

УДК 621.311

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ АГРЕГАТОВ КУСТОВЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ В КАЧЕСТВЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ-РЕГУЛЯТОРОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

Докт. техн. наук ЗАБЕЛЛО Е. П.,  
канд. техн. наук ВСЕЕВ А. Н., ГИМАДИЕВ Р. А.

*РУП «БЕЛТЭИ», ОАО «Татнефть»*

Крупные насосные агрегаты кустовых насосных станций (КНС) – в числе основных потребителей электроэнергии на нефтеносных площадях. Эти агрегаты являются не только потребителями, но и источниками реактивной мощности, что важно при электропотреблении с использованием дифференцированных по времени тарифов. Для выявления реальных возможностей агрегатов КНС в качестве потребителей-регуляторов реактивной энергии были организованы эксперименты на ряде эксплуатируемых насосных агрегатов КНС различных типов и при разных нагрузках. Были выбраны четыре вида агрегатов в различных нефтегазодобывающих предприятиях (НГДП), в том числе с мощностью электродвигателей  $P = 1600$ , 1250 и 1000 кВт – по одному агрегату,  $P = 800$  и 630 кВт – по три агрегата. Нагрузки на агрегатах не менялись, т. е. замеры необходимых параметров проводились при реально сложившихся механических нагрузках в пределах 0,58...0,98 номинальных.

В ходе экспериментов ток возбуждения изменялся, причем в таких пределах, чтобы, получив «нулевую» или близкую к ней точку перехода от потребления реактивной мощности к ее генерации, замерить значения по обе стороны от этой зоны с учетом компенсирующей способности электродвигателя и в допустимом диапазоне регулирования тока возбуждения.

Работы проводились с использованием многофункциональных электронных счетчиков «Альфа», переносного компьютера, вольтамперфазометра и образцового амперметра. Все данные экспериментов заносились в таблицу.

Как видно из табл. 1, при снятии показаний приборов в каждом из экспериментов проводилось по 8...10 замеров. Графическое отображение этих результатов приведено на рис. 1...3, на которых агрегаты сгруппированы по мощности, а кривые зависимости потребления (генерации) реактивной мощности электродвигателей и затрат на электроэнергию (руб/ч работы) от тока возбуждения ротора совмещены.

Таблица 1

Тип электродвигателя	Ток возбуждения $I_b$ , А	Активная мощность $P$ , кВт	Реактивная мощность $Q$ , квар	Тип электродвигателя	Ток возбуждения $I_b$ , А	Активная мощность $P$ , кВт	Реактивная мощность $Q$ , квар
СТД-1600	150	1073,5	374,7	СТД-800	135	669,6	411,8
	170	1061,6	149,0		150	666,7	216
	182	1062,7	9,7		160	662,4	120
	205,7	1067,0	-231,1		180	663,8	-1,4
	224,5	1051,9	-382,3		200	660,9	-97
	245	1068,1	-570,2		220	659,5	-203
	247	1049,7	-584,2		235	659,5	-279,3
	265	1046,5	-706,3		250	659,5	-357,1
	275	1044,3	-765,7		270	659,5	-469,4
СТД-1250	165	1009,4	190	СТД-630	120	519,8	342,7
	172,2	1012,3	120,9		140	518,4	128,1
	180	1013,7	51,8		160,2	516,9	15,8
	190	1015,2	-2,8		165	518,4	-1,4
	200,8	1006,5	-106,5		182,6	518,4	-87,8
	210	1006,5	-195,8		200	521,2	-165,6
	225	1003,6	-322,5		240	522,7	-344,1
	245,1	1000,8	-498,2		260	521,2	-417,6
263	1000,8	-659,5	280	522,7	-483,9		
СТД-1000	110	532,8	406	СТД-630	140	627,8	421,9
	125	531,4	227,5		151,6	624,9	266,4
	143,4	528,4	110,8		162,7	620,6	161,2
	160	512,6	4,3		175	617,7	53,2
	165	511,2	-1,4		185	617,7	-1,4
	184	512,6	-105,1		200	614,8	-69,1
	200	521,2	-188,6		210	613,4	-113,7
	215	522,7	-262		225	613,4	-187,2
	230	522,7	-338,4		235	613,4	-213,8
	246,6	522,7	-411,8		250	610,5	-290,8
275	524,1	-552,9					
СТД-800	145	475,2	207,3	СТД-630	135	552,9	430,9
	155	470,8	136		150	551,8	260,2
	170	466,5	42,1		175	549,7	83,1
	175	468,7	6,4		198	548,6	2,1
	180	469,8	0		200	551,8	-6,4
	200	461,1	-85,3		210	549,7	-63,7
	225	457,9	-184,6		225	550,8	-127,4
	250	457,9	-251,6		250	554	-210,6
	275	455,7	-330,4		270	555,1	-280,8
	300	459	-396,3				
СТД-800	150	622	181	СТД-800	250	620	-365,7
	175	622	0		283	622	-529,4
	200	620,6	-125,2		300	623,5	-583

Анализируя кривые (рис. 1), можно отметить, что на участках, где синхронные двигатели работают в режиме генерации реактивной мощности, эти зависимости являются практически линейными, как и кривые затрат  $Z = f(I_b)$  в рублях за 1 ч работы двигателя, которые строились, используя следующую формулу:

$$Z = T_{\text{cp}}P \pm 0,08T_{\text{cp}}Q = T_{\text{cp}}(P \pm 0,08Q), \quad (1)$$

где  $T_{\text{cp}}$  – средний тариф на электроэнергию, руб/(кВт · ч);  $P$  – потребляемая при некотором значении тока возбуждения активная мощность;  $Q$  – потребляемая (или отдаваемая) реактивная мощность при тех же значениях тока возбуждения.

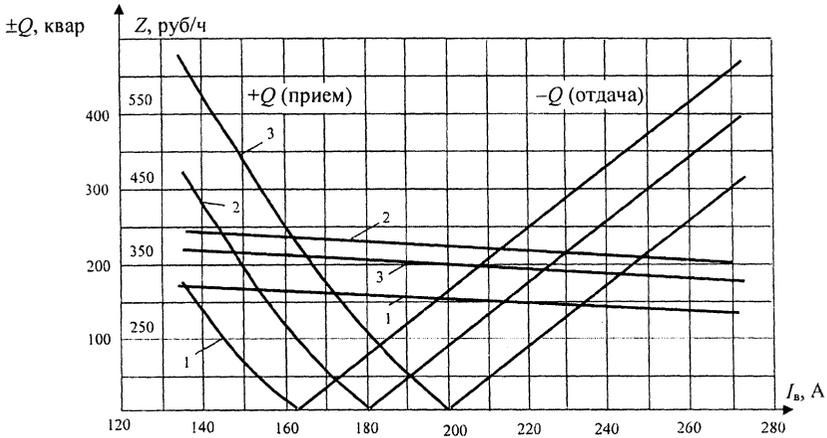


Рис. 1. Зависимость потребления (генерации) реактивной мощности синхронными двигателями СТД-630 и затрат на электроэнергию (руб/ч работы) от тока возбуждения ротора при различной степени загрузки двигателя: 1 –  $K_3 = 0,82$ ; 2 –  $0,98$ ; 3 –  $0,87$

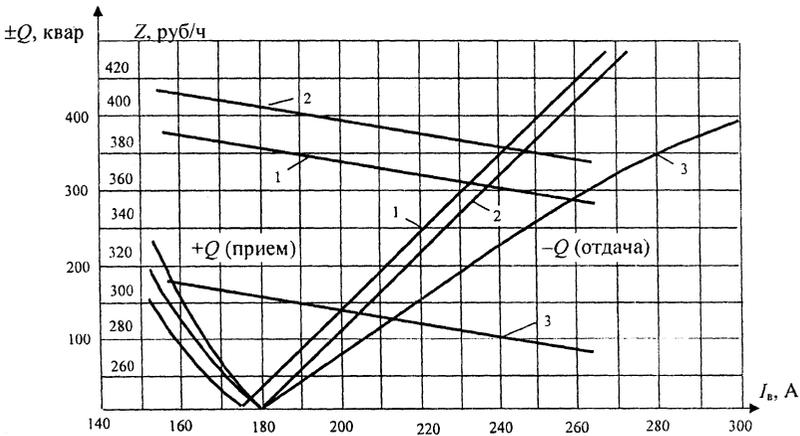


Рис. 2. Зависимость потребления (генерации) реактивной мощности синхронными двигателями СТД-800 и затрат на электроэнергию (руб/ч работы) от тока возбуждения ротора при различной степени загрузки двигателя: 1 –  $K_3 = 0,78$ ; 2 –  $0,83$ ; 3 –  $0,58$

Кривые  $Z = f(I_b)$  на рис. 1 и последующих рассчитаны при  $T_{\text{cp}} = 0,6$  руб/(кВт · ч), коэффициент  $0,08$  применен в (1) согласно установленному соотношению платы за реактивную и активную энергию в тарифах на 2003 г. для ОАО «Татнефть».

Как видно из рис. 1, кривые  $Q = f(I_b)$  не идентичны для данного типа двигателя, так как они получены при разных степенях загрузки, причем кривая для двигателя, имеющего наибольшую нагрузку, занимает не крайнее правое, а промежуточное положение, что объясняется, по-видимому,

отличием фактических характеристик двигателя от паспортных из-за износа или по другим причинам.

Зависимости  $Z = f(I_b)$  отличаются для данной группы двигателей несущественно, вполне линеаризуемы на выбранном участке тока возбуждения и имеют уклон в сторону его увеличения, т. е. затраты на электроэнергию при работе синхронного двигателя тем меньше, чем выше ток возбуждения в пределах допустимого интервала.

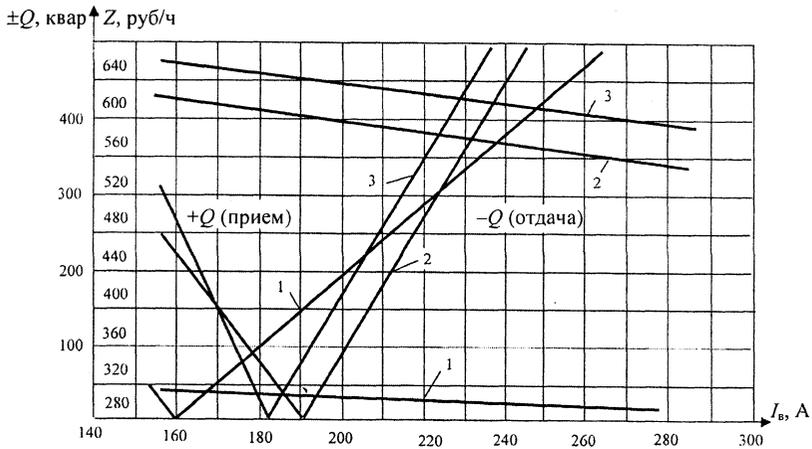


Рис. 3. Зависимость потребления (генерации) реактивной мощности синхронными двигателями СТД-1000 (1), СТД-1250 (2) и СТД-1600 (3) и затрат на электроэнергию (руб/ч работы) от тока возбуждения ротора при различной степени загрузки двигателей: 1 –  $K_3 = 0,52$ ; 2 – 0,8; 3 – 0,66

При анализе кривых (рис. 2) для электродвигателей мощностью 800 кВт следует обратить внимание на существенное отличие характеристики  $Q = f(I_b)$  одного из них, объясняемое, видимо, также его специфичностью. Закономерности изменения  $Z = f(I_b)$  согласуются с предыдущими – функции линеаризуемы, значение  $Z$  тем выше, чем больше коэффициент загрузки электродвигателя, и тем меньше, чем выше значение тока возбуждения.

Зависимости рис. 3, как и аналогичные на предыдущих рисунках, позволяют определить как возможные величины генерируемой реактивной мощности, так и возможные величины затрат при увеличении тока возбуждения. Так как затраты (в рублях на 1 ч работы двигателя) в допустимых пределах регулирования тока возбуждения в большую сторону снижаются, можно сделать вывод, что:

- режим работы синхронных двигателей КНС рассматриваемых модификаций в условиях перевозбуждения вполне экономичен;
- область возможных режимов при положительном значении  $Q$  (отдача) по току возбуждения составляет от 160 до 300 А;
- зависимости затрат  $Z = f(I_b)$  являются индивидуальными для каждого двигателя в пределах его типа и для каждого значения коэффициента загрузки.

В табл. 2 приведены значения  $\Delta Q$ ,  $\Delta Z$  и  $K_p$  для всех девяти электродвигателей исследуемой выборки, где  $\Delta Q$  – диапазон регулирования значений  $Q$  (отдача);  $\Delta Z$  – снижение затрат (руб/час работы на данном диапазо-

не изменений  $\Delta Q$ );  $K_p$  – коэффициент, определяемый отношением  $\Delta Z$  к  $\Delta Q$ , т. е.:

$$K_p = \frac{\Delta Z}{\Delta Q}, \quad (2)$$

и отражающий удельную экономию платы в расчете на 1 квар · ч реактивной энергии.

Таблица 2

$\Delta Q$ , квар	760	280	470	480	550	660	396	291	583	4470
$\Delta Z$ , руб/ч	48,25	9,68	25	20,5	18,73	40	25,5	18,3	20,24	226,2
$K_p$	0,0063	0,035	0,053	0,043	0,034	0,061	0,064	0,063	0,035	0,051

Как видно из табл. 2, значение  $K_p$  находится в пределах 0,034... 0,064 руб/(квар · ч), т. е. оно индивидуально для каждого электродвигателя. Среднее значение  $K_p = 0,051$ , т. е. близко к величине оплаты за 1 квар · ч реактивной энергии, равной 8 % платы за 1 кВт · ч активной энергии. Таким образом, при работе 100 агрегатов КНС (около 20 % их общего числа) в ОАО «Татнефть» в течение года в режиме генерации 200 квар реактивной мощности в условиях превышения допустимых пределов ее потребления, годовой экономический эффект составит

$$E_{\text{год}} = 100 \cdot 200 \cdot 8760 \cdot 0,05 = 8,76 \text{ млн руб.}$$

Приведенные на рис. 1...3 зависимости после представления в линеаризованной форме можно использовать для некоторых оптимизационных расчетов, например при решении следующей линейной задачи: определить минимум целевой функции

$$\sum_{i=1}^n Z_i = f(Q_i) \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничении

$$\sum_{i=1}^n \Delta Q_i = \Delta Q_{\text{тр}}. \quad (4)$$

В целевой функции (3)  $Z_i = f(Q_i)$  – зависимость затрат (руб/ч работы) от уровня компенсации реактивной мощности  $i$ -го двигателя на некотором допустимом диапазоне тока возбуждения:  $\Delta Q_i$  – допустимый диапазон генерирования реактивной мощности  $i$ -м двигателем, квар;  $\Delta Q_{\text{тр}}$  – требуемая суммарная величина генерируемой в данном узле реактивной мощности, квар.

Так как мы располагаем набором зависимостей генерируемой реактивной мощности от токов возбуждения электродвигателей при некоторой нагрузке и зависимостями  $Z_i = f(I_a)$ , перерасчет их на новый аргумент не представляет трудностей. Допустим, имеем координаты двух точек  $A_{\{Q_1, Z_1\}}$  и  $B_{\{Q_2, Z_2\}}$ , и требуется записать уравнение прямой линии, проходящей через эти точки. Вычисляем угол наклона прямой

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{Q_2 - Q_1}. \quad (5)$$

Записываем уравнение прямой линии

$$Z = Z_0 - Q \operatorname{tg}\alpha, \quad (6)$$

где  $Q$  – текущее значение переменной;  $Z_0$  – начальное значение  $Z$  при  $Q = 0$ .

Значение  $Z_0$  определим из следующих формул:

$$Z_0 = Z_1 + Q_1 \operatorname{tg}\alpha \quad \text{или} \quad Z_0 = Z_2 + Q_2 \operatorname{tg}\alpha. \quad (7)$$

Пример:  $Q_1 = 10$  квар,  $Z_1 = 640$  руб/ч;

$Q_2 = 770$  квар,  $Z_2 = 590$  руб/ч.

Данные получены из характеристики СТД-1600.

Уравнение  $Z = f(Q)$  при полученных данных примет следующий вид согласно (5)...(7):

$$Z = 640 + 10 \cdot 50/760 - Q \cdot 50/760 = 640,7 - 0,07Q.$$

Из полученного уравнения  $Z = f(Q)$  следует, что при использовании СТД-1600 в режиме перекомпенсации с величиной  $Q = 500$  квар значение  $Z$  составит величину  $Z = 640 - 0,07 \cdot 500 = 605,7$  руб за каждый час работы, или ее снижение равно 35 руб/ч.

Допустим, насосные агрегаты с электродвигателями мощностью 800 кВт (три агрегата), характеристики которых мы исследовали, расположены в одном КНС и используются в качестве регуляторов реактивной мощности. Предварительными расчетами обоснована необходимость генерации  $Q_{\text{тр}} = 500$  квар этой мощности. Следует распределить объемы ее генерации для каждого электродвигателя и указать при этом величины токов возбуждения с тем, чтобы обеспечить выполнение заданий по генерации на данном отрезке времени.

Используя формулы (5)...(7) и численные значения показателей (табл. 1), получим следующие зависимости  $Z_i = f(Q_i)$  и  $I_{\text{в}i} = f(Q_i)$  для электродвигателей мощностью 800 кВт:

$$\begin{aligned} Z_1 &= 398 - 0,053Q_1, & I_{\text{в}1} &= 180 + 0,19Q_1; \\ Z_2 &= 282 - 0,066Q_2, & I_{\text{в}2} &= 180 + 0,3Q_2; \\ Z_3 &= 373 - 0,046Q_3, & I_{\text{в}3} &= 175 + 0,21Q_3. \end{aligned} \quad (8)$$

При получении линеаризованных зависимостей  $Z_i = f(Q_i)$  использованы следующие ограничения, обусловленные результатами эксперимента:

$$0 \leq Q_1 \leq 470 \text{ квар}; \quad 0 \leq Q_2 \leq 396 \text{ квар}; \quad 0 \leq Q_3 \leq 583 \text{ квар}.$$

Из (8) для  $Z_i = f(Q_i)$  видно, что максимальное значение суммы  $Z_1 + Z_2 + Z_3$  будет при  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$  и составит величину 1053 руб на 1 ч работы электродвигателей. Ее снижение может быть обеспечено, в первую очередь, за счет того электродвигателя, у которого значение коэффициента  $\operatorname{tg}\alpha$  при  $Q_i$  максимально. Таким двигателем является второй с  $\operatorname{tg}\alpha = 0,066$ . Так как верхнее ограничение по  $Q_2$  установлено в пределах 396 квар, использу-

ем его полностью, при этом ток возбуждения  $I_{в2}$ , вычисленный по (8), будет равен 300 А.

Вторым по эффективности генерации реактивной мощности является первый электродвигатель ( $\operatorname{tg}\alpha = 0,053$ ). Так как суммарно требуется генерация 500 квар реактивной мощности, на долю первого электродвигателя остается

$$Q_1 = Q_{\text{тр}} - Q_2 = 500 - 396 = 104 \text{ квар,}$$

для чего значение тока возбуждения необходимо установить на величину

$$I_{в1} = 180 + 0,19 \cdot 104 = 200 \text{ А.}$$

Третий электродвигатель при заданной величине генерируемой реактивной мощности в ее генерации не участвует.

Вычислим значение суммы затрат при рассчитанном режиме работы электродвигателей

$$Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + Z_3 = 398 - 0,053 \cdot 104 + 282 - 0,066 \cdot 396 + 373 = 1021,4 \text{ руб.}$$

Таким образом, при работе в режиме перекомпенсации первого и второго электродвигателей и в режиме полной компенсации третьего обеспечение генерации 500 квар реактивной мощности дает возможность экономить ежедневно

$$\Delta Z = 1053 - 1021,4 = 31,6 \text{ руб,}$$

а при сохранении такого режима в течение года эта экономия составит

$$\Delta Z_{\Sigma} = 31,6 \cdot 8760 = 276,8 \text{ тыс. руб.}$$

Как видно из приведенных расчетов, в случае использования синхронных электродвигателей в качестве регуляторов реактивной мощности распределение значений этих мощностей между агрегатами особых затруднений не вызывает. Некоторым усложнением задачи может быть учет коэффициента загрузки двигателей, так как приведенные табличные данные и зависимости относятся к конкретным замерам в рабочем состоянии оборудования на некотором участке времени  $t$ . Так как коэффициент загрузки агрегатов КНС может быть недостаточно стабильным, его учет можно проводить методом пополнения статистических данных по интересующим показателям, что вполне осуществимо ввиду того, что насосные агрегаты КНС в настоящее время дооснащаются штатной измерительной аппаратурой (например, электронными счетчиками энергии для технического учета электропотребления и мощности).

Усложняет задачу минимизации рассмотренных выше затрат  $Z$  случай, когда агрегаты КНС используются как регуляторы не только реактивной, но и активной мощности в условиях дифференцирования тарифа  $T$  по зонам времени. Использование электродвигателей КНС в таких режимах может быть выгодно, если они отключаются кратковременно в часы пиковых нагрузок энергосистемы (два часа утром и три часа вечером) и тарифы на электроэнергию имеют наибольшие значения. В этих условиях вести расчеты  $Z_i$  по средним тарифам, как это было проведено выше, неправильно. Следующая особенность – при управлении потреблением активной мощности меняется состав работающих и неработающих электродвигателей,

среди которых могут оказаться и являющиеся эффективными источниками генерации реактивной мощности.

В этом случае основная задача – выбор отключаемого электродвигателя. При выборе должны учитываться:

- коэффициент загрузки двигателя на момент отключения;
- факт использования (неиспользования) двигателя в данное время в качестве источника реактивной мощности;
- приоритет электродвигателя в качестве источника реактивной мощности;
- ограничения по отключаемой активной мощности, обусловленные необходимостью закачки требуемого объема воды для поддержания пластового давления.

С учетом изложенных выше факторов можно руководствоваться следующим порядком выбора агрегата для отключения в часы максимальных нагрузок в случае, когда этот выбор неоднозначен:

- первым отключается тот агрегат, который не участвует в регулировании реактивной мощности;
- если такой агрегат отсутствует, то отключается агрегат, у которого в линеаризованной характеристике  $Z = f(Q)$  значение  $\operatorname{tg}\alpha$  минимально;
- в случае отключения выбранного таким способом агрегата реактивная мощность, генерируемая им до отключения, перераспределяется между оставшимися агрегатами узла по изложенной выше методике ее распределения.

## ВЫВОДЫ

1. Для использования электродвигателей КНС в качестве потребителей-регуляторов активной и реактивной мощностей следует проводить экспериментальное снятие необходимых числовых характеристик параметров, влияющих на экономические показатели работы агрегатов, в частности плату за потребление активной и потребление-генерацию реактивной энергии. Так как экспериментальное снятие характеристик является достаточно затратным мероприятием и не может проводиться систематически, следует по возможности использовать штатную аппаратуру с пополнением ее современной электронной, в частности оснащать агрегаты КНС электронными счетчиками класса 1,0 для технического учета потребляемой активной и генерируемой реактивной энергии и мощности; счетчики должны быть обеспечены цифровым выходом в компьютерную систему сбора и обработки данных.

2. Необходима разработка соответствующего блока компьютерных программ для местных диспетчерских нефтегазодобывающих предприятий, обеспечивающих проведение в реальном режиме времени необходимых расчетов по режимам работы каждого агрегата КНС, включенного в перечень потребителей-регуляторов. Часть этих программ может быть составлена с применением методов, изложенных в статье.

3. Расчеты по рассмотренным способам и реализации их результатов должны проводиться параллельно с анализом энергоэкономических характеристик насосных агрегатов в целом, так как удельные расходы электроэнергии на закачку воды зависят как от характеристик электродвигателей, так и от характеристик насосов для некоторой КНС. В этом случае в расчеты необходимо включать объемы закачиваемой воды и соответственным

образом учитывать удельные расходы электроэнергии на эту закачку каждым насосом, если измерительная аппаратура позволяет это. При определении приоритетов на отключение агрегата в этом случае и при прочих равных условиях следует руководствоваться тем положением, что как в зоне пиковых, так и других нагрузок наименьшее число часов должен работать агрегат с наилучшими энергоэкономическими характеристиками.

УДК 621.314.224

## **ВЫЯВЛЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ ВИТКОВ ВО ВТОРИЧНЫХ ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СНЯТИИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Докт. техн. наук СОПЬЯНИК В. Х., инженеры ВЛАСОВ А. И., ГЛУШОНОК Е. А.

*Научно-исследовательское и проектное республиканское  
унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»*

Надежность функционирования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в установившихся и переходных режимах короткого замыкания (КЗ) во многом зависит от точности работы трансформаторов тока (ТТ).

В инструкции по проверке ТТ, используемых в схемах релейной защиты [1] (в дальнейшем – Инструкция), отмечается, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) ТТ являются основой при оценке исправности и определении погрешности их работы. Наиболее распространенная неисправность ТТ – витковое замыкание во вторичных обмотках, которые выявляются по резкому снижению ВАХ и изменению ее крутизны. Согласно Инструкции ВАХ ТТ должны сниматься при новом включении и полных плановых проверках ТТ при практически синусоидальном напряжении [1]. При этом ток намагничивания измеряется двумя амперметрами, реагирующими на действующее и амплитудное значения тока. По результатам замеров строятся две ВАХ ТТ: первая – для сравнения с типовой характеристикой, вторая – для контроля исправности ТТ при последующих проверках. Однако из-за отсутствия амплитудных амперметров на практике, как правило, снятие ВАХ ТТ производится с использованием амперметра и вольтметра действующих значений. Снятая таким методом ВАХ ТТ не обеспечивает построение амплитудной характеристики намагничивания, как того требует Инструкция.

В [2] изложена методика снятия ВАХ ТТ путем цифрового осциллографирования (ЦО) токов, напряжений и приведено описание разработанной компьютерной программы (КП) обработки цифровых осциллограмм. Результаты обработки КП цифровых осциллограмм токов и напряжений ВАХ ТТ включают: гармонический анализ подводимого напряжения к ТТ и протекающего тока во вторичной обмотке, расчет их действующих, средних