



СНИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ СВАРКЕ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **И. И. ЗАРУБА**, д-р техн. наук, **В. В. ДЫМЕНКО**, канд. техн. наук, **А. Ф. ШАТАН**, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описан опыт применения при ручной дуговой сварке переменным током импульсных устройств стабилизации горения дуги, обеспечивающих стабильность процесса сварки, качество формирования сварных швов, экономию электротехнических материалов при изготовлении сварочных трансформаторов и электроэнергии при их эксплуатации.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварочный трансформатор, переменный ток, стабильность процесса сварки, экономия электроэнергии, электротехнические материалы

Широкое распространение ручной дуговой сварки покрытыми электродами стимулирует совершенствование материалов и оборудования, предназначенных для этого способа сварки. В части оборудования усовершенствованию подлежат прежде всего источники питания. В настоящее время распространение получили инверторные источники питания как перспективный вид сварочного оборудования. Однако сложность их электрической схемы и высокая стоимость плохо сочетаются с простотой устройства и сравнительной дешевизной держателя и электродов для ручной дуговой сварки. В связи с этим проблемы уменьшения массы и энергопотребления источников питания, создания их портативного варианта важны и актуальны для дуговой сварки. Одними из перспективных, на наш взгляд, направлений является применение импульсного устройства стабилизации горения дуги (УСГД) в сочетании с источниками питания переменного тока — сварочными трансформаторами. УСГД — это прибор, состоящий из последовательно включенных обмотки питания, конденсатора, тиристорного коммутатора и дугового промежутка (сварочной обмотки). Разряд конденсатора при каждом переходе сварочного тока через нуль способствует повторному зажиганию дуги. Для расширения сферы применения переменного сварочного тока существуют следующие возможности:

использование УСГД с серийными сварочными трансформаторами;

снижение за счет УСГД напряжения холостого хода $U_{х.х}$ трансформаторов;

создание комбинированных трансформаторов с тиристорным управлением и УСГД;

разработка многопостовых сварочных систем переменного тока с УСГД на постах. Рассмотрим эти возможности подробнее.

1. Эффективность подключения УСГД к сварочному трансформатору оценивали [1] путем сравнительных испытаний стандартного сварочного трансформатора типа ТДМ-503 с УСГД и без него. При этом использовали УСГД типа СД-3. С целью обеспечения сварки электродами, предназначенными для постоянного тока, трансформатору типа ТДМ-503 без УСГД создавали наиболее благоприятные условия: несколько превышали напряжение сети, а режим сварки выбирали на первой ступени регулировки тока, когда индукция стали магнитопровода трансформатора не выше допустимой, поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора соединены последовательно (синусоидальная кривая напряжения на его выходе не искажена, как в случае параллельного соединения, т. е. скорость нарастания напряжения после перехода через нуль достаточно велика [2]). Обмотки этого трансформатора имеют малое омическое сопротивление сварочного контура R_k и его отношение к реактивному X_k сопротивлению незначительное:

$$\gamma = R_k/X_k \approx 0.$$

Подключение УСГД к сварочному трансформатору привело к улучшению практически всех показателей, приведенных в табл. 1. Это заметно при сварке электродами, предназначенными для постоянного тока: уменьшаются потери металла (коэффициент потерь K_n), особенно при сварке электродами с тугоплавкими обмазками; наблюдается тенденция к увеличению коэффициента наплавки a_n и скорости v расплавления электрода; существенно увеличивается суммарный показатель Б сварочных свойств трансформатора, определяемый по ГОСТ 25616–83 [3]. Кроме того, применение УСГД позволяет выполнять сварку от-

Таблица 1. Результаты испытаний трансформатора ТДМ-503 с УСГД и без него

Марка электрода	d_3 , мм	I_2 , А	U_2 , В	ТДМ-503У2			
				K_n , %	a_n , г/(А·ч)	v , мм/(А·ч)	Б, баллы
УОНИ-13/55	5	220	24	7,37	8,71	1,59	19
УОНИ-13/45	4	140	22	3,01	8,58	2,38	21
ОЗЛ-8	4	120	25	5,43	12,50	3,26	17
МР-3	4	210	23	10,40	7,73	2,30	20
АНО-4	4	195	24	12,40	8,72	2,67	22
	3	120	25	10,90	8,62	4,67	22

Окончание табл. 1

Марка электрода	ТДМ-503 + СД-3				α_1 , %	α_2 , %	α_3 , %	α_4 , %
	$K_{п0}$, %	$a_{п0}$, г/(А·ч)	v_0 , мм/(А·ч)	Б ₀ , баллы				
УОНИ-13/55	5,50	8,90	1,67	22	25	2,2	5	16
УОНИ-13/45	1,88	8,80	2,54	24	38	2,6	7	14
ОЗЛ-8	5,08	12,90	3,95	20	6	3,2	21	18
МР-3	7,44	8,01	2,40	22	29	3,6	4	10
АНО-4	12,30	8,94	2,75	22	1	2,5	3	0
	9,63	8,81	4,93	23	12	2,2	6	4

Примечания. 1. d_3 — диаметр электрода; I_2 , U_2 — соответственно ток и напряжение вторичной цепи; $\alpha_1 = [(K_{п0} - K_n)/K_n] \cdot 100$ %; $\alpha_2 = [(a_{п0} - a_n)/a_n] \cdot 100$ %; $\alpha_3 = [(v_0 - v)/v] \cdot 100$ %; $\alpha_4 = [(B_0 - B)/B] \cdot 100$ %; остальные см. в тексте. 2. Опыт проводили при $U_{x,x} = 83$ В.

ветственных изделий сварщику более низкой квалификации, облегчает его труд, улучшает качество формирования сварного шва, способствует экономии электроэнергии и увеличивает производительность процесса сварки, дает возможность применять более производительные режимы и электроды, увеличить долю времени горения дуги в общем времени работы сварщика. В то же время стоимость УСГД массой 0,4 кг составляет не более 5...7 % средней стоимости трансформатора. Учитывая, что годовой выпуск сварочных трансформаторов составляет много тысяч единиц и уже имеется их значительный парк, можно предположить, какую экономию средств даст применение УСГД.

2. Снижение напряжения холостого хода $U_{x,x}$ сварочного трансформатора приводит к уменьшению его массогабаритных показателей при изготовлении и расхода электроэнергии при эксплуатации, а также к улучшению безопасности условий работы.

Нельзя, однако, не учитывать, что с $U_{x,x}$ связаны показатели устойчивости горения дуги, возможность обеспечения таких параметров заданного режима работы, как напряжение дуги и сварочный ток. Начальное зажигание дуги при ручной сварке осуществляется путем закорачивания электрода на изделие; после каждого перехода сварочного тока через нуль для повторного зажигания дуги необходимо обеспечить достаточ-

ное напряжение повторного зажигания U_3 . Чем больше U_3 (для электродов при переменном токе — 40...50 В, а при постоянном — 60...90 В и выше), тем больше должно быть значение $U_{x,x}$.

С уменьшением напряжения холостого хода $U_{x,x}$ напряжение зажигания U_3 дуги при изменении полярности тока, как правило, увеличивается незначительно. Однако при случайных возмущениях по длине дуги, режиму сварки, тепловому состоянию столба дуги (вследствие переноса металла, образования козырька на электроде и пр.) U_3 при низких значениях $U_{x,x}$ становится больше, чем при высоких, особенно, если значение эффективного потенциала ионизации дугового газа велико. При этом U_3 будет тем больше, чем дольше длится случайное возмущение. Несмотря на то, что средняя частота случайных возмущений намного ниже частоты промышленного переменного тока, эти возмущения могут стать причиной нарушения стабильности процесса сварки. Таким образом, увеличение $U_{x,x}$ сварочных трансформаторов является средством преодоления случайных повышений значений U_3 , т. е. по существу в источник питания закладывается излишек дорогостоящих активных материалов (электротехнические медь и сталь) на случай появления возмущения, которое может привести к нежелательному росту U_3 . Такой путь повышения стабильности процесса сварки неэкономичен. Исследователи уже давно пытались найти более эффективные решения, из ко-



Таблица 2. Показатели расплавления электрода и его энергетические параметры

№ опыта	Марка электрода (диаметр, мм)	Источник питания	$U_{x,x}$, В	I_1 , А	U_1 , В	P_a , кВт·А	I_2 , А	U_2 , В	K_p , %
1	УОНИ-13/55 (5)	Опытный	36,5	25,0	384	5,20	215	22,0	11,90
2			37,0	23,5	389	4,74	195	22,5	7,18
3			36,5	23,0	385	4,40	185	22,0	2,11
4		СТШ-500	60,0	34,0	384	5,14	200	23,0	3,70
5			60,0	38,5	380	5,60	215	22,5	2,37
6	МР-3 (4)	Опытный	36,5	24,0	384	5,00	195	24,0	11,80
7			37,0	23,0	388	4,44	180	23,0	9,96
8		СТШ-500	60,0	32,7	384	5,22	195	24,0	16,10
9			60,0	36,0	384	5,28	195	24,0	13,20

Окончание табл. 2

№ опыта	Марка электрода (диаметр, мм)	Источник питания	K_{n1} , г/(А ² ·ч)	K_{n2} , г/(В ¹ ·А ¹ ·ч)	КПД, %	cos φ	P_c , кВт·А ₁	Кривые на рисунке
1	УОНИ-13/55 (5)	Опытный	8,90	0,200	91,0	0,54	9,60	2
2			9,44	0,201	91,6	0,54	9,14	3
3			10,10	0,211	92,5	0,50	8,86	4
4		СТШ-500	9,95	0,152	89,5	0,39	13,10	1
5			10,00	0,147	86,4	0,38	14,63	1
6	МР-3 (4)	Опытный	7,37	0,156	93,6	0,54	9,22	—
7			7,49	0,156	93,2	0,50	8,92	—
8		СТШ-500	7,32	0,114	89,7	0,41	12,56	—
9			7,38	0,104	88,6	0,38	13,82	—

Примечания. I_1 , U_1 — ток и напряжение первичной сети; P_a — активная мощность трансформатора; $P_c = I_1 U_1$ — мощность, потребляемая из сети; cos φ — коэффициент мощности; K_{n1} — коэффициент наплавки, характеризующий металлургические свойства электрода; K_{n2} — коэффициент наплавки, характеризующий затраты энергии, потребляемой из сети для расплавления единицы массы электродного металла.

торых наилучшим является подключение параллельно дуге генератора импульсов, обеспечивающего необходимое значение U_3 при погасании дуги.

В ИЭС им. Е. О. Патона создано новое поколение УСГД, простых, экономичных и надежных в работе. На основе УСГД стало возможным уменьшить значения $U_{x,x}$ сварочного трансформатора. Проведены исследования [4] по определению допустимого предела понижения значений $U_{x,x}$ трансформатора при ручной дуговой сварке покрытыми электродами различных марок, в том числе предназначенными для сварки на постоянном токе. Результаты исследований показали [4], что при ручной дуговой сварке на токе до 200 А значение $U_{x,x}$ трансформатора не должно превышать 37 В, на токе до 300 А $U_{x,x} < 45$ В, а на токе до 500 А $U_{x,x} < 55$ В. Между тем, $U_{x,x}$ сварочных трансформаторов, рассчитанных на все номинальные токи, обычно составляет 60...80 В.

Как известно, изменение рода тока (например, в случае электродов УОНИ-13/45) может отразиться на механических свойствах сварных соединений. Предполагалось, что показатели этих

свойств зависят в определенной мере от формы кривых тока и напряжения на дуге, которые изменяются в зависимости от $U_{x,x}$. Проводили опытную сварку стыковых соединений листовой стали СтЗсп с применением трансформатора с понижающимся $U_{x,x}$. При этом использовали специальный сварочный трансформатор с жесткой внешней характеристикой, обеспечивающий ступенчатое (через 3...5 В) изменение значений $U_{x,x}$ от 30 до 80 В. Наклон внешней характеристики регулировали дросселем с подвижным шунтом, последовательно включенным в сварочную цепь. Наряду с опытным образцом трансформатора испытывали стандартный СТШ-500 ($U_{x,x} = 60$ В), параллельно которому, как и в случае опытного трансформатора, подключали УСГД, рассчитанное на частоту 100 Гц. В опытах главным образом применяли электроды двух типов — УОНИ-13/45 (с основным покрытием) и МР-3 (с рутиловым покрытием). Стабильность процесса сварки оценивали исходя из количества перерывов в горении дуги за время расплавления всего электрода, а также по осциллограммам тока и напряжения на дуге. Ток подбирали в зависимости от

диаметра электрода (несколько меньше рекомендуемого), $U_{x,x}$ последовательно снижали до появления хотя бы одного обрыва горения дуги и такое значение $U_{x,x}$ считали критическим, т. е. недопустимым. Для указанных выше, а также других марок электродов диаметром 3, 4 и 5 мм допустимый предел понижения значений $U_{x,x}$ составлял 36...37 В. При более низком значении $U_{x,x}$ в горении дуги наблюдались перерывы, количество которых резко возрастало по мере уменьшения $U_{x,x}$. Результаты испытаний свидетельствуют о том [4], что механические свойства соединений, полученных при пониженном $U_{x,x}$, полностью отвечают требованиям ГОСТ 9467-75 и находятся на уровне типичных показателей для данной марки электрода. Таким образом, в плане механических свойств сварных соединений понижение значений $U_{x,x}$ трансформатора до 36...37 В вполне допустимо.

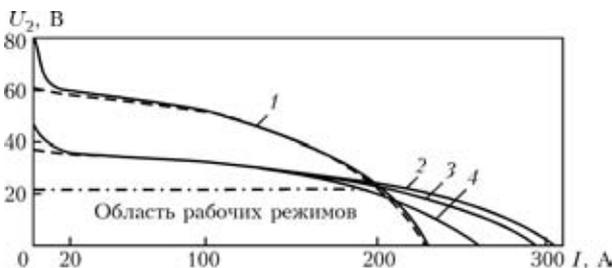
В табл. 2 приведены показатели расплавления электродов и их энергетические параметры. Как следует из табл. 2, значения коэффициента полезного действия (КПД), $\cos \varphi$ и K_{H2} , соответствующие рабочим режимам в случае источника питания с низким $U_{x,x}$, больше, а потребляемая из сети мощность P_c меньше, чем у источника с высоким напряжением холостого хода ($U_{x,x} = 60$ В). Сравним результаты опытов № 3 и 5, а также № 7 и 9 (табл. 2). В первом случае при практически одинаковом K_{H1} (10,1...10,0 г/(А₂·ч)) трансформатор с пониженным напряжением холостого хода ($U_{x,x} = 36,5$ В) из сети потребляет $P_c = 8,86$ кВ₁·А₁, а трансформатор с $U_{x,x} = 60$ В — $P_c = 14,63$ кВ₁·А₁, т. е. на 40 % меньше второго. Кроме того, энергия, взятая из сети, в первом случае используется более рационально, чем в случае трансформатора с более высоким значением $U_{x,x}$. Так, для наплавки одной и той же массы электродного металла расход активной мощности в опыте № 3 (см. табл. 2) составляет 4,4 кВт, а в опыте № 5 — 5,6 кВт, т. е. на 21 % больше. Коэффициент наплавки K_{H2} показывает, что с понижением $U_{x,x}$ масса наплавленного металла на 1 кВ₁·А₁ мощности, потребляемой из первичной

сети, увеличивается на 40 %. Аналогичные данные получены и в опытах № 7 и 9: масса наплавленного металла на 1 кВ₁·А₁ мощности, потребляемой из первичной сети, увеличивается также на 40 %.

В табл. 2 приведены показатели расплавления K_H и K_P при сварке электродами УОНИ-13/55 на разных токах. Заметна тенденция к увеличению коэффициента наплавки K_H и уменьшению коэффициента потерь K_P , значения которых при токе 185 А не превышают полученные для трансформатора с $U_{x,x} = 60$ В. Увеличение коэффициента наплавки связано с уменьшением тока сварки и соответственно тока короткого замыкания $I_{к.з.}$. Трансформатор с низкими значениями $U_{x,x}$ имеет более жесткие внешние характеристики в диапазоне рабочих режимов, чем с высоким $U_{x,x}$. При этом из трех его внешних характеристик (см. кривые 2-4 на рисунке) для приведенных выше режимов сварки (соответственно 215, 195 и 185 А); кривая 4 наиболее близкая по значению $I_{к.з.}$ к трансформатору с $U_{x,x} = 60$ В (кривая 1). Соответственно в этом случае близки также и значения коэффициента потерь металла K_P . Отсюда можно заключить, что трансформаторы с меньшими значениями $U_{x,x}$ с УСГД можно использовать для сварки на пониженных режимах.

Таким образом, трансформатор с $U_{x,x} = 37$ В, снабженный УСГД, работающим на частоте 100 Гц, обеспечивает сварку на токе около 200 А (как переменном, так и постоянном) покрытыми электродами; при этом имеет место экономия материальных и энергетических ресурсов.

На основании выполненных исследований в ИЭС им. Е. О. Патона разработан сварочный трансформатор дуговой комбинированный с УСГД типа ТДК-315 ($U_{x,x} = 45$ В; номинальный ток $I_{ном} = 315$ А). Встроенный в него УСГД генерирует за полупериод два импульса. При сравнении его технических характеристик с серийным трансформатором типа ТДМ-317 (табл. 3) видно, что в ТДК-315 ввиду увеличения коэффициента трансформации номинальный первичный ток уменьшается и для создания номинальной мощности дуги $P_{2ном} = 10,27$ кВт он потребляет из сети мощность $P_c = 17,6$ кВ₁·А₁. Для создания такой же мощности дуги трансформатор ТДМ-317 ($U_{x,x} = 65$ и 80 В) потребляет из сети 22,5 кВ₁·А₁, т. е. расходует на 4,9 кВ₁·А₁ (на 22 %) больше энергии, чем ТДК-315. Имея более высокие КПД и $\cos \varphi$, предлагаемый источник питания рациональнее использует потребляемую энергию. Каждая тысяча трансформаторов с пониженным $U_{x,x}$ будет потреблять из сети на 4...5 тыс. кВ·А меньше, чем с $U_{x,x} = 60$ В и более. В Украине в настоящее время работает много сотен тысяч сварочных трансформаторов и эффект очевиден.



Внешние характеристики трансформаторов в области рабочих режимов: 1 — СТШ-500 ($U_{x,x} = 60$ В, $I_2 = 200...215$ А); 2 — опытный трансформатор ($U_{x,x} = 36$ В, $I_2 = 215$ А); 3 — то же ($I_2 = 195$ А); 4 — то же ($I_2 = 185$ А); сплошные кривые —



Таблица 3. Сравнительные технические и энергетические характеристики типов ТДМ-317 и ТДК-315

Параметр	ТДМ-317	ТДК-315
Напряжение питания сети U_1 , В	380	380
Номинальный сварочный ток $I_{2ном}$, А	315	315
Относительная продолжительность нагрузки ПН при цикле 5 мин, %	60	20; 60
Первичный ток при номинальном сварочном токе $I_{1ном}$, А	58	42
Диапазон регулирования сварочного тока, А: I_{2min} I_{2max}	60 370	100 345
Напряжение холостого хода сварочной обмотки $U_{х.х}$, В	65; 80	45±4
Номинальное рабочее напряжение $U_{2ном}$, В	32,6	32,6
Максимальное рабочее напряжение U_{2max} , В	34,8	33,8
Номинальная мощность сварочной дуги, обеспечиваемая трансформаторами $P_{2ном} = I_{2ном}U_{2ном}$, кВт	10,27	10,27
КПД при номинальном токе $\eta = P_2/P_1$, %, не менее	83	78
Коэффициент мощности $\cos \varphi = P_1/P_{1ном}$, не менее	0,55	0,75
Номинальная потребляемая мощность из сети $P_{с.ном} = I_{1ном}U_1$, кВт·А, не более	22,5	17,6
Масса Q , кг, не более	130	55; 85

ТДК-315 с ПН = 60 % имеет массу не более 85 кг (табл. 3), т. е. экономия электротехнических материалов по сравнению с аналогом ТДМ-317 составляет около 35 %. Кроме того, трансформатор ТДК-315 по своим сварочно-технологическим свойствам выше трансформатора дугового с механическим регулированием типа ТДМ-317, поскольку позволяет выполнять сварку электродами, предназначенными для постоянного тока. Затраты на УСГД окупятся только за счет уменьшения массы ТДК-315.

На основе трансформаторов с пониженным $U_{х.х}$ и УСГД, рассчитанным на 100 Гц, созданы макеты переносных источников питания для ручной дуговой сварки. В качестве примера можно привести разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона источник питания «Разряд-90» массой 18 кг (табл. 4), который по удельной массе хотя и несколько уступает инверторному источнику питания, но превосходит его по простоте, надежности и дешевизне.

Идея импульсного поджига дуги используется и при разработке ряда оригинальных сварочных источников питания не только переменного, но и постоянного тока [5].

3. Создание тиристорно-управляемых трансформаторов с УСГД — еще один путь повышения экономической эффективности сварочного оборудования. В ИЭС им. Е. О. Патона разработан тиристорно-управляемый дуговой трансформатор ТДТ с УСГД. Он имеет основную сварочную обмотку ($U_{х.х} = 45...55$ В в зависимости от номинального тока, который составляет 200...500 А) и последовательно включенную дополнительную обмотку и дроссель ($U_{х.х} = 35...25$ В) для питания дежурной дуги. Дополнительная обмотка вместе с последовательно включенным дросселем шунтируется тиристорным ключом. При закрытых тиристорах дуга запитывается суммарным напряжением основной сварочной и дополнительной обмоток ($U_{х.х} \leq 80$ В), а ток (25...50 А) такой дежурной дуги определяется в основном значением индук-

Таблица 4. Технические характеристики серийных трансформаторов типа «Разряд» и разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона

Источник питания	U_1 , В	$U_{х.х}$, В	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	$I_{min}...I_{max}$, А	ПН, %	f , Гц	m	Q , кг
ТДМ-401	380	63...80	36	400	80...460	60	—	2	145
ТДЭ-402	380	80	44	400	80...400	60	—	1	180
ТДМ-315	380	63...80	33	315	60...360	60	—	2	130
«Разряд-315»	380	45	33	315	60...360	60	200	1	90
«Разряд-90»	220	40	24	90	30...95	20	100	1	18

Примечание. $I_{min}...I_{max}$ — диапазон регулирования сварочного тока; f — частота следования стабилизирующих импульсов; m — количество ступеней регулирования тока.

тивного сопротивления дросселя. При открытых тиристорах ток определяется тем номинальным значением, на которое рассчитана сварочная обмотка.

В табл. 5 представлены технические характеристики источников питания переменного тока, рассчитанные на номинальный ток 250 и 315 А и сравниваются разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона трансформаторы «Разряд-250» с ТДТ-251 ($I_{ном} = 250$ А, ПН = 20 %), а также ТДТ-315 с изготавливаемым серийно трансформатором ТДМ-317 ($I_{ном} = 315$ А, ПН = 60 %). Трансформаторы «Разряд-250» и ТДМ-317 имеют напряжение холостого хода $U_{x,x} \leq 60$ В, а ТДТ-251 и ТДТ-315 — соответственно $U_{x,x} = 45$ и 50 В. Из таблицы видно, что трансформатор ТДТ-251, обеспечивая одинаковую с трансформатором «Разряд-250» номинальную мощность сварочной дуги $P_{2ном} = 7,5$ кВт, потребляет для этого энергии из сети на 30 % меньше, кроме того, его масса на 10 % меньше. Трансформатор ТДТ-315 также потребляет энергии из сети на 30 % меньше, а масса

его на 30 % меньше, чем у ТДМ-317. При этом трансформаторы типа ТДТ имеют один расширенный диапазон регулирования сварочного тока.

Из табл. 6 видно, что трансформатор ТДТ-251, имеющий $U_{x,x} = 45$ В, на $1 A_1 \cdot V_1 \cdot ч$ энергии, взятой из сети, расплавит металла на 39 % (электроды АНО-6 диаметром 4 мм) и 27 % (электроды УОНИ-13/45 диаметром 5 мм) больше, чем трансформатор «Разряд-250» с $U_{x,x} = 60$ В. Для наплавки 1 г металла трансформатор ТДТ-315 ($U_{x,x} = 50$ В) из сети потребляет на 45 % энергии меньше, чем трансформатор ТДМ-317 ($U_{x,x} = 80$ В).

Трансформаторы типа ТДТ не только не уступают по своим сварочно-технологическим свойствам лучшим отечественным и зарубежным аналогам, но и превосходят их, поскольку пригодны для сварки электродами с основным покрытием (УОНИ-13/45, ОЗЛ-8 и др.), аргодуговой сварки неплавящимся электродом нержавеющей сталей, алюминия и его сплавов.

4. Разработка многопостовых систем электроснабжения — важная задача повышения экономи-

Таблица 5. Технические характеристики сварочных трансформаторов

Параметр	«Разряд-250»	ТДТ-251	ТДМ-317	ТДТ-315
Напряжение питания сети U_1 , В	380	380	380	380
Номинальный сварочный ток $I_{2ном}$, А	250	250	315	315
Относительная продолжительность нагрузки при цикле 5 мин, %	20	20	60	60
Первичный ток при номинальном сварочном токе $I_{1ном}$ А	43	31	65; 43	42
Диапазон регулирования сварочного тока, А:				
I_{2min}	90	25	60	25
I_{2max}	255	275	340	375
Напряжение холостого хода сварочной обмотки $U_{x,x}$, В	60±4	45±4	65; 80	50±4
Ток холостого хода $I_{1x,x}$, А, не более	4	4	6	4
Номинальное рабочее напряжение $U_{2ном}$, В	30,0	30,0	32,6	32,6
Максимальное рабочее напряжение U_{2max} , В	30,2	31,0	33,6	35,0
Номинальная мощность сварочной дуги $P_{2ном}$, обеспечиваемая установкой, кВт	7,5	7,5	10,3	10,3
Максимальная мощность сварочной дуги P_{2max} , обеспечиваемая установкой, кВт	7,7	8,53	11,424	13,125
КПД при номинальном токе η , %, не менее	75	83	80	86
Коэффициент мощности $\cos \varphi$, не менее	0,65	0,84	0,56	0,75
Номинальная потребляемая из сети мощность $P_{1ном}$, $кВ \cdot A_1$, не более	15,4	10,8	23,0	16,0
Максимальная мощность P_{1max} потребляемая из сети, $кВ \cdot A$	15,8	12,23	25,5	20,35
Установленная максимальная потребляемая мощность $P_{y,max}$, $кВ \cdot A$, не более	17,4	13,5	28,1	22,4
Частота следования импульсов f , Гц	100	100	—	100
Время отключения УСГД на холостом ходу трансформатора τ , с, не более	2	2	—	2
Габаритные размеры, см:				
длина	35	35	52	50
ширина	31	31	58	45
высота	47	47	80	50
Масса Q , кг, не более	50	45	130	90
Примечание. ПН = $(\tau_{св}/\tau_{ц}) \cdot 100$ %; $U_{2ном} = 20 + 0,04I_{2ном}$; $U_{2max} = 20 + 0,04I_{2max}$; $P_{2ном} = I_{2ном}U_{2ном}$; $P_{2max} = I_{2max}U_{2max}$; $\eta = P_{2ном}/P_1$; $\cos \varphi = P_1/P_{1ном}$; $P_{1ном} = P_{2ном}/\eta \cos \varphi$; $P_{1max} = P_{2max}/\eta \cos \varphi$; $P_{y,max} = 1,1P_{1max}$				

Таблица 6. Коэффициенты расплавления K_n , K_p , a_n и суммарный показатель B сварочных свойств сравниваемых трансформаторов

Источник питания	Электрод (диаметр, мм)	$U_{х.х.}$, В	I_1 , А	U_1 , В	I_2 , А	U_2 , В	K_n , %	a_n , г/(А ² ·ч)	K_p , г/(В ¹ ·А ¹ ·ч)	B , баллы
«Разряд-250»	АНО-6 (4)	60	34	378	190	25	8,40	8,80	0,128	23
	УОНИ-13/45 (5)	60	35	378	188	24	3,70	3,37	0,134	24
ТДТ(УДС)-251	АНО-6 (4)	45	25	374	180	25	7,90	8,22	0,178	22
	УОНИ-13/45 (5)	45	26	372	200	26	3,10	8,91	0,183	20
ТДК-315	АНО-6 (4)	45	24	375	180	25	8,20	9,10	0,188	23
	УОНИ-13/45 (5)	45	24	378	188	23	2,60	9,50	0,197	24
ТДМ-317	АНО-6 (4)	82	45	372	210	24	9,07	7,90	0,100	24

ческой эффективности сварочного производства. При сосредоточении большого количества сварочных источников питания (выпрямителей, трансформаторов) на сравнительно ограниченных площадях предприятий создаются определенные трудности, приводящие к снижению производительности труда и удорожанию сварочных работ. В промышленности широкое применение нашли однопостовые сварочные трансформаторы, рассчитанные на ток 500 А (ТД-500У2, ТДМ-503У2 и др.), которые, как правило, используются для токов до 300...350 А включительно. В случае значительного сосредоточения их в цеховых помещениях имеет место нерациональное использование производственных площадей. Обычно эти источники в течение рабочего дня загружены не более чем на 50 %. Кроме того, работа трансформатора на холостом ходу приводит к большим потерям электроэнергии. Обычно в этих условиях трансформаторы подключаются к питающей сети силовыми кабелями длиной 20...30 м, которые укладываются на сварные конструкции и сборочные приспособления, что нежелательно с точки зрения техники безопасности. При этом трансформаторы подсоединяют через электроштыки к питающей сети 380 В группами и отключение или подключение хотя бы одного из постов ведет к простоям всех остальных.

При сварке на постоянном токе эти недостатки устраняются благодаря использованию многопостовых систем, получивших широкое распространение как при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, так и при механизированной сварке в углекислом газе и под флюсом, например с применением выпрямителя ВМГ-5000 на $I_{ном} = 5000$ А. Переход от индивидуальных источников питания к многопостовым системам оказался целесообразным в плане общей экономии электроэнергии и производственных площадей, а также уменьшения затрат на амортизацию, обслуживание и ремонт.

К сожалению, преимущества многопостового питания переменного тока на практике пока еще не реализованы. Главной причиной этого является

отсутствие технического решения, обеспечивающего надежную и экономичную работу системы. Использование существующих технических решений для многопостовых систем, работающих на постоянном токе, не дает положительного результата, поскольку регулирование тока на постах с помощью балластного реостата не обеспечивает требуемой устойчивости процесса, надежности зажигания дуги и сопряжено с большими потерями энергии.

В основу технического решения многопостовой системы для сварки на переменном токе, предложенного в ИЭС им. Е. О. Патона [5], положено применение мощного сварочного трансформатора с жесткой характеристикой с подключением к нему сварочных постов, каждый из которых представляет собой компактный регулируемый дроссель, снабженный УСГД. Могут также использоваться УСГД, встроенные в сварочный трансформатор, но при этом должно быть предусмотрено их питание (около 50 В). Наконец, возможно устройство многопостовой системы по принципу выше описанных тиристорно-управляемых трансформаторов с УСГД, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона: общий для постов трансформатор с жесткой внешней характеристикой и индивидуальный на каждом посту тиристорный регулятор с трансформатором дежурной дуги.

Как известно, важным этапом внедрения нового технического решения является его экономическое обоснование. При этом необходимо сопоставление новых решений с существующими.

Для проверки предложенного технического решения в производственных условиях переделке подвергали серийные сварочные трансформаторы ТДФ-1001 и ТДФ-1601 таким образом, чтобы их внешняя статическая характеристика стала близкой к жесткой (максимально сближены между собой первичные и вторичные обмотки, убран шунт и др.). Для этих трансформаторов разработан также регулятор сварочного тока типа ОИ-125 УХЛЗ, который обслуживает четыре поста и состоит из четырех дросселей с плавно регулируемым (посредством магнитного шунта) индуктивным соп-

ротивлением. К каждому дросселю подключено УСГД.

В ИЭС им. Е. О. Патона изготовлены макеты трансформаторов ТДЭМ-1200У4 и ТДЭМ-3000У4 с жесткими внешними характеристиками, рассчитанные на ток 1200 и 3000 А. Сопоставим многопостовые системы питания переменного тока на 48 постов и на 4 поста, построенные на основе источников, приведенных в табл. 7.

Первая система (базовый вариант) формируется автономными сварочными трансформаторами типа ТДМ-503 (48 шт.), относительную массу которого примем за $Q_{н1}/Q_б = 1$ (где $Q_н$ — масса новой постовой системы; $Q_б$ — базового варианта). Вторая система формируется трансформаторами ТДФ-1601 (2 шт.) и 12 регуляторами сварочного тока ОИ-125УХЛЗ, каждый из которых состоит из четырех дросселей (всего 48 сварочных постов). Относительная масса этого варианта $Q_{н2}/Q_б = 0,6$, т. е. на 40 % меньше, чем в базовом. Третья система формируется трансформаторами ТДЭМ-1201 (3 шт.) и 48 регуляторами сварочного тока (всего 48 сварочных постов). Относительная масса $Q_{н3}/Q_б = 0,59$, т. е. общая масса этой системы на 41 % меньше, чем в базовом варианте. Четвертая система формируется трансформатором ТДЭМ-3001 (1 шт.) и 48 регуляторами сварочного тока. Относительная масса $Q_{н4}/Q_б = 0,58$, т. е. общая масса этой системы на 42 % меньше, чем в базовом варианте. Пятая система формируется трансформатором ТДЭМ-501 (1 шт.) и четырьмя регуляторами сварочного тока.

Относительная масса $Q_{н5}/Q_б = 0,66$, т. е. общая масса этой системы на 34 % меньше, чем в базовом варианте. В третьем–пятом вариантах принцип регулировки режима сварки такой же, как и у тиристорно-регулируемого сварочного трансформатора (см. п. 3 настоящей работы) типа ТДГ — каждый пост состоит из двух дросселей и тиристорного регулятора. Таким образом, каждая из предлагаемых многопостовых систем на 48 постов расходует приблизительно на 40 %, а на четыре поста — на 34 % меньше дефицитных электротехнических материалов, чем в базовом варианте.

С точки зрения экономии затрат электроэнергии сравним сначала четырехпостовую систему ТДЭМ-501 с четырьмя трансформаторами ТДМ-503 (базовый вариант). В табл. 8 представлены четыре варианта режимов работы сварочных постов (см. п. 1–4) с одинаковым коэффициентом спроса $\beta = 0,6$. Этим режимам соответствуют определенные значения мощности $P_с$, потребляемой из сети, а также потери мощностей при сварке P' и на холостом ходу $P'_{х.х.}$. В п. 5 представлены все расходуемые мощности и потери мощности системами на четырех постах.

В табл. 9 показана доля общих потерь от всей энергии, потребляемой системой при использовании номинальной мощности четырех постов. Больше всего энергии теряется в базовом варианте (16,6 %). Четырехпостовая система на базе ТДЭМ-501 теряет только 9,8 % и берет из сети на 41 % меньше энергии, а относительные потери на 64 %

Таблица 7. Технические характеристики источников питания для многопостовых систем

Параметр	ТДМ-503	ТДФ-1601	ТДЭМ-1201	ТДЭМ-3001	ТДЭМ-501
Номинальный сварочный ток $I_{ном}$, А	500	1600	1200	3000	500
Номинальное рабочее напряжение $U_{ном}$, В	40	70	60	70	40
ПН, %	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0
Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$, В	65 (80)	75	65	75	55
КПД	0,86	0,88	0,92	0,92	0,90
Коэффициент мощности $\cos \varphi$	0,65	0,90	0,92	0,92	0,90
Потери мощности на холостом ходу $P_{х.х.}$, кВт	1,5	2,0	2,0	2,0	1,0
Номинальная потребляемая мощность $P_{ном}$, кВт·А	21,47	141,4	85,0	248,0	24,7
Количество источников питания на 48 постах N , шт.	48/48	2/48	3/48	1/48	1/4
Площадь, занимаемая многопостовой системой $S_с$, м ²	57,4 (1,2)	16 (0,33)	12 (0,25)	9 (0,19)	1,44 (0,36)
Масса одного источника питания $Q_п$, кг	170	1000	800	2300	250
Масса одного дросселя $Q_д$, кг, не более	—	60	50	50	50
Масса многопостовой системы, кг, не более	8160 (170)	4880 (102)	4800 (100)	4700 (98)	450 (112)
Относительная масса системы $Q_н/Q_б$	1,00	0,60	0,59	0,58	0,66
Относительная оптовая стоимость 48 постов (или четыре поста для ТДЭМ-500) $\Pi_н/\Pi_б$	1,00	0,59	0,60	0,40	0,70

Примечания. 1. Π — новая цена многопостовой системы; $\Pi_б$ — то же базовый; 2. В скобках указаны площадь и масса, рассчитанные на один пост; номинальная мощность одного источника питания $P_{ном} = (U_{ном} I_{ном} ПН) / (\eta \cos \varphi)$.



Таблица 8. Режимы работы четырехпостовой системы

№ технологического варианта	Количество n постов, шт.	Режим работы постов ($\beta = 0,6$)	Мощность	Мощность трансформатора, кВт	
				ТДМ-503	ТДЭМ-501
1	1	$I = 500 \text{ A}$ $U = 40 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	21,47 3,00 0,60	14,81 1,48 0
2	1	$I = 315 \text{ A}$ $U = 31,6 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	10,7 1,5 0,6	7,40 0,74 0
3	1	$I = 250 \text{ A}$ $U = 30 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	8,05 1,13 0,60	5,60 0,56 0
4	1	$I = 160 \text{ A}$ $U = 26,4 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	4,53 0,63 0,60	3,13 0,31 0
5	4	—	$P_{\text{ном}}$ $P_{\text{ном}} = P' + P'_{x,x}$ $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} + P' + P'_{x,x}$ P_3	44,75 8,66 53,41 85,88	30,94 (7,735) 3,10 (0,775) 31,52 (7,850) 24,7

Таблица 9. Сравнительные затраты и потери энергии четырехпостовой системы

Источник питания	$\frac{P_6 - P_{\text{ном}}}{P_6} \cdot 100\%$	$\frac{P' + P'_{x,x}}{P} \cdot 100\%$	$\frac{P_{\text{о.лб}} - P_{\text{ном}}}{P_{\text{о.п.ном}}} \cdot 100\%$
ТДМ-503	—	16,6	—
ТДЭМ-501	41	9,8	64

Примечание. P_6 — мощность базовая.

меньше, чем в системе, состоящей из четырех трансформаторов ТДМ-503.

В табл. 10 представлены четыре варианта режима работы сварочных постов: (п. 1–4) много-

постовых систем (48 постов) на основе трансформаторов различных типов: базовый вариант — ТДМ-503 (48 шт.), а также ТДФ-1601 (2 шт.), ТДЭМ-1201 (3 шт.) и ТДЭМ-3001 (1 шт.) с разными коэффициентами спроса β . Этим режимам соответствуют различные мощности как потребляемые из сети P_c , так и теряемые при сварке P' и на холостом ходу $P'_{x,x}$. В п. 5 представлены суммарные расходуемые и теряемые мощности 48 постами.

В табл. 11 приведена доля общих потерь системы от всей энергии, взятой ею из сети при пот-

Таблица 10. Режимы работы многопостовых систем (48 постов)

№ технологического варианта	Количество n постов, шт.	Режим работы постов	Мощности	Мощность и потери мощности трансформатора, кВт			
				ТДМ-503	ТДФ-1601	ТДЭМ-1201	ТДЭМ-3001
1	8	$\beta = 0,45$ $I = 500 \text{ A}$ $U = 40 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	129 18,0 6,6	91 11,0 0	85 6,8 0	85 6,8 0
2	16	$\beta = 0,50$ $I = 250 \text{ A}$ $U = 30 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	107 15 12	76 9,1 0	71 5,7 0	71 5,7 0
3	16	$\beta = 0,75$ $I = 200 \text{ A}$ $U = 28 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	120 16,8 6	85 10,2 0	79 6,3 0	79 6,3 0
4	8	$\beta = 0,40$ $I = 150 \text{ A}$ $U = 26 \text{ В}$	$P_{\text{ном}}$ P' $P'_{x,x}$	22 3,00 7,2	16 1,90 0	14 1,12 0	14 1,12 0
5	48	—	$P_{\text{ном}}$ $P_{\text{ном}} = P' + P'_{x,x}$ $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} + P' + P'_{x,x}$ P_3	378 85 463 1031	268 (5,58) 32 (0,67) 300 (6,25) 283	249 (5,19) 20 (0,42) 269 (5,60) 255	249 (5,19) 20 (0,42) 269 (5,60) 248

Примечание. Потребляемая из сети мощность $P_c = P_{\text{ном}} + P' + P_{x,x}$, из которой: $P_c = (UI\beta)/(\eta \cos \varphi)$ — расходуется на полезную номинальную нагрузку, $P' = P_c (1 - \eta)$ — потери мощности при сварке, $P'_{x,x} = P_{x,x} n (1 - \beta)$ — потери мощности на холостом ходу; $P_{\text{о.п}}$ — общие потери; $P_3 = P_{\text{ном}} N$ — заявленная мощность.

Таблица 11. Сравнительные затраты и потери энергии системой из 48 постов

Источник питания	$\frac{P_6 - P_{ном}}{P_6} \cdot 100\%$	$\frac{P' + P'_{x.x}}{P} \cdot 100\%$	$\frac{P_{о.п.ном} - P_{о.п.ном}}{P_{о.п.ном}} \cdot 100\%$
ГДМ-503	—	18,4	—
ГДЭМ-501	35	10,7	62
ГДФ-1601	42	7,4	76
ГДЭМ-3001	42	7,4	76

реблении номинальной мощности 48 постами. Больше всего (18,4 %) энергии теряется в базовом варианте. В многопостовых системах на базе ГДЭМ доля общих потерь составляет 7,4 %, они берут из сети на 42 % энергии меньше, а относительные потери одного поста в системе на 76 % меньше, чем у базового источника.

В табл. 8 (система из четырех постов) и 10 (система из 48 постов) представлены также мощность, потребляемая из сети, P_c , и общие потери $P_{о.п.}$ мощности в расчете на один сварочный пост (см. показатели в скобках в табл. 7, 8 и 10). Сравнение данных этих таблиц показывает следующее: чем на большее количество постов рассчитана многопостовая система, тем больше ее энергетическая эффективность. Энергия, потребляемая одним постом четырехпостовой системы по сравнению с базовым вариантом, уменьшается на 41 %, а ее потери — на 64 % в случае многопостовой системы, состоящей из 48 постов, эти же показатели составляют соответственно 45 и 76 %. Как видно из табл. 7, площадь, занимаемая одним сварочным постом четырехпостовой системы (значения в скобках), уменьшается более чем в 3 раза, а в системе из 48 постов — от 3,6 до 6,3 раз.

Таким образом, использование многопостовых систем питания приводит к экономии электротехнических материалов при их изготовлении на 33...40 %, а электроэнергии при эксплуатации на 35...40 %. Они в 3...6 раз занимают меньше производственных площадей и в 2...3 раза уменьшаются затраты на амортизацию, обслуживание и ремонт оборудования.

Многопостовые системы целесообразно устанавливать на крупных предприятиях по производству металлоконструкций, в цехах которых расположено большое количество сварочных постов. Приведенные ориентировочные расчеты показали,

что разработка многопостовых систем окупится для заказчика в течение 1–2 лет.

Необходимо отметить, что при расчете экономического эффекта применения многопостовых систем следует учитывать и другие положительные факторы, например, возможность монтажа на каждом сварочном посту УСГД делает такой пост универсальным: можно осуществлять сварку электродами как на постоянном, так и переменном токе, а также неплавящимся электродом нержавеющей сталей, алюминия и его сплавов. Кроме того, УСГД облегчает труд сварщика, повышает качество сварки, увеличивает долю времени горения дуги в общем времени сварки.

Выводы

1. Применение в сварочных трансформаторах УСГД, разработанных ИЭС им. Е. О. Патона, позволяет снизить напряжение холостого хода трансформатора, что экономит электроэнергию на 30...40 % и уменьшает расход электротехнических материалов на 30 %.

2. Система многопостового питания, представляющая собой мощный трансформатор с жесткой внешней характеристикой, питающий постовые устройства, состоящие из регулируемого дросселя и УСГД, экономит электроэнергию в 2...4 раза (в зависимости от количества сварочных постов) по сравнению с многопостовой системой постоянного тока, при этом требуется в 2...10 раз меньше производственных площадей для размещения системы и в 2...3 раза уменьшаются затраты на амортизацию, обслуживание и ремонт оборудования.

1. Заруба И. И., Дыменко В. В., Болотко В. И. Сварочные трансформаторы с устройствами стабилизации горения дуги // Автомат. сварка. — 1989. — № 10. — С. 46–51.
2. Пентегов И. В., Дыменко В. В., Рымар С. В. Влияние насыщения магнитной системы сварочного трансформатора на устойчивость горения дуги переменного тока // Там же. — 1995. — № 7. — С. 35–40.
3. ГОСТ 25616–83. Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств. — Введ. с 01.01.84 по 01.01.89.
4. Заруба И. И., Дыменко В. В., Болотко В. И. Применение стабилизаторов горения дуги с целью понижения напряжения холостого хода трансформаторов для ручной дуговой сварки // Автомат. сварка. — 1982. — № 10. — С. 27–31.
5. Заруба И. И., Дыменко В. В., Кухарский В. Я. Применение многопостовых источников переменного тока для дуговой сварки // Там же. — 1991. — № 2. — С. 59–63.

Experience of employing pulsed devices for arc stabilisation, ensuring a high stability of the process and quality of weld formation, and making it possible to save power in operation and electrotechnical materials in manufacture of welding transformers, is described.

Поступила в редакцию 17.01.2006