



ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, М. Е. ШИНЛОВ, канд. техн. наук, Р. В. ЮХИМЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены высокочастотные силовые трансформаторы для специализированных установок малой и большой мощности, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Описаны особенности их конструктивного исполнения. Приведены результаты сопоставления рассмотренных высокочастотных трансформаторов с трансформаторами промышленной частоты.

Ключевые слова: термообработка, высокочастотные силовые трансформаторы, индукционные установки, конструкция, магнитопровод, обмотки

Большинство высокочастотных индукционных установок технологического назначения имеют в своем составе силовые трансформаторы, согласующие электрические параметры нагрузки (индуктор с нагреваемой деталью) с параметрами источника питания током высокой частоты.

В бывшем СССР (г. Степанован, Армения) для этих целей серийно выпускались трансформаторы типа ТЗ (трансформатор закалочный) мощностью от 800 до 3200 кВ·А и автотрансформаторы типа АТС мощностью 1500 кВ·А для диапазона частот тока 1...10 кГц. Конструкции этих трансформаторов и автотрансформаторов были максимально унифицированы. В них применяли Ш-образные магнитопроводы, внешние торцы которых вместе с расположенными рядом трубками охлаждения заливали алюминиево-цинковым сплавом, осуществляющим передачу тепла от магнитопровода к системе охлаждения. В трансформаторах использовали обмотки галетного типа с достаточно сложной технологией изготовления.

Первичная обмотка представляла собой плоскую спираль из нескольких витков изолированной медной трубки.

Вторичную обмотку изготавливали путем заливки первичной обмотки и дополнительных трубок охлаждения алюминием. В результате получалась неразборная секция (галета), состоящая из первичной обмотки, полностью окруженной телом вторичной обмотки. Достоинством такой конструкции обмоток является возможность изменения в широких пределах коэффициента трансформации, а также экономия меди. Однако в связи с увеличением потерь во вторичной обмотке и выводных частях обмоток снижается КПД трансформатора.

Универсальности конструкции достигали за счет некоторого увеличения массогабаритных показателей по сравнению со специализированными трансформаторами. Производимые заводом в г. Степанован трансформаторы и автотрансформаторы в основном удовлетворяли потребности в них при комплектации электротермического оборудования. Их применяли во многих случаях даже

тогда, когда мощность технологического оборудования была значительно меньше 800 кВ·А, поскольку трансформаторы меньшей мощности не выпускались (точнее, разрабатывались и изготавливались только в специальных целях).

В настоящее время в странах СНГ сокращено производство некоторых видов электротермического оборудования, практически прекращено производство высокочастотных трансформаторов. При этом остро встала проблема замены устаревшего оборудования.

Кроме того, существует потребность в трансформаторах малой мощности (менее 800 кВ·А) как для специализированных установок (в частности для сварочных машин, имеющих особые требования к массогабаритным показателям), так и для других установок с учетом современных требований, касающихся снижения себестоимости изготовления оборудования и экономии энергии. То же относится к специализированным трансформаторам большой мощности, поскольку они экономичнее, чем универсальные.

Исходя из изложенных причин, в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны высокочастотные трансформаторы для специализированных установок малой и большой мощности.

Высокочастотный сварочный трансформатор малой мощности типа П-139 УХЛ4 и его модификации П-144 и П-145 (рис. 1) имеют следующие технические характеристики (для конкретного исполнения):

Напряжение, В	
первичное	350
вторичное	32
Ток, А	
первичный	490
вторичный	5000
Мощность нагрузки, кВ·А	160
Частота тока, Гц	2400
Коэффициент трансформации*	11
Масса, кг	22
Габаритные размеры (с кронштейном), мм	
длина	265
ширина	165
высота	280

* Коэффициент трансформации изменяется путем замены первичной обмотки — цилиндрической спирали из медной трубки с необходимым количеством витков.

В трансформаторе используются листовой (витой) П-образный секционированный магнитопровод (рис. 2, *а*), более простой в конструкции и экономичный в изготовлении по сравнению с шихтованным. Кроме того, он более надежный, чем шихтованный, поскольку в нем не используют стяжку пакета шпильками. Стяжку набора стали осуществляют обматыванием после его сборки миткалевой лентой, пропитанной бакелитовым лаком с последующим прогревом в течение 3...4 ч при температуре около 100 °С. Обе стороны стальных лент перед сборкой магнитопровода покрывают изоляцией.

Большие потери в магнитопроводе трансформаторов обуславливают необходимость применения интенсивного охлаждения. Для этого используют водоохлаждаемые экраны, состоящие из медных радиаторных листов с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды (рис. 2, *б*).

Радиаторные листы выполняют из горячекатаной листовой меди, имеющей большую теплопроводность, вследствие чего тепло, выделяющееся в пакетах магнитопровода, отводится в протекающую по охлаждающим трубкам воду. Потери от протекания вихревых токов в самих радиаторных листах, даже при их сравнительно большой толщине (1...2 мм), в обычных условиях невелики, поскольку медь является немагнитным материалом.

Система водяного охлаждения магнитной цепи выполняется таким образом, чтобы предотвратить образование замкнутых электрических контуров вокруг пакетов стали, которые могли бы вызвать добавочные потери от индуцированных в этих контурах токов. Для поступления воды к системам охлаждения магнитопровода и обмоток они снабжаются необходимым количеством специальных наконечников (штуцеров) из меди, латуни или стали, непосредственно на которые надеваются резиново-тканевые шланги для соединения трубок систем охлаждения между собой, а также для подачи воды от распределяющего приспособления. В зависимости от сечения канала системы охлаждения диаметр штуцеров может меняться в широких пределах, соответственно меняется и толщина стенки. Крепление штуцера из латуни и стали к трубкам охлаждения может быть резьбовым, а из меди — выполненным посредством пайки твердым припоем.

Применение интенсивного водяного охлаждения магнитной цепи дает возможность работать с индукцией, недопустимой при ином способе охлаждения, например, воздушном или масляном. При водяном охлаждении сечение сердечника и общие размеры магнитной цепи, а также диаметр обмоток, расположенных коаксиально с сердечником, их длина, активное сопротивление и потери в них уменьшаются.

При размещении радиаторных листов следует исходить из того, что все они должны нести по возможности одинаковую тепловую нагрузку. Их количество не должно быть большим, так как каждый лист с припаянными трубками, занимая часть полезной площади сердечника, снижает коэффициент заполнения сечения магнитопровода, что



Рис. 1. Высокочастотный сварочный трансформатор малой мощности типа П-139

приводит к увеличению радиальных размеров обмоток.

Трансформатор имеет цилиндрическую систему обмоток с непосредственным охлаждением. В большинстве случаев он выполняется со вторичной обмоткой, имеющей один виток, реже два. Первичная обмотка состоит из 10...30 витков.

Первичная обмотка (рис. 2, *в*) выполнена в виде однослойной спирали. Увеличение количества слоев, непосредственно прилегающих друг к другу, вызывает значительный рост потерь в медных проводниках обмоток вследствие того, что каждый последующий слой находится в магнитном поле, созданном полным током всех предыдущих слоев.

Поскольку при высоких частотах вследствие поверхностного эффекта активное сечение провода располагается в слоях металла, прилегающих к его поверхности, спираль первичной обмотки выполняется из полый медной трубки, канал которой используется для интенсивного водяного охлаждения.

Конфигурация сечения трубки должна быть прямоугольной, поскольку ток в витках первичной обмотки протекает по боковой стороне трубок, и такая конфигурация обеспечивает получение большего активного сечения провода по сравнению с трубкой круглого сечения при равной высоте витка. При этом также улучшаются условия охлаждения обмотки.

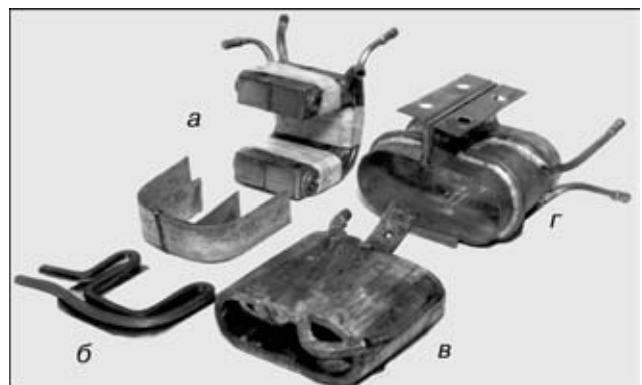


Рис. 2. Основные узлы трансформатора типа П-139: *а* — витой П-образный секционированный магнитопровод; *б* — медные радиаторные листы с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды; *в*, *г* — соответственно первичная и вторичная обмотки

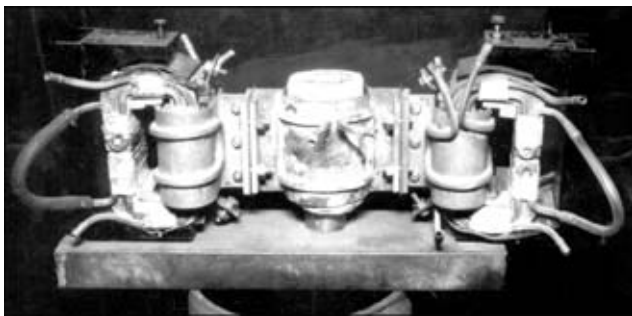


Рис. 3. Использование группы трансформаторов типа П-139 для питания индукционной тигельной печи

Витки первичной обмотки изолируются друг от друга лентой из лакоткани, которая навивается на трубку в один-два слоя внахлест. Выводы обмотки обычно ориентируются в направлении, противоположном контактному колодку перпендикулярно к оси трансформатора.

Вторичная обмотка (рис. 2, з), представляющая собой незамкнутый цилиндрический виток, расположена коаксиально первичной обмотке с обхватом ее снаружи. Вторичная обмотка может иметь различное исполнение в зависимости от типа и условий работы трансформатора. Целесообразно делать ее из свернутого в виде цилиндра листа красной меди толщиной 2... 4 мм. Для охлаждения с наружной стороны цилиндра напаяются прямоугольные медные трубки, расположенные в определенном порядке.

С целью получения наименьшего рассеяния магнитного потока целесообразно, чтобы высота первичной обмотки по возможности была равна высоте вторичной.

Мощность трансформатора может быть удвоена при двойном увеличении количества секций магнитопровода. При этом в два раза возрастает ширина трансформатора.

Трансформаторы можно использовать при групповом соединении первичных или вторичных обмоток. На рис. 3 показан пример использования двух трансформаторов типа П-139 для питания индукционной тигельной печи, причем вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно.

Трансформатор типа П-139 применяется в машинах для стыковой индукционной сварки труб диаметром 114...325 мм (на базе машины для кон-

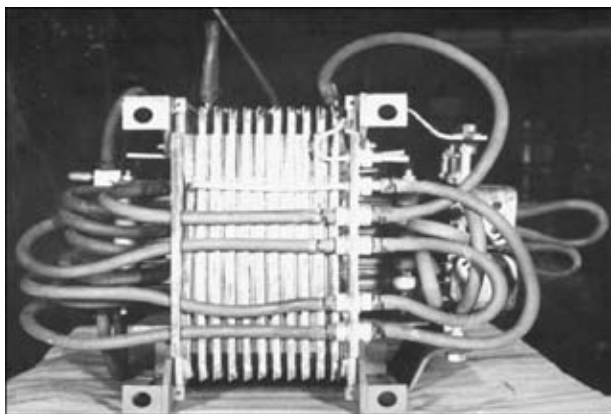


Рис. 4. Трансформатор высокочастотный большой мощности (4000 кВ·А) типа ОБ-2030

тактной сварки типа К-584 М), типа П-144 — для соединения труб диаметром 57...114 мм и типа П-145 — труб диаметром 114...325 мм. Машины П-144 внедрены на предприятиях Татарстана для соединения труб нефтяного сортамента [1].

Другое применение трансформаторы типа П-139 нашли в составе блока для индукционной термобработки сварных соединений труб диаметром до 426 мм.

Трансформатор высокочастотный большой мощности типа ОБ-2030 У4 (рис. 4) имеет следующие технические данные:

Напряжение, В	
первичное	750
вторичное (макс.)	300
Коэффициент трансформации	15... 2
Мощность нагрузки, кВ·А	4000
Частота тока, Гц	2400
Масса, кг	355
Габаритные размеры, мм	
длина	665
ширина	620
высота	515

Такие трансформаторы используются в специальных печах для индукционного переплава, в машинах для разрыва труб на мерные части в линии высокочастотной сварки труб среднего диаметра, а также в других технологических установках.

В трансформаторе применяют магнитопровод броневого типа, имеющий более благоприятные условия охлаждения по сравнению с магнитопроводом стержневого типа [2]. Набор стали магнитопровода для охлаждения разбивается по толщине на несколько пакетов, между которыми размещаются медные радиаторные листы с припаянными к ним трубками для охлаждающей воды.

Трансформатор имеет дисковую систему обмоток, характеризующуюся малым сопротивлением рассеяния, с непосредственным жидкостным охлаждением каждой из секций обмоток. Путем переключения дисков первичной и вторичной обмоток в соответствующие группы можно варьировать коэффициент трансформации в широких пределах.

Первичные катушки в этих обмотках представляют собой многовитковую плоскую спираль овальной формы, которая изготавливается из полой медной трубки. На обоих концах эта трубка имеет контактные колодки для подключения к схеме.

Одновитковые вторичные дисковые катушки представляют собой незамкнутый диск из листовой меди. Примыкающие к разрезу части диска заканчиваются выводами в виде колодок или пластин для объединения катушек в обмотку.

Поскольку каждый диск первичной обмотки размещен между двумя дисками вторичной, то рассеяние всей системы улучшается. Ток распределяется не по одной стороне трубки, как в однослойных цилиндрических обмотках, а по двум, что значительно повышает использование меди, поскольку при прочих равных условиях активное сечение провода увеличивается вдвое. Кроме того, такая конструкция дает возможность размещения в окне магнитопровода обмоток сравнительно небольшой высоты с большим количеством витков (4... 15 в первичной обмотке и 1... 2 во вторичной).

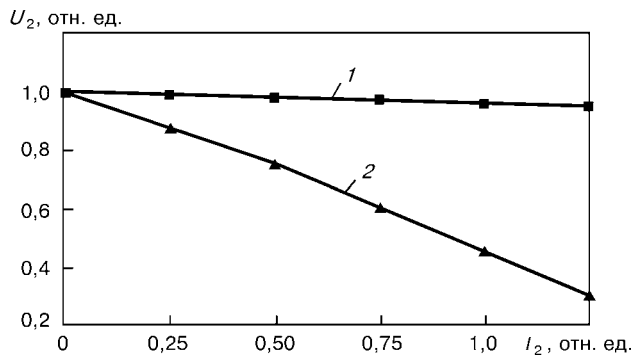


Рис. 5. Внешние характеристики трансформаторов типа П-139 УХЛ4 (1) и ТСС-400/0,5 (2)

В некоторых технологических процессах в качестве источников питания возможно применение трансформаторов как высокочастотных, так и промышленной частоты.

Сравнивая силовые трансформаторы промышленной частоты с высокочастотными силовыми, можно сделать вывод, что во многих случаях последние более эффективны в использовании. Так, например, полезная мощность высокочастотного сварочного трансформатора малой мощности типа П-139 УХЛ4 на один килограмм его массы составляет 2,55 кВт, тогда как полезная мощность силового трансформатора промышленной частоты ТСС-400/0,5, используемого для нагрева и питания электропечей, равняется 0,2 кВт.

Большая степень компактности высокочастотных трансформаторов способствует их использованию в выносных блоках для термообработки изделий.

Рассмотрим, например, конструкцию блока индукционной термообработки труб в полевых условиях (БИТО). В рабочем положении блок располагается на подвеске стрелы транспортной базы комплекса для термообработки труб, соединяется кабелями с источником токов высокой частоты и блоком управления процессом, а также шлангами с магистралью принудительного жидкостного охлаждения токоведущих частей индуктора и трансформатора. БИТО состоит из жесткого индуктора с бесконтактным разъемом, обеспечивающего заданный локальный нагрев зоны сварного шва (раз-

High-frequency power transformers for specialized units of a low and high power developed at PWI are considered. Features of their design are described. Results of comparison of the considered high-frequency transformers with commercial frequency transformers are given.

работка ИЭС); высокочастотных трансформаторов типа П-139 (2 шт.); механизма сведения-разведения индуктора; механизма фиксации БИТО на трубе; датчиков параметров режима термообработки.

Индуктор состоит из двух симметричных полуиндукторов, каждый из которых имеет съемный индуктирующий виток, пакеты магнитопровода и токопроводы. Конструкция индуктора обеспечивает равномерный по периметру трубы заданный локальный нагрев сварного соединения, быструю установку на место выполнения термообработки и сьем с него, а также отсутствие электрического контакта в месте разъема полуиндукторов, что значительно повышает эксплуатационные показатели и надежность работы оборудования. Конструкция индуктора предусматривает установку датчиков параметров режима термообработки.

Техническая характеристика индуктора

Максимальная мощность, кВт	160
Номинальная частота тока, Гц	2400
Температура нагрева труб, °С	любая
	в пределах режимов ТО

Другим важнейшим параметром трансформаторов является их внешняя характеристика — зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от тока нагрузки I_2 , который во многом определяет область эффективного использования трансформатора соответствующей частоты в технологических процессах.

Вид внешней характеристики (рис. 5) зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos \varphi_2$). Как видно из рисунка, внешняя характеристика высокочастотного сварочного трансформатора является крутопадающей, что обеспечивает трансформатору устойчивую работу при его использовании в электродуговых технологиях. Это достигается за счет увеличения индуктивного сопротивления трансформатора и электрических цепей нагрузки (пропорционально частоте тока).

1. Письменный А. С., Шилов М. Е., Буженецкий А. И. Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента // Автомат. сварка. — 1995. — № 12. — С. 35–38.
2. Тур Л. Л. Трансформаторы для устройств индукционного нагрева повышенной частоты. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 240 с.

Поступила в редакцию 04.04.2002