

**Украинский высоковольтный трансформатор тока с
литой изоляцией**

ООО НПП «Укртрансэнерго»

Украинский высоковольтный трансформатор тока с литой изоляцией

В распределительных сетях 6-10кV на территории Украины в эксплуатации находятся около 100 000 штук измерительных трансформаторов тока (ТТ) с литой изоляцией, в основном производства Свердловского завода трансформаторов тока и ОАО «Самарский трансформатор».

Коммерческий учет электроэнергии по стороне высокого напряжения (6-10кV) строится на основе измерительных ТТ, измерительных трансформаторов напряжения (ТН) и трехфазных счетчиков электроэнергии. Кроме этого большая часть измерительных ТТ имеет дополнительную защитную обмотку, с которой подается сигнал на устройства релейной защиты при аварийных ситуациях.

Ежегодная потребность потребителей в высоковольтных измерительных ТТ с литой изоляцией составляет, по нашим оценкам, не менее 10 000шт., однако до недавнего времени подобные ТТ в Украине не выпускались.

С августа 2007 г. НПП «Укртрансэнерго» г. Днепропетровск после успешного завершения государственных приемочных испытаний начало серийное производство двух модификаций измерительных ТТ с литой изоляцией: ТОЛУ-10 и ТПЛУ-10, которые включены в Государственный реестр средств измерительной техники под номером У2615-07.

При разработке технического задания и его согласования с Минтопэнерго Украины были определены основные технические характеристики ТТ с учетом не только требований ГОСТ 7746-2001 «Трансформаторы тока» Общие технические условия, но и современных требований потребителей, а именно:

- обеспечение погрешности вторичной обмотки для измерения не хуже класса 0,5S;
- обеспечение стойкости к намагничиванию измерительной обмотки;
- уменьшение коэффициента безопасности;
- снижение веса ТТ;
- сохранение крепежных и присоединительных размеров эксплуатируемых трансформаторов;
- увеличение межповерочного интервала.

Нужен ли класс 0,5S?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим график зависимости модуля предельной относительной погрешности ТТ для различных классов точности (Рисунок 1).

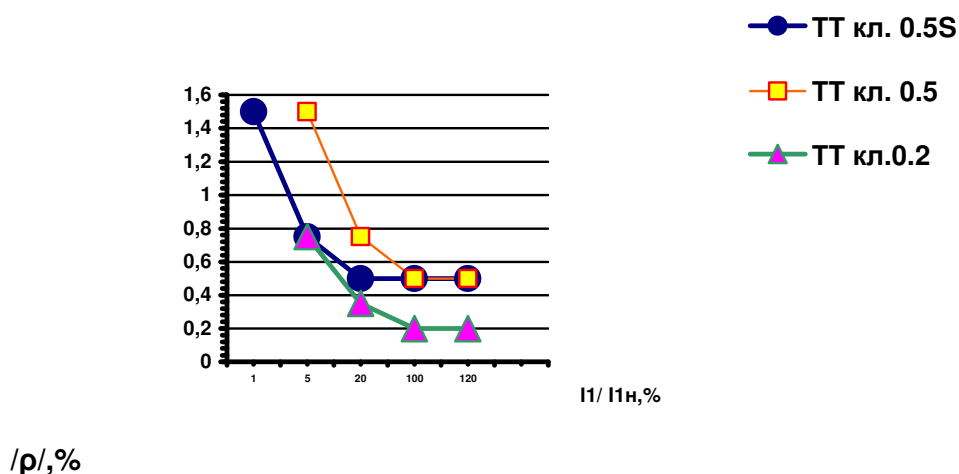


Рисунок 1. Графики модуля предельной относительной погрешности ТТ.

Из представленного графика видно, что для ТТ класса 0,5S погрешность нормируется, начиная с 1% номинального тока и не может превышать 1,5%. Для ТТ класса 0,5 погрешность для 1% номинального тока не нормируется вообще, на 5% I_n составляет 1,5%, и даже на 20% I_n увеличивается до 0,75%.

К чему это приводит в коммерческом учете электроэнергии? В условиях спада и существенных колебаний нагрузки потребителей, ТТ значительное время работают в режиме действующего значения тока менее 20% I_n . Поскольку погрешность ТТ на малых токах всегда имеет отрицательное значение, применение ТТ класса 0,5 обязательно приведет к большему недоучету потребленной электроэнергии, чем при использовании ТТ класса 0,5S. Просчитаем величину этой разности в недоучете электроэнергии для случая трансформатора тока с номинальным током 150А.

Примем, что трансформатор тока 10 часов в сутки нагружен менее 20% номинального тока. Для промышленности это, как правило время с 22.00 до 7.00, в коммунальном секторе это и ночное время, и время с 9.00 до 17.00. Будем считать, что среднее значение нагрузки в это время составляет 5% от номинальной. Разница погрешностей ТТ класса 0,5 и 0,5S на 5% нагрузки составляет 0,75%. Расчет потребленной электроэнергии для ТТ классов 0,5 и 0,5S проведем по формуле:

$$W_{0,5} = U * I * T * 0,985 = 738,750 \text{ кВт}\cdot\text{час}$$

$$W_{0,5S} = U * I * T * 0,9925 = 744,375 \text{ кВт}\cdot\text{час}$$

U – напряжение (10кV)

I – ток (7,5А) (5% $I_{ном}$)

T – 10 часов

$$\Delta W_{сут} = 5,625 \text{ кВт}\cdot\text{час}$$

$$\Delta W_{год} = 2053 \text{ кВт}\cdot\text{час}$$

Рисунок 2. Расчет потребленной энергии для ТТ классов 0,5 и 0,5S.

Таким образом, за одни сутки недоучет электроэнергии при применении ТТ кл. 0,5 составит 5,625 кВт·час, а за год – 2053 кВт·час, что при стоимости 1 кВт·час 0,25грн. составит 500грн.

Выше отмечено, что на сетях Украины находятся около 100 000 ТТ в основном класса 0,5, то есть, общий недоучет электроэнергии из-за использования ТТ низкого класса может составлять 205 300МВт·час или 51млн гривен в год. На самом деле потери энергоснабжающих компаний из-за высокой погрешности измерений существующих ТТ значительно больше, так как по статистике Укрметрестстандарта до 15% предоставляемых на очередную поверку ТТ бракуются; их погрешность не соответствует требованиям даже по классу 0,5.

Погрешность трансформатора тока тем меньше, чем меньше магнитное сопротивление магнитопровода, то есть, чем больше магнитная проницаемость материала, больше сечение сердечника и меньше его длина, а также, чем меньше вторичная нагрузка.

Традиционно для материала сердечников ТТ применяется электротехническая сталь. В трансформаторах тока производства НПП «Укртрансэнерго» измерительные сердечники выполнены из нанокристаллического сплава семейства «Finemet». Такие сплавы начали применяться в конце 80-х годов прошлого столетия в электротехнической промышленности США и Японии. Эти сплавы на основе железа, кремния, бора, ниобия и меди получают путем розлива расплава через тонкую ~25мкм фильеру на поверхность вращающегося с большой скоростью охлаждаемого вала. При высокой скорости охлаждения (до 1 миллиона градусов в секунду) атомы сплава не успевают сформировать крупнокристаллическую решетку. Сплав, таким образом, приобретает аморфный, нанокристаллический характер, когда размеры кристаллов и доменов в тысячи раз меньше обычных и уникальные магнитоэлектрические свойства.

На рис. 3 представлены типовые петли гистерезиса для электротехнической стали и нанокристаллического сплава.

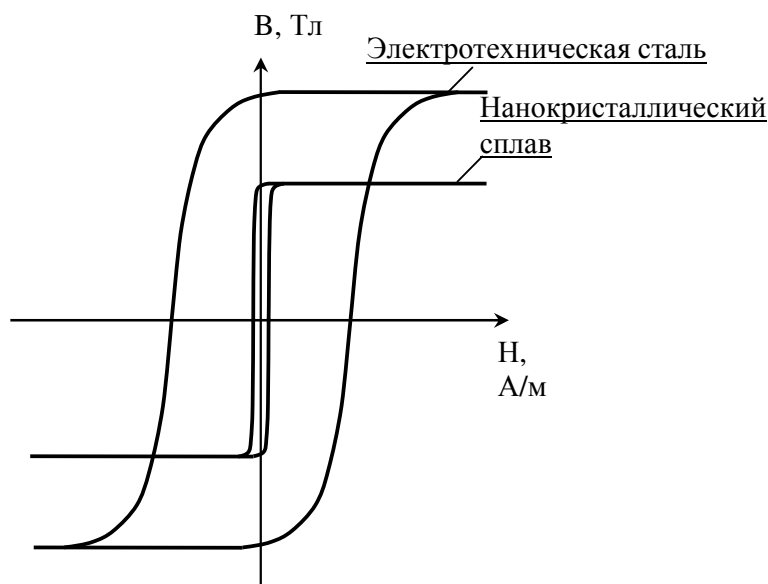


Рисунок 3. Петля гистерезиса для электротехнической стали и нанокристаллического сплава.

Поскольку ТТ работают в установившемся режиме в малых полях, то для их изготовления необходимо использовать материалы не только с большой магнитной проницаемостью, но и с высокой начальной магнитной проницаемостью.

Сравним характеристики электротехнической стали и нанокристаллического сплава.

Характеристики	Ед. изм.	Электротехническая сталь	Нанокристаллический сплав
Начальная магнитная проницаемость	μ_n	400	50 000
Максимальная магнитная проницаемость	μ_{max}	8000	600 000
Магнитная индукция насыщения (при $H=800A/m$)	B_s	2	1,2
Коэрцитивная сила (А/м)	H_c	80	2,5
Удельное электрическое сопротивление (мкОм·м)	ρ	0,6	1,6
Потери на вихревые токи (Вт/кг)		20	5

Высокая начальная магнитная проницаемость и линейность характеристики намагничивания позволяет обеспечить метрологические характеристики ТТ с магнитопроводами из нанокристаллических сплавов уже в начале диапазона, а высокая максимальная магнитная проницаемость в конце диапазона (120% In). Характеристика намагничивания магнитопроводов из электротехнической стали в начале диапазона имеет нелинейный характер, чем и объясняется увеличенная погрешность измерений в диапазоне до 20% Inom.

Значение магнитной индукции насыщения для нанокристаллических сплавов меньше, чем для электротехнической стали, что позволяет снизить коэффициент безопасности.

Очень низкое значение коэрцитивной силы у нанокристаллического сплава практически исключает возможность намагничивания сердечника постоянным током. Полное перемагничивание сердечника при подаче переменного тока происходит уже при напряженности магнитного поля и значениях первичного тока 1-2 процента.

Для сердечников же из электротехнической стали, которые могут намагнититься при аварийных отключениях, этого добиться трудно.

За счет высокого удельного сопротивления магнитные вихретоковые потери в нанокристаллических сердечниках в 4-10 раз меньше, чем в сердечниках из электротехнической стали.

Нанокристаллические сплавы сохраняют свои магнитные свойства при нормальной температуре не менее 100 лет, а при температуре +50 °С не менее 50 лет, что позволяет увеличивать межповерочный интервал ТТ.

В целом нанокристаллические сердечники характеризуются меньшей материалоемкостью, габаритом и весом по сравнению с сердечниками из электротехнической стали для аналогичных по номиналам ТТ.

Основные технические характеристики ТТ типа ТОЛУ-10 и ТПЛУ-10 приведены на рисунке 4.

Наименование параметра	Норма
Номинальное напряжение, кВ	10
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	12
Номинальная частота переменного тока, Гц	50
Номинальный вторичный ток, А	5
Номинальный первичный ток, А	20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000
Число вторичных обмоток	2

Класс точности: - вторичной обмотки для измерений; - вторичной обмотки для защиты.	0,5S 10P
Номинальная вторичная нагрузка при коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,8$, В•А: - вторичной обмотки для измерений; - вторичной обмотки для защиты.	10 15
Номинальная предельная кратность вторичной обмотки для защиты, не менее	5
Номинальный коэффициент безопасности приборов обмотки для измерений для трансформаторов: - ≤ 600 А, не более; - ≥ 800 А, не более.	3 5
Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты: - первичной обмотки, кВ; - вторичной обмотки, кВ.	42 3

Номинальный первичный ток, А	Ток электродинамической стойкости, кА	Трехсекундный ток термической стойкости, кА	Масса, не более, кг
20	4	0,8	13
30, 40	6,3	1,25	13
50	8,1	1,6	13
75, 100	16,2	3,2	13
150, 200	32,5	6,4	13
300, 400	65	12,8	13
500, 600	81,2	16	13
800, 1000	101,6	20	14

Рисунок 4. Основные технические характеристики ТТ типа ТОЛУ-10, ТПЛУ-10.

Класс точности вторичной обмотки для измерений 0,5S, при этом, если нагрузка измерительной обмотки ТТ будет снижена до 5 В·А, погрешность ТТ будет соответствовать требованиям класса 0,2S.

Номинальная предельная кратность вторичной обмотки для защиты – не менее 5, фактическое значение от 8 до 15 (требование ГОСТ 7746 от 5 до 30). Это значит, что в случае аварийной ситуации на устройства защитной автоматики ТТ выдаст ток 40-75А, что вполне достаточно для срабатывания всех видов релейной защиты.

Номинальный коэффициент безопасности приборов обмотки для измерений не более 5, фактически ~2,5. Это значит, что при аварийной ситуации ток в цепи измерительного сердечника, где, как правило включен счетчик электроэнергии для коммерческого учета не превысит 15А.

Для сравнения коэффициент безопасности ТТ ТПЛ-10-М класса 0,5 производства Свердловского завода трансформаторов тока – 15. То есть, при аварийной ситуации ток во входной цепи счетчика электроэнергии может достигать 75А, что приведет к выходу из строя счетчика.

Масса трансформаторов тока ТОЛУ-10 и ТПЛУ-10 не превышает 14кг, масса аналогичных ТТ производства ОАО «Самарский трансформатор» и СЗТТ не менее 19кг. Таким образом, ТТ ТОЛУ-10 и ТПЛУ-10 ничем не уступают, а по отдельным параметрам превосходят ТТ производства предприятий РФ.

Нами были направлены документы для сертификации ТТ ТОЛУ-10, ТПЛУ-10 в РФ и Беларусь, а с 30 сентября 2008 они были зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под номером РБ 03 13 3872 08 и допущены к применению в Республике Беларусь.

Освоение технологии литой высоковольтной изоляции с применением современных эпоксидных компаундов позволяет НПП «Укртрансэнерго» выпускать кроме ТТ и другие изделия.

Нами ведется разработка и подготовка производства измерительных трансформаторов напряжения, высоковольтных обмоток сухих силовых трансформаторов, опорных и проходных изоляторов из эпоксидных компаундов и трансформаторов тока ТОП-0,66 с сердечниками из нанокристаллических сплавов.