

О необходимости замены трансформаторов тока для повышения точности учета электроэнергии

Раскулов Р.Ф., главный конструктор
отдела измерительных трансформаторов, к.т.н.,
ОАО "Свердловский завод трансформаторов тока".
620043, Россия, г. Екатеринбург,
ул. Черкасская, 25.
Телефон (343) 234-31-05, факс 212-52-55,
e-mail: design@cztt.ru

В настоящее время доля электроэнергии в себестоимости промышленной продукции неуклонно возрастает. Если в конце восьмидесятых годов доля электроэнергии в себестоимости промышленной продукции составляла несколько процентов, то в настоящее время доля электроэнергии в машиностроении превышает 20 %, а в энергоемких производствах достигает 60 % и выше.

Существующие системы учета электроэнергии не обеспечивают требуемой в условиях рыночных отношений точности учета, так как они создавались в основном десятки лет назад, когда электроэнергия не являлась товаром и на точность ее учета не обращалось должного внимания.

Большие погрешности измерений электроэнергии и мощности приводят к нерациональному использованию пропускной способности линий электропередач, резервов мощности на электростанциях, затрудняют контроль режимов работы сетей и приводят к финансовым потерям как производителей и поставщиков, так и потребителей электроэнергии. Недостаточная точность измерений обусловлена рядом недостатков существующих систем учета электроэнергии, поскольку измерительные комплексы (ИК) создавались ранее, а также создаются и в настоящее время по типовым проектам, разработанным еще в 70–80-х годах XX века, в которых не предусматривались решения для обеспечения высокой точности ИК.

В измерительные комплексы средств учета электрической энергии (ИК) входят трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН), счетчики электрической энергии и цепи связи между ними.

Погрешности существующих ИК нередко превышают 5 – 10 %, что совершенно недопустимо в современных рыночных условиях.

Причиной столь значительных погрешностей ИК является то, что условия работы ИТ, устанавливаемых на электрических станциях и в электрических сетях, характеризуются многочисленными факторами, влияющими на погрешности ИТ.

При выпуске ИТ из производства во время приемо-сдаточных испытаний, погрешности определяются в нормированных диапазонах первичных токов, напряжений, мощности вторичной нагрузки и $\cos\varphi$ вторичной нагрузки согласно стандартов на ТТ и ТН, однако в эксплуатации нередко ИТ работают в условиях, для которых погрешности не нормированы.

Основными факторами являются:

для ТТ – первичный ток, мощность вторичной нагрузки, $\cos\varphi$ вторичной нагрузки, токи короткого замыкания в первичных цепях.

для ТН – мощность нагрузки во вторичных цепях, $\cos\varphi$ нагрузки во вторичных цепях, первичное напряжение.

Общими факторами для ТТ и ТН являются: частота сети, температура окружающего воздуха, коэффициент гармоник сети, вибрационные нагрузки при работе ИТ, транспортная тряска при транспортировании ИТ и срок эксплуатации.

При измерениях, требующих совместного использования ТТ и ТН факторами, влияющими на погрешность ИК, являются коэффициент мощности и характер нагрузки контролируемого присоединения.

Из-за конструктивных особенностей ТТ зависимости погрешностей от первичного тока и мощности вторичной нагрузки носят нелинейный характер и имеют разброс даже для ТТ одного типоразмера.

Погрешности ТТ определяют по следующим выражениям

$$\delta i = -100 \cdot \frac{L_{CP} \cdot K_F}{K_i^{1-\gamma} \cdot W_1^{1+\gamma} \cdot I_{1H}^{1+\gamma}} \left(\frac{I_{2H}^2 \cdot Z_2}{4,44 \cdot f_H \cdot S_M} \right)^\gamma \cdot \sin(\psi + \alpha); \quad (1)$$

$$\theta i = 3440 \cdot \frac{L_{CP} \cdot K_F}{K_i^{1-\gamma} \cdot W_1^{1+\gamma} \cdot I_{1H}^{1+\gamma}} \left(\frac{I_{2H}^2 \cdot Z_2}{4,44 \cdot f_H \cdot S_M} \right)^\gamma \cdot \cos(\psi + \alpha), \quad (2)$$

где δi – токовая погрешность ТТ, %; θi – угловая погрешность ТТ, мин; K_i – кратность первичного тока I_1 по отношению к номинальному первичному току I_{1H} ; I_{2H} – номинальный вторичный ток; f_H – номинальная частота переменного тока; W_1 – количество первичных витков; L_{CP} – средняя длина магнитного пути в магнитопроводе; Z_2 – полное сопротивление вторичной цепи, определяют по формуле [1]

$$Z_2 = \sqrt{(R_2 + Z_H \cdot \cos \varphi)^2 + (X_2 + Z_H \cdot \sin \varphi)^2}, \quad (3)$$

где R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки; X_2 – реактивное сопротивление вторичной обмотки; R_{2H} – активное сопротивление вторичной нагрузки; X_{2H} – реактивное сопротивление вторичной нагрузки; φ – угол между вторичным током и вторичным напряжением, определяющий коэффициент мощности вторичной нагрузки ТТ ($\cos \varphi$); α – угол между вторичной ЭДС E_2 и вторичным током I_2 определяют по формуле [1]

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{X_2 + Z_H \cdot \sin \varphi}{R_2 + Z_H \cdot \cos \varphi}. \quad (4)$$

ψ – угол потерь, характеризующий соотношение активных и реактивных потерь в материале магнитопровода, определяют по формуле

$$\psi = K_\psi \cdot \left(\frac{K_i \cdot I_{2H}^2 \cdot Z_2}{4,44 \cdot f_H \cdot S_M \cdot I_{1H} \cdot W_1} \right)^\lambda + \psi_0, \quad (5)$$

где K_ψ , K_F , γ , λ и ψ_0 – коэффициенты, зависящие от индукции в магнитопроводе ТТ и от используемой марки стали, полученные экспериментально.

Из формул (1) и (2) видно, что погрешности ТТ зависят как от влияния внешних параметров сети, так и от конструктивных особенностей ТТ.

В аккредитованном Госстандартом России испытательном центре ОАО «СЗТТ» в течение ряда лет проводились экспериментальные исследования влияния внешних факторов на погрешности ИТ.

Результаты исследований приведены в работах [3-6].

По результатам аналитических исследований и экспериментов внешние факторы по степени влияния на погрешности ИТ можно разделить на три группы (таблица 1).

Первая группа охватывает факторы, оказывающие значительное влияние на точностные характеристики ТТ и ТН, то есть погрешности ИТ при воздействии этих влияющих факторов изменяются более чем на 80 % от допускаемой погрешности.

Таблица 1 – Классификация факторов, влияющих на метрологические характеристики измерительных ТТ и ТН

Номер группы	ТТ	ТН
Первая	Первичный ток, мощность вторичной нагрузки, $\cos\varphi$	Мощность нагрузки, $\cos\varphi$
Вторая	Температура окружающего воздуха, токи КЗ	Первичное напряжение, температура окружающего воздуха
Третья	Частота сети, воздействие вибрации и транспортирования, срок эксплуатации	

Ко второй группе относятся факторы, не оказывающие существенного влияния на точностные характеристики ТТ и ТН, то есть погрешности ИТ при воздействии этих факторов изменяются на 10–80 % от допускаемой погрешности.

К третьей группе относятся факторы, практически не оказывающие влияния на точностные характеристики ИТ. К ним относятся факторы, погрешности при воздействии которых изменяются менее, чем на 10 % от допускаемой погрешности.

Рассмотрим более подробно влияние двух факторов на метрологические характеристики ТТ – мощности вторичной нагрузки и кратности первичного тока.

При увеличении мощности (сопротивления) вторичной нагрузки $Z_{2Н}$ более номинального погрешности ТТ возрастают. При дальнейшем увеличе-

нии Z_{2H} вторичной нагрузки угловая погрешность начинает уменьшаться и при значительном превышении Z_{2H} (в несколько раз) может приобретать отрицательное значение [6].

Для ТТ согласно стандарта [2] задаются допускаемые пределы токовой и угловой погрешностей в зависимости от первичного тока I_1 :

- для классов точности 0,2 и 0,5 в диапазоне 5 – 120 % номинального первичного тока;
- для классов точности 0,2S и 0,5S в диапазоне 1 – 120 % номинального первичного тока.

Пределы допускаемых погрешностей согласно стандарта [2] для указанных классов точности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Пределы допускаемых погрешностей трансформаторов тока

Класс точности ТТ	Первичный ток I_1 , % номинального значения	Предел допускаемой погрешности	
		токовой, δi , %	угловой, θi , мин
0,2	5	$\pm 0,75$	± 30
	20	$\pm 0,35$	± 15
	100-120	$\pm 0,2$	± 10
0,2S	1	$\pm 0,75$	± 30
	5	$\pm 0,35$	± 15
	20	$\pm 0,2$	± 10
	100	$\pm 0,2$	± 10
	120	$\pm 0,2$	± 10
0,5	5	$\pm 1,5$	± 90
	20	$\pm 0,75$	± 45
	100-120	$\pm 0,5$	± 30
0,5S	1	$\pm 1,5$	± 90
	5	$\pm 0,75$	± 45
	20	$\pm 0,5$	± 30
	100	$\pm 0,5$	± 30
	120	$\pm 0,5$	± 30

На Рис. 1 и 2 приведены диапазоны погрешностей согласно стандарта [2].

Из графиков на рис.1 и 2 видно, что ТТ классов точности 0,2S и 0,5S имеют более узкие диапазоны погрешностей в области токов менее 20 % номинального первичного тока, чем ТТ классов 0,2 и 0,5 соответственно.

Согласно стандарта [2] мощность вторичной нагрузки должна находиться в диапазоне от 25 до 100 % номинальной вторичной нагрузки, а коэффициент мощности вторичной нагрузки 0,8 или 1.

Наиболее распространенным случаем нарушения требований стандарта является превышение мощности вторичной нагрузки.

В работе [6] показано, что превышение мощности вторичной нагрузки приводит к значительному ухудшению метрологических характеристик ТТ вплоть до того, что погрешности ТТ класса точности 0,5 могут соответствовать классу точности 10.

На Рис. 3 и 4 приведены графики погрешностей (математическое ожидание) ТТ типа ТПОЛ-10 класса точности 0,5 при различной мощности вторичной нагрузки.

В связи с широким внедрением электронных счетчиков для систем коммерческого учета электроэнергии, имеющие меньшее энергопотребление по сравнению с индукционными, особенную актуальность приобрел вопрос о соответствии погрешностей ТТ классу точности при мощности вторичной нагрузки меньше нижнего предела вторичной нагрузки.

По стандарту на электронные счетчики, мощность, потребляемая параллельной цепью (напряжения) электронных счетчиков активной энергии не должна превышать 10 В·А, а последовательной (токовой) – 1 В·А [7].

В действительности мощность счетчиков может быть еще меньше.

Наиболее распространенные типы ТТ класса напряжения 10 кВ рассчитаны на номинальную мощность вторичной нагрузки 10 В·А.

Мощность токовой цепи электронного счетчика в 1 В·А намного ниже нижнего предела мощности вторичной нагрузки, которая согласно [2] составляет 3,75 В·А.

У большинства типов ТТ токовая погрешность отрицательная во всем диапазоне первичного тока, однако у некоторых типов ТТ токовая погрешность может принимать положительное значение при токах близких к номинальному и при уменьшении мощности вторичной нагрузки менее нижнего предела токовая погрешность может выйти за верхний предел допускаемой стандартом [2] токовой погрешности.

На Рис. 5 и 6 приведены графики погрешностей ТТ типа ТПОЛ 10 класса точности 0,5 при номинальной мощности вторичной нагрузки и без нагрузки.

Из графиков видно, что без подключения вторичной нагрузки токовая погрешность может выходить из верхнего предела допускаемой токовой погрешности для класса точности 0,5.

На рисунках 7 и 8 приведены графики погрешности ТТ типа ТПОЛ 10 класса точности 0,5S при номинальной мощности вторичной нагрузки и без нагрузки.

Из графиков видно, что погрешности ТТ класса точности 0,5S без вторичной нагрузки практически во всем диапазоне близки к нулю.

Следующий фактор – кратность первичного тока.

При уменьшении кратности первичного тока K_i токовая и угловая погрешности возрастают. Возрастание погрешностей нелинейное вследствие нелинейной зависимости коэффициентов K_F , K_ψ , γ и λ от индукции в магнитопроводе.

ТТ, как правило, работают при недогрузке по первичному току. Нередко трансформаторы классов точности 0,5 и 1 работают при первичном токе менее 5 % номинального первичного тока.

Это объясняется следующими причинами:

- коэффициенты трансформации ТТ выбирались завышенными исходя из проектной мощности электроустановок;
- ТТ выбирались исходя из требований стойкости к воздействию к токам короткого замыкания.

Согласно «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) для ТТ, предназначенных для учета электроэнергии при максимальной нагрузке присоединения ток во вторичной обмотке ТТ должен составлять не менее 40 % номинального тока счетчика, а при минимальной рабочей нагрузке – не менее 5 %.

Данное требование ПУЭ сложно, а нередко и невозможно реализовать на практике, так как во многих узлах учета требуется заменить ТТ для коммерческого учета на ТТ с меньшим номинальным током, однако рассчитанный на прежний ток КЗ, что, как правило, технически невозможно.

Нередко требуют, чтобы стойкость к току термической стойкости увеличилась в десятки раз, причем при сохранении существующих габаритов, или запрашивают трансформаторы с обмоткой для измерений с номинальным первичным током в несколько раз меньше, чем номинальный первичный ток обмотки для защиты.

Однако стойкость к токам термической и динамической стойкости у такого ТТ определяется первичной обмоткой, рассчитанной на меньший ток.

Данное требование по минимальному току во вторичной обмотке не менее 5 % не учитывает тот факт, что для ТТ классов точности 0,5S и 0,2S при 1 % номинального первичного тока нормируются погрешности такие же, как при 5 % для ТТ классов точности 0,5 и 0,2 соответственно.

Поэтому ТТ классов точности 0,2S и 0,5S необходимо применять, когда ток контролируемого присоединения менее 5 % номинального.

На рис. 9 и 10 приведены графики погрешностей ТТ типа ТПОЛ 10 классов точности 0,5 и 0,2S из которых видно, что погрешности ТТ класса точности 0,2S в несколько раз меньше, чем у ТТ класса точности 0,5.

Следующим моментом в пользу ТТ классов точности 0,5S и 0,2S является то, что они имеют намного меньшие угловые погрешности по сравнению с ТТ с магнитопроводами из электротехнической стали.

На рис. 11 приведена векторная диаграмма токов и напряжений при активно-индуктивной нагрузке контролируемого присоединения.

Положительная угловая погрешность ТТ при малых первичных токах, как правило, намного больше, чем угловая погрешность ТН, и вызывает уменьшение угла между током и напряжением на вторичной стороне ИТ для случая активно-индуктивной нагрузки контролируемого присоединения.

Для случая активно-индуктивной нагрузки уменьшение угла на вторичной стороне ИТ приводит к тому, что активная электроэнергия при малых первичных токах измеряется с положительной погрешностью, а реактивная – с отрицательной и соответственно к завышению $\cos\varphi_1$ контролируемого присоединения [8].

При уменьшении $\cos\varphi_1$ контролируемого присоединения влияние угловых погрешностей ИТ становится определяющим фактором, и положительная погрешность трансформаторной схемы подключения счетчика δ_θ для активной электроэнергии в несколько раз превышает отрицательную погрешность напряжения ТН δ_U и токовую погрешность ТТ δ_I .

Таким образом, угловые погрешности ИТ приводят к тому, что погрешность ИК зависит не только от факторов, непосредственно влияющих на метрологические характеристики ИТ, но и от характера нагрузки и коэффициента мощности контролируемого присоединения.

В работе [9] показано влияние остаточного намагничивания после протекания токов КЗ, которое может приводить к значительному увеличению погрешностей ТТ и выходу из класса точности.

ТТ классов точности 0,5S и 0,2S из-за характеристик материала магнитопровода практически не подвержены влиянию токов КЗ.

На ОАО "Свердловский завод трансформаторов тока" серийно выпускаются ТТ классов напряжения от 0,66 до 35 кВ классов точности 0,2S и 0,5S. При использовании специальных сплавов оказалось возможным получить ТТ классов точности 0,2S и 0,5S, не увеличивая габаритные размеры и массу ТТ.

Однако ТТ классов точности 0,5S и 0,2S требуют строгого соблюдения требований стандартов по мощности вторичной нагрузки [10].

В связи с широким внедрением систем коммерческого учета была проведена следующая модернизация ТТ класса напряжения 10-35 кВ:

1. Введено пломбирование выводов измерительных обмоток ТТ защитной крышкой, предохраняющей от несанкционированного доступа;
2. Освоено серийное производство ТТ с тремя и четырьмя вторичными обмотками, из которых одна обмотка предназначена для коммерческого учета и имеет класс точности 0,5S или 0,2S; остальные обмотки предназначены для технического учета или релейной защиты;
3. ТТ классов точности 0,5S и 0,2S выпускаются в зависимости от требований заказчика с мощностью измерительных обмоток от 1 до 30 В·А.

Выводы

1. Для повышения точности измерения электроэнергии наиболее эффективным является замена измерительных ТТ класса точности 0,5 и менее точных на трансформаторы классов точности 0,5S и 0,2S.
2. При замене ТТ с магнитопроводами из электротехнической стали на ТТ классов точности 0,5S и 0,2S с магнитопроводами из нанокристаллических или аморфных сплавов погрешность ИК уменьшается в несколько раз и практически не зависит от влияния первичного тока и токов КЗ в первичной цепи;

Литература

- 1 Афанасьев В.В. и др. Трансформаторы тока. - Л.: Энергия, Ленинградское отделение, 1989.-344 с., ил.
- 2 ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия.
- 3 Раскулов Р.Ф., Эткинд Л.Л. Влияние воздействующих факторов на метрологические характеристики ТТ и ТН с литой эпоксидной изоляцией/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады науч.-техн. семинаров и конф. 1998-2001 гг. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.– 2001.– С. 317-327.

- 4 Раскулов Р.Ф., Смирнов А.С. Влияние температуры окружающего воздуха на погрешности измерительных трансформаторов/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады третьей науч.-практ. конференции. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.– 2003.– Доклад 22.–С.1-23.
- 5 Раскулов Р.Ф., Смирнов А.С. Влияние коэффициента мощности вторичной нагрузки на погрешности измерительных трансформаторов/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады третьей науч.-практ. конференции. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС.– 2003.– Доклад 23.– С.1–21.
- 6 Раскулов Р.Ф. Влияние вторичной нагрузки на погрешности трансформаторов тока// Электрические станции.– 2003.–№7. – С. 43-45.
- 7 ГОСТ 30206-94 Статические счетчики Ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 0,2S и 0,5S).
- 8 Раскулов Р.Ф., Влияние угловых погрешностей измерительных трансформаторов на точность определения коэффициента мощности нагрузки/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике.: Доклады четвертой науч.-практ. конференции.– М.: Изд-во НЦ ЭНАС.–2004.–Доклад 25.–С.1–11.
- 9 Раскулов Р.Ф. Погрешности трансформаторов тока. Влияние токов короткого замыкания //Новости электротехники. – 2005.–№2 (32).–С.114-116.
- 10 Раскулов Р.Ф. О превышении мощности вторичной нагрузки для трансформаторов тока классов точности 0,2S и 0,5S // Электрические станции.– 2003.–№8.–С. 59-62.

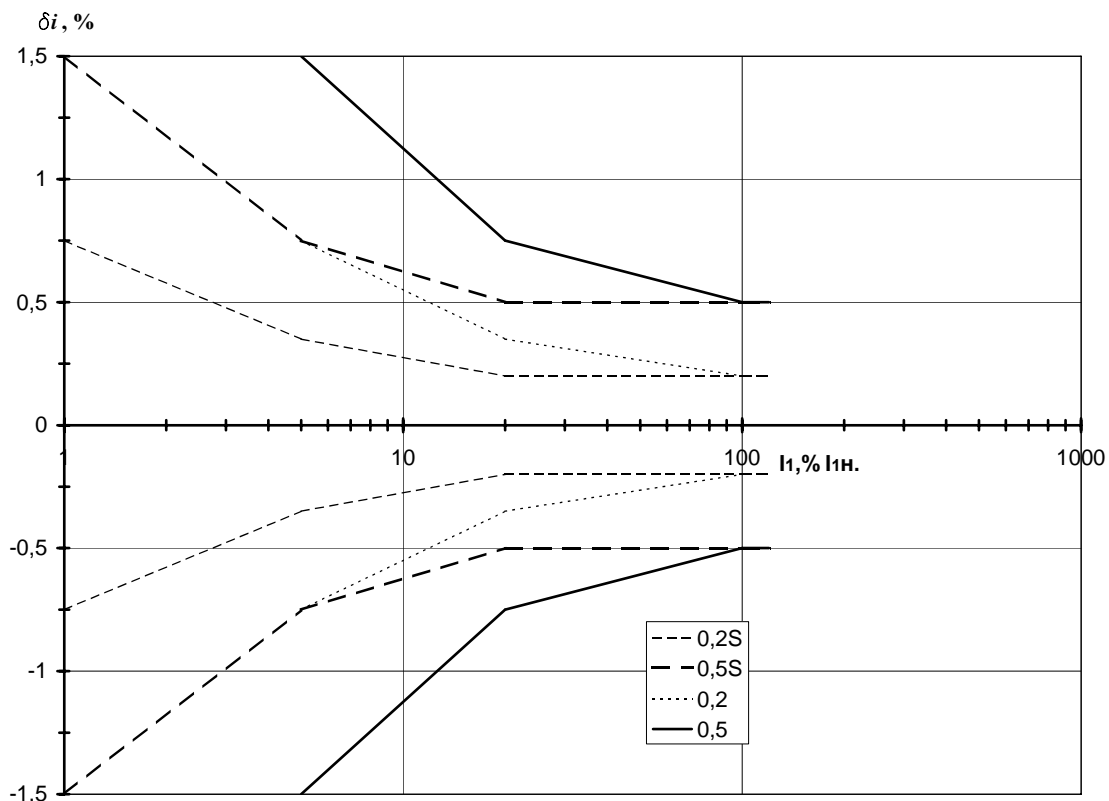


Рис. 1 Диапазон допускаемой токовой погрешности для трансформаторов тока различных классов точности по ГОСТ 7746-2001

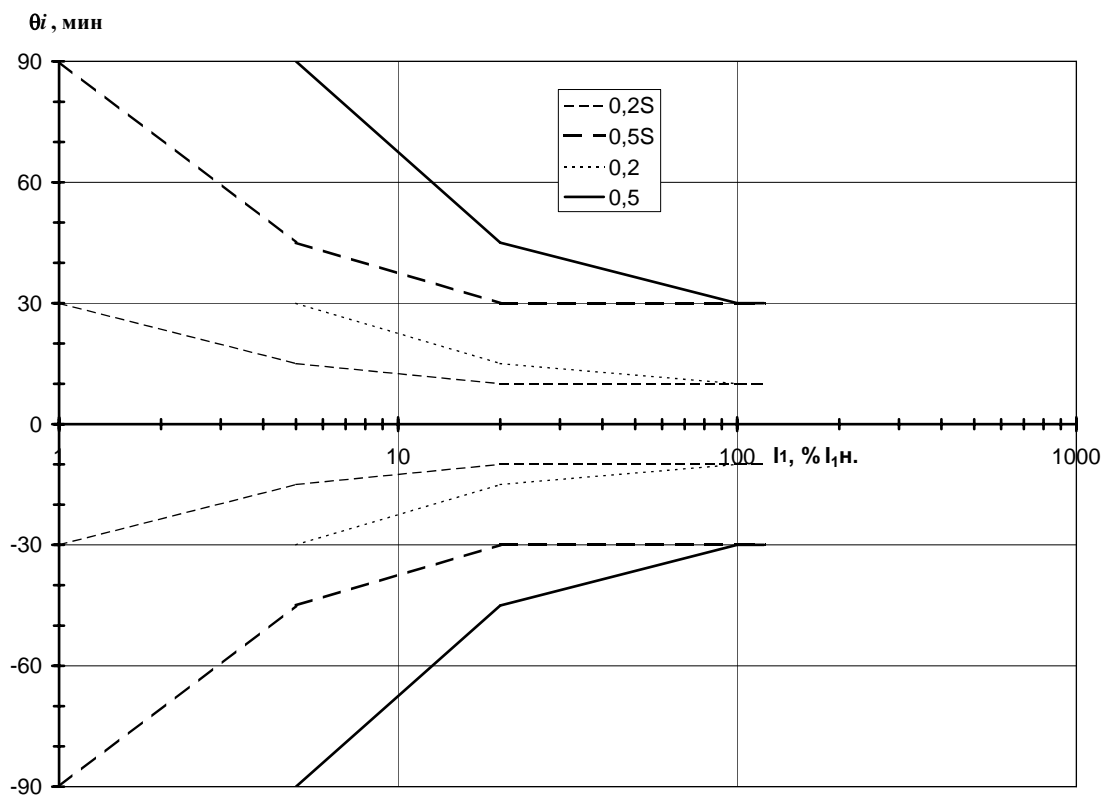


Рис. 2 Диапазон допускаемой угловой погрешности для трансформаторов тока различных классов точности по ГОСТ 7746-2001

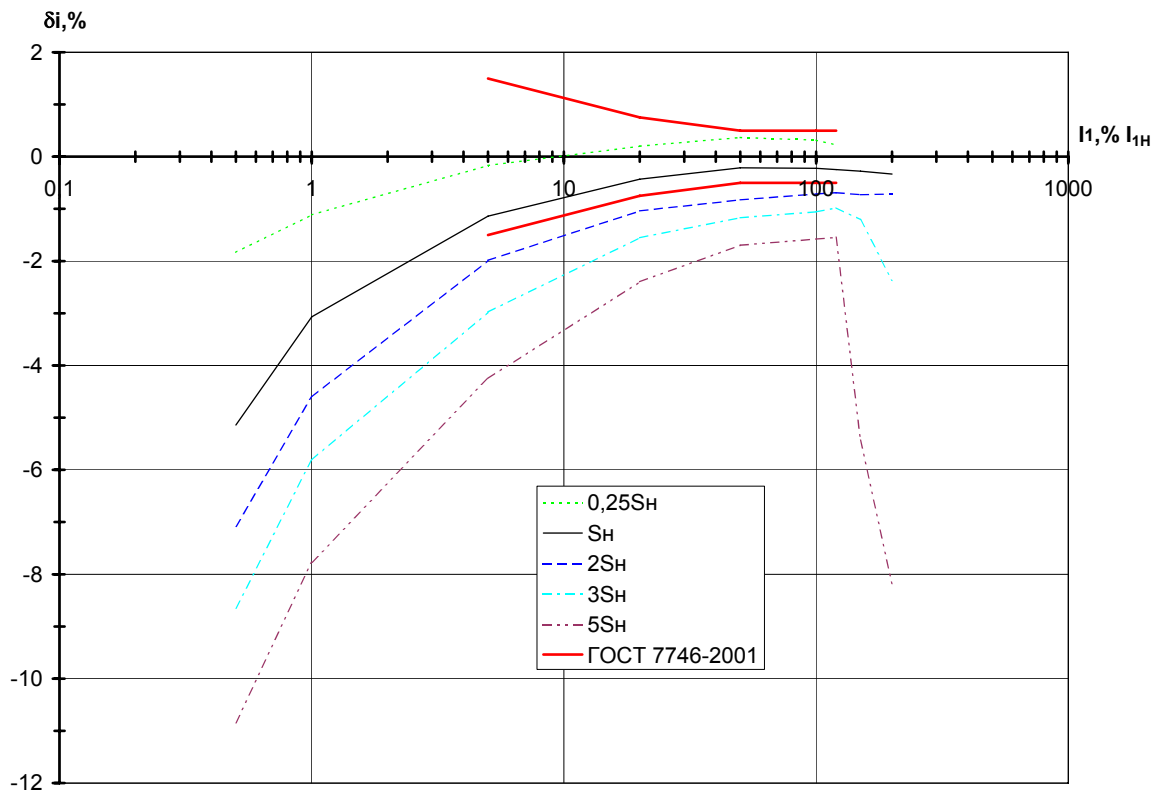


Рис. 3 Зависимость токовой погрешности ТТ ТПОЛ-10-300/5 от первичного тока при различной мощности вторичной нагрузки

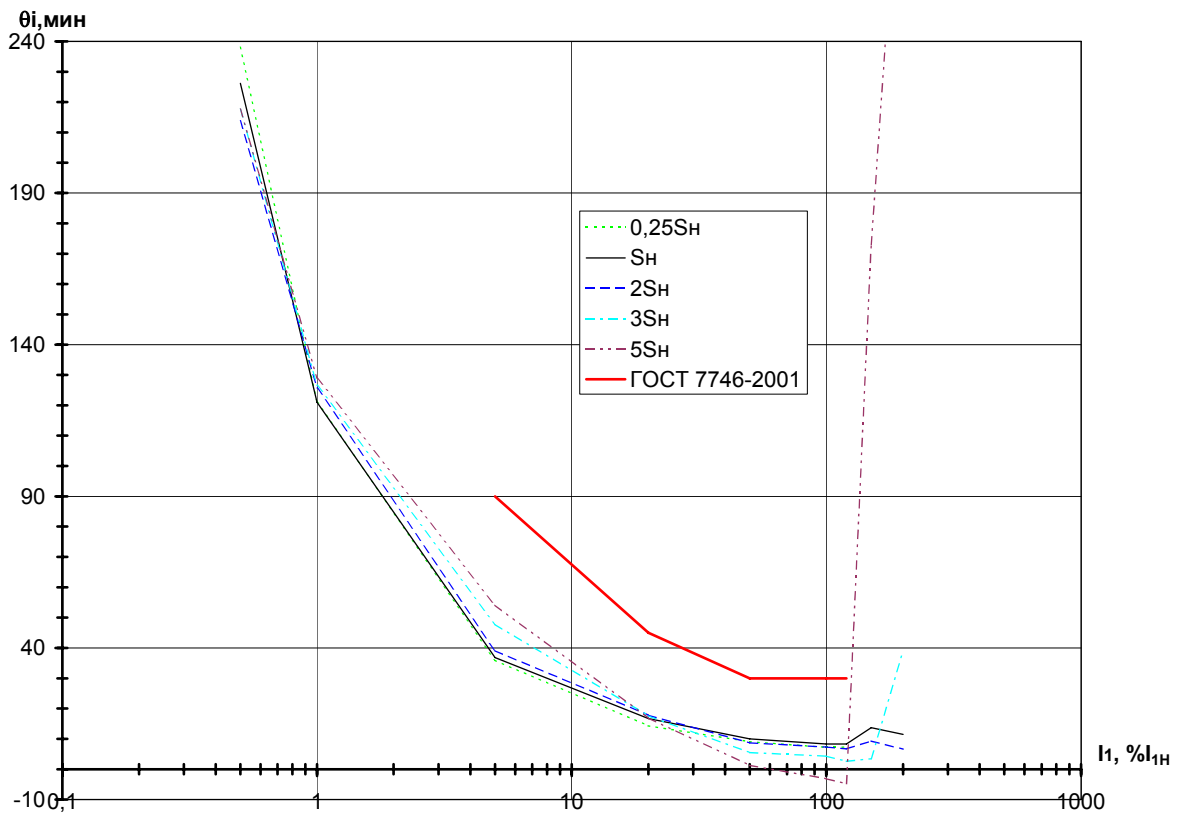


Рис. 4 Зависимость угловой погрешности ТТ ТПОЛ-10-300/5 от первичного тока при различной мощности вторичной нагрузки

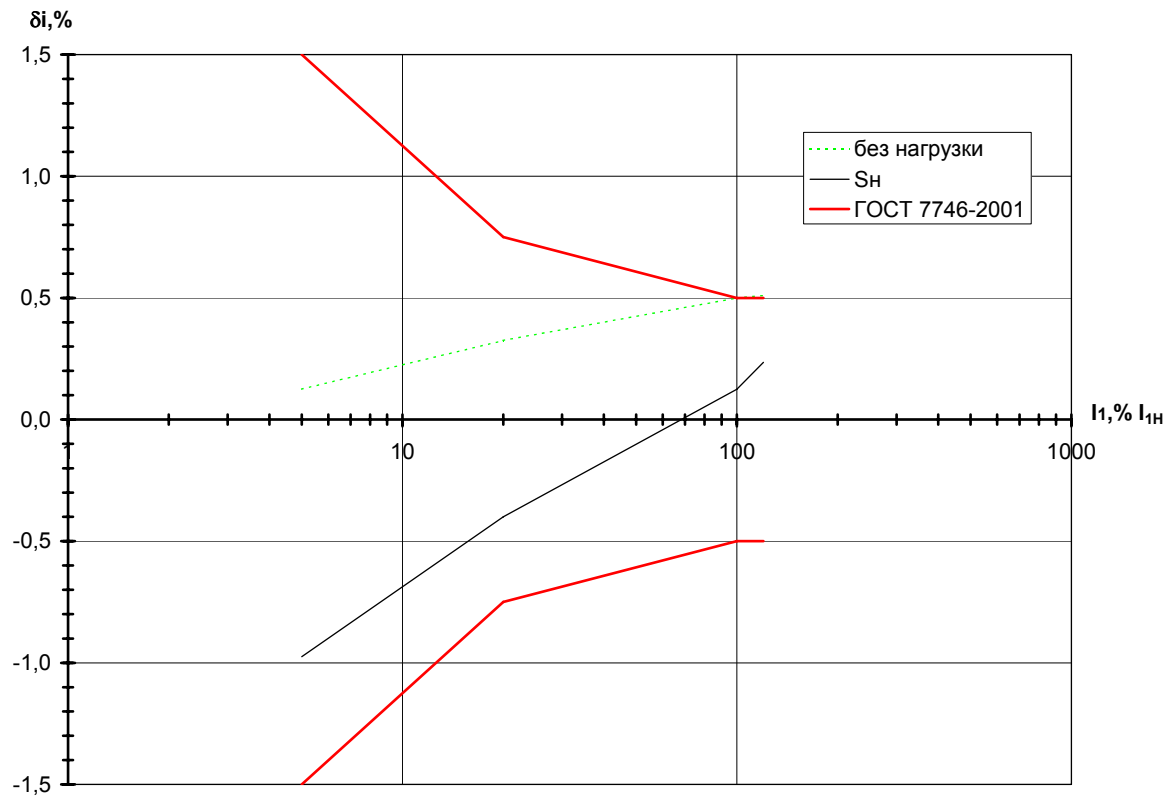


Рис. 5 Токовые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 класса точности 0,5

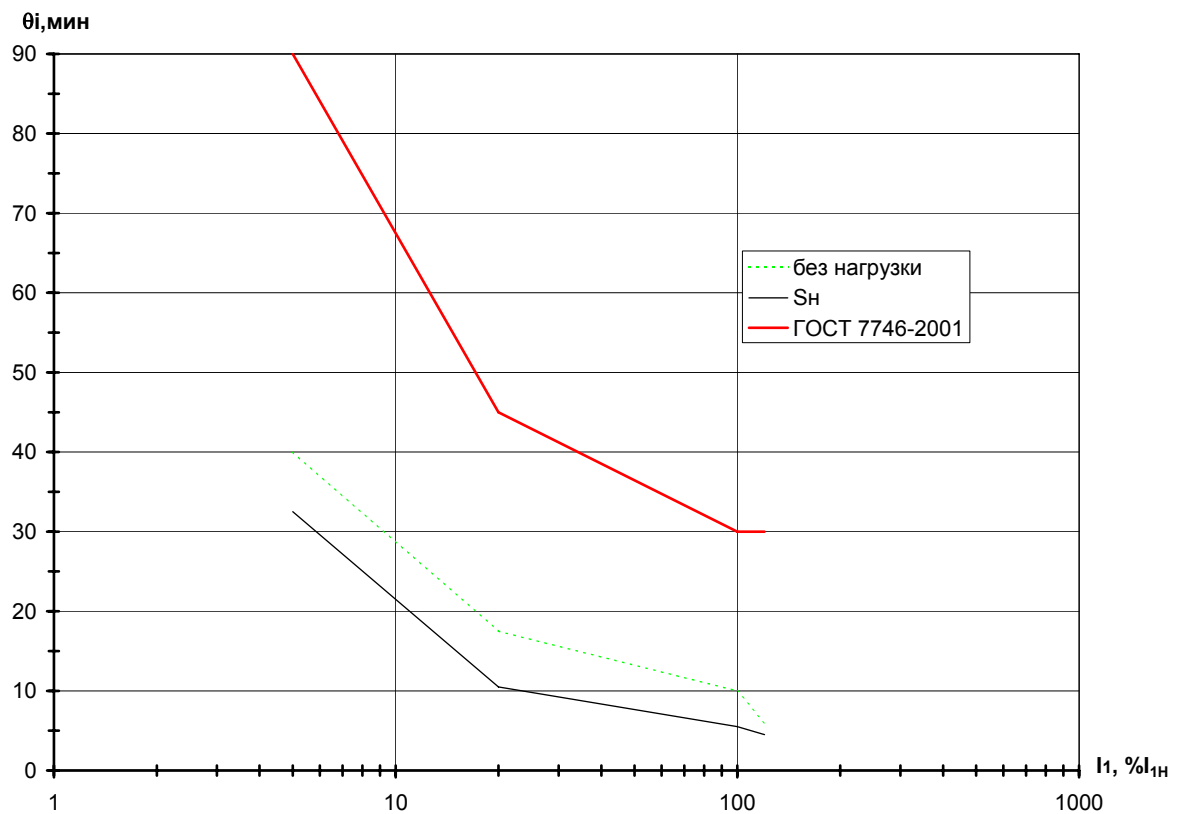


Рис. 6 Угловые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 класса точности 0,5

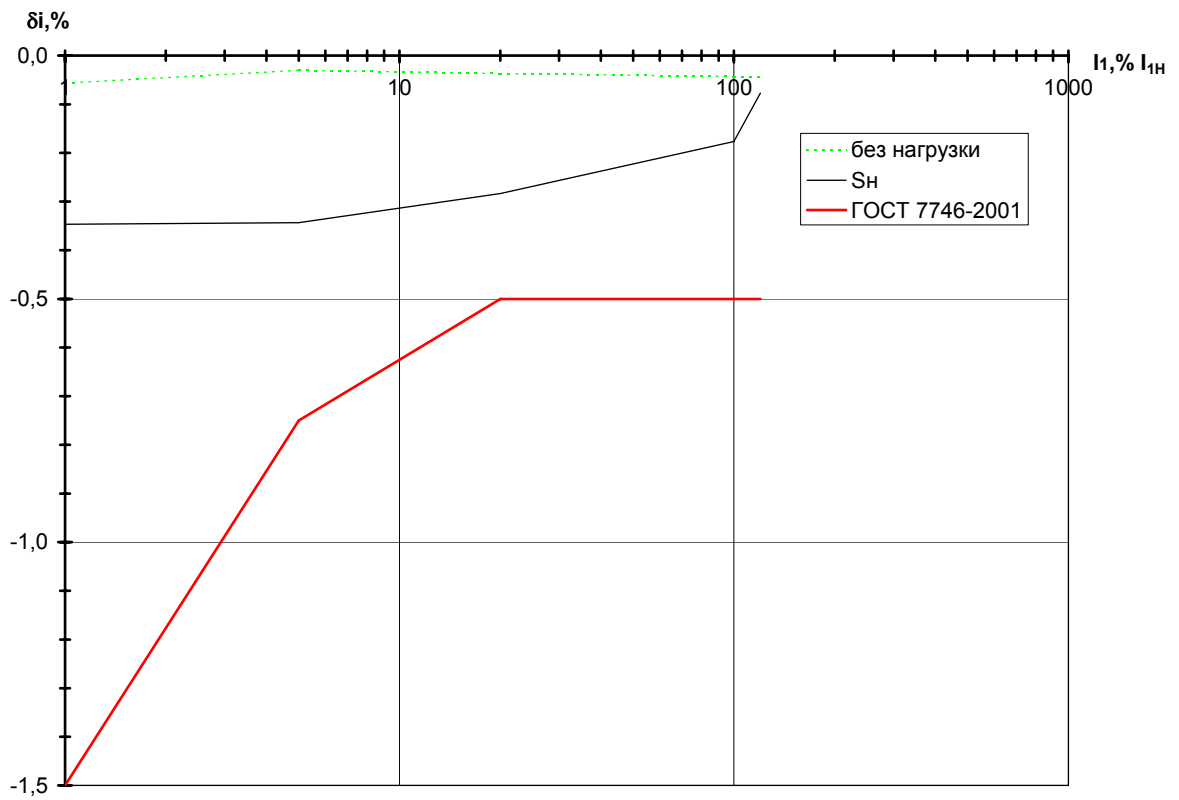


Рис. 7 Токовые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 класса точности 0,5S

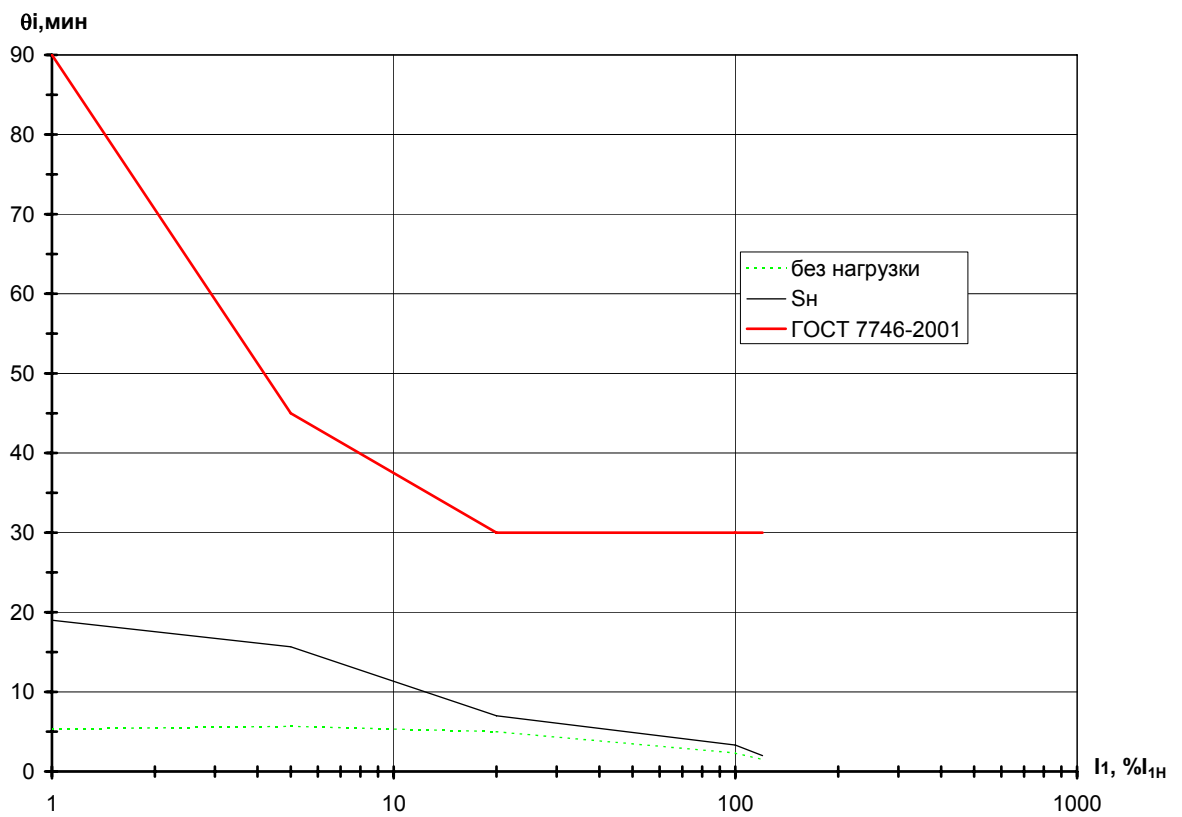


Рис. 8 Угловые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 класса точности 0,5S

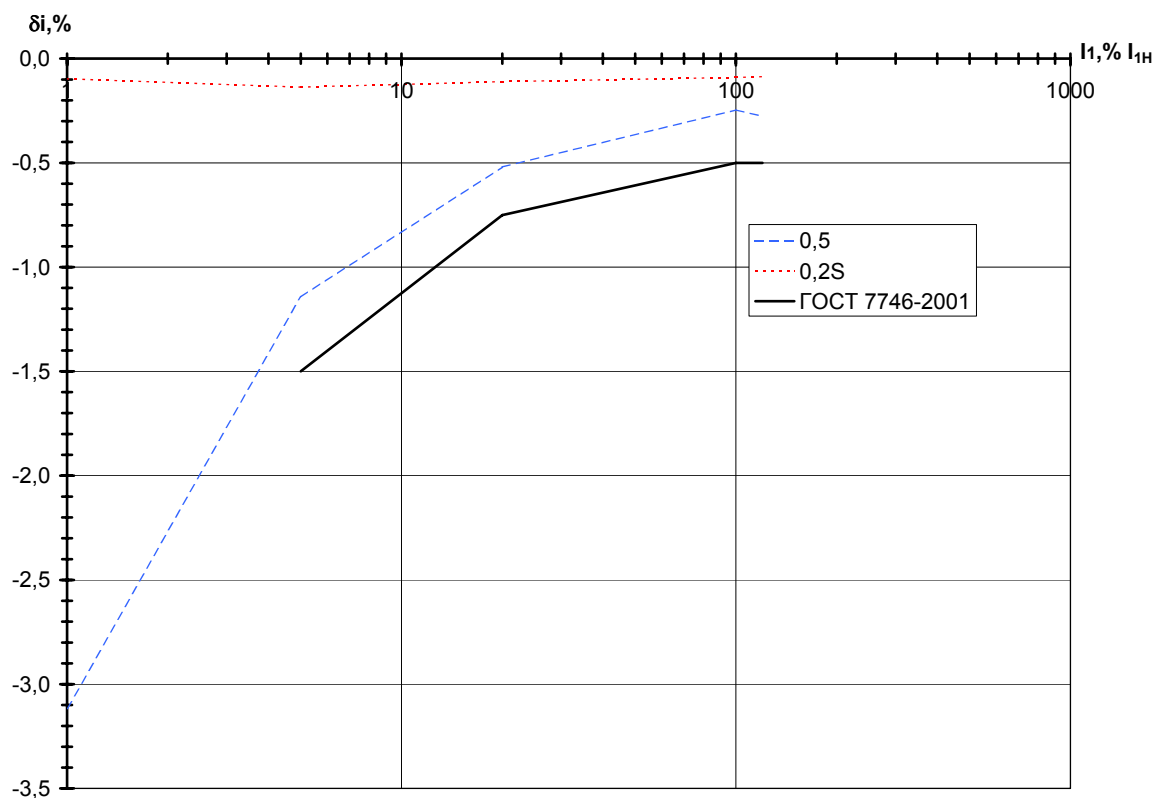


Рис. 9 Токовые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 классов точности 0,5 и 0,2S

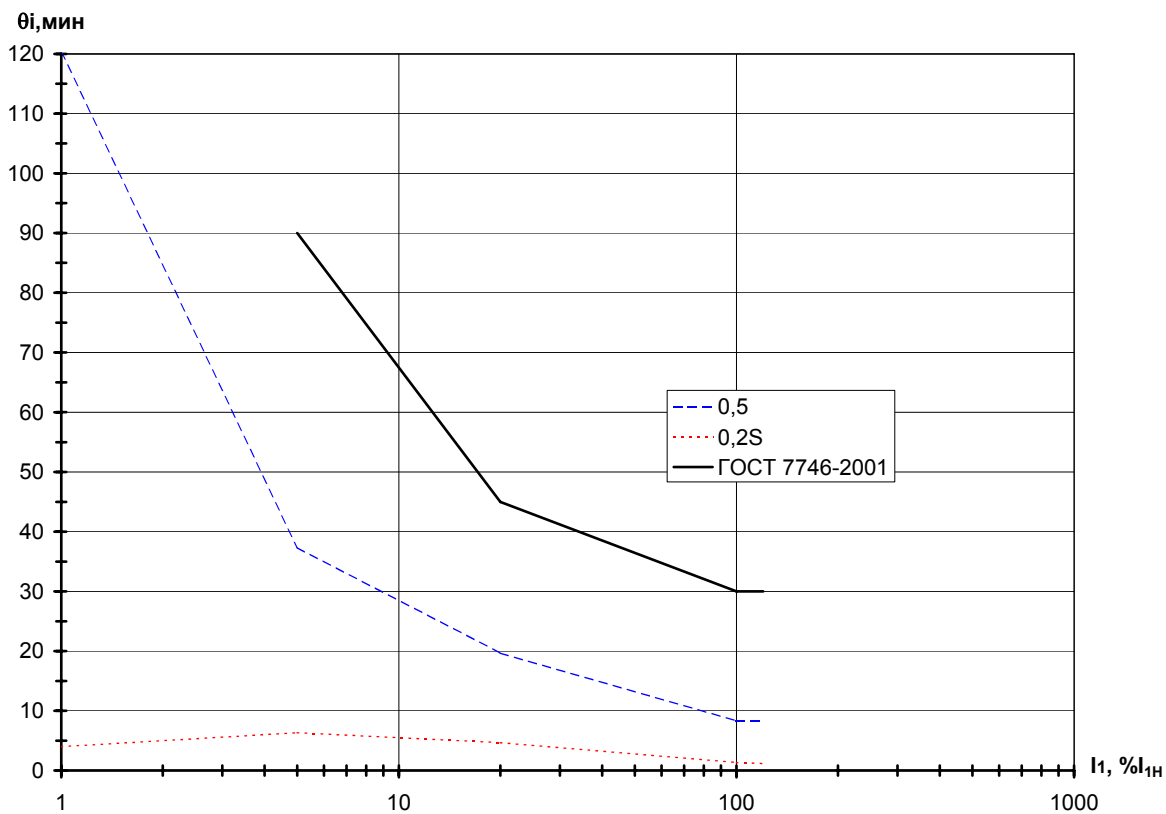
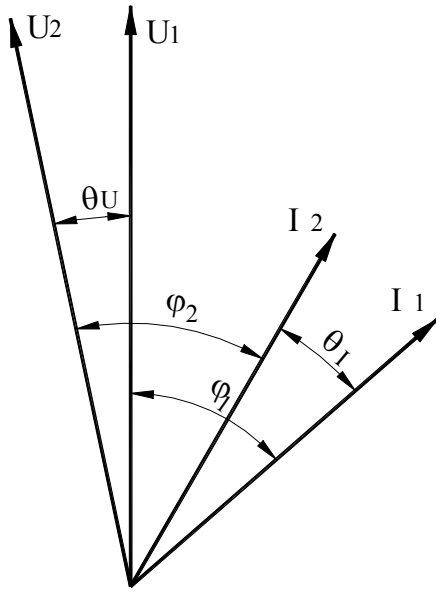
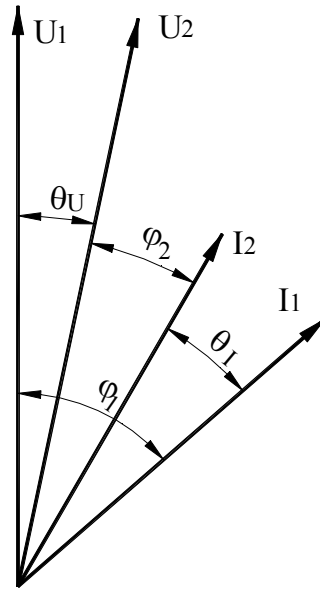


Рис. 10 Угловые погрешности ТТ ТПОЛ-10- 300/5 классов точности 0,5 и 0,2S



а)



б)

Рис. 11 Векторная диаграмма токов и напряжений при активно-индуктивной нагрузке присоединения:
 а - погрешности ТТ и ТН положительные;
 б - погрешность ТТ положительная,
 погрешность ТН- отрицательная