

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПОГРЕШНОСТЯМ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ АСКУЭ

Епифанов Валерий Игоревич

старший преподаватель кафедры электроснабжения

Нефедов Святослав Святославович

старший преподаватель кафедры практической подготовки студентов

Тюнина Елена Александровна

старший преподаватель кафедры электроснабжения

Белорусский государственный аграрный технический университет

Республика Беларусь, г. Минск

Аннотация: в статье на основе использования информации, получаемой из базы по метрологическим характеристикам (МХ) отдельных элементов и другим их характеристикам рассматривается методика распределения требований к МХ отдельных элементов в измерительном узле, исходя из общего требования к допустимой погрешности в целом по каналу учета.

Ключевые слова: погрешность, трансформатор тока, трансформатор напряжения, канал учета, электронный счетчик, энергоучет.

DISTRIBUTION OF REQUIREMENTS FOR THE ERRORS OF THE ELEMENTS OF THE MEASURING UNITS OF THE AMR SYSTEMS

Epifanov Valery Igorevich

Senior Lecturer at the Department of Power Supply

Nefedov Svetoslav Svetoslavovich

Senior Lecturer of the Department of Practical Training of Students

Tsiunina Alena Alexandrovna

Senior Lecturer at the Department of Power Supply

Belarusian State Agrarian Technical University

Belarus, Minsk

Abstract: in the article, based on the use of information obtained from the base on the metrological characteristics of individual elements and their other characteristics, the method of distributing the requirements for the metrological characteristics of individual elements in the measuring unit is considered, based on the general requirement for the permissible error as a whole along the metering channel.

Key words: error, current transformer, voltage transformer, metering channel, electronic meter, energy metering.

Введение

Рассмотренные в публикациях [1] и [2] проблемы учета электрической энергии при переменных нагрузках и формирования информационной базы для расчета в реальном времени необходимых метрологических характеристик (МХ) АСКУЭ показало, что имеется реальная возможность создания такой базы с длительным сроком хранения информации на верхнем уровне системы.

Актуальность вопроса

В соответствии с программой и методикой [3] оценки погрешности АСКУЭ, ее первоначально осуществляют по отдельным каналам согласно приведенной в [3] формуле,

согласно которой погрешности δ_a информационного канала есть корень квадратный из квадратичной суммы слагаемых в виде пределов допускаемых относительных погрешностей всех элементов, влияющих на суммарную погрешность. Основными составляющими суммарной погрешности являются погрешности электронных счетчиков, трансформаторов тока и напряжения, которые прежде чем быть включенными в состав измерительного узла индивидуально аттестуются на соответствие метрологических характеристик определенному классу. В таких условиях суммарная погрешность по каналу учета может иметь различные значения, обусловленные выбором из Госреестра измерительных приборов, как разных классов, так и разной стоимости, что приводит к перерасходу финансовых средств на создание систем АСКУЭ в целом. При этом необходимо учитывать, что затраты на функционирование АСКУЭ слагаются не только из капитальных, но и эксплуатационных, а также затрат на поверку измерительных средств, которые составляют существенные величины. Так, согласно [4] стоимость поверки трансформаторов тока (ТТ) составляет две цены нового ТТ класса напряжения 0,66-10 кВ. Например, ТТ класса 0,66 кВ в 2014 г. стоил 250 российских рублей, а поверка – от 600 руб. и выше, цена ТТ класса 10 кВ составляла 5000 российских рублей, а поверка – от 12000 руб. и выше. Хотя подобную проблему можно частично решить увеличением межповерочного интервала (с 4 до 8 лет, как предлагается в [4]), однако основным решением все же является правильный выбор состава измерительных средств, при котором учитываются такие характеристики, как цены на измерительные средства, пределы допускаемых погрешностей, сроки службы.

Существенное влияние на выбор измерительных приборов оказывают такие факторы, как вид нагрузки (активная, активно-индуктивная и т.д.) и формы графиков этой нагрузки, которые для каждого узла специфичны и с течением времени могут изменяться в лучшую (уплотнение на суточном интервале) или худшую (появление провалов нагрузок) сторону. Исследованиями показано, например, в диссертационной работе [6], что погрешности измерительных трансформаторов в сетях 0,4 и 6-10 кВ являются систематическими и могут приводить как к недоучету электроэнергии, так и ее переучету в зависимости от нагрузки и коэффициента мощности.

В таблице 1 и на рисунках 1 и 2 приведены числовые значения и зависимости погрешности измерительных трансформаторов (ИТ) класса точности 0,5 для активной электроэнергии от первичного тока при значениях $\cos\varphi$ от 0,25 до 1 и загрузке по току от 1 до 120%. Полученные автором [6] данные и зависимости свидетельствуют о том, что при низких нагрузках и коэффициентах мощности абсолютные значения погрешности могут достигать «+»8% в сетях 6-10 кВ и «+»(9-10)% в сетях 0,4 кВ, а также соответственно «-»(1-2)% и «-»(3-4)% при чисто активной нагрузке. Из полученных данных следует вывод, что отсутствие компенсации реактивной мощности гарантирующему поставщику выгодно и, наоборот, невыгоден отпуск чисто активной энергии, так как погрешности учета энергии в обоих случаях имеют разные знаки. Конечно, подобный вывод неоднозначен, так как рассмотренный фактор не единственный среди влияющих на энергоэффективность показателей поставщика и потребителя, однако игнорировать его в технико-экономических расчетах нельзя из-за существенной величины. Учитывать подобный фактор необходимо уже на начальной стадии – при выборе состава элементов измерительного канала, предварительно изучив динамику электрических нагрузок, уровень компенсации реактивной мощности и возможные отклонения значений $\cos\varphi$.

Таблица 1 – Погрешности ИТ для активной электроэнергии в сетях 6-10 (группа 1) и 0,66 кВ (группа 2) при различных значениях $\frac{I_1}{I_n}$ и $\cos\varphi$

Группа	$\frac{I_1}{I_n}, \%$	$\delta, \% \text{ при } \cos\varphi$			
		1,0	0,8	0,5	0,25
1	1	-1,55	1,58	3,64	8,15
	5	-0,45	0,33	0,77	1,72
	20	-0,08	0,07	0,17	0,37
	100	0,12	-0,08	-0,19	-0,42
	120	0,14	-0,1	-0,24	-0,53
2	1	-3,78	1,75	4,03	4,02
	5	-1,23	0,52	1,21	2,70
	20	-0,39	0,12	0,27	0,6
	100	-0,32	0,09	0,22	0,48
	120	-0,46	0,12	0,27	0,61

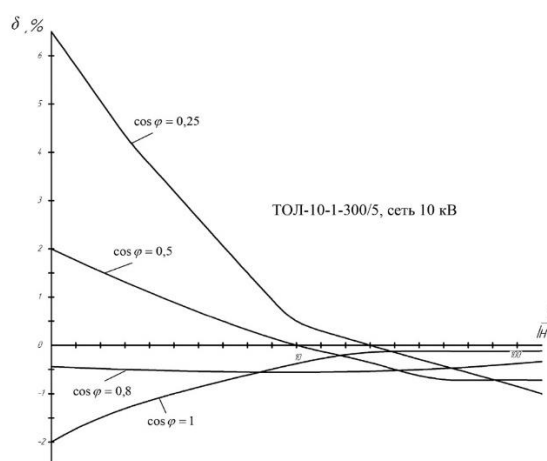


Рис. 1 Зависимость погрешности ИТ для активной электроэнергии от первичного тока для ИТ класса 0,5 при различных значениях $\cos\varphi$ активно-индуктивной нагрузки

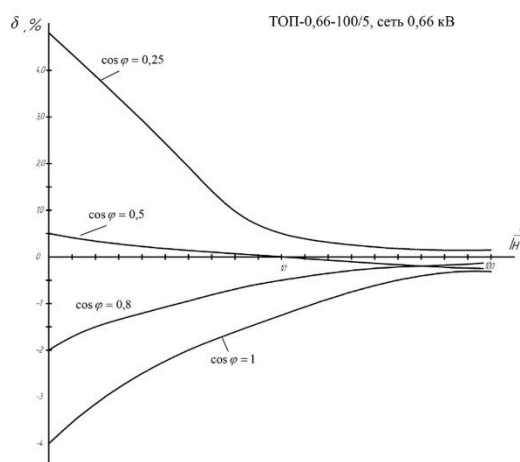


Рис.2 Зависимость погрешности ИТ для активной электроэнергии от первичного тока для ИТ класса 0,5 при различных значениях $\cos\varphi$ активно-индуктивной нагрузки

Постановка задачи

Для синтеза элементов измерительного узла имеются зависимости их стоимости от относительной погрешности $Z_{\text{ЭС}} = f(\delta_{\text{ЭС}})$, $Z_{\text{ТТ}} = f(\delta_{\text{ТТ}})$, $Z_{\text{ТН}} = f(\delta_{\text{ТН}})$. Суммарная относительная погрешность задана в виде ее требуемого значения $\delta_{\text{ТР}}$. Используя зависимости $Z_{\text{ЭС}}$, $Z_{\text{ТТ}}$, $Z_{\text{ТН}}$ и заданное ограничение $\delta_{\text{ТР}}$ необходимо провести обоснование выбора названных элементов при соблюдении условия:

$$Z_{\Sigma} = Z_{\text{ЭС}} + Z_{\text{ТТ}} + Z_{\text{ТН}} = \min, \quad (1)$$

$$\delta_{\phi} < \delta_{\text{ТР}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \delta_{\phi} = \pm 1,1 \sqrt{\delta_{\text{ЭС}}^2 + \delta_{\text{ТТ}}^2 + \delta_{\text{ТН}}^2}, \quad (3)$$

Как следует из (1) для минимизации функции требуется знание зависимостей затрат (стоимостей) конкретных типов оборудования от их метрологической характеристики δ . Для электронных однофазных счетчиков получены, например, следующие зависимости на основании данных по оптовым ценам для однофазных и трехфазных электронных счетчиков [1] (у.е.):

$$Z_{\text{оф}} = 40 + \frac{1,2}{\delta^2}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{мф}} = 140 + \frac{4}{\delta^2}, \quad (5)$$

Для четырех типов трансформаторов тока в [1] приведены зависимости оптовой цены от коэффициентов трансформации. Учитывая эти зависимости, а также данные по классам точности трансформаторов, получена следующая зависимость $Z_{\text{ТТ}} = f(\delta_{\text{ТТ}})$ (у.е.):

$$Z_{\text{ТТ}} = 21 + 0,025 K_T + \frac{0,5}{\delta^{2,5}}, \quad (6)$$

При $K_T=80$ формула (6) примет вид:

$$Z_{\text{ТТ}} = 23 + \frac{0,5}{\delta^{2,5}} \quad (6a)$$

Аналогично приведенной в (6) можно получить зависимости и по остальным типам трансформаторов, учитывая их различную стоимость, тип и класс точности.

Согласно действующим стандартам, трансформаторам напряжения, предназначенным для измерения, следует присваивать классы точности, выбираемые из ряда: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0, причем трансформаторам присваивают один или несколько классов точности в зависимости от номинальных мощностей и назначения. Конкретные классы точности устанавливают в стандартах на трансформаторы конкретных типов. Изготавливается не менее 20 типов однофазных и трехфазных измерительных трансформаторов напряжения с разницей в стоимости 150-400 у.е. (однофазные) и 380-900 у.е. (трехфазные), обусловленной в том числе и классом точности этих трансформаторов. Данные по оптовым ценам и классам точности ТН позволили получить ряд зависимостей $Z_{\text{ТН}} = f(\delta_{\text{ТН}})$, одна из которых, например, следующая (для однофазного ТН):

$$Z_{\text{ТН}} = 150 + \frac{3}{\delta^2}, \quad (7)$$

На рисунке 3 приведены функциональные зависимости стоимостей элементов измерительного узла от относительной погрешности при номинальной нагрузке. Выбрав зависимости $Z_{\text{ТТ}} = f(\delta_{\text{ТТ}})$, $Z_{\text{ЭС}} = f(\delta_{\text{ЭС}})$ (однофазный электронный счетчик), $Z_{\text{ТН}} = f(\delta_{\text{ТН}})$, составим следующую целевую функцию:

$$F(\lambda) = Z_{\text{ЭС}} + Z_{\text{ТТ}} + Z_{\text{ТН}} + \lambda(\delta_{\text{ЭС}} + \delta_{\text{ТТ}} + \delta_{\text{ТН}}) = \min, \quad (8)$$

$$(\delta_{\text{ЭС}}^2 + \delta_{\text{ТТ}}^2 + \delta_{\text{ТН}}^2)1,21 = \delta_{\text{ТП}}^2 \quad (9)$$

где равенство (9) является ограничивающим условием, согласно которому нужно так выбрать измерительные элементы узла, чтобы суммарная относительная погрешность измерений была не ниже заданной, а стоимость этих элементов – минимальной.

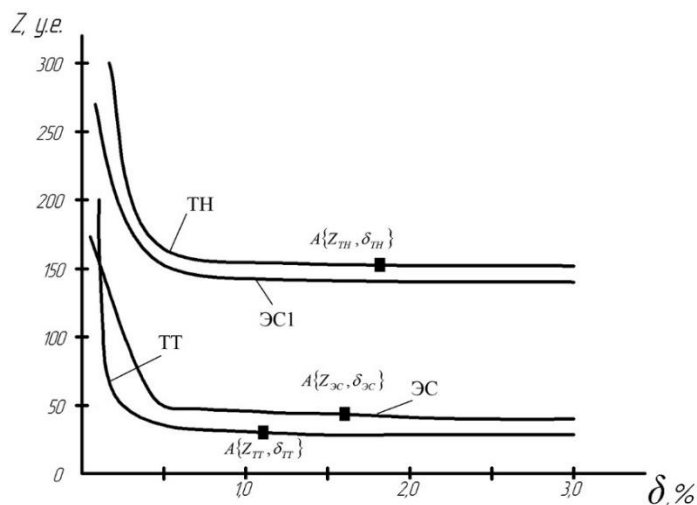


Рис.3 Функциональные зависимости стоимостей элементов измерительного узла от относительной погрешности при номинальной нагрузке.

$A\{Z_i, \delta_i\}$ – координаты точек с оптимальными значениями Z_i при $\delta = 3\%$

Проведем минимизацию полученной целевой функции с учетом зависимостей (4), (6) и (7), для чего определим частные производные $\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \delta}$:

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \delta_{\text{ЭС}}} = -2,4\delta_{\text{ЭС}}^{-3} + \lambda = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \delta_{\text{ТТ}}} = -1,25\delta_{\text{ТТ}}^{-3,5} + \lambda = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial F(\lambda)}{\partial \delta_{\text{ТН}}} = -6\delta_{\text{ТН}}^{-3} + \lambda = 0, \quad (12)$$

Из уравнений (10)-(12) следует:

$$\lambda = 2,4\delta_{\text{ЭС}}^{-3} = 1,25\delta_{\text{ТТ}}^{-3,5} = 6\delta_{\text{ТН}}^{-3}, \quad (13)$$

откуда
$$\delta_{\text{ЭС}} = \sqrt[3]{\frac{2,4\delta_{\text{ТТ}}^{3,5}}{1,25}} = 1,24\delta_{\text{ТТ}}^{1,17}, \quad (14)$$

$$\delta_{\text{ТН}} = \sqrt[3]{\frac{6\delta_{\text{ТТ}}^{3,5}}{1,25}} = 1,68\delta_{\text{ТТ}}^{1,17}, \quad (15)$$

Подставляя полученные в (13) и (14) значения для $\delta_{\text{ЭС}}$ и $\delta_{\text{ТН}}$ в ограничение (9), получим:

$$(1,24\delta_{\text{ТТ}}^{1,17})^2 + (\delta_{\text{ТТ}})^2 + (1,68\delta_{\text{ТТ}}^{1,17})^2 = \frac{\delta_{\text{ТП}}^2}{1,21}, \quad (16)$$

После преобразования формула (15) примет вид:

$$5,28\delta_{\text{ТТ}}^{2,34} + 1,21\delta_{\text{ТТ}}^2 - \delta_{\text{ТП}}^2 = 0 \quad (17)$$

Решая полученное уравнение относительно $\delta_{ТТ}$ при различных заданных значениях $\delta_{ТР}$ и используя зависимости (14) и (15) погрешностей $\delta_{ЭС}$ и $\delta_{ТН}$ в функции $\delta_{ТТ}$, составим таблицу значений искомых величин (таблица 2), позволяющих выбрать оптимальное сочетание элементов измерительного узла при минимальных затратах. Так, из таблицы следует, что при требуемом значении относительной погрешности в измерительном узле, равном 1 ($\delta_{ТР}^2=1$) оптимальные значения погрешностей для ТН, ТТ и ЭС должны составлять соответственно величины 0,66%, 0,45% и 0,487%. Выбрав из соответствующих рядов классов точности по каждому из измерительных элементов их стандартные величины, близкие к рассчитанным, получим:

$$\delta_{ТН} = 0,5, \delta_{ТТ} = 0,5, \delta_{ЭС} = 0,5$$

Таблица 2 – Варианты распределения оптимальных расчетных значений относительных погрешностей ТН, ТТ и ЭС при заданных значениях суммарной погрешности

δ_{ϕ}^2	1	2	4	6,25	9
$\delta_{ТН}$	0,66	0,924	1,29	1,64	1,978
$\delta_{ТТ}$	0,45	0,6	0,8	0,98	1,15
$\delta_{ЭС}$	0,487	0,682	0,95	1,21	1,67

Проверим с помощью формулы (8) и (13) полученную расчетом величину $F(\lambda)_1$ и то же $F(\lambda)_2$ после уточнения выбранных классов точности, одинаковых для ТН, ТТ и ЭС при $\delta_{ТР}=1$, используя значения $Z_{ТН}$, $Z_{ТТ}$, $Z_{ЭС}$, рассчитываемые по формулам (4), (6а) и (7):

$$F(\lambda)_1 = 150 + \frac{3}{0,66^2} + 23 + \frac{0,5}{0,45^{2,5}} + 40 + \frac{1,2}{0,487^2} + \frac{6}{0,66^3} (0,487 + 0,45 + 0,66) = 261,93 \text{ у.е.}$$

$$F(\lambda)_2 = 150 + \frac{3}{0,5^2} + 23 + \frac{0,5}{0,5^{2,5}} + 40 + \frac{1,2}{0,5^2} + \frac{6}{0,5^3} (0,5 + 0,5 + 0,5) = 304,62 \text{ у.е.}$$

Как следует из полученных значений $F(\lambda)$, выбор одинаковых по классу точности элементов измерительного узла приводит к существенному увеличению значения целевой функции (на 16%), но учтем, что такое решение получено при $\delta_{ТР}=1$. При других значениях $\delta_{ТР}$ решения будут также другими и далеко не очевидными. Например, при $\delta_{ТР}=3$ ($\delta_{ТР}^2=9$, см. таблицу 2 и рисунок 3), учитывая, что все электронные счетчики имеют класс точности не хуже 1, а у ТН и ТТ класс точности, равный 2, отсутствует, реализуемым является только субоптимальное решение, при котором все координаты (по параметру δ) точек А на рисунке 3 становятся одинаковыми, равными единице. В этом случае рассчитанные по формулам (8) и (13) значения $F(\lambda)_1$ и $F(\lambda)_2$ и их отношения будут следующими: $F(\lambda)_1 = 229,12 \text{ у.е.}$, $F(\lambda)_2 = 289,7 \text{ у.е.}$ $\frac{F(\lambda)_1}{F(\lambda)_2} = 1,264$, т.е. оптимальное

решение отличается от вынужденного на 26,4%. Подобное вынужденное решение приводит к избыточным затратам, чего можно было бы избежать, пополнив номенклатуру классов точности трансформаторов тока и напряжения классом, равным, например, 2, с соответствующей данному классу ценой. Подобное положение вполне обосновано, так как номенклатурные ряды рассматриваемых трансформаторов изначально выбирались без каких-либо оптимизационных расчетов частично по той причине, что автоматизированные сети учета электрической энергии и управления энергопотреблением хотя и начали применяться сравнительно давно, однако широкое применение получили только в последние годы.

Рассмотренное в статье оптимальное распределение требований к погрешности элементов измерительного узла в АСКУЭ позволяет решить задачу синтеза элементов при минимальных затратах, исходя из их стоимостей и классов точности на интервалах, не охватывающих весь диапазон нагрузок. По этой причине следует говорить о субоптимальном решении, улучшить которое можно в процессе функционирования канала учета, учитывая, что нагрузки имеют различную форму. На рисунке 4 приведены графики токовых нагрузок по продолжительности на суточном интервале, аппроксимированные линейной и нелинейной зависимостями, по характеру которых можно судить о степени равномерности (неравномерности) графика нагрузок, величины которых влияют на погрешности измерений.

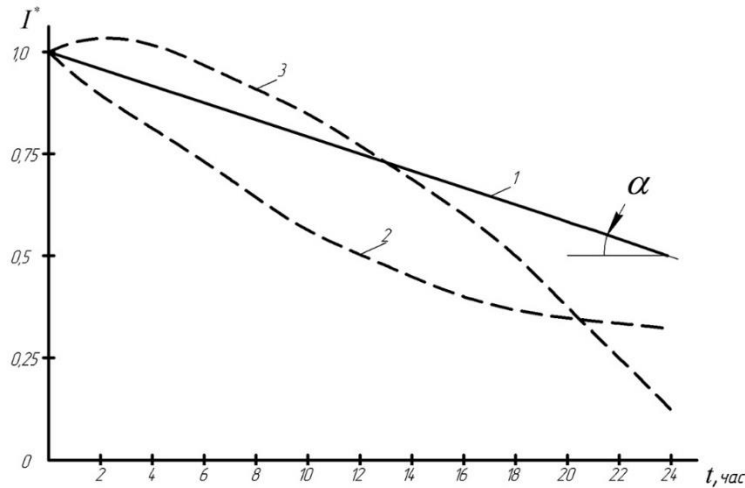


Рис. 4 Графики токовых нагрузок по продолжительности на суточном интервале, аппроксимированные линейной (1) и нелинейными зависимостями (2,3).

1. $I^* = 1 - t \cdot \operatorname{tg} \alpha$
2. $I^* = e^{-Kt}$, $K = 0,05$
3. $I^* = 2 - e^{-Kt} - \frac{t}{12}(1 - e^{-24K})$, $K = 0,1$

Например, график 3 характерен для нагрузок потребителей-регуляторов, у которых уровень электропотребления минимальный в часы утренних и вечерних пиковых нагрузок и близкий к равномерному в остальные часы суток. Наоборот, график 3 свидетельствует о наличии пиков нагрузки на коротком интервале и низких значениях – в остальные часы суток. График 1 занимает промежуточную позицию, свидетельствуя о том, что минимальное значение нагрузки в течение суток имело величину не менее половины максимальной. Таким образом, если иметь функциональные зависимости относительных погрешностей элементов измерительного узла от степени загрузки по току, аналогично приведенным в [2], можно рассчитать их значения на всех интервалах нагрузок, используя их графики, построенные по аналогии с приведенными на рисунке 4. Например, для трансформатора тока класса 0,1 в [2] приведена следующая расчетная формула для определения δ_{TT} в зависимости от степени K загрузки канала:

$$\delta_{TT} = 0,3384e^{-1,262K}, \quad (18)$$

где $K = \frac{I}{I_n} = I^*$, величина которой определяется одной из функциональных зависимостей,

приведенных на рисунке 4. В случае, когда $I^* = 1 - t \cdot \operatorname{tg} \alpha$, где t – часы суточного интервала по графику продолжительности, $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямой $I^* = f(t)$, формула (18) примет следующий вид:

$$\delta_{TT} = 0,3384e^{-1,2623(1-tg\alpha)}, \quad (19)$$

На рисунке 5 приведены зависимости δ_{TT} от величины $tg\alpha$, рассчитанные по формуле (19), свидетельствующие о том, что при существенном отклонении формы графика нагрузок от равномерного погрешность ТТ может отклоняться в разы на интервалах минимальных нагрузок.

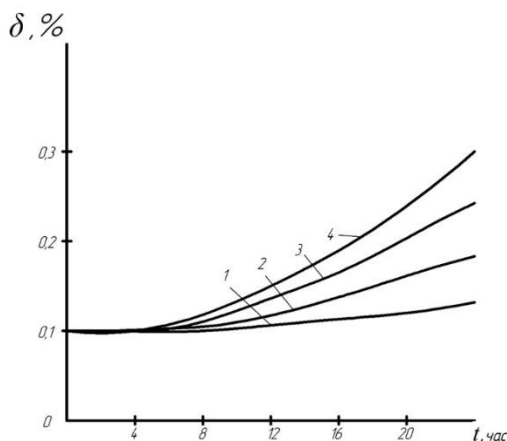


Рис. 5 Изменение относительной погрешности трансформатора тока класса 0,1 в зависимости от времени t суточного интервала при упорядочении нагрузок по убыванию

1. $tg\alpha = 0,01$
2. $tg\alpha = 0,02$
3. $tg\alpha = 0,03$
4. $tg\alpha = 0,0375$

Подобное обстоятельство сказывается и на средней приведенной погрешности δ_{TT} , величина которой может быть рассчитана различными способами, один из которых предложен в [5], где для определения средней приведенной погрешности на суточном интервале используется следующая формула:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta_{кл} \cdot A_{кл} + \bar{\delta}_T \cdot A_t}{A_{кл} + A_t}, \quad (20)$$

где $A_{кл} = \int_0^{t_{кл}} I(t, tg\alpha) dt$ – интегральная величина, характеризующая ток на интервале, где погрешность δ находится в классе;

$A_t = \int_{t_{кл}}^{24} I(t, tg\alpha) dt$ – то же на интервале, где погрешность превышает значение $\delta_{кл}$,

$$\bar{\delta}_t = \frac{\int_{t_{кл}}^{24} \delta(t, tg\alpha) \cdot I(t, tg\alpha) dt}{\int_{t_{кл}}^{24} I(t, tg\alpha) dt} \quad \text{– среднее значение погрешности на интервале } [t_{кл}, 24].$$

Приведенной формулой можно воспользоваться и в нашем случае, так как необходимые интегрируемые функции приведены на рисунке 5 и в формуле (19). Если подобно приведенным в (19) зависимостям получить аналогичные и по другим элементам

измерительного узла, то обеспечивается возможность оперативного контроля метрологических характеристик в каждом из узлов при любой форме суточных графиков нагрузок по всем сезонам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подход к распределению требований к погрешностям элементов измерительных узлов, основанный на составлении и минимизации функции затрат, идущих на создание комплекса энергоучета и его функционирование, является обоснованным и реализуемым, что подтверждено предложенной методикой и конкретными результатами расчетов на примере измерительного узла, содержащего трансформатор тока, трансформатор напряжения и электронный счетчик.

2. Эффективность оптимизационных расчетов по выбору состава элементов измерительного узла зависит в том числе и от качества номенклатурного ряда классов точности по каждому элементу, которые до настоящего времени методически не обоснованы и требуют совершенствования в условиях развития современных интеллектуальных электрических сетей, выполняющих наряду с другими и функции коммерческого энергоучета. Совершенствование номенклатурного ряда классов точности элементов измерительных узлов позволит в определенной степени сократить затраты, идущие на создание системы энергоучета.

3. Так как при обосновании выбора состава элементов измерительного комплекса заранее невозможно прогнозировать форму графиков нагрузок, следует принять во внимание то, что полученный результат оптимизации можно сохранить только улучшая режим электропотребления до уровня, близкого к равномерному.

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского Фонда Фундаментальных исследований (договор № Т19М-079).

Список литературы:

1. Забелло Е. П. Расчет метрологических характеристик многоуровневых АСКУЭ на основе оперативного контроля нагрузок и электронной базы данных средств измерения/Е. П. Забелло, В. И. Епифанов// Энергетическая стратегия. – 2016. – №1.
2. Забелло Е. П. Система информационного обеспечения для расчета метрологических характеристик многоканальных автоматизированных систем учета электроэнергии / Е. П. Забелло, В. И. Епифанов // Энергетика и ТЭК. – 2016. – №1.
3. Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии по межгосударственным, межсистемным перетокам и генерации. Программа и методика метрологической аттестации (ПМА. МН 1783-2010). БелГИМ, Минск 2010;
4. Раскулов Р. Ф. О межповерочном интервале измерительных трансформаторов /Р. Ф. Раскулов// Энергетика. – 2014. – №1.
5. Шклярский Я. Э. Погрешности трансформаторов тока при переменных нагрузках./Я.Э. Шклярский, В.А. Кузнецов//Нефтегазовое дело.–2012.–№2.
6. Раскулов Р. Ф. Анализ условий работы измерительных трансформаторов и исследование влияний воздействующих факторов на точностные характеристики трансформаторов в энергосистемах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Москва. – 2004.

