

Влияние коэффициента мощности вторичной нагрузки на погрешности измерительных трансформаторов.

Раскулов Р.Ф. , инженер- конструктор,

Смирнов А.С., инженер – испытатель.

ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока».

620043, Россия, г. Екатеринбург, ул. Черкасская, 25.

Телефон (3432) 23-65-08, факс 12-52-55, *e-mail*: cztt@cztt.etel.ru / design@cztt.etel.ru.

Одним из важнейших факторов, оказывающим влияние на метрологические характеристики измерительных трансформаторов, является коэффициент мощности вторичной нагрузки ($\cos\varphi$). Этот коэффициент равен отношению между активным и полным сопротивлением вторичной нагрузки. При $\cos\varphi = 1$ вторичная нагрузка носит чисто активный характер.

ГОСТ 7746-2001 и ГОСТ 1983-2001 нормируют погрешности трансформаторов при мощности вторичной активно-индуктивной нагрузки от 25 до 100 % номинальной и $\cos\varphi$ в диапазоне от 0,8 до 1 для трансформаторов тока [1] и 0,8 для трансформаторов напряжения [2].

На практике нередко коэффициент мощности вторичной нагрузки трансформаторов тока из-за завышенной индуктивности вторичной нагрузки не укладывается в указанный диапазон. Вторичная нагрузка трансформаторов напряжения также может иметь завышенную индуктивность нагрузки. В[3] рекомендуют для устранения недоучета подключать конденсаторы к вторичной обмотке трансформаторов напряжения, и при этом нагрузка носит активно – емкостный характер.

Для более наглядного представления влияния коэффициента мощности вторичной нагрузки на метрологические характеристики трансформаторов тока рассмотрим векторную диаграмму приведенного трансформатора тока (первичный ток приведен к вторичному току).

На рисунке 1 изображена векторная диаграмма трансформатора тока с коэффициентом мощности вторичной нагрузки 0,8.

Для наглядности, вектора падений напряжений показаны сопоставимыми с векторами первичного и вторичного токов.

Вектора имеют следующие обозначения:

I_1 – первичный ток;

I_2 - вторичный ток;

I_0 - ток намагничивания;

$I_2 \cdot R_2$ - падение напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки;

$I_2 \cdot X_2$ - падение напряжения на реактивном сопротивлении вторичной обмотки;

$I_2 \cdot R_{2H}$ – падение напряжения на активном сопротивлении вторичной нагрузки;

$I_2 \cdot X_{2H}$ – падение напряжения на реактивном сопротивлении вторичной нагрузки;

E_2 - вторичная ЭДС;

φ - угол, характеризующий коэффициент мощности нагрузки;

α - угол между вторичной ЭДС E_2 и вторичным током I_2 ;

ψ - угол потерь, характеризующий соотношение активных и реактивных потерь в материале магнитопровода;

Φ_0 - магнитный поток в магнитопроводе.

Токовая погрешность f определяется как арифметическая разность между действительным вторичным током и приведенным к вторичной цепи действительным первичным, выраженная в процентах от приведенного к вторичной цепи действительного первичного тока.

Угловая погрешность δ определяется как угол между первичным током и повернутым на 180° вторичным током. Если вектор повернутого на 180° вторичного тока опережает вектор первичного тока, то такая погрешность считается положительной.

На векторной диаграмме токовая погрешность арифметически равна отрезку AC, а угловая углу δ .

Используя тригонометрические соотношения можно получить формулы для погрешностей:

$$f = -100 \cdot \frac{I_0 \cdot \sin(\psi + \alpha)}{I_1}, \quad (1)$$

$$\delta = 3440 \cdot \frac{I_0 \cdot \cos(\psi + \alpha)}{I_1} \quad (2)$$

Угол α определяется по формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{X_2 + X_{2H}}{R_2 + R_{2H}}, \quad (3)$$

где X_{2H} и R_{2H} –индуктивное и активное сопротивление нагрузки, определяются по формулам:

$$R_{2H} = Z_{H'} \cdot \cos \varphi, \quad X_{2H} = Z_{H'} \cdot \sin \varphi. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент мощности вторичной нагрузки непосредственно влияет на угол α между вторичным током и вторичной ЭДС.

Исходя из формул (3) и (4) при увеличении угла φ будет увеличиваться угол α , и токовая погрешность будет увеличиваться, а угловая уменьшаться. При большом угле

φ выражение $\cos(\psi + \alpha)$ примет отрицательное значение, и угловая погрешность станет отрицательной.

На рисунке 2 изображена векторная диаграмма трансформатора тока с коэффициентом мощности вторичной нагрузки менее 0,8.

На диаграмме видно, что при большом угле φ вектор тока I_0 находится ниже оси абсцисс и угловая погрешность отрицательна.

Исследования влияния коэффициента мощности на погрешности измерительных трансформаторов проводились в испытательном центре ОАО «СЗТТ» по схемам поверки согласно ГОСТ 8.217-87 для трансформаторов тока и ГОСТ 8.216-88 для трансформаторов напряжения. При определении погрешностей трансформаторов тока использовался образцовый трансформатор тока типа И-512 класса точности 0,05, а при определении погрешностей трансформаторов напряжения образцовый трансформатор напряжения типа НЛЛ –15 класса точности 0,05 и прибор сравнения К-507. В качестве нагрузки с небольшим $\cos \varphi$ использовалась специально спроектированная индуктивность.

Исследования влияния коэффициента мощности вторичной нагрузки проводились на следующих типо-представителях трансформаторов тока:

1. ТОЛ 10-1- 300/5 класс точности 0,5;
2. ТПОЛ 10 - 300/5 класс точности 0,5.

Измерения проводились в расширенном диапазоне первичного тока - от 0,5 до 120 % номинального первичного тока. При номинальном значении мощности вторичной нагрузки $\cos \varphi$ изменялся от 1 до 0,4. Погрешности трансформаторов тока определялись также при и двойном значении мощности вторичной нагрузки с $\cos \varphi$ 0,4.

На рис. 3 и 4 приведены графики зависимости токовой погрешности от первичного тока для трансформаторов тока ТОЛ 10-1 и ТПОЛ 10 при различных $\cos \varphi$. Линией двойной толщины показаны пределы допускаемой погрешности по ГОСТ 7746-2001 для класса точности 0,5. Штрих пунктирной линией показаны погрешности при двойной мощности вторичной нагрузки с $\cos \varphi$ 0,4.

Из графиков токовой погрешности видно, что при уменьшении $\cos \varphi$ токовые погрешности увеличиваются и при первичном токе 5 % номинального, при номинальной мощности вторичной нагрузке с $\cos \varphi$ 0,4, токовая погрешность трансформатора тока ТОЛ 10-1 выходит за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001. Токовая погрешность трансформатора тока ТПОЛ 10 при $\cos \varphi$ 0,4 и номинальной вторичной нагрузке выходит за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001 во всем диапазоне первичного тока. Осо-

бенно сильно уменьшение $\cos \varphi$ сказывается при небольших первичных токах. Если при 0,5 % номинального первичного тока при $\cos \varphi = 1$ токовая погрешность составляет минус 1,6 % для трансформатора ТОЛ 10-1 и минус 2,1 % для ТПОЛ 10, то при уменьшении $\cos \varphi$ до 0,4 токовая погрешность составляет минус 5,2 % для трансформатора ТОЛ-10 и минус 5,3 % для ТПОЛ 10. При двойной номинальной мощности вторичной нагрузки и $\cos \varphi = 0,4$, погрешности ТОЛ 10-1 выходят за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001 при первичном токе менее 80 % номинального, а при токе 0,5 % номинального первичного, погрешность составляет минус 6,8 %. У трансформатора тока ТПОЛ 10 токовые погрешности достигают минус 1 % при токе 100 % номинального первичного тока, а при 0,5 % номинального первичного тока достигают минус 7,3 %.

На рисунках 5 и 6 приведены графики зависимости угловой погрешности от первичного тока при различных $\cos \varphi$ для трансформаторов тока ТОЛ 10-1 и ТПОЛ 10.

Из графиков зависимости угловой погрешности от первичного тока видно, что при уменьшении $\cos \varphi$ угловые погрешности уменьшаются. Для трансформатора тока ТОЛ 10-1 при номинальной мощности вторичной нагрузки и $\cos \varphi = 0,4$, при токе более 5 % номинального угловые погрешности из положительных становятся отрицательными и достигают минус 7,5'. При токе 0,5 % номинального первичного тока и $\cos \varphi = 1$, угловая погрешность составляет плюс 152', а при уменьшении $\cos \varphi$ до 0,4 угловая погрешность составляет плюс 25' для номинальной мощности вторичной нагрузки и минус 7' для двойной номинальной мощности. При двойной номинальной мощности вторичной нагрузки и $\cos \varphi = 0,4$ угловые погрешности отрицательны для всего диапазона первичного тока.

У трансформатора тока ТПОЛ 10 угловая погрешность при уменьшении $\cos \varphi$ также уменьшается и при $\cos \varphi = 0,4$ и номинальной мощности вторичной нагрузки отрицательна во всем диапазоне первичного тока. При увеличении мощности вторичной нагрузки до двойной номинальной при $\cos \varphi = 0,4$ угловая погрешность выходит за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001 и достигает минус 37' при токе 100 % номинального и минус 80' при 0,5 % номинального первичного тока.

В настоящее время все большее распространение получают трансформаторы тока классов точности 0,2S и 0,5S, предназначенные для коммерческого учета электроэнергии. Для этих трансформаторов нормируются погрешности в области низких значений первичного тока [1]. В трансформаторах тока классов точности 0,2S и 0,5S для измерительной обмотки применяется магнитопровод из нанокристаллического сплава, имеющего меньшие потери и меньший угол ψ , чем электротехническая сталь [4]. По-

этому на погрешности трансформаторов тока классов точности 0,2S и 0,5S, изменение $\cos \varphi$ оказывает меньшее влияние, чем на погрешности трансформаторов с магнитопроводами из электротехнической стали.

Исследования влияния $\cos \varphi$ на погрешности трансформаторов тока класса точности 0,5S были проведены трансформаторах ТОЛ 10-1- 300/5 и ТПОЛ 10 - 300/5 класса точности 0,5S.

На рисунках 7 и 8 приведены графики зависимости токовой погрешности от первичного тока при различных $\cos \varphi$ для трансформаторов тока ТОЛ 10-1 и ТПОЛ 10 класса точности 0,5S. Линией двойной толщины показаны пределы допускаемой погрешности по ГОСТ 7746-2001 для класса точности 0,5S. Штрих пунктирной линией показаны погрешности при двойной мощности вторичной нагрузки с $\cos \varphi$ 0,4.

Графики зависимости погрешностей от $\cos \varphi$ носят такой же характер, как и для трансформаторов класса точности 0,5, но разброс погрешностей гораздо меньше. При 0,5 % номинального первичного тока и $\cos \varphi$ 1 токовые погрешности составляют минус 0,7 % для ТОЛ 10-1 и минус 1 % для ТПОЛ 10, а при уменьшении $\cos \varphi$ до 0,4 погрешности составляют минус 3,7 % для трансформатора ТОЛ 10-1 и минус 4,3 % для ТПОЛ 10. При двойной номинальной мощности вторичной нагрузки и $\cos \varphi$ 0,4, погрешности ТОЛ 10-1 выходят за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001 при первичном токе менее 70 % номинального, а при токе 0,5 % номинального первичного погрешность составляет минус 4,7 %. У трансформатора тока ТПОЛ 10 токовые погрешности, при двойной номинальной мощности вторичной нагрузки и $\cos \varphi$ 0,4, выходят за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001 во всем диапазоне первичного тока. Токовые погрешности при 100 % номинального первичного тока составляют минус 0,6 %, а при 0,5 % номинального первичного тока токовые погрешности достигают минус 5,6 %.

На рисунках 9 и 10 приведены графики угловой погрешности для трансформаторов тока ТОЛ 10-1 и ТПОЛ 10 класса точности 0,5S. Из графика зависимости угловой погрешности от первичного тока для трансформатора тока ТОЛ 10-1 видно, что при уменьшении $\cos \varphi$ угловые погрешности уменьшаются и при $\cos \varphi$ 0,4 и номинальной мощности вторичной нагрузки при токе более 1 % номинального из положительных становятся отрицательными. При двойной номинальной мощности вторичной нагрузке и $\cos \varphi$ 0,4, угловые погрешности отрицательны для всего диапазона первичного тока. При токе 0,5 % номинального первичного тока и $\cos \varphi$ 1 угловая погрешность составляет плюс 119', а при уменьшении $\cos \varphi$ до 0,5 угловая погрешность составляет плюс 12'

для номинальной мощности вторичной нагрузки и минус 30' для двойной номинальной.

У трансформатора тока ТПОЛ 10 угловая погрешность при уменьшении $\cos \varphi$ также уменьшается, и при $\cos \varphi 0,4$ и номинальной вторичной нагрузке отрицательна во всем диапазоне первичного тока. При увеличении значения вторичной нагрузки до двойной номинальной и $\cos \varphi 0,4$ угловая погрешность выходит за пределы, заданные ГОСТ 7746 только при токе 20 % номинального (у трансформатора класса точности 0,5 - во всем диапазоне).

При небольших первичных токах при номинальной мощности вторичной нагрузки, при уменьшении $\cos \varphi$ погрешности трансформаторов тока класса точности 0,5S меньше, чем у трансформаторов тока класса точности 0,5.

Погрешности трансформаторов напряжения вызванные протеканием тока нагрузки определяются по формулам [5]:

$$\Delta U_H = - (U_a \cdot \cos \varphi + U_p \cdot \sin \varphi) \quad (5)$$

$$\delta_H = 34,4 (U_a \cdot \sin \varphi - U_p \cdot \cos \varphi) \quad (6)$$

где ΔU_H – погрешность напряжения, вызванная падением напряжения в обмотках трансформатора от протекания тока нагрузки;

δ_H – угловая погрешность, вызванная протеканием тока нагрузки;

$U_a = U_{a1} + U_{a2}$, суммарные активные падения напряжений в первичной и вторичной обмотках от тока нагрузки;

$U_p = U_{p1} + U_{p2}$ – суммарные реактивные падения напряжений в первичной и вторичной обмотках от тока нагрузки;

φ - угол, характеризующий коэффициент мощности нагрузки.

Полные погрешности трансформатора напряжения определяются по формулам:

$$f = f_x + \Delta U_H, \quad (7)$$

$$\delta = \delta_x + \delta_H, \quad (8)$$

где f – полная погрешность напряжения трансформатора напряжения при нагрузке;

δ – полная угловая погрешность трансформатора напряжения при нагрузке;

f_x – погрешность напряжения трансформатора напряжения в режиме холостого хода;

δ_x – угловая погрешность трансформатора напряжения в режиме холостого хода.

Характер изменения погрешностей при изменении $\cos \varphi$ зависит от соотношения активных и реактивных падений напряжений в трансформаторе. При активно – индуктивной нагрузке, при уменьшении $\cos \varphi$ менее 1 погрешности напряжения первоначальной

начально становятся более отрицательными, а при дальнейшем уменьшении $\cos \varphi$ погрешности напряжения становятся более положительными. Угловые погрешности при уменьшении $\cos \varphi$ при активно – индуктивной нагрузке становятся более положительными из-за уменьшения произведения $U_p \cdot \cos \varphi$ в формуле (6) и при значительном уменьшении $\cos \varphi$ угловые погрешности выходят за пределы, заданные ГОСТ 1983-2001 ($\pm 20'$).

При активно-емкостной нагрузке $\sin \varphi$ отрицательный, поэтому при уменьшении $\cos \varphi$ погрешности напряжения станут более положительными, а угловые более отрицательными и также выходят за пределы, заданные ГОСТ 1983-2001 ($\pm 20'$).

Исследования влияния коэффициента мощности вторичной нагрузки на погрешности трансформаторов напряжения проводились на пяти трансформаторах серии ЗНОЛ.06 класса напряжения 10 кВ.

Измерения погрешностей трансформаторов напряжения проводились при 80 % номинального первичного напряжения и 25 % номинальной мощности вторичной нагрузки и при 120 % номинального первичного напряжения и номинальной мощности вторичной нагрузки. $\cos \varphi$ изменялся от 0,8 до 0,15 при активно-индуктивной нагрузке и от 0,8 до 0,5 при активно- емкостной нагрузке.

На рисунках 11 и 12 приведены графики зависимости погрешности напряжения от первичного напряжения при различных коэффициентах мощности нагрузки для трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ.06 класса напряжения 10 кВ. Из графиков видно, что для активно-индуктивной нагрузке при уменьшении $\cos \varphi$ от 1 до 0,8 погрешности напряжения становятся более отрицательными. При дальнейшем уменьшении $\cos \varphi$ от 0,8 до 0,15 погрешности напряжения становятся более положительными.

При активно-емкостной нагрузке при уменьшении $\cos \varphi$ погрешности напряжения также становятся более положительными.

На рисунках 13 и 14 приведены графики зависимости угловой погрешности от первичного напряжения при различных коэффициентах мощности нагрузки для трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ.06 класса напряжения 10 кВ. Из графиков видно, что для активно – индуктивной нагрузке при уменьшении $\cos \varphi$ угловые погрешности становятся более положительными и выходят за пределы заданные ГОСТ 1983-2001. Для случая активно – емкостной нагрузки, при уменьшении $\cos \varphi$ угловые погрешности становятся более отрицательными и также выходят за пределы, заданные ГОСТ 1983-2001.

Выводы:

1. Уменьшение коэффициента мощности вторичной нагрузки трансформаторов тока приводит к значительному увеличению токовых погрешностей и выходу погрешностей за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001.
2. Угловые погрешности трансформаторов тока при уменьшении коэффициента мощности уменьшаются и могут становиться из положительных отрицательными.
3. При уменьшении коэффициента мощности и превышении мощности вторичной нагрузки и токовые и угловые погрешности трансформаторов тока одновременно выходят за пределы, заданные ГОСТ 7746-2001, причем угловые погрешности выходят из отрицательного диапазона.
4. Трансформаторы тока класса точности 0,5S более устойчивы к уменьшению коэффициента мощности при небольших первичных токах, чем трансформаторы тока класса точности 0,5.
5. При уменьшении коэффициента мощности вторичной нагрузки, как при активно-индуктивной, так и при активно-емкостной нагрузке, угловые погрешности трансформаторов напряжения выходят за пределы, заданные ГОСТ 1983-2001.

Литература

1. ГОСТ 7746-2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия.
2. ГОСТ 1983-2001 Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
3. Малый А.С. Устранение недоучёта электроэнергии, обусловленного погрешностями трансформаторов напряжения. - Современные методы и средства расчёта, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях: Информационно-методические материалы. - М.: "Изд-во НЦ ЭНАС", 2000 г.
4. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2002.-384 с.
5. Дымков А.М. и др. Трансформаторы напряжения. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.-200 с., ил.

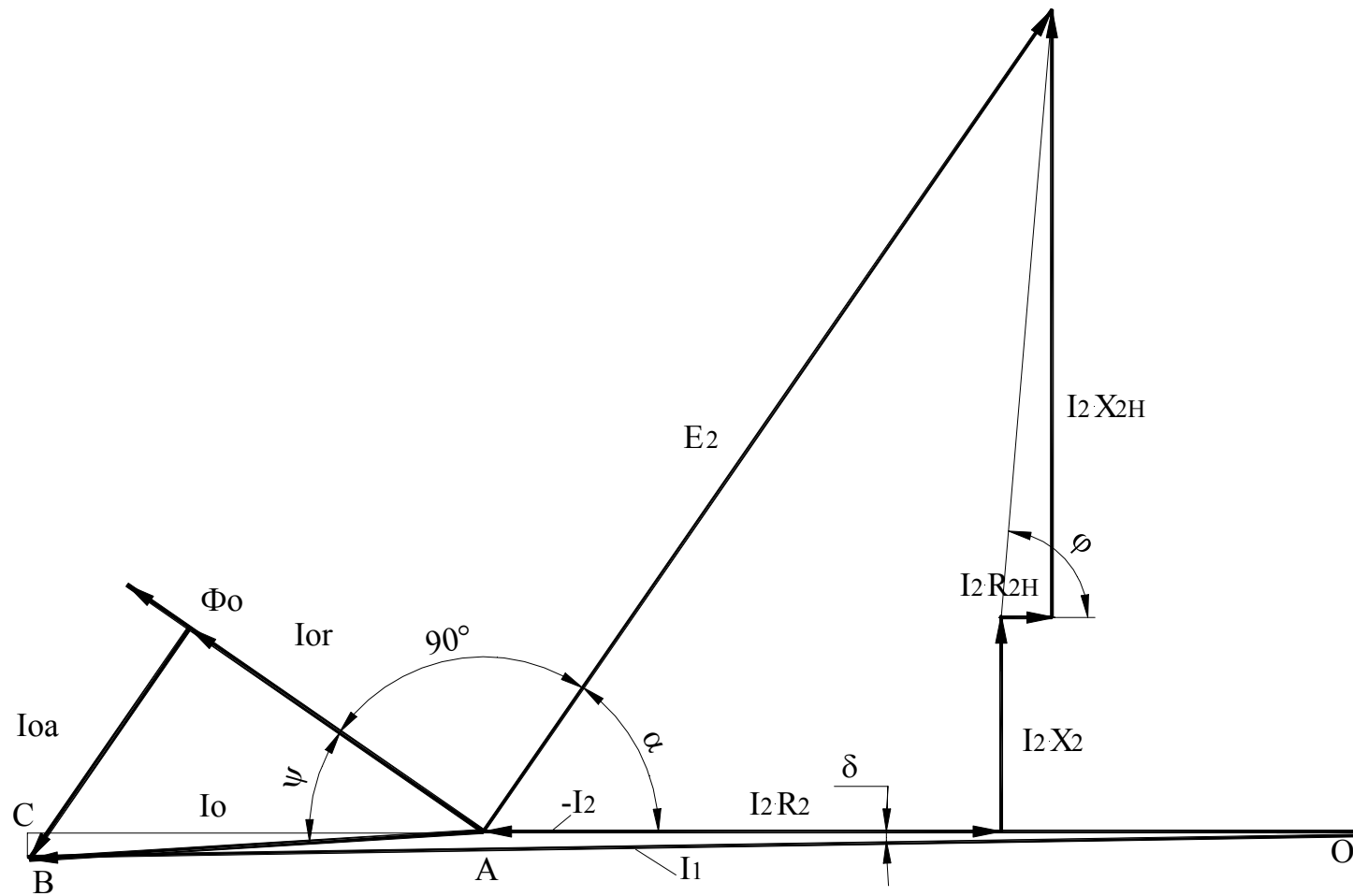


Рис. 2 Векторная диаграмма для трансформатора тока с коэффициентом мощности вторичной нагрузки менее 0,8.

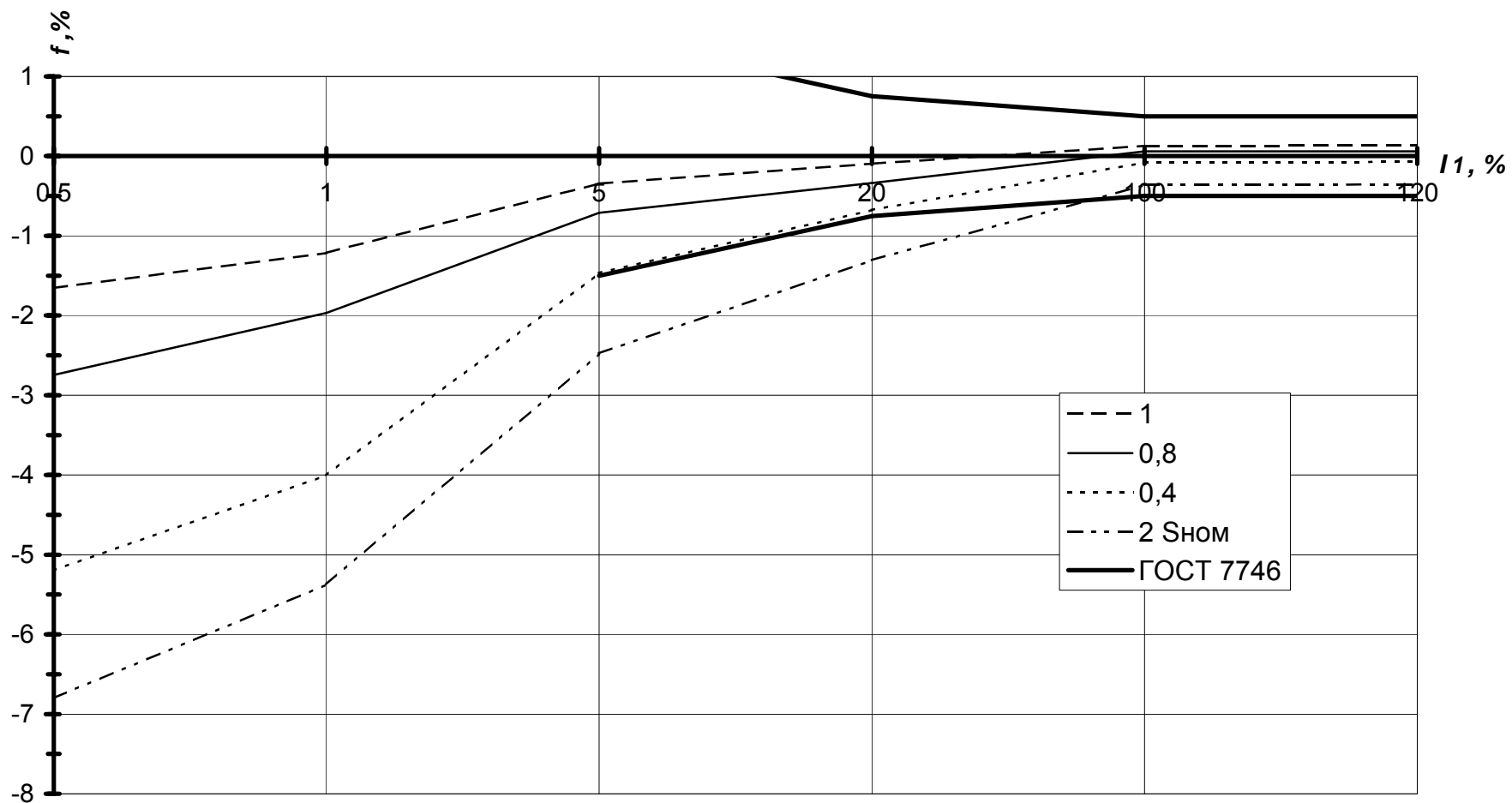


Рис. 3 Токовые погрешности ТОЛ 10-1 класса точности 0,5 при различных коэффициентах мощности нагрузки

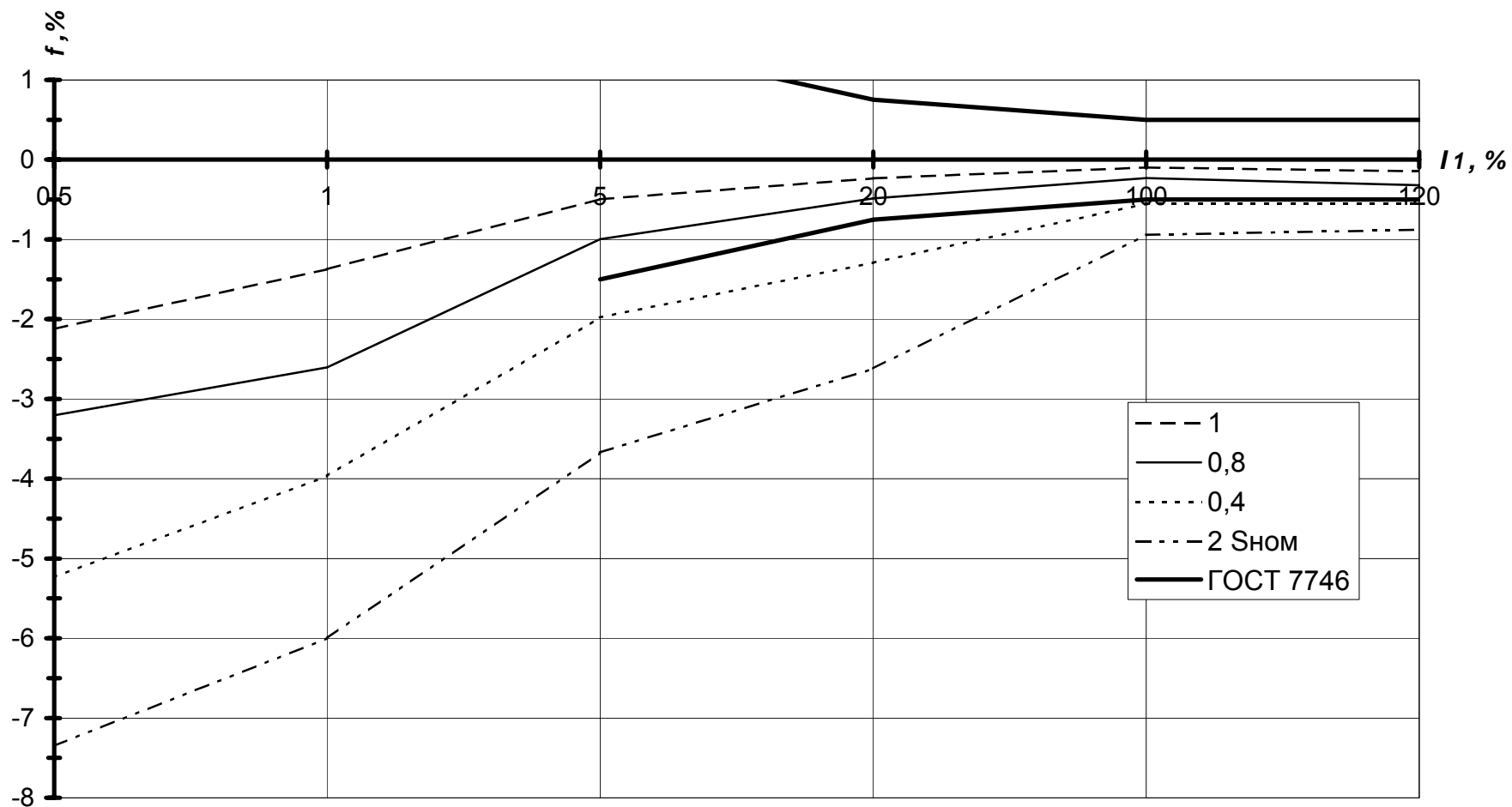


Рис. 4 Токовые погрешности ТПОЛ 10 класса точности 0,5 при различных коэффициентах мощности нагрузки

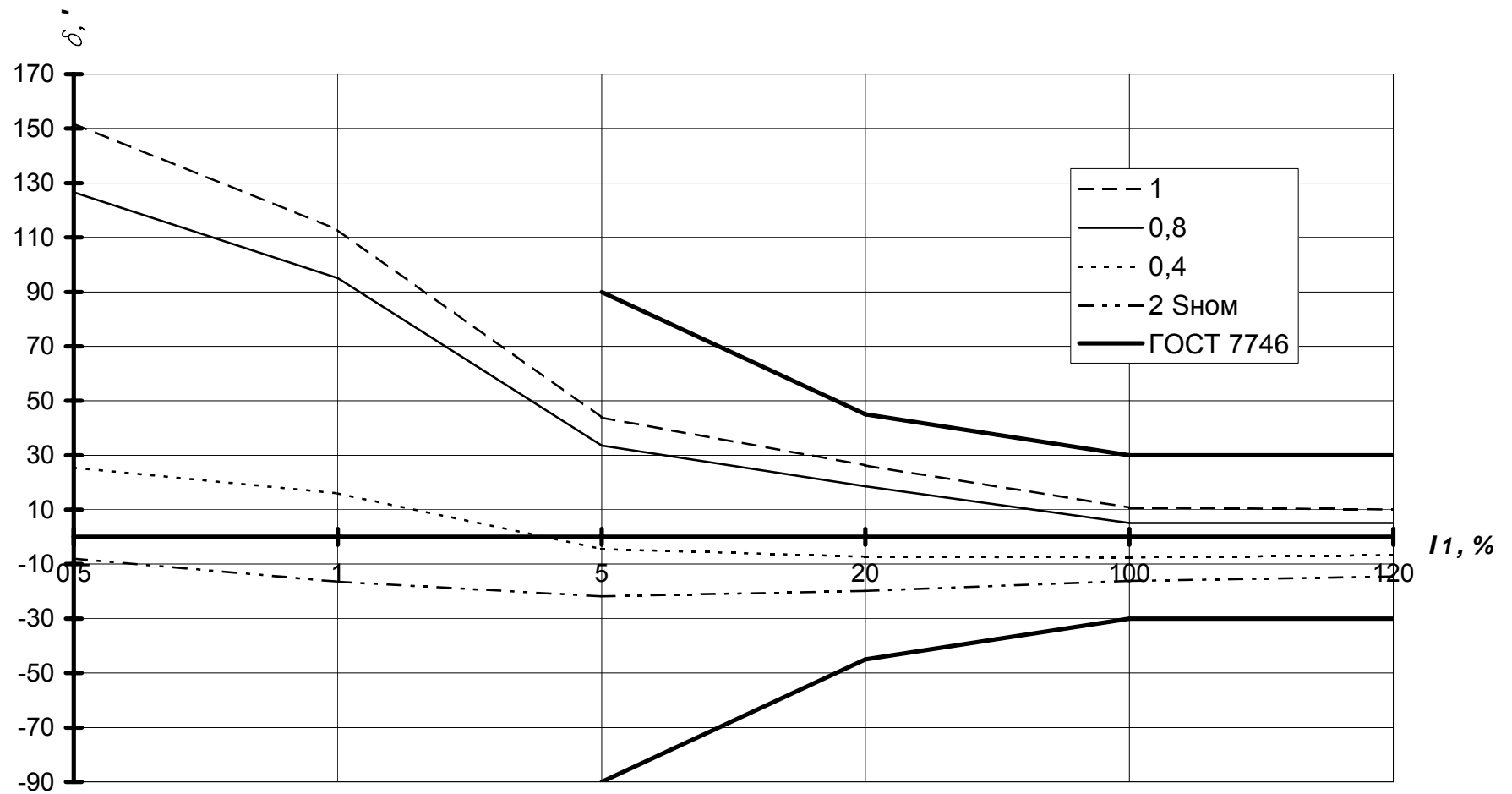


Рис. 5 Угловые погрешности ТОЛ 10-1 класса точности 0,5 при различных коэффициентах мощности нагрузки

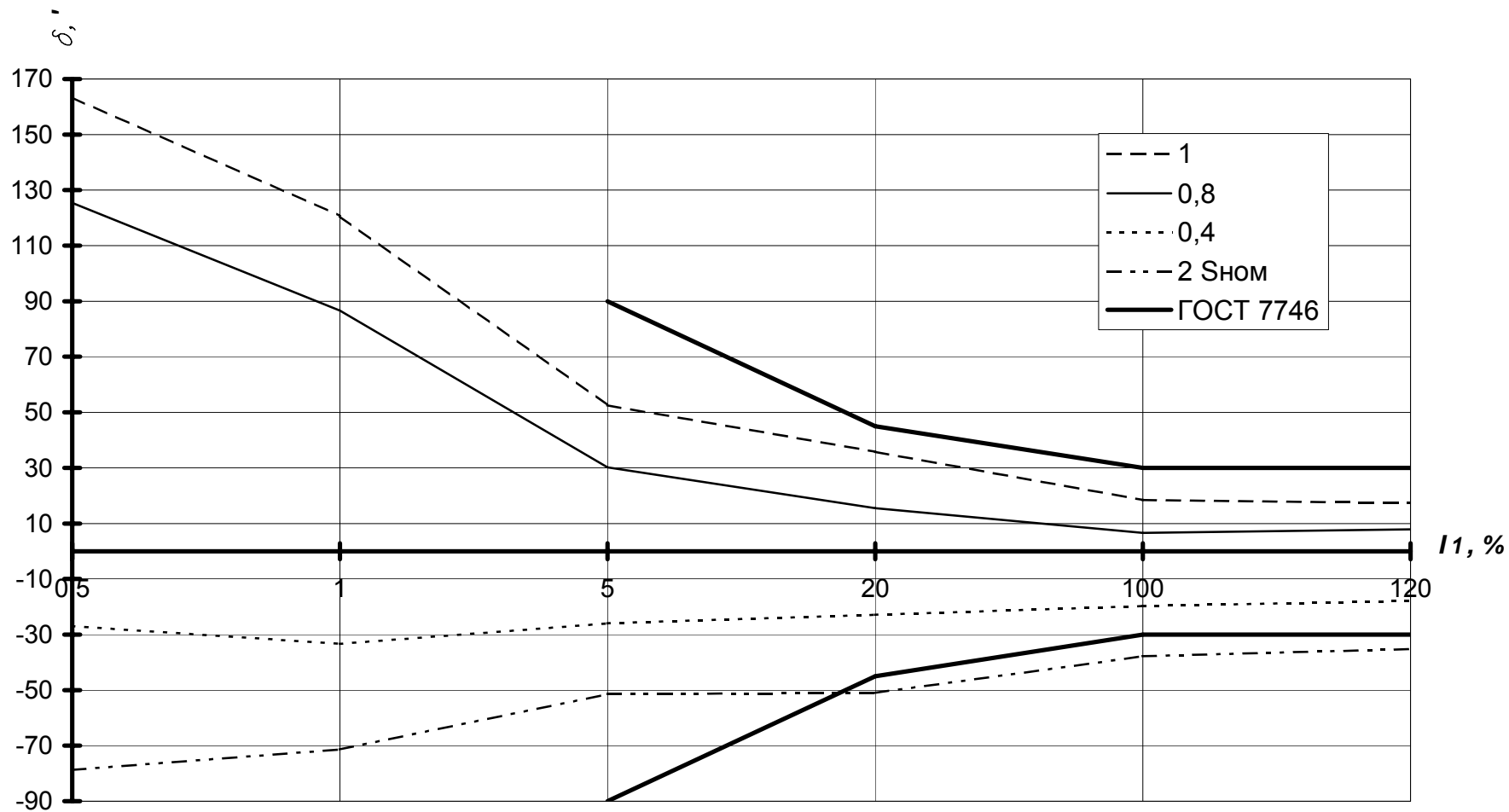


Рис. 6 Угловые погрешности ТПОЛ 10 класса точности 0,5 при различных коэффициентах мощности нагрузки

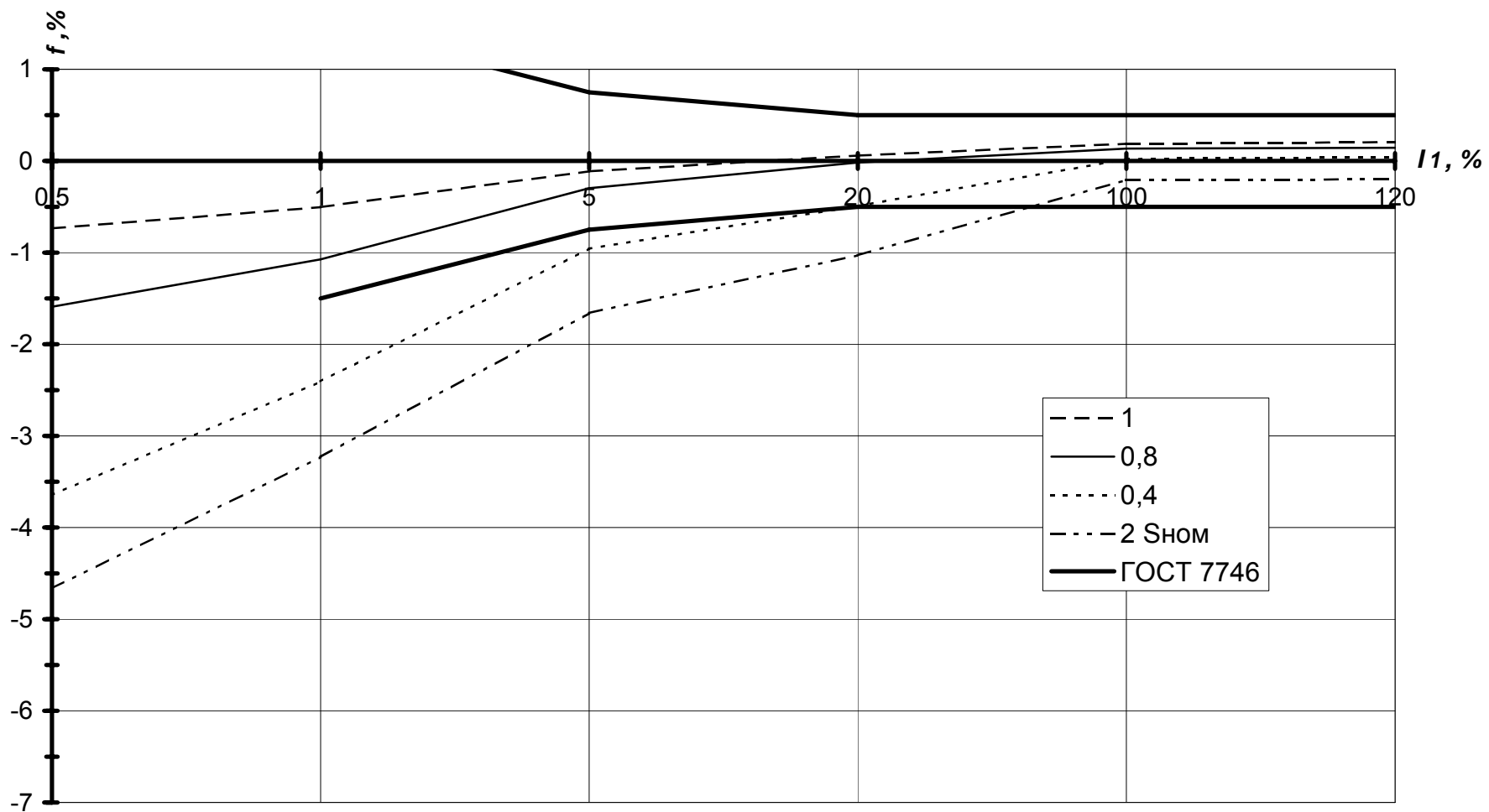


Рис. 7 Токовые погрешности ТОЛ 10-1 класса точности 0,5S при различных коэффициентах мощности нагрузки

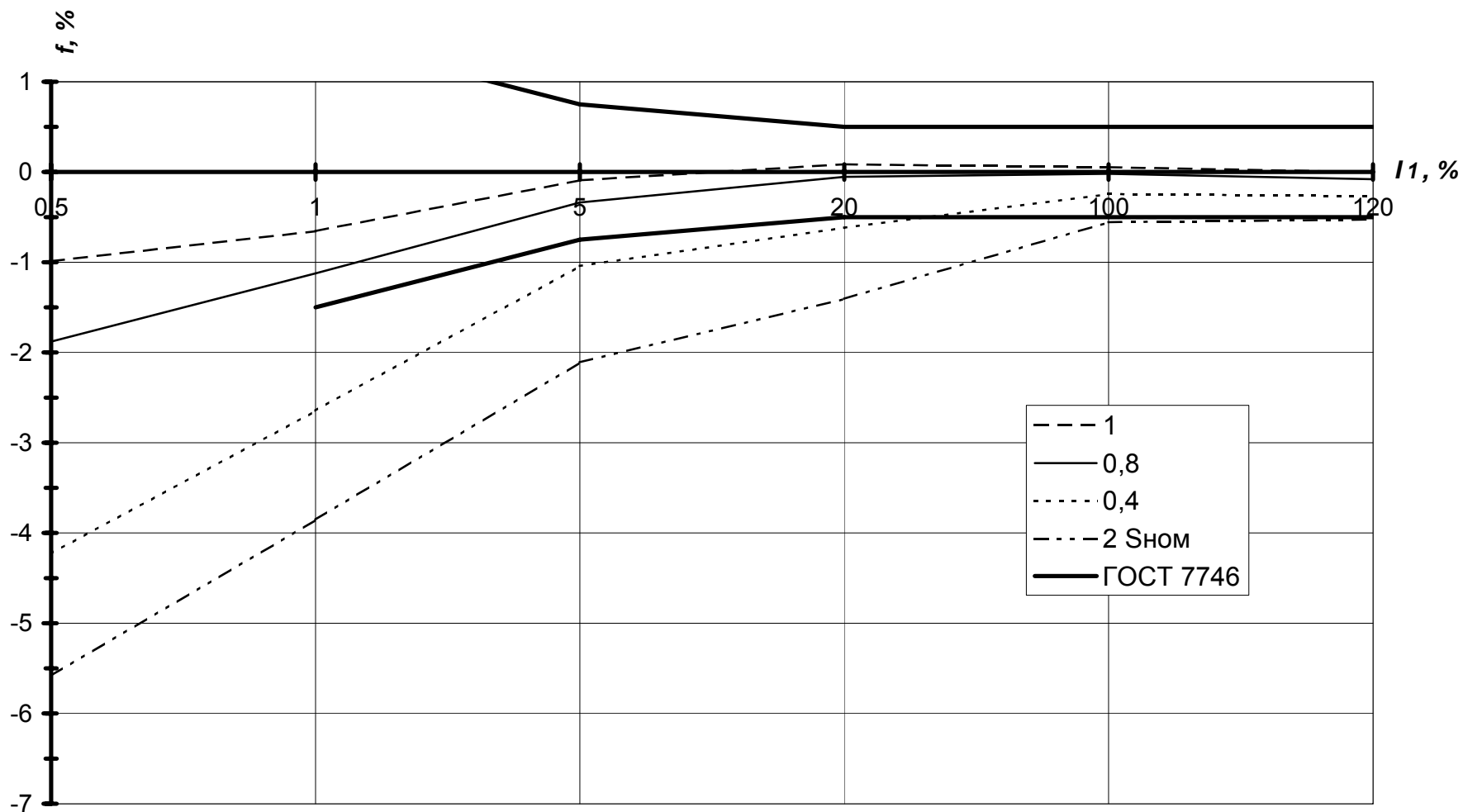


Рис. 8 Токовые погрешности ТПОЛ 10 класса точности 0,5S при различных коэффициентах мощности нагрузки

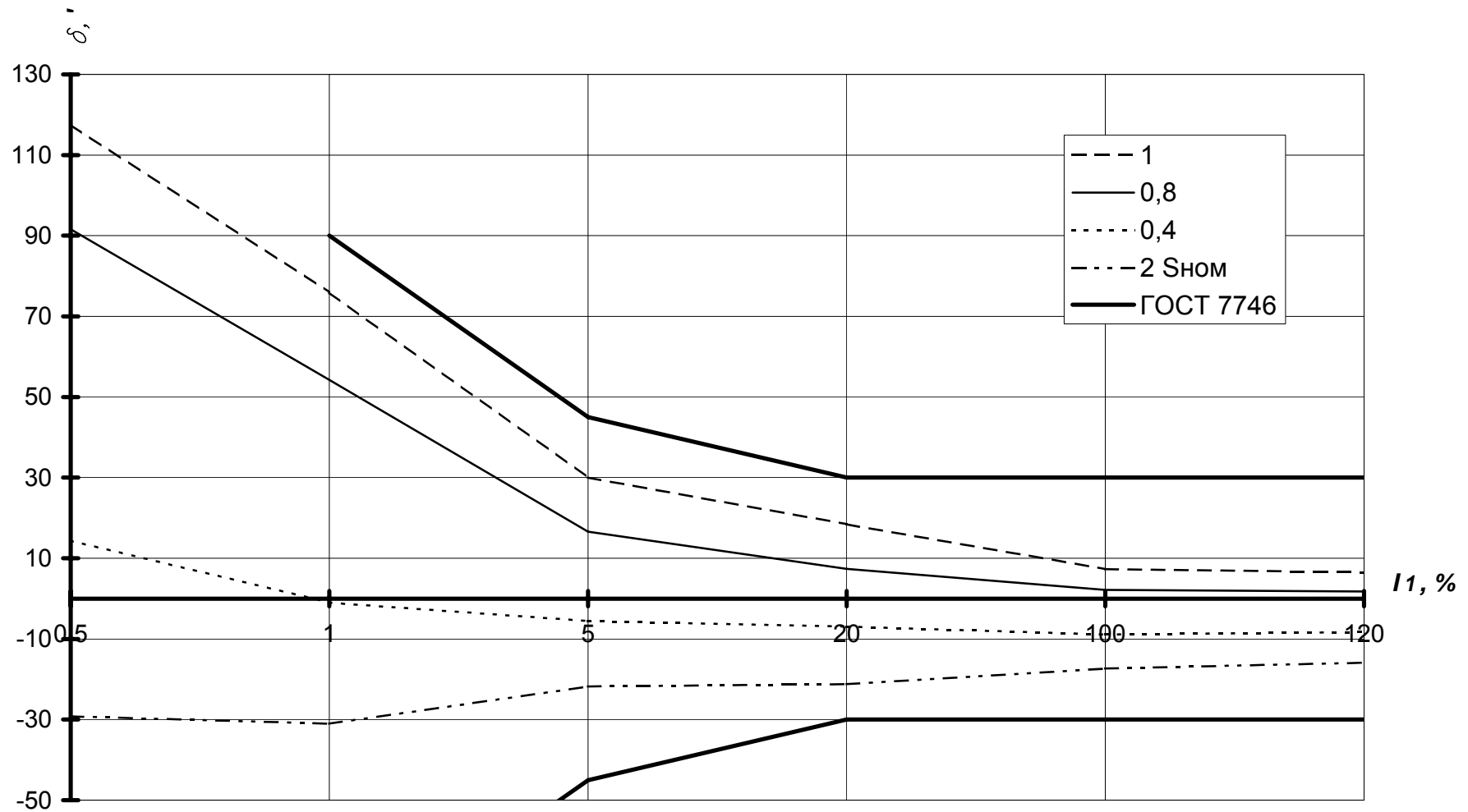


Рис. 9 Угловые погрешности ТОЛ 10-1 класса точности 0,5S при различных коэффициентах мощности нагрузки

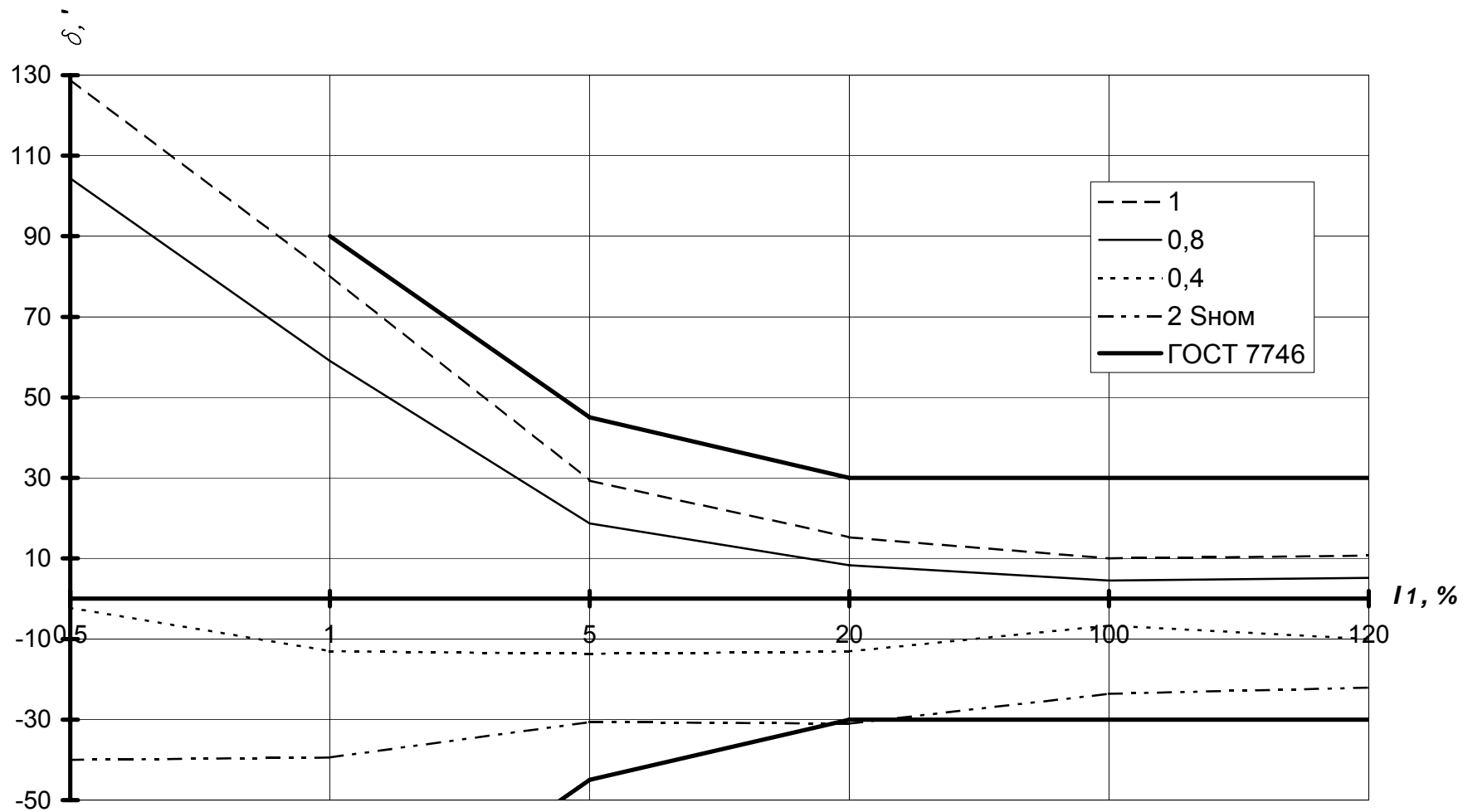


Рис. 10 Угловые погрешности ТПОЛ 10 класса точности 0,5S при различных коэффициентах мощности нагрузки

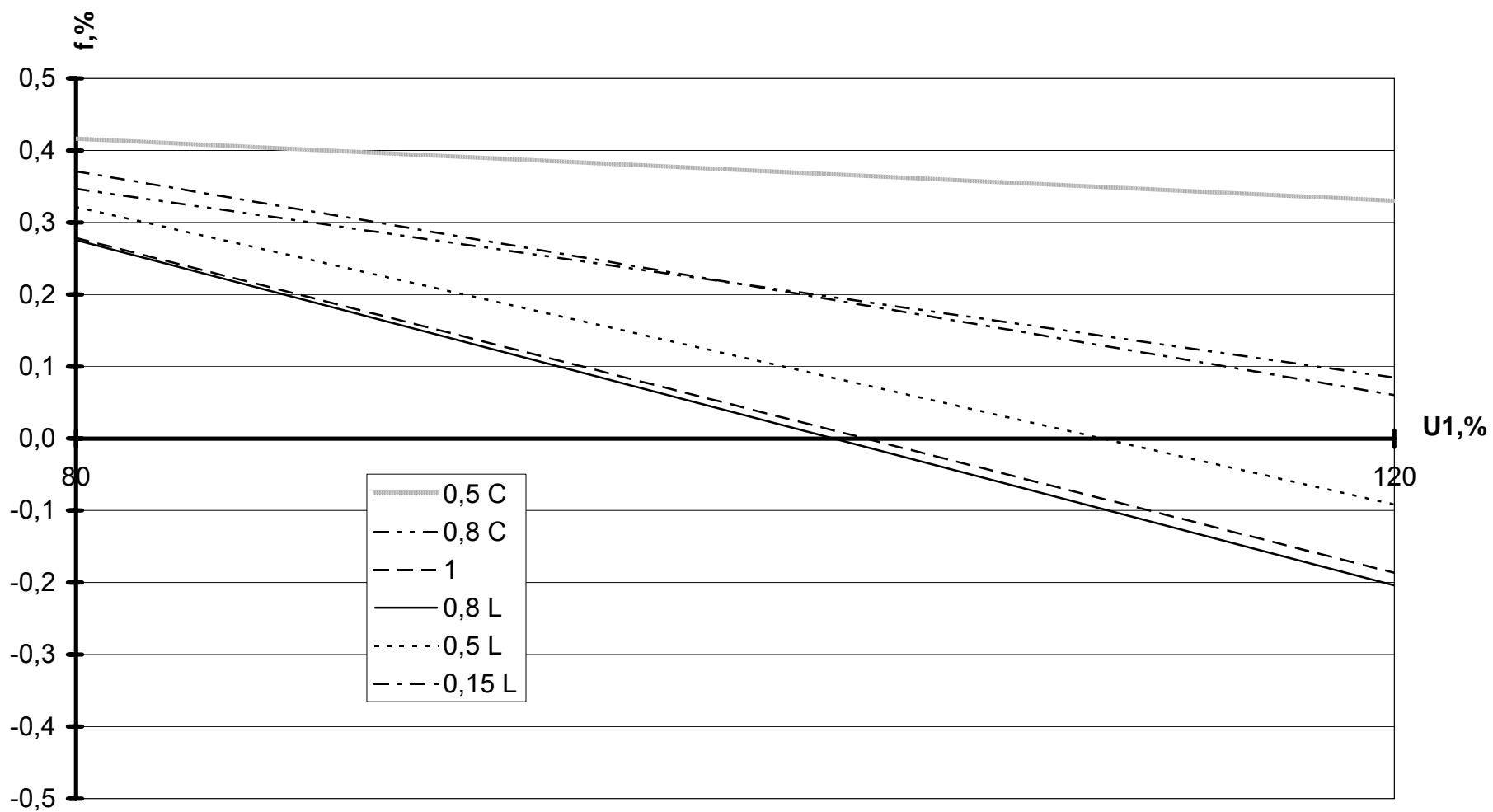


Рис. 11. Зависимость погрешностей напряжения трансформаторов ЗНОЛ.06 от первичного напряжения при различных коэффициентах мощности нагрузки

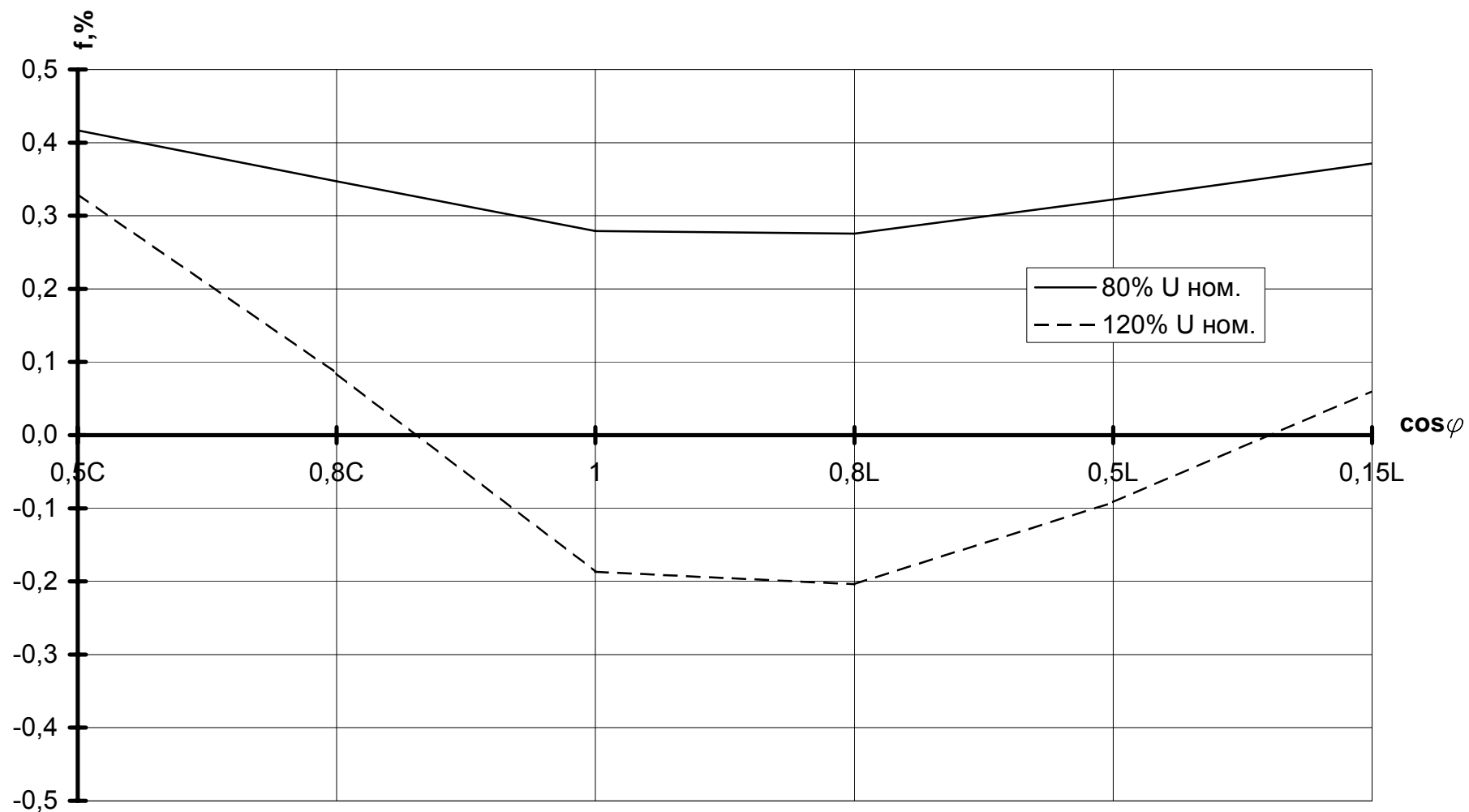


Рис. 12. Зависимость погрешностей напряжения трансформаторов ЗНОЛ.06 от коэффициента мощности нагрузки при различных первичных напряжениях

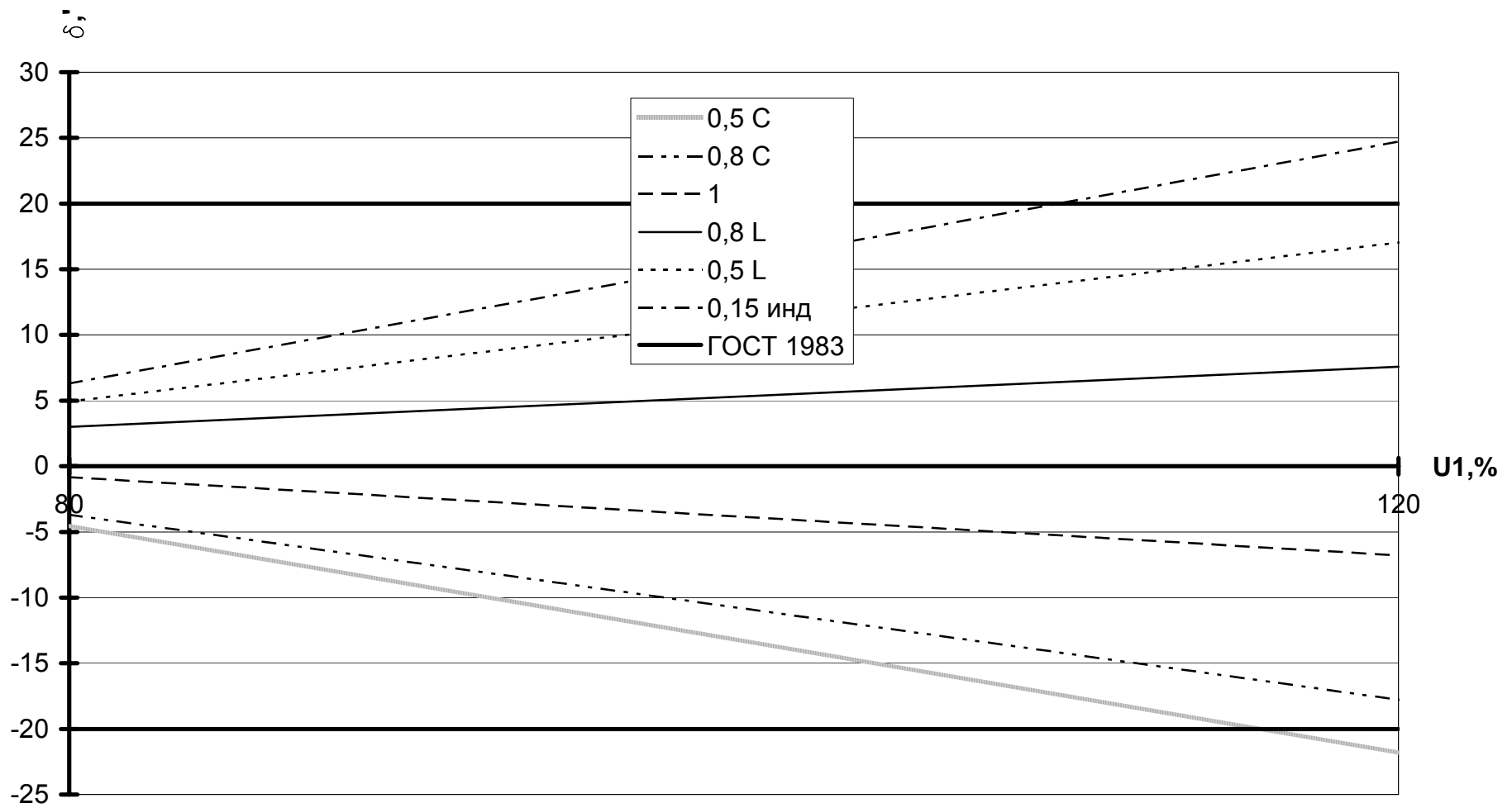


Рис. 13. Зависимость угловых погрешностей трансформаторов ЗНОЛ.06 от первичного напряжения при различных коэффициентах мощности нагрузки

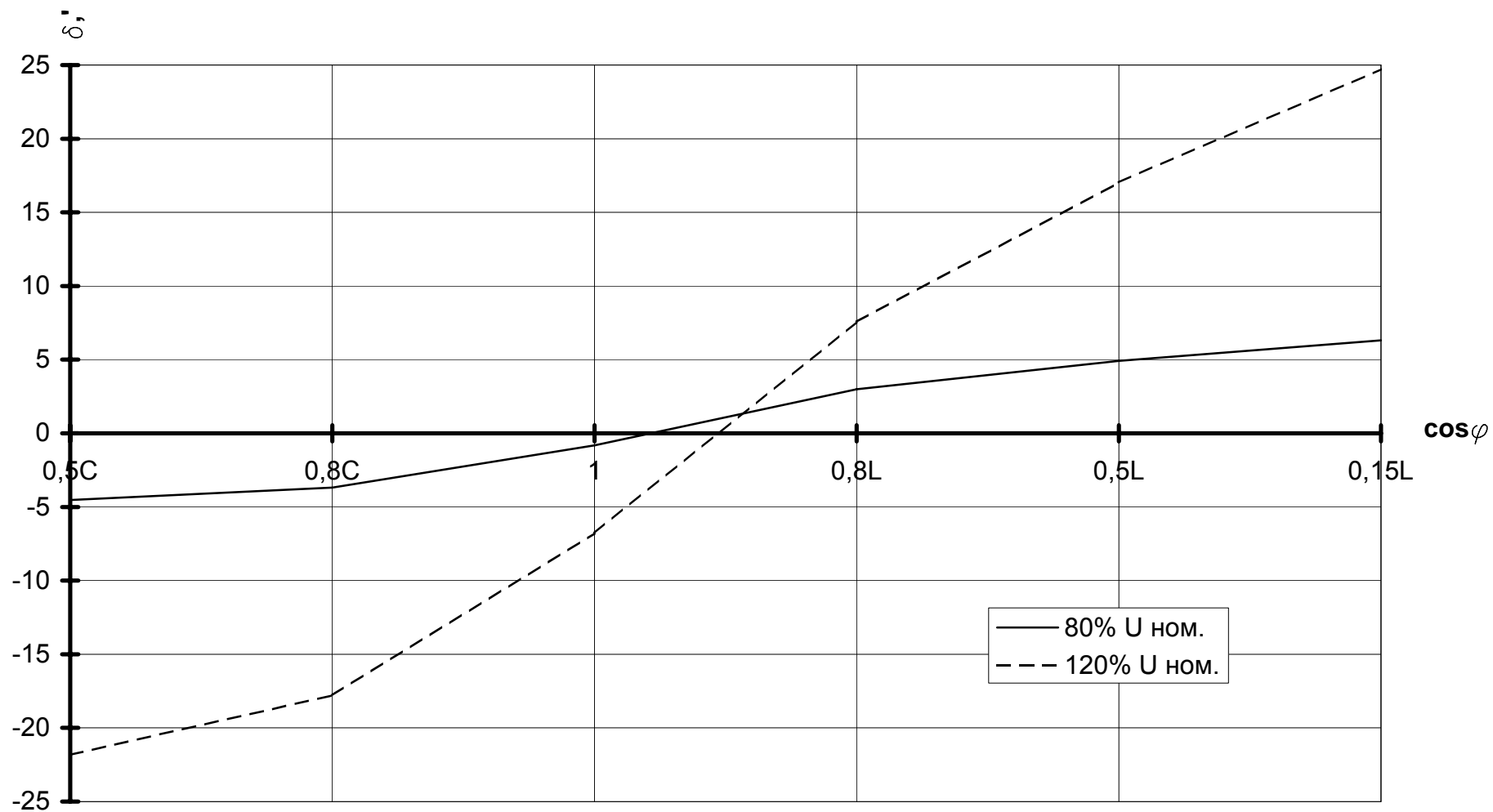


Рис. 14. Зависимость угловых погрешностей трансформаторов ЗНОЛ. 06 от коэффициента мощности нагрузки при различных первичных напряжениях