаточно было определить значение измеряемой ими активной электрической мощности  $P$ , которая для стационарных процессов однозначно определяет потребленную (отпущенную) активную электроэнергию  $W_P$  за любой интервал времени.

Как известно из курса ТОЭ, значение активной мощности  $P$  определяется в следующем виде:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1)$$

Удалено: 1

где  $u(t), i(t)$  – мгновенные значения напряжения и тока.

При наличии высших гармонических составляющих в сети, когда токи и напряжения представлены в виде ряда Фурье, это выражение, после соответствующих математических преобразований, приобретает известный вид:

$$P = \sum_{j=0}^n P_j = \sum_{j=0}^n U_j I_j \cos \varphi_j, \quad (2)$$

где  $P$  – активная мощность;

$P_j$  – активная мощность каждой  $j$ -ой гармонической составляющей ( $j$  – от 0 до  $n$ );

$U_j, I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -ой гармонической составляющей;

$\varphi_j$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой  $j$ -ой гармонической составляющей.

Применительно к анализируемым сетям это выражение можно представить в следующем виде:

$$P = P_1 + \Delta P_j = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{j=2}^{40} U_j I_j \cos \varphi_j, \quad (3)$$

где  $P$  – активная мощность;

$P_1$  – первая составляющая, определяет активную мощность (энергию) по основной частоте (первой гармонике);

$\Delta P_j$  – вторая составляющая, определяет активную мощность (энергию) по всем высшим гармоникам;

$U_1$  и  $I_1$  – действующие значения напряжения и тока основной частоты;

$U_j$  и  $I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -ой ( $j$  – от 2 до 40) высшей гармонической составляющей;

$\varphi_1$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_1$  и током  $I_1$  основной частоты;

$\varphi_j$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой  $j$ -ой ( $j$  – от 2 до 40) высшей гармонической составляющей.

Как показали исследования, электронные счетчики совершенно адекватно отрабатывают данную модель. В качестве примера можно рассмотреть результаты исследования одного из трехфазных счетчиков, приведенные в таблице 1. Были рассмотрены предельные случаи, когда напряжения и токи высших гармоник совпадали по фазе (чисто активная нагрузка и источник искажений находится во внешней сети), либо, когда напряжения и токи гармоник были в противофазе (чисто активная нагрузка, источником искажения является сам потребитель). В двух предпоследних столбцах таблицы приведены расчетные значения, которые должен был теоретически показывать счетчик в каждом эксперименте и реальные значения, которые показал счетчик в соответствующем режиме, смоделированном с помощью калибратора. В последнем столбце приведена КПС в каждом исследовавшемся режиме по отношению к режиму, когда все высшие гармоники отсутствуют (первая строка таблицы).

Как видно по этим результатам, показания счетчиков определяются алгебраической суммой активной мощности по первой гармонике и всех активных мощностей высших гармоник с учетом их знака. Отсюда следует интересный вывод. Потребитель, который получает некачественную электроэнергию из сети, платит за нее больше, а потребитель, который сам вносит искажения в сеть, платит за эту некачественную электроэнергию

меньше по сравнению с потребленной электроэнергией без искажений. Эта разница в оплате, как видно из таблицы 1, может быть весьма существенна. На практике, в любом конкретном случае, указанная разница в оплате может быть точно и однозначно определена путем проведения соответствующих измерений показателей качества электроэнергии в месте подключения счетчика, например, с использованием прибора «ЭРИС-КЭ».

Практически все исследованные счетчики, в том числе и бытовые, соответствуют данной модели во всем диапазоне учитываемых гармоник от 1-ой (основной) до 40-ой. Исключение составил только один из трехфазных счетчиков активной энергии, который при наличии гармоник, начиная с 17-ой и выше, и при значениях этих гармоник 5-7 % и более, полностью выходил из строя, начинал давать показания, в несколько раз отличающиеся от действительных значений измеряемой мощности (энергии). Вероятно, это связано с конструктивными особенностями входных цепей этого счетчика.

Более сложным оказался вопрос о влиянии характеристик несинусоидальности электрической энергии на показания счетчиков реактивной энергии  $W_Q$ .

Как правило, все счетчики реактивной энергии  $W_Q$ , в настоящее время реализуют следующий алгоритм измерения реактивной мощности  $Q$  :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (4)$$

Удалено: ¶

где  $S$  – полная мощность;

$P$  – активная мощность.

Такой алгоритм вполне приемлем для «чистой» сети при отсутствии в электроэнергии высших гармоник напряжения и тока. Однако при наличии высших гармоник в измеряемых сигналах напряжения и тока ситуация резко меняется.

Рассмотрим вначале вопрос теоретически – что должен показывать счетчик реактивной электроэнергии, реализующий указанный алгоритм (4), при наличии в электроэнергии сети высших гармонических составляющих напряжения и тока?

Полная мощность  $S$  определяется как произведение действующих значений напряжения  $U$  и тока  $I$ :

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 \cdot \sum_{j=1}^n I_j^2}, \quad (5)$$

где  $U_j$  и  $I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -ой ( $j$  – от 1 до  $n$ ) гармонической составляющей:

Указанные действующие значения напряжения  $U$  и тока  $I$ , в свою очередь, определяются через действующие значения напряжений  $U_j$  и токов  $I_j$  всех учитываемых  $j$ -ых гармоник:

$$U = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2}, \quad (6)$$

$$I = \sqrt{\sum_{j=1}^n I_j^2}. \quad (7)$$

Тогда, подставляя (5) и (2) в (4), получим выражение для реактивной мощности  $Q$ :

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 \cdot \sum_{j=1}^n I_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n U_j I_j \cos \varphi_j\right)^2}. \quad (8)$$

где  $\varphi_j$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой  $j$ -ой ( $j$  – от 1 до  $n$ ) гармонической составляющей.

После проведения соответствующих математических преобразований получим окончательное искомое выражение зависимости показаний счетчика

реактивной электроэнергии от характеристик высших гармоник напряжения и тока сети:

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 I_j^2 \sin \varphi_j + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n [(U_k I_l)^2 - 2(U_k I_l U_l I_k) \cos \varphi_k \cos \varphi_l + (U_l I_k)^2]}. \quad (9)$$

где  $Q$  – реактивная мощность;

$U_j$  и  $I_j$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $j$ -ой гармонической составляющей ( $j$  – от 1 до  $n$ );

$U_k$  и  $I_k$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $k$ -ой гармонической составляющей ( $k$  – от 1 до  $n-1$ );

$U_l$  и  $I_l$  – действующие значения напряжения и тока каждой  $l$ -ой высшей гармонической составляющих ( $l$  – от  $k+1$  до  $n$ );

$\varphi_j$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_j$  и током  $I_j$  каждой  $j$ -ой гармонической составляющей ( $j$  – от 1 до  $n$ );

$\varphi_k$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_k$  и током  $I_k$  каждой  $k$ -ой гармонической составляющей ( $k$  – от 1 до  $n-1$ );

$\varphi_l$  – угол фазового сдвига между напряжением  $U_l$  и током  $I_l$  каждой  $l$ -ой высшей гармонической составляющей ( $l$  – от  $k+1$  до  $n$ ).

При чисто активной нагрузке по всем гармоникам, когда выполняется равенство  $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \dots = \cos \varphi_n = 1$ , получаем:

$$Q = \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n (U_k I_l - U_l I_k)^2}. \quad (10)$$

Таким образом, даже в случае, когда ни на одной гармонике нет потребления реактивной мощности, счетчик все равно покажет некоторое значение потребляемой реактивной мощности в соответствии с (10).



При потреблении только реактивной мощности по всем гармоникам, когда выполняется равенство  $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = \dots = \cos \varphi_n = 0$ , получаем:

$$Q = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_j^2 I_j^2 + \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n [(U_k I_l)^2 + (U_l I_k)^2]}. \quad (11)$$

Это подтверждает, что суммарная реактивная мощность (энергия) в сети больше, чем просто сумма всех реактивных мощностей по всем гармоникам.

Проведенные эксперименты со всеми счетчиками полностью подтвердили правильность полученных теоретически зависимостей. Для каждого счетчика первоначально по (9) рассчитывались ожидаемые показания в соответствии с программой испытаний, а затем эти же результаты определялись экспериментально на счетчиках. Во всех случаях результаты практически совпали. Примеры полученных зависимостей приведены на рисунках 3, 4 и 5.

На рисунке 3 графики соответствуют различным уровням потребления реактивной мощности на основной гармонике. Напряжения и токи 1-й и 5-й гармоник для всех зависимостей неизменны, меняются только углы между ними.

Из полученных результатов видно, что чем больше реактивная мощность по основной гармонике, тем КПС счетчика меньше, и наоборот. Наибольшая погрешность возникает при полном отсутствии потребления реактивной мощности по 1-й гармонике. При этом следует иметь в виду, что для первых двух кривых КПС определялась по отношению к величине реактивной мощности по 1-й гармонике. Для кривой 3, когда реактивная мощность по основной гармонике вообще отсутствует, погрешность определялась относительно гипотетической максимальной величины реактивной мощности по основной гармонике, когда угол между напряжением и током первой

гармоники был бы равен  $90^0$  (чисто реактивная нагрузка). Аналогично и для остальных рисунков.

Второй важный вывод, следующий из приведенных зависимостей, это сильное влияние на КПС направления потока мощности искажения. При увеличении угла между током и напряжением высших гармоник, что соответствует переходу потребителя из режима потребления реактивной мощности высших гармоник в режим их генерации, КПС резко возрастает.

На рисунке 4 приведены зависимости КПС по реактивной мощности от амплитуды высшей гармоники (в данном случае 5-ой). Видно, что чем больше амплитуда и угол гармоники, тем больше оказывается КПС. Здесь следует обратить внимание на кривую 1 рисунка 4-а. Она соответствует нулевому значению тока 5-й гармоники, т.е. реактивная мощность по 5-й гармонике в данном случае вообще отсутствует. Вместе с тем, имеется постоянная КПС, величиной около 9%, которая, как и следовало ожидать, для этого режима не зависит от угла между напряжением и током 5-й гармоники. Это полностью соответствует полученной математической модели.

На рисунке 5 приведен анализ влияния на КПС по реактивной мощности одновременно двух гармоник, в зависимости от их фазовых углов. На рис. 5-а реактивная мощность по первой гармонике соответствует режиму работы счетчика при  $\cos\varphi_1=0,87$ , а на рис. 5-б реактивная мощность по первой гармонике отсутствует ( $Q_1=0$ ). При этом, в последнем случае, когда вообще нет потребления реактивной мощности по первой гармонике, счетчик может показывать реактивную мощность, близкую к значению реактивной мощности по первой гармонике при работе счетчика с  $\cos\varphi_1=0,87$  ( $\varphi_1=30^\circ$ ).

Как видно из приведенных зависимостей, для реактивной мощности (энергии) значение анализируемой погрешности может достигать весьма значительных уровней. Следует еще раз отметить, что на КПС влияют как величины гармоник, так и, в очень сильной мере, фазовые углы сдвига между

напряжениями и токами для каждой из этих гармоник. В отличие от активной мощности, здесь нет алгебраического сложения. Поэтому, при учете реактивной мощности для потребителя, получающего из сети некачественную электроэнергию, КПС будет значительно меньше, чем для потребителя, самого генерирующего высшие гармоники напряжения и тока в сеть. Таким образом, в случае учета реактивной мощности, потребитель, «портящий» качество электроэнергии в сети, как бы сам себя наказывает, производя большую оплату за реактивную электроэнергию.

### **Выводы.**

Удалено: 1

1. Сформированы математические модели, описывающие работу электронных счетчиков электроэнергии при наличии высших гармонических составляющих в сигналах напряжения и тока измеряемой сети.

2. Проведены натурные физические эксперименты, подтверждающие адекватность предложенных моделей.

3. Показано, что при наличии высших гармоник напряжения и тока значительного уровня в измеряемой сети, показания счетчиков могут существенно отличаться от действительных значений измеряемой энергии (мощности) основной частоты (гармоники) 50 Гц.

4. Разница между показаниями счетчика и действительным значением измеряемой энергии (мощности) существенно зависят от соотношения амплитуд и фаз всех гармоник, включая первую.

5. При значительных коэффициентах несинусоидальности в сети измерение активной и реактивной энергии (мощности) необходимо производить только по первой (основной) гармонике 50 Гц.

### **Таблица 1.**

**Результаты тестирования 3-х фазного электронного счетчика по влиянию 5 и 7 гармоник на величину измеренной активной электроэнергии (мощности)**

№ п/п	Гармоника 5			Гармоника 7			Р <sub>Σ</sub> расчетн (%)	Р <sub>Σ</sub> измерен (%)	ΔР <sub>Σ</sub> (%) КПС
	U <sub>5</sub> (%)	I <sub>5</sub> (%)	ΔP <sub>5</sub> (%)	U <sub>7</sub> (%)	I <sub>7</sub> (%)	ΔP <sub>7</sub> (%)			
1	-	-	-	-	-	-	100,0	100,0	0,0
2	10	10	1	-	-	-	101,0	100,8	0,8
3	20	20	4	-	-	-	104,0	103,8	3,8
4	20	40	8	-	-	-	108,0	107,7	7,7
5	30	40	12	-	-	-	112,0	111,2	11,2
6	10	10	1	10	10	1	102,0	101,8	1,8
7	10	10	1	20	20	4	105,0	104,8	4,8
8	20	20	4	20	20	4	108,0	107,6	7,6
9	10	-10	-1	-	-	-	99,0	98,9	- 1,1
10	20	-20	- 4	-	-	-	96,0	95,9	- 4,1
11	20	-40	- 8	-	-	-	92,0	91,8	- 8,2
12	30	-40	- 12	-	-	-	88,0	88,5	-11,5
13	10	-10	- 1	10	-10	- 1	98,0	97,9	- 2,1
14	10	-10	- 1	20	-20	- 4	95,0	94,9	- 5,1
15	20	-20	- 4	20	-20	- 4	92,0	91,8	- 8,2
16	10	-10	- 1	10	10	1	100,0	99,9	- 0,1
17	10	-10	- 1	20	20	4	103,0	102,9	2,9
18	20	-20	- 4	20	20	4	100,0	99,8	- 0,2

\*) все переменные приведены к аналогичным номинальным значениям по 1-й гармонике (U<sub>1</sub>, I<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>)

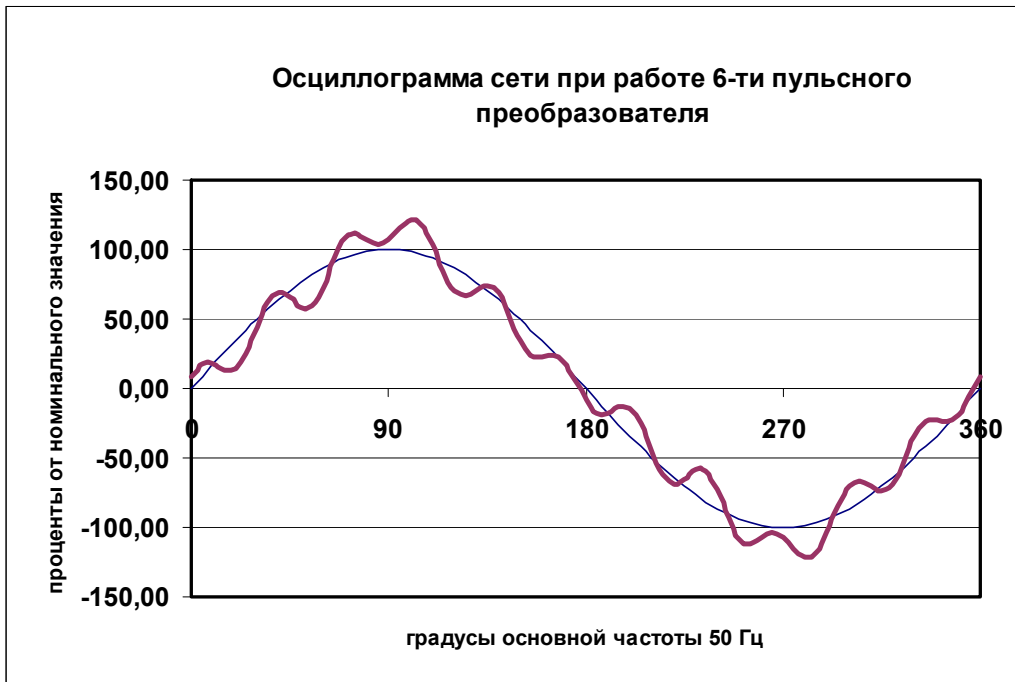


Рисунок 1.



Рисунок 2.

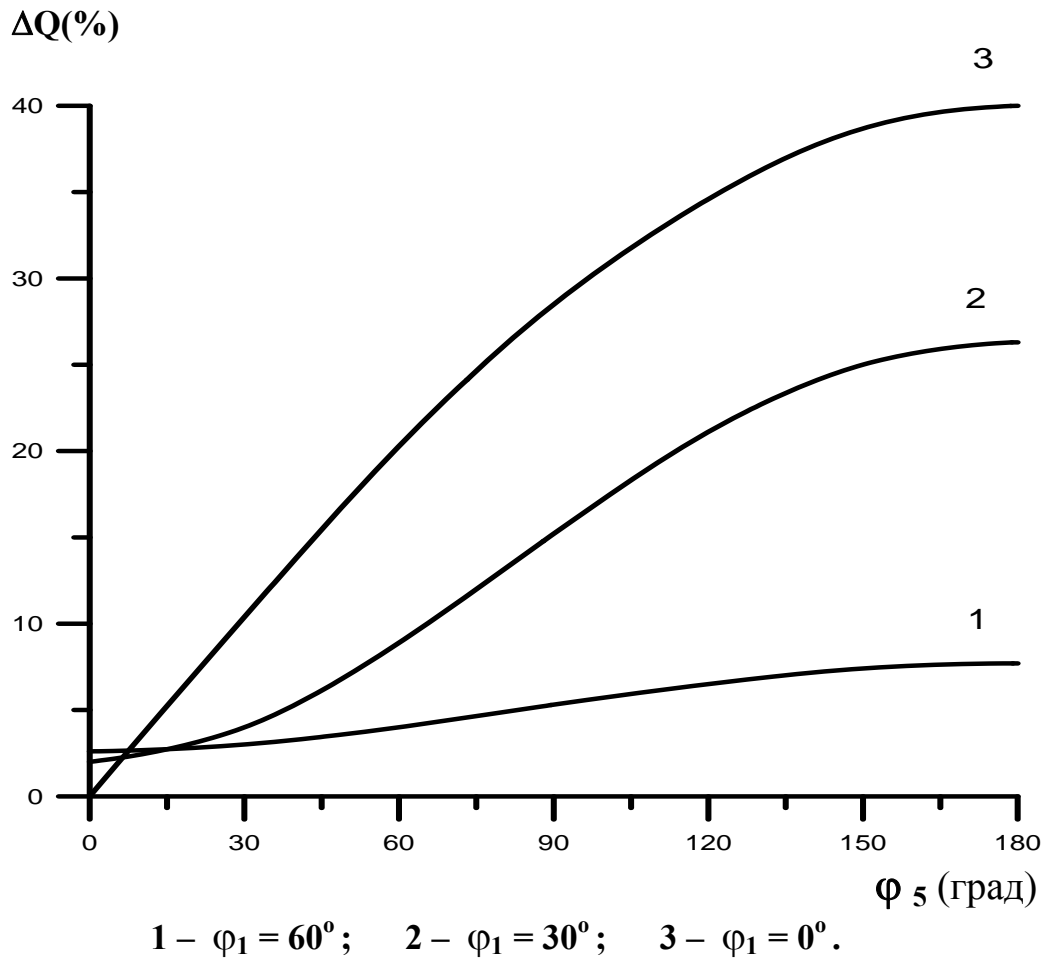
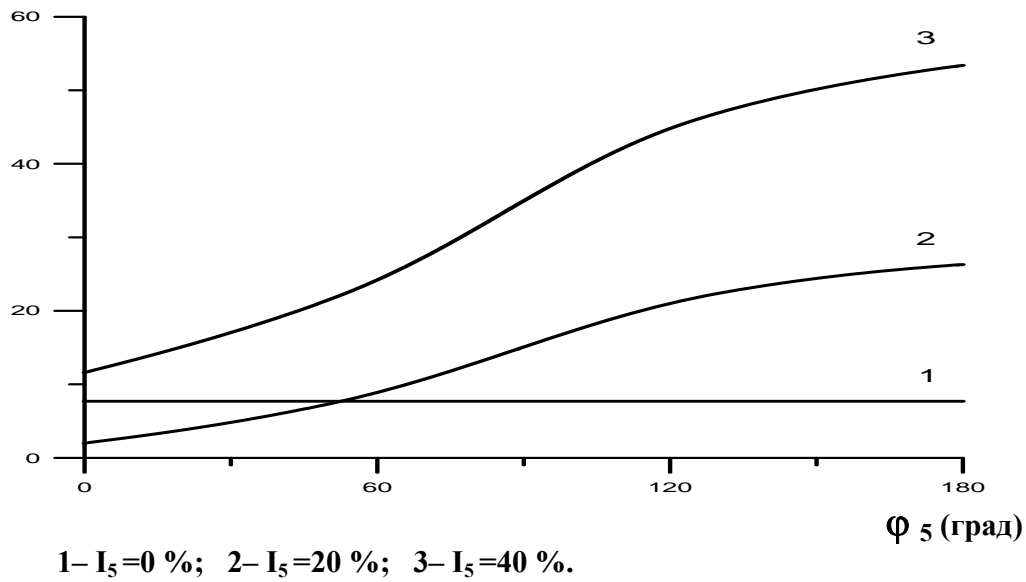


Рис. 3. Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии при наличии 5-й гармоники, в зависимости от ее фазы и загрузки реактивной мощностью по 1-й гармонике ( $U_5=0,2 U_{\text{ном}}$ ,  $I_5=0,2 I_{\text{ном}}$ )

$\Delta Q(\%)$



$\Delta Q(\%)$

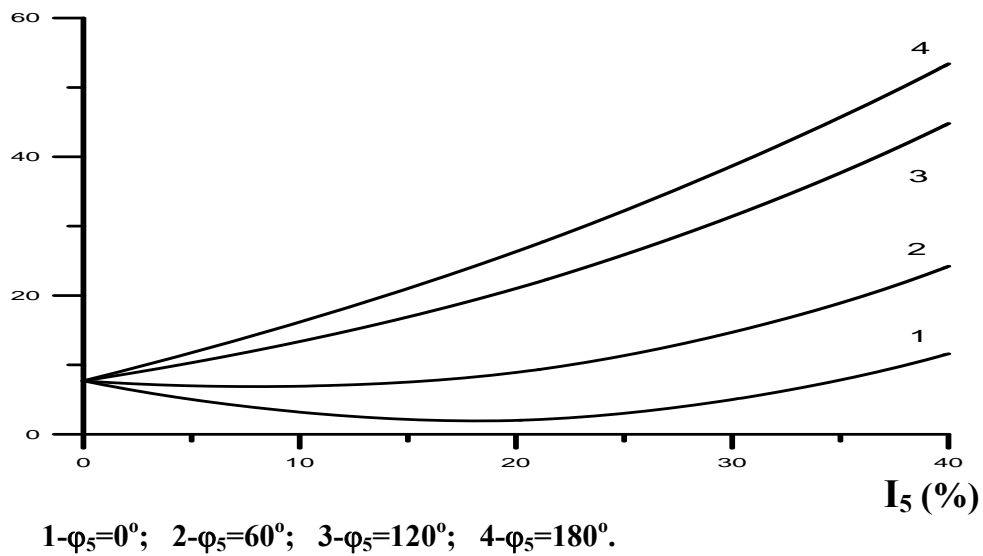


Рис. 4. Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии при  $\cos \varphi_1 = 0,87$  ( $\varphi_1 = 30^\circ$ ) в зависимости от амплитуды и фазы тока 5-й гармоники ( $U_5=0,2U_{ном}$ )

$\Delta Q(\%)$

$\cos \varphi_1 = 0,87$

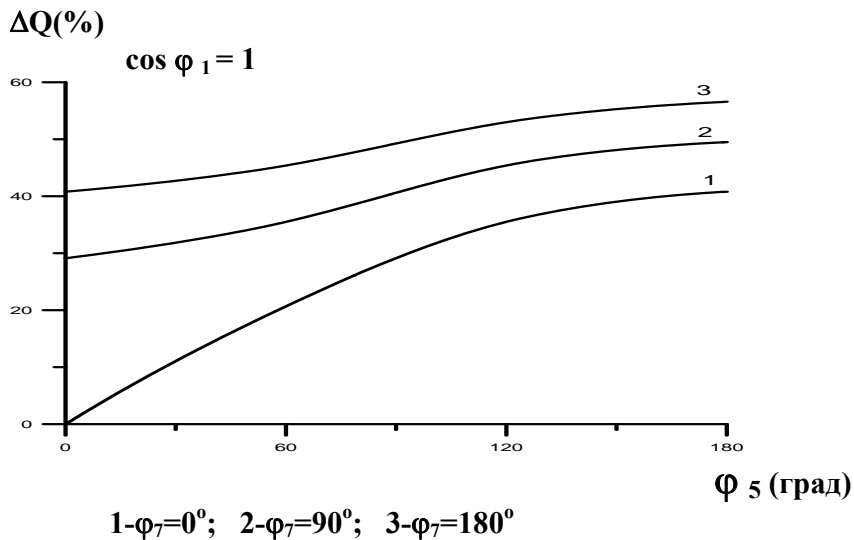
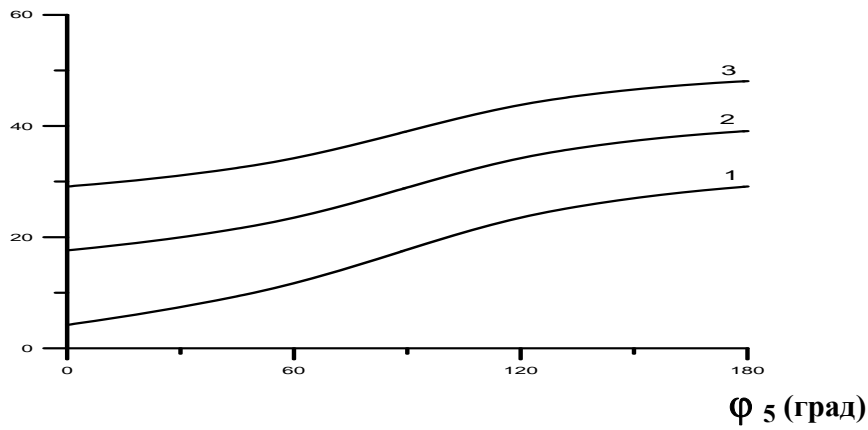


Рис. 5. Погрешности электронного счетчика реактивной электроэнергии в зависимости от амплитуд и фазовых углов 5-й и 7-й гармоник ( $U_5=U_7=0,2 U_{\text{ном}}$ ,  $I_5=I_7=0,2 I_{\text{ном}}$ ).

Для  $\cos \varphi_1 = 0,87$  – погрешности отнесены к текущей реактивной мощности по 1-й гармонике  $Q_T$  при  $U_1=U_{\text{ном}}$ ,  $I_1=I_{\text{ном}}$ ,  $\cos \varphi_1 = 0,87$ .

Для  $\cos \varphi_1 = 1$  – погрешности отнесены к максимальной реактивной мощности по 1-й гармонике  $Q_{\text{макс}}$  при  $U_1=U_{\text{ном}}$ ,  $I_1=I_{\text{ном}}$ ,  $\cos \varphi_1 = 0$  ( $Q_{\text{макс}} = 2 Q_T$ ).