

Особенности разработки комбинированных измерительных трансформаторов тока и напряжения

Р.С. Плакидин, Д.Н. Ульянов, А.В. Мокеев

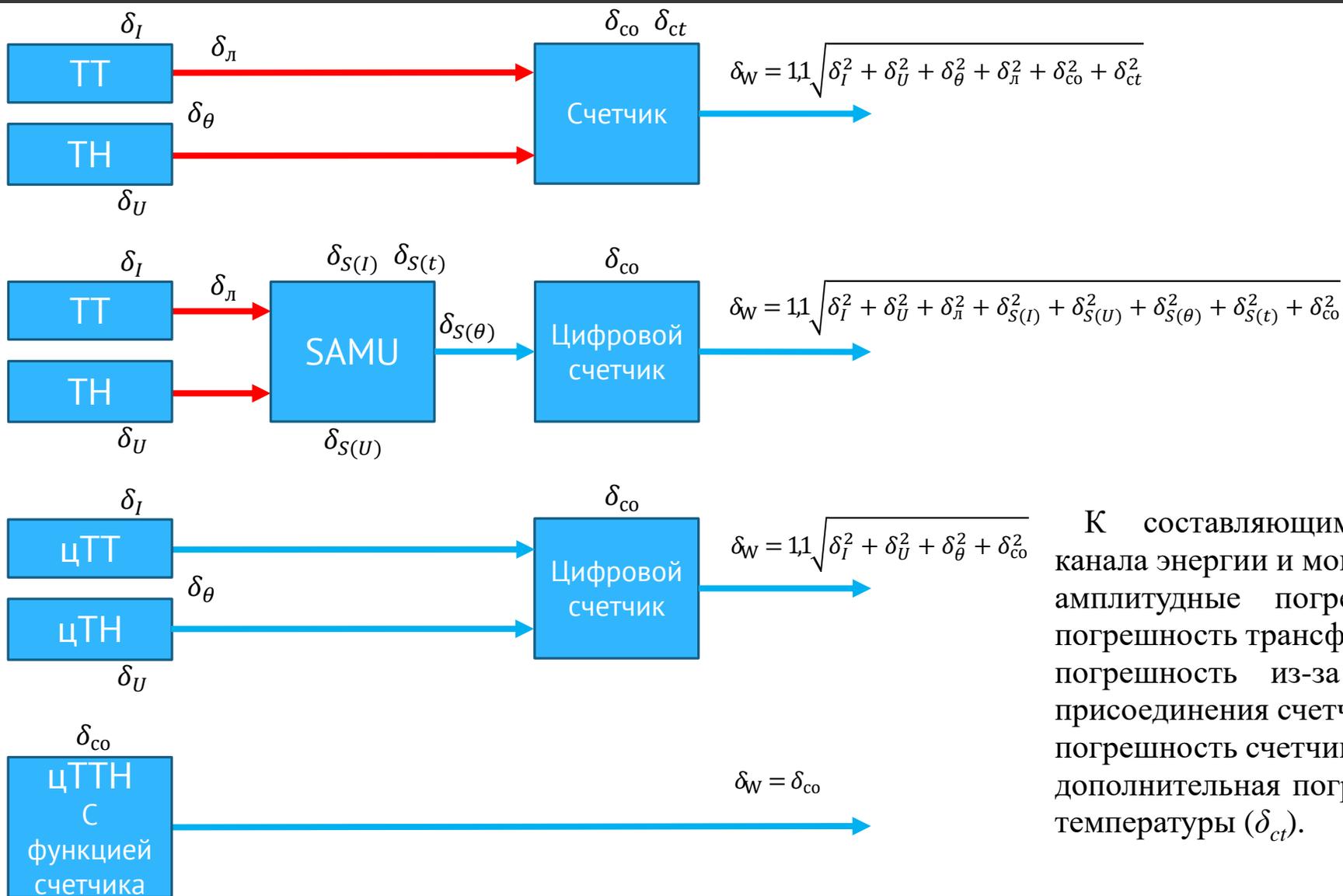
**ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,
Северный (Арктический) федеральный университет**

11-я Научно-практическая конференция «Энергия Белых Ночей»

Санкт-Петербург

29 мая 2024

Структурная схема ИК энергии и мощности



К составляющим погрешности измерительного канала энергии и мощности относятся:

- амплитудные погрешности ТТ (δ_I) и ТН (δ_U),
- погрешность трансформаторной схемы включения (δ_θ),
- погрешность из-за потерь напряжения в линии присоединения счетчика к ТН (δ_λ),
- погрешность счетчика электрической энергии (δ_{co}),
- дополнительная погрешность счетчика при изменении температуры (δ_{ct}).

Вклад угловой погрешности в общую погрешность ИК

Наименование присоединения	Класс точности			φ	$\cos\varphi$	Ток в % от I_n	Составляющие погрешности измерительного канала АИИС КУЭ						Относительная погрешность ИК		Допуск	доля погрешности схемы включения в общей погрешности					
	ТТ	ТН	счетчик				ТТ		ТН		$\delta\theta, \%$	$\delta l, \%$	Счетчик			в1 (медь)	в2 (SV)	%			
							$\delta I, \%$	$\theta I, \text{мин}$	$\delta U, \%$	$\theta U, \text{мин}$			$\delta_{co}, \%$	$\delta_{ct}, \%$				$\delta\theta/\delta v_1$	$\delta\theta/\delta v_2$	$\delta\theta/\text{допуск}$	
	2	3	5				9	10	11	12	18	20	21	22		23	25	26	$\delta\theta/\delta v_1$	$\delta\theta/\delta v_2$	$\delta\theta/\text{допуск}$
ТТ, ТН, счетчик	0,2s	0,2	0,2s	60	0,5	2	0,65	26	0,2	10	1,41	0,25	0,50	0,30	1,9	1,8	5,5	75,9	78,0	25,7	
						5	0,35	15	0,2	10	0,91	0,25	0,50	0,30	1,3	1,2	5,5	69,9	74,2	16,5	
						20-120	0,20	10	0,2	10	0,71	0,25	0,30	0,30	1,0	0,9	3,0	71,0	78,6	23,7	
					37	0,8	2	0,65	26	0,2	10	0,61	0,25	0,50	0,30	1,2	1,1	2,9	49,9	53,3	21,1
							5	0,35	15	0,2	10	0,39	0,25	0,50	0,30	0,9	0,8	2,9	42,0	47,4	13,5
							20-120	0,20	10	0,2	10	0,31	0,25	0,30	0,30	0,7	0,6	1,7	43,3	54,4	18,1
				20	0,94	2	0,65	26	0,2	10	0,30	0,25	0,50	0,30	1,1	1,0	2,9	27,6	30,1	10,2	
						5	0,35	15	0,2	10	0,19	0,25	0,50	0,30	0,9	0,7	2,9	22,3	25,8	6,6	
						20-120	0,20	10	0,2	10	0,15	0,25	0,30	0,30	0,6	0,5	1,7	23,1	30,9	8,8	
				0	1,0	2	0,65	26	0,2	10	0,00	0,25	0,40	0,30	1,0	0,9	2,9	0,0	0,0	0,0	
						5	0,35	15	0,2	10	0,00	0,25	0,20	0,30	0,7	0,5	2,9	0,0	0,0	0,0	
						20-120	0,20	10	0,2	10	0,00	0,25	0,20	0,30	0,6	0,4	1,7	0,0	0,0	0,0	

Погрешность трансформаторной схемы включения

Относительная погрешность вычисления косинуса зависит от абсолютной угловой погрешности $\Delta\varphi$ и значения самого угла φ

$$\delta \cos\varphi = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% = \frac{x' - x}{x} \cdot 100\% = \frac{R \cdot \cos(\varphi \pm \Delta\varphi) - R \cdot \cos\varphi}{R \cdot \cos\varphi} \cdot 100\% =$$

от длины вектора относительная погрешность не зависит

$$= \frac{\cos(\varphi \pm \Delta\varphi) - \cos\varphi}{\cos\varphi} \cdot 100\% =$$

$$\text{раскроем косинус суммы углов} \\ = \frac{\cos\varphi \cdot \cos\Delta\varphi \mp \sin\varphi \cdot \sin\Delta\varphi - \cos\varphi}{\cos\varphi} \cdot 100\% =$$

поскольку угол $\Delta\varphi$ менее 3 градусов, то $\cos\Delta\varphi$ стремится к 1,

тогда

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} \cdot 100\% =$$

градусах

$$\varphi \cdot \text{tg}\varphi$$

тому уравнение принимает

$$\sqrt{\frac{1 - \cos^2\varphi}{\cos^2\varphi}}$$

$$\delta\theta = 0,029 \cdot \sqrt{\theta_J^2 + \theta_U^2} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos^2\varphi}{\cos^2\varphi}}$$

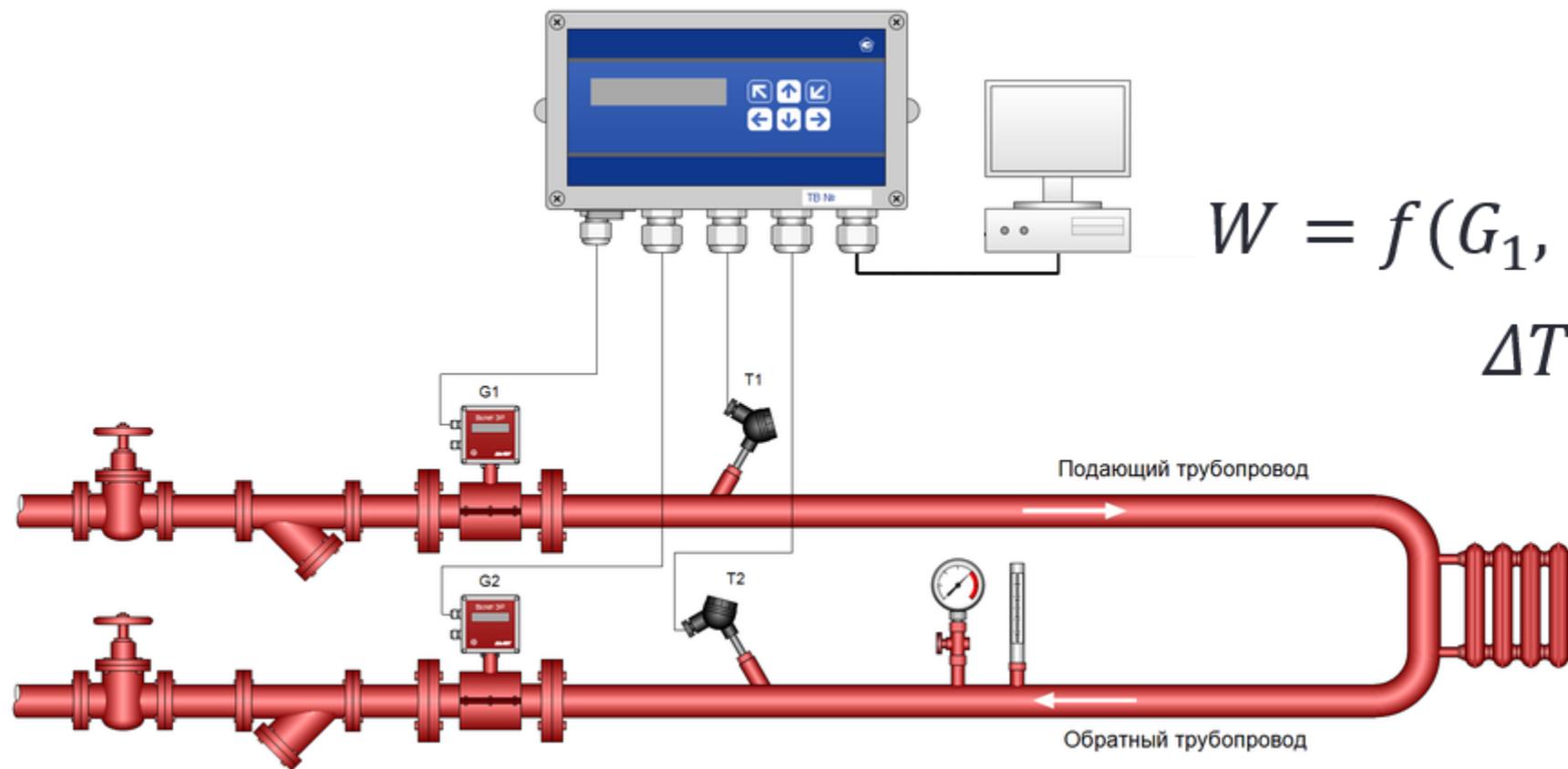
$$\frac{2\pi \cdot 100}{360 \cdot 60} \quad \Delta\varphi \quad \text{tg}\varphi$$

Для расчета суммарной угловой погрешности принято использовать геометрическое суммирование, поскольку угловые погрешности случайные и некоррелированные.

Т.о. формула принимает вид:

$$\delta\theta = 0,029 \cdot \sqrt{\theta_J^2 + \theta_U^2} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi} = 0,029 \cdot \sqrt{\theta_J^2 + \theta_U^2} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos^2\varphi}{\cos^2\varphi}}$$

Комплект термометров



$$W = f(G_1, [G_2], T_1, T_2, [P_1, P_2])$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

Комплект термометров



Комплект термopеобразователей сопротивления КТПТР-01-2-Pt1000-60/8



Комплект термopеобразователей сопротивления КТСПТВХ-07 класс В L45 Pt100 4-х проводная



Комплект термopеобразователей сопротивления КТСПТВХ-02 класс В L45 Pt100 4-х проводная с гильзами



Комплект термopеобразователей сопротивления КТСП-Н исп.6 L27.5 Pt100 кл.В 2-х проводная с кабелем 1.5м



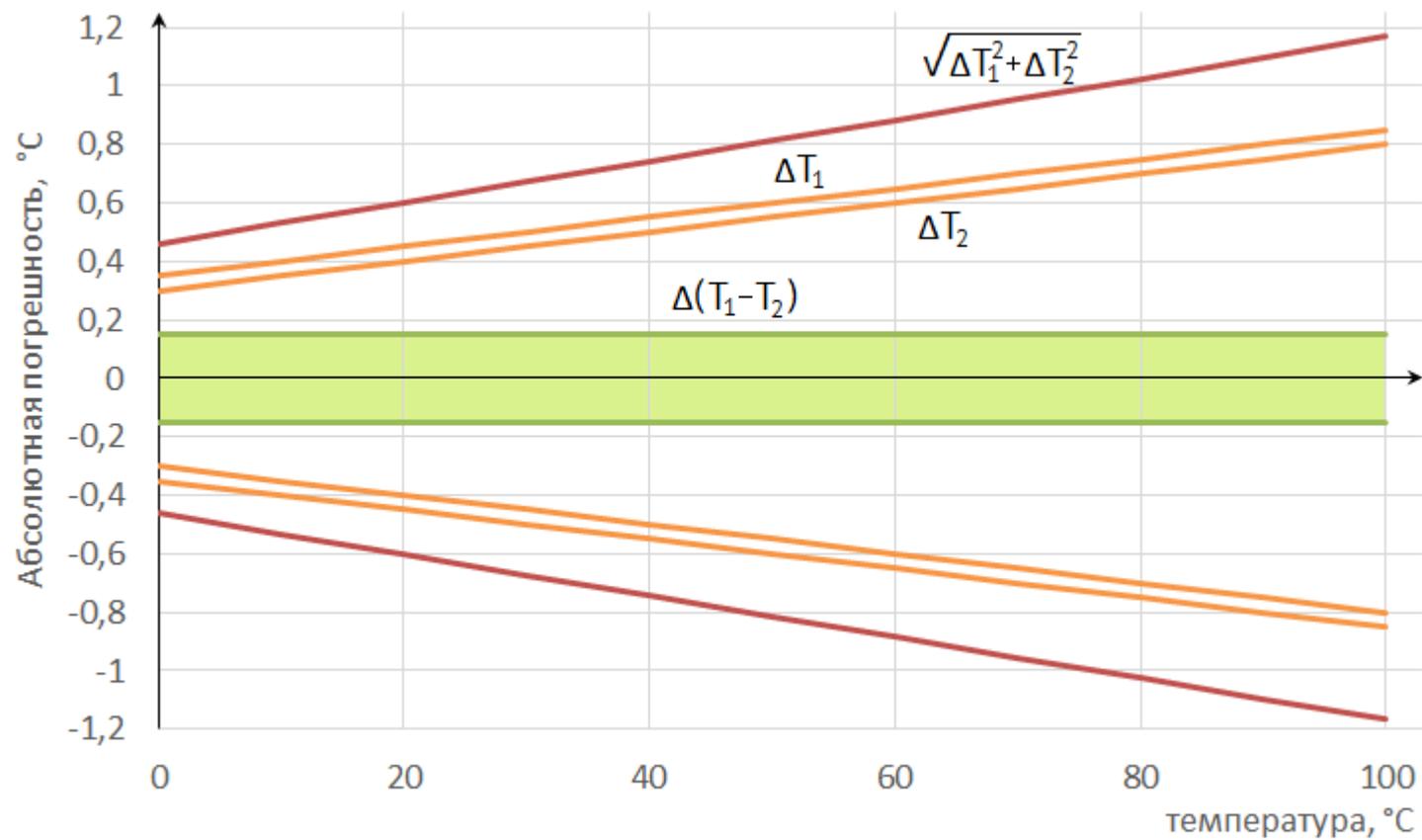
Комплект термopеобразователей сопротивления КТСП-Н исп.1 L45 Pt500 кл.В 2-х проводная с кабелем 1.5м



Комплект термopеобразователей сопротивления КТСП-Н исп.5 L60 Pt1000 кл.А 4-х проводная с гильзами и бобышками

91756-24	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	Pt 500 BM	Общество с ограниченной ответственностью "Водомер" (ООО "Водомер"), Московская обл., г. Мытищи
86750-22	Комплекты термopеобразователей сопротивления	ТСПА-К	СООО "АРВАС", Республика Беларусь
67387-17	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	КТС-П	ООО "Термо+", г.Пермь
65321-18	Комплекты термopеобразователей сопротивления	ТСПА-К	СООО "АРВАС", Беларусь, г.Минск
56651-14	Комплекты термopеобразователей сопротивления	КДТС	Общество с ограниченной ответственностью «Производственное Объединение ОВЕН» (ООО «Производственное Объединение ОВЕН»), Тульская обл., г. Богородицк
52980-13	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	ТЭСМА-К	Общество с ограниченной ответственностью "Энергосберегающая компания "ТЭМ", г. Москва
47133-11	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	КСТВ	ЗАО "НПК "ВИП", г.Екатеринбург
43096-20	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	КТС-Б	ООО "Поинт", Республика Беларусь
41564-14	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	ТР	Фирма "SENSIT s.r.o.", Чехия
38878-17	Комплекты термopеобразователей сопротивления	КТСП-Н	ООО "ИНТЭП", Беларусь, г.Новополоцк
38790-13	Комплекты термopеобразователей сопротивления	КТСМ, КТСП	ЗАО "Промышленная группа "Метран", г.Челябинск
33220-06	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых для измерения разности температур	КТСПр	ОАО "Владимирский завод "Эталон", г.Владимир
33010-12	Комплекты термopеобразователей сопротивления	КТСП	ООО "Теплоприбор-Сенсор", г.Челябинск
32088-06	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	ТСПА-К	СООО "АРВАС", Беларусь, г. Минск;
31430-06	Комплекты термopеобразователей сопротивления платиновых	КТС-Т	ООО "Термопоинт", г.Москва
46156-10	Комплекты термометров сопротивления из платины технических разностных	КТПТР	Закрытое акционерное общество «ТЕРМИКО» (ЗАО «ТЕРМИКО»), г. Москва, Зеленоград
46153-10	Комплекты термометров сопротивления	КТП-9201	ООО НПФ "Сенсорика", г.Екатеринбург
46019-10	Комплекты термометров сопротивления платиновых	Pt 500	ЗАО "Тепломер", г.Мытищи; ООО "ПроектСтройМонтаж", г.Мытищи.
41217-09	Комплекты термометров сопротивления платиновых	КТП	ООО Малоярославецкий завод "ИВК-Саяны", г.Малоярославец;

Комплект термометров



Класс допуска ТС комплекта по ГОСТ 6651-2009	B
Допуск ТС комплекта по ГОСТ 6651-2009, °C	$\pm(0,3 + 0,005 \cdot t)$

Комплект трансформаторов



Пределы допускаемой угловой погрешности между фазным напряжением и током, $\varphi_{UI} = \pm 15'$



Класс точности	Первичный ток, % номинального значения	Предел допускаемой погрешности	
		токовой, %	угловой
0,2S	1	$\pm 0,75$	± 30
	5	$\pm 0,35$	± 15
	20–120	$\pm 0,2$	± 10
0,5S	1	$\pm 1,5$	± 90
	5	$\pm 0,75$	± 45
	20–120	$\pm 0,5$	± 30

Класс точности	Предел допускаемой погрешности	
	напряжения, %	угловой
0,1	$\pm 0,1$	$\pm 5'$
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 10'$
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 20'$
1,0	$\pm 1,0$	$\pm 40'$

ГОСТ Р МЭК 61869-4—2019

5.401.2 Взаимное влияние

Во время работы трансформатора тока в диапазоне от 5 % значения номинального тока до нормированного тока длительного нагрева, пределы погрешности напряжения и угла фазового сдвига трансформатора напряжения не должны превышать пределы погрешностей напряжения и угла фазового сдвига, соответствующего его классу точности, при номинальном значении нагрузки в диапазоне от 80 % до 120 % номинального значения напряжения.

Во время работы трансформатора напряжения от 80 % номинального значения напряжения до номинального напряжения, помноженного на номинальный коэффициент напряжения, пределы токовой погрешности и угла фазового сдвига трансформатора тока не должны превышать пределы токовой погрешности и угла фазового сдвига в диапазоне тока, соответствующего его классу точности и в диапазоне нормированной паспортной нагрузки.

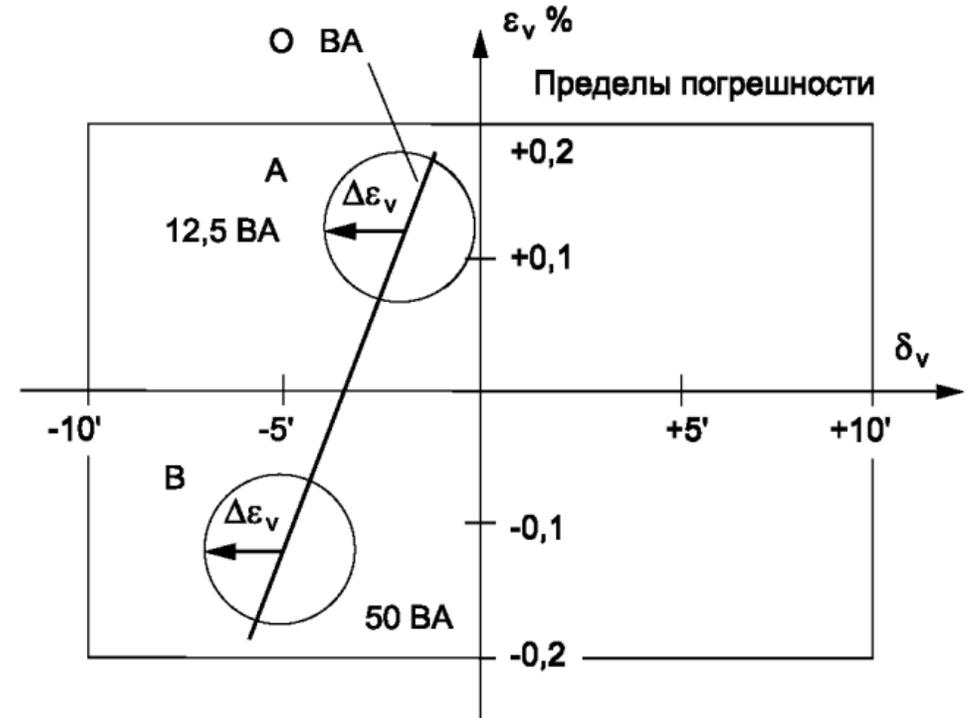
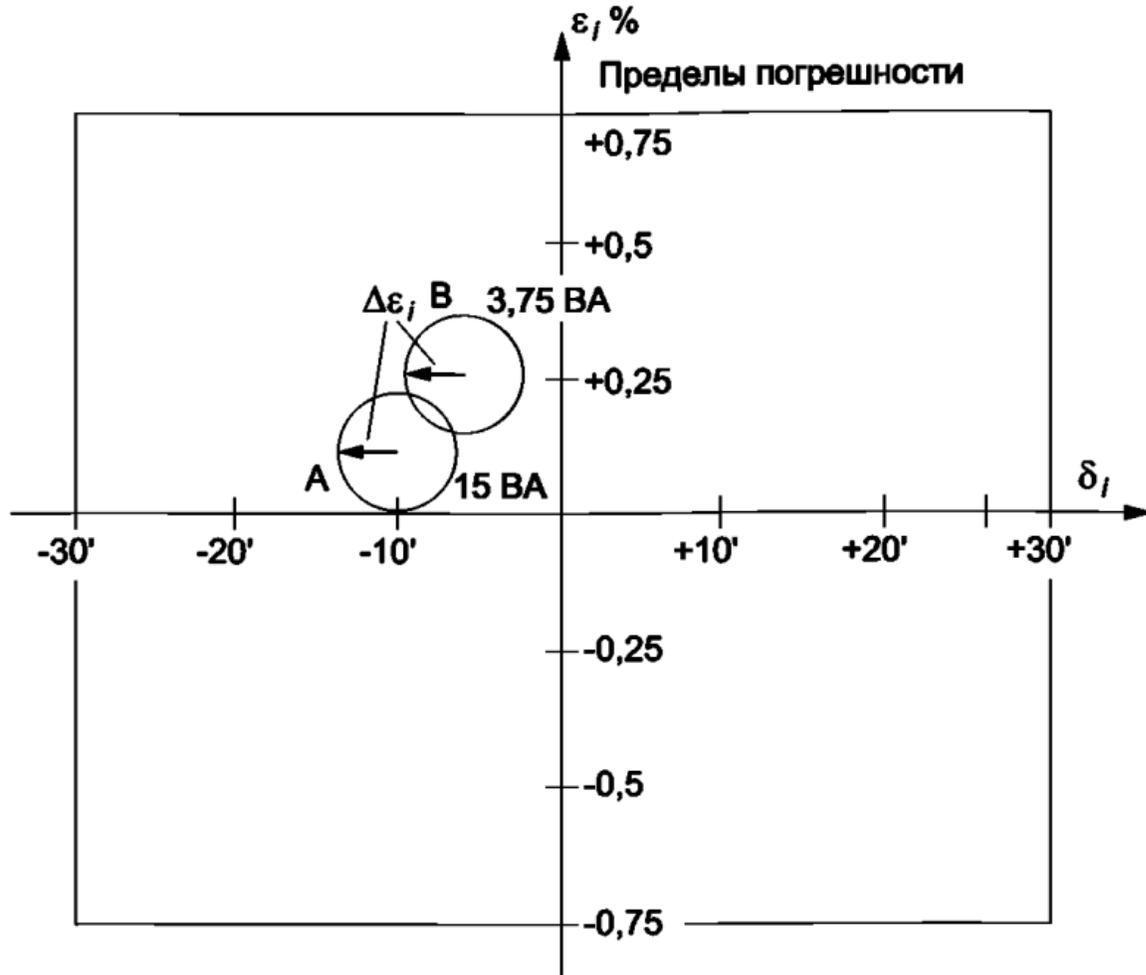
Дополнительные требования к комбинированным трансформаторам

sive voltage transformers

power instrument transformers

	61869-14	Additional requirements for current transformers for DC applications
	61869-15	Additional requirements for voltage transformers for DC applications
	61869-16	TEDS (transducer electronic data sheet) for instrument transformers
	61869-99	Glossary

IEC 61869-4
ГОСТ Р МЭК 61869-4—2019



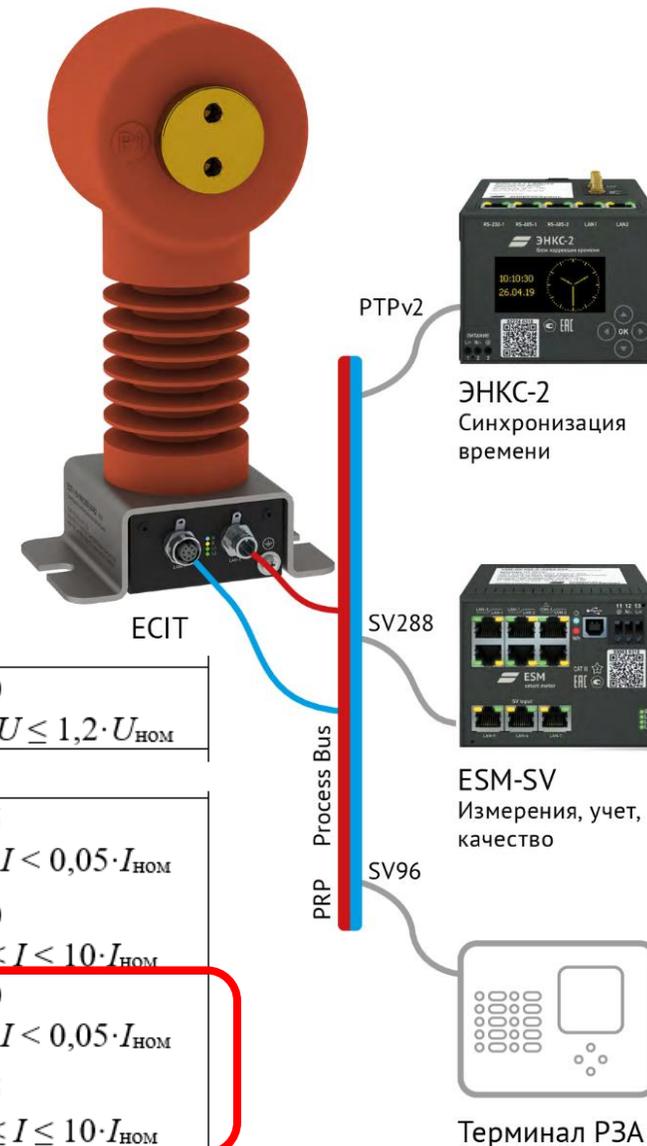
Комбинированные трансформаторы



Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
73766-19 62261-15 55601-13	Трансформаторы комбинированные	НТОЛП-НТЗ, ЗНТОЛП-НТЗ	Общество с ограниченной ответственностью "Невский Трансформаторный Завод "Волхов" (ООО "НТЗ "Волхов"), г. Великий Новгород
54310-13	Трансформаторы комбинированные	EJGF	Фирма "PIFFNER Deutschland GmbH", Германия
52351-12	Трансформаторы комбинированные	KA-123, KA-245	Фирма "Electrotecnica Artech Hermanos S.L.", Испания
50642-12	Трансформаторы комбинированные	KGBE12 (4МК12), KGBE24 (4МК24), KGBE40,5 (4МК40,5)	Фирма "RITZ Instrument Transformers GmbH", Германия
49012-12	Трансформаторы комбинированные	KOTEF 245	Фирма "AREVA T&D Messwandler GmbH", Германия
39473-13 39473-08	Трансформаторы комбинированные	SVAS 123/245/362/550	Фирма "Trench Germany GmbH", Германия
38887-14 38887-08	Трансформаторы комбинированные	AVG 123/245	Фирма "Trench Italia S.r.l.", Италия
53609-13 37850-08	Трансформаторы комбинированные	VAU-123/245/362	Фирма "KONCAR - Instrument transformers Inc.", Хорватия
35647-07	Трансформаторы комбинированные	KGBE12-40,5 (4МК12-40,5)	Фирма "RITZ Instrument Transformers GmbH", Германия
30828-05	Трансформаторы комбинированные	JUK 123a	Фирма "ABB Sp. z.o.o.", Польша
82812-21	Трансформаторы тока и напряжения измерительные комбинированные электронные	TECV	Общество с ограниченной ответственностью "Оптиметрик" (ООО "Оптиметрик"), г. Ярославль
75752-19	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные	ТГК	Общество с ограниченной ответственностью "ЗЭТО-Газовые Технологии" (ООО "ЗЭТО-Газовые Технологии"), Псковская обл., г. Великие Луки
72862-18	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные электронные	ТТНК	АО "Профотек", г. Москва; ООО "НПЦ Профотек", г. Москва
70302-18	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные цифровые	ЦТН	ООО НПО "Цифровые измерительные трансформаторы", г.Иваново



Комбинированный измерительный трансформатор ECIT



Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига напряжения, '

± 20
при $0,8 \cdot U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,2 \cdot U_{\text{НОМ}}$

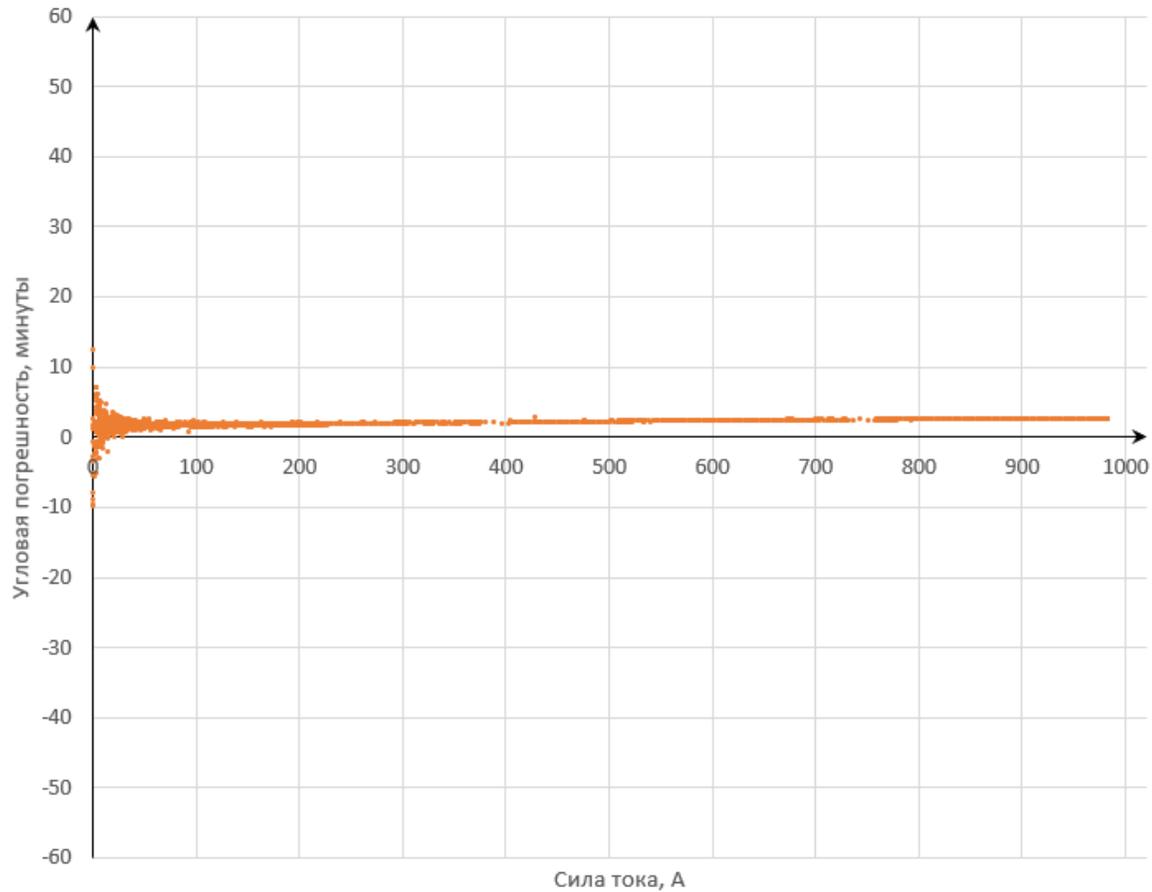
Пределы допускаемой абсолютной погрешности угла фазового сдвига силы тока, '

± 45
при $0,01 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I < 0,05 \cdot I_{\text{НОМ}}$
 ± 30
при $0,05 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I < 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$

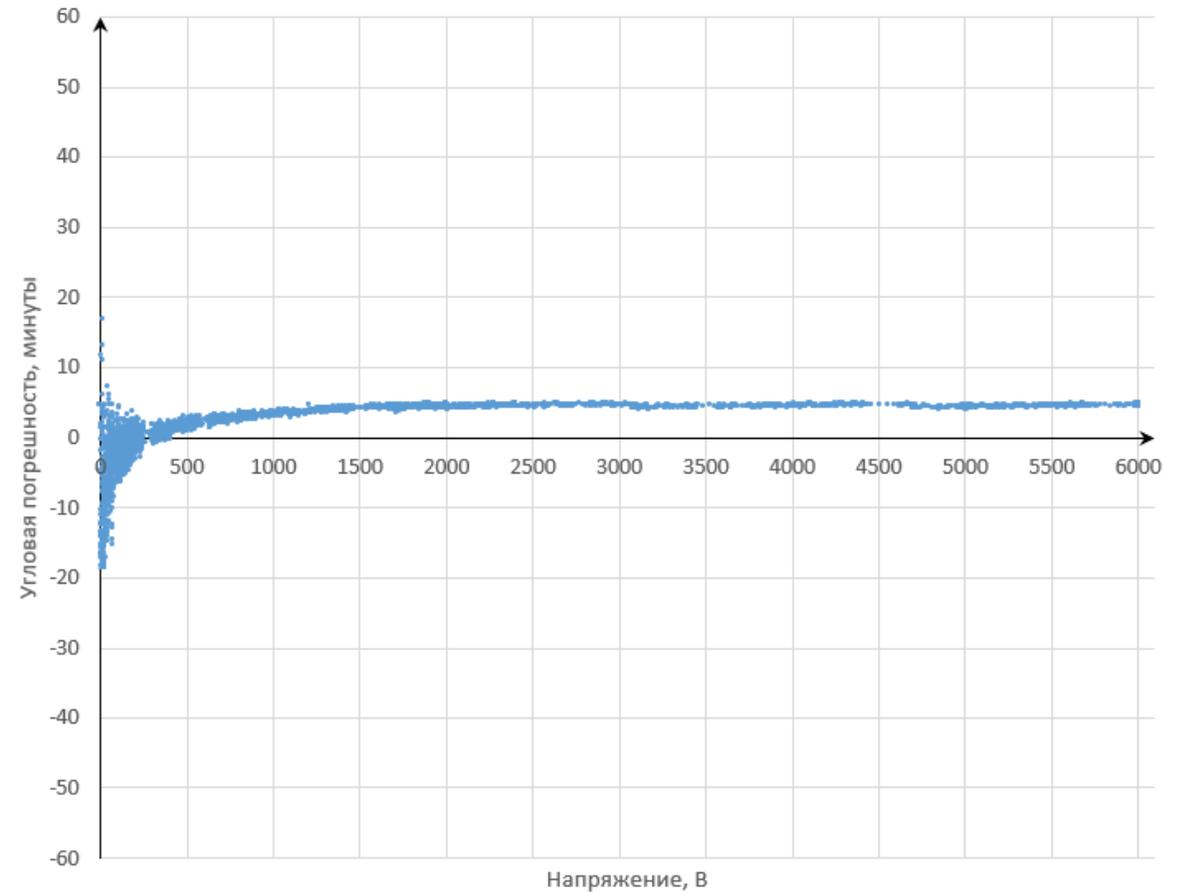
Пределы допускаемой абсолютной угловой погрешности фазового сдвига между фазным напряжением и током, '

± 20
при $0,01 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I < 0,05 \cdot I_{\text{НОМ}}$
 ± 15
при $0,05 \cdot I_{\text{НОМ}} \leq I \leq 10 \cdot I_{\text{НОМ}}$

угловая погрешность **силы тока** (ЕСИТ) с компенсаций



угловая погрешность **напряжения** (ЕСИТ) с компенсацией

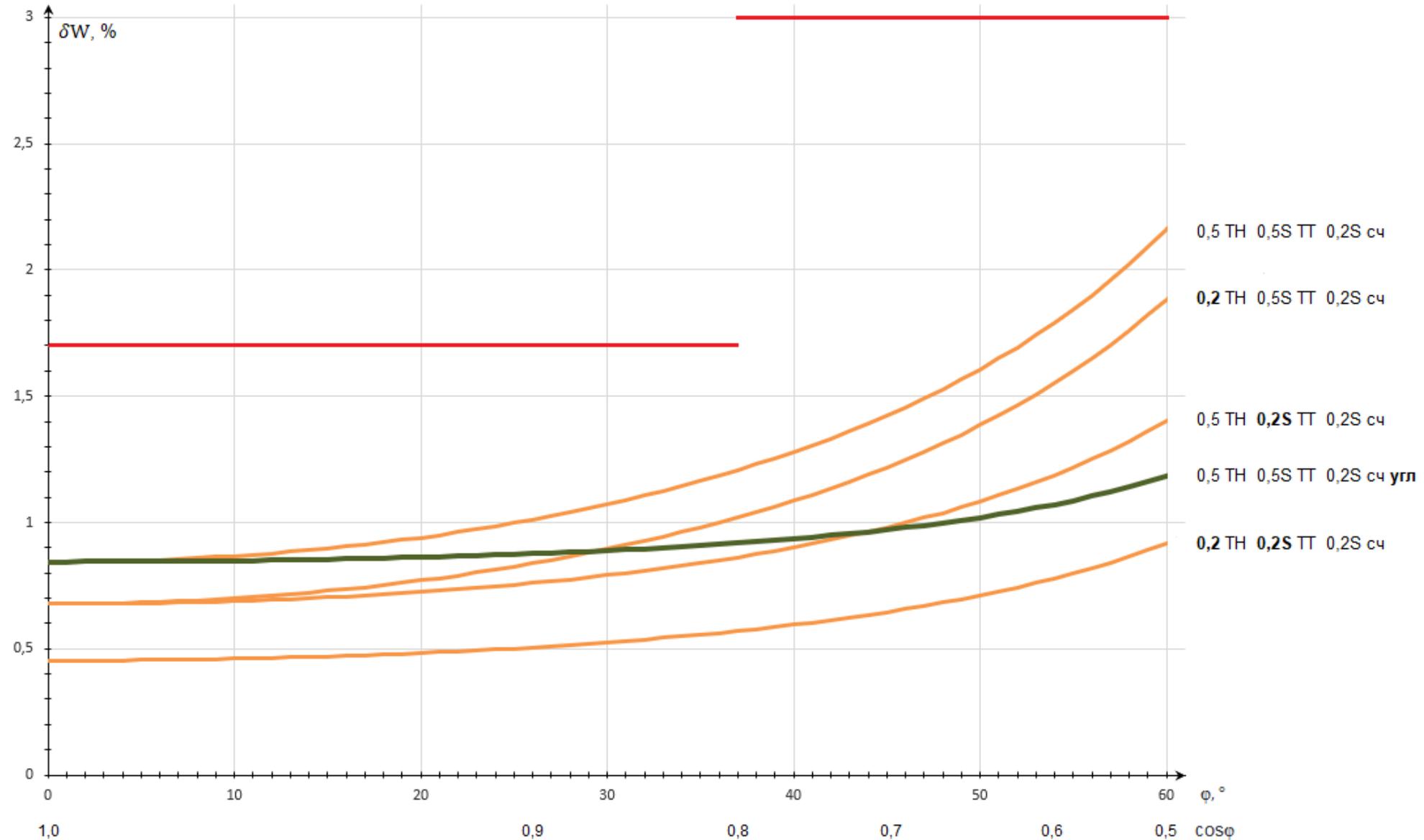


Влияние угловой погрешности

φ	$\cos\varphi$	Ток в % от I_n	Допуск	Относительная погрешность ИК				
60	0,5	2	5,5	1,9	2,2	2,0	4,7	4,8
		5	5,5	1,3	1,7	1,5	2,8	3,0
		20-120	3,0	1,0	1,5	1,3	1,9	2,2
37	0,8	2	2,9	1,2	1,4	1,8	2,5	2,6
		5	2,9	0,9	1,1	1,3	1,6	1,7
		20-120	1,7	0,7	1,0	1,0	1,1	1,3
20	0,94	2	2,9	1,1	1,2	1,7	1,9	1,9
		5	2,9	0,9	1,0	1,2	1,2	1,3
		20-120	1,7	0,6	0,8	1,0	0,9	1,0
		ТН		0,2	0,5	0,5	0,2	0,5
		ТТ		0,2S	0,2S	0,5S	0,5S	0,5S
		сч		0,2S	0,2S	0,2S	0,2S	0,2S

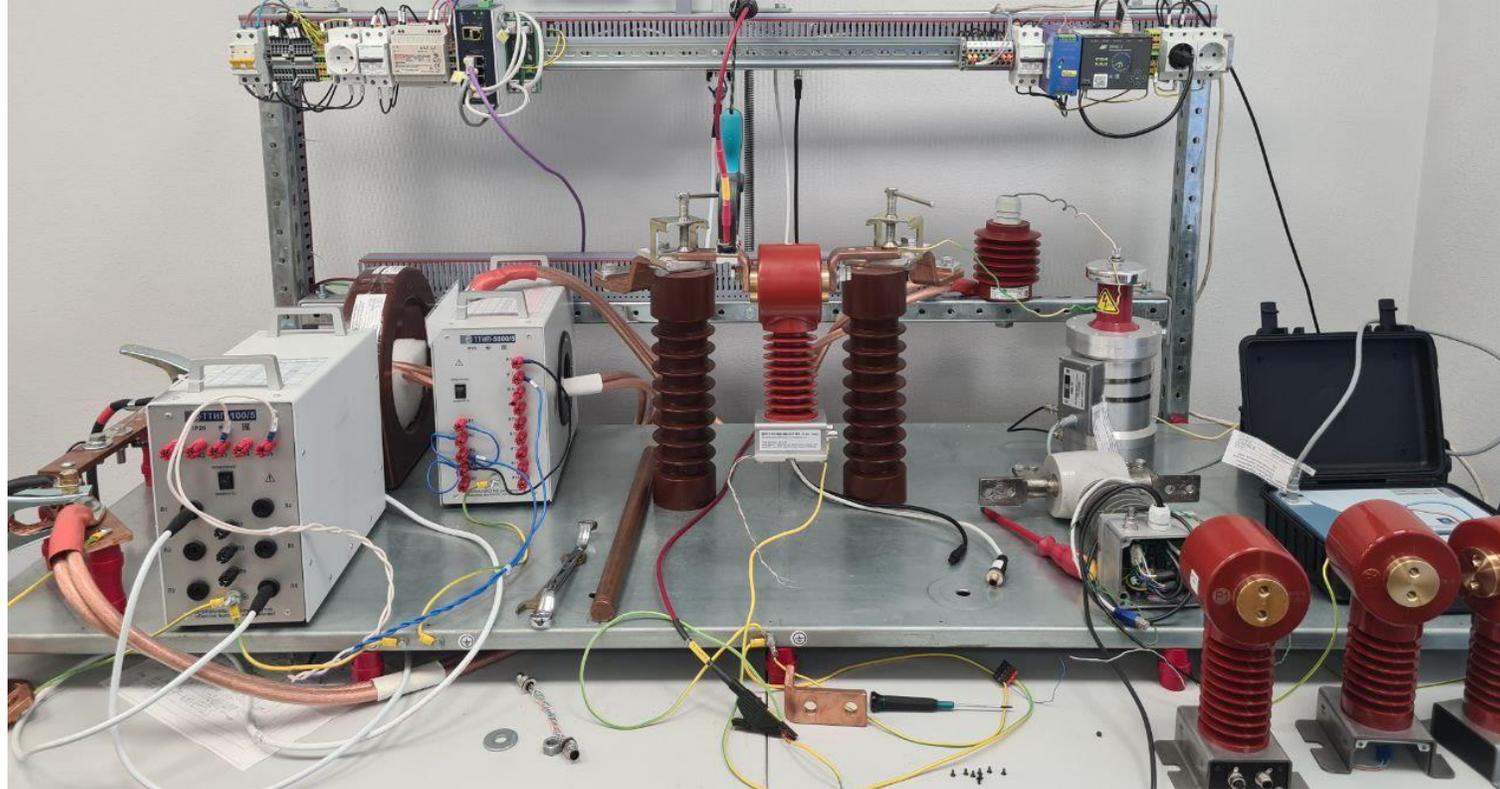
угол φ

Влияние угловой погрешности



Угловая погрешность вносит существенный вклад в суммарную погрешность измерительного канала электрической энергии и мощности.

Повышение точности измерительного канала электрической энергии и мощности возможно **при нормировании абсолютной погрешности фазового сдвига** между фазным напряжением и силой тока **для комбинированных измерительных трансформаторов.**



Плакидин Роман Сергеевич

ведущий инженер по метрологии

rplakidin@ens.ru