

# СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ФИРМЫ ELHAND TRANSFORMATORY

Появление транзистора в 50-х годах прошлого столетия положило начало быстрому развитию силовой электроники. Традиционные источники питания заменялись более эффективными импульсными источниками со значительно меньшими массогабаритными показателями. Современные полупроводниковые ключи позволяют создавать преобразователи, работающие на все более высоких частотах. Постоянно совершенствуемые магнитные материалы обеспечивают разработку трансформаторов и индуктивных элементов с оптимальными параметрами. Ведущим европейским производителем силовых компонентов, предназначенных для работы на высоких частотах, является компания Elhand Transformatory (Польша), которая как частное предприятие существует на рынке с 1981 года. Марка изделий компании хорошо известна в мире и ассоциируется с их высоким качеством. Компания производит сухие трансформаторы, силовые дроссели и блоки питания для систем энергетики, средств управления, автоматики и сортировки, медицинской аппаратуры. Изделия компании можно найти в оборудовании железнодорожного транспорта, кораблестроительной, авиационной, горнодобывающей, сталеплавильной и химической отраслей промышленности. Рассмотрим трансформаторы для преобразовательных схем, выпускаемых данной польской фирмой.

## ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В импульсном источнике питания постоянного тока с преобразователем типа push-pull (рис.1) первичное напряжение питания подается на транзисторный мост инвертора. Попеременно переключаемая, чаще всего на большой частоте, пара транзисторов подает напряжение прямоугольной формы на трансформатор — преобразующий элемент, согласующий

А.Юшков, М.Лукевски,  
yushkov\_alexei@argussoft.ru, m.lukiewski@elhand.pl

значения выпрямляемого напряжения и тока. Значение напряжения, подаваемого на трансформатор, задается продолжительностью включения транзисторов. Сглаживание выходного напряжения обеспечивает индуктивный или индуктивно-емкостной фильтр, включенный на выходе диодного моста. Преобразователи типа push-pull предназначены для питания приемников большой мощности [1].

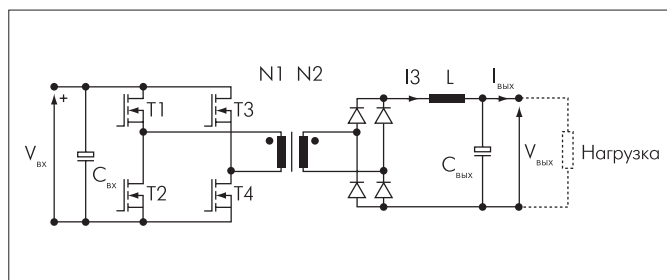
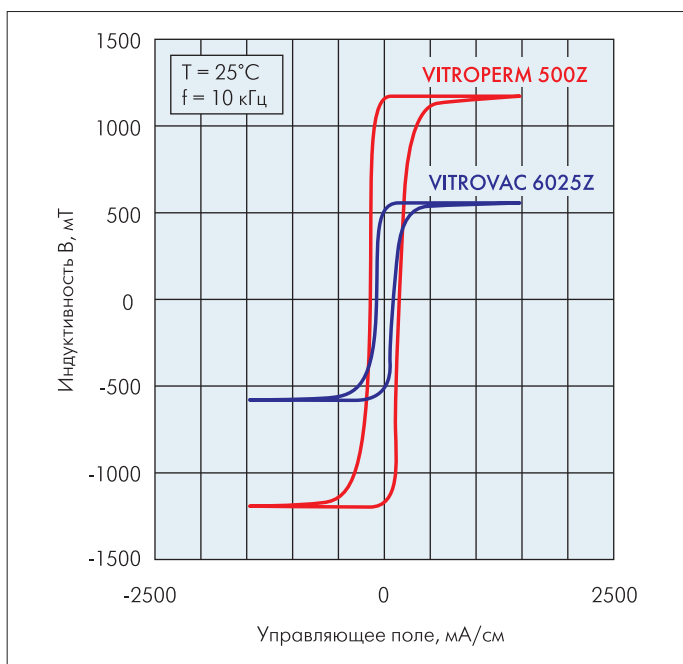


Рис. 1. Мостовая схема конвертора типа push-pull [1]

## ТРАНСФОРМАТОР С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ СЕРДЕЧНИКОМ

Трансформаторы, работающие в импульсных цепях, подвержены воздействию различных факторов, вызывающих дополнительные потери. На основе конфигурации схемы преобразователя (например, полномостовой) и оптимальной рабочей частоты системы можно подобрать магнитный материал сердечника трансформатора. При расчете обмотки трансформатора следует учитывать вероятность роста потерь вследствие возникновения скин-эффекта — увеличения сопротивления обмотки с увеличением частоты тока. Существенное влияние на работу трансформатора оказывают также потери на гистерезис сердечника и потери, вызываемые возникающими в сердечнике вихревыми токами. Для их ограничения сердечники современных трансформаторов выполняются из магнетиков с низкими потерями. К таким магнетикам относится нанокристаллический материал торговой марки Vitroprem 500F, предназначенный для применения в электронных силовых системах. Получают этот материал методом контролируемой термообработки аморфного сплава железа. У Vitroprem 500F узкая петля магнитного гистерезиса (рис.2) и большое электрическое сопротивление, бла-



**Рис.2. Зависимость индуктивности диэлектриков из нанокристаллического сплава Vitroperm 500F и аморфного Vitrovac 6025Z от приложенного поля [2]**

годаря чему удается эффективно ограничить вихревые токи и обеспечить оптимальные значения частоты, плотности магнитного потока и коэффициента формы напряжения, питающего



**Рис.3. Тороидальные сердечники, выполненные из нанокристаллического сплава Vitroperm 500F [2]**

трансформатор [2]. Внешний вид тороидального сердечника на основе сплава Vitroperm 500F приведен на рис.3.

Нанокристаллический сплав Vitroperm 500F имеет следующие характеристики:

Толщина ленты.....	~25 мкм
Индукция насыщения.....	1,2 Т
Козрцитивная сила (статическая).....	<3 А/м
Козффициент магнитной проницаемости.....	10 000–150 000
Удельное электрическое сопротивление.....	115 мкОм·см
Частота, $f_0$ .....	100 кГц
Магнитострикция насыщения.....	$10^{-8}$ – $10^{-6}$
Отклонения индуктивности, $\Delta B_0$ .....	0,6 Т
Козффициент формы, $F_0$ .....	1,11 (синус)
Потери в сердечнике	
при $f_0 = 100$ кГц, $B = 0,3$ Т.....	$P_{fe} = 80$ Вт/кг
при $F_0, \Delta B_0, f_0$ .....	110 Вт/кг
Температура Кюри.....	600°C
Допустимая температура	
в непрерывном режиме работы.....	120°C
при кратковременной перегрузке.....	180°C

Таблица 1. Массогабаритные показатели однофазных силовых трансформаторов ET1S

Тип	Мощность, кВА	L, мм	B <sub>max</sub> , мм	H, мм	d, мм	e, мм	k, мм	h <sub>1</sub> , мм	w, мм	f, мм	Масса, кг	Исполнение
ET1S-1.6	1,6	160	145	235	110	115	141	–	203	11×15	17	A
ET1S-2.0	2,0	178	145	252	128	114	140	–	223	11×15	18	A
ET1S-2.5	2,5	178	158	252	128	126	152	–	223	11×15	21	A
ET1S-3.0	3,0	200	165	280	140	133	165	–	258	11×15	24	A
ET1S-3.5	3,5	200	177	280	140	145	177	–	258	11×15	27	A
ET1S-4.0	4,0	200	195	285	140	160	192	–	258	11×15	30	A
ET1S-5.0	5,0	200	205	285	140	171	203	–	258	11×15	36	A
ET1S-6.3	6,3	240	180	315	200	140	178	–	258	11×15	41	A
ET1S-7.5	7,5	280	255	415	240	141	183	–	305	11×15	46	B
ET1S-8.0	8,0	280	265	415	240	151	193	53	–	11×15	57	B
ET1S-10.0	10,0	280	280	415	240	166	208	53	–	11×15	64	B
ET1S-12.0	12,0	280	295	415	240	181	223	53	–	11×15	76	B
ET1S-15.0	15,0	320	340	475	270	200	240	53	–	13×18	94	B
ET1S-16.0	16,0	320	350	475	270	210	250	63	–	13×18	110	B
ET1S-20.0	20,0	360	370	540	310	230	270	63	–	13×18	119	B
ET1S-25.0	25,0	360	380	540	310	240	280	63	–	13×18	130	B
ET1S-30.0	30,0	360	390	540	310	250	290	63	–	13×18	150	B
ET1S-40.0	40,0	460	440	610	360	230	320	63	–	13×18	210	B
ET1S-50.0	50,0	460	470	610	360	270	360	63	–	13×18	265	B
ET1S-63.0	63,0	460	490	610	360	290	380	63	–	13×18	290	B



Рис.4. Однофазные силовые трансформаторы ET1S мощностью 1,6–63 кВА

Чтобы обеспечить правильную работу трансформатора, необходимо определить значения оптимальной индуктивности сердечника  $\Delta B_{opt}$  и оптимальной плотности тока обмоток  $S_{opt}$ . Для выбранного материала сердечника эти параметры рассчитываются после того, как уже определены предпочтительные для заданных условий работы значения массы  $m_{fe}$ , термического сопротивления  $R_{th}$  и потери мощности  $P_o$ . На этом этапе устанавливаются также значения частоты и формы напряжения питания –  $f$ ,  $F$ . Значение  $\Delta B_{opt}$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta B_{opt} = \Delta B_o \cdot \left( \frac{2 \cdot \Delta T}{(2 + Z) \cdot R_{th} \cdot m_{fe} \cdot P_o \cdot \left(\frac{F}{F_o}\right)^x \cdot \left(\frac{f}{f_o}\right)^y} \right)^{1/2}$$

При расчете обмоток следует предварительно установить значения тока  $I_{cu}$  и сопротивления  $\rho_{cu}$  материала, из которого они будут выполнены. Важным параметром также является площадь сечения обмотки  $A_{cu}$ , подобранная так, чтобы при оптимальной плотности тока температура обмоток не превышала допустимого значения  $\Delta T$ :

$$S_{opt} = \sqrt{\left( (Z + \Delta T) / (Z + 2) \cdot R_{th} \cdot \rho_{cu} \cdot I_{cu} \cdot A_{cu} \right)}$$

Зная значение оптимальной индукции сердечника и плотность тока обмоток, можно определить значение преобразуемой мощности  $P_{max}$  при частоте напряжения питания  $f$ :

$$P_{max} = k \cdot f \cdot A_{fe} \cdot A_{cu} \cdot \Delta B_{opt} \cdot C_{opt}, \quad [3]$$

где  $k$  – коэффициент мощности преобразователя, который зависит от его вида. Для полномостовой схемы преобразова-

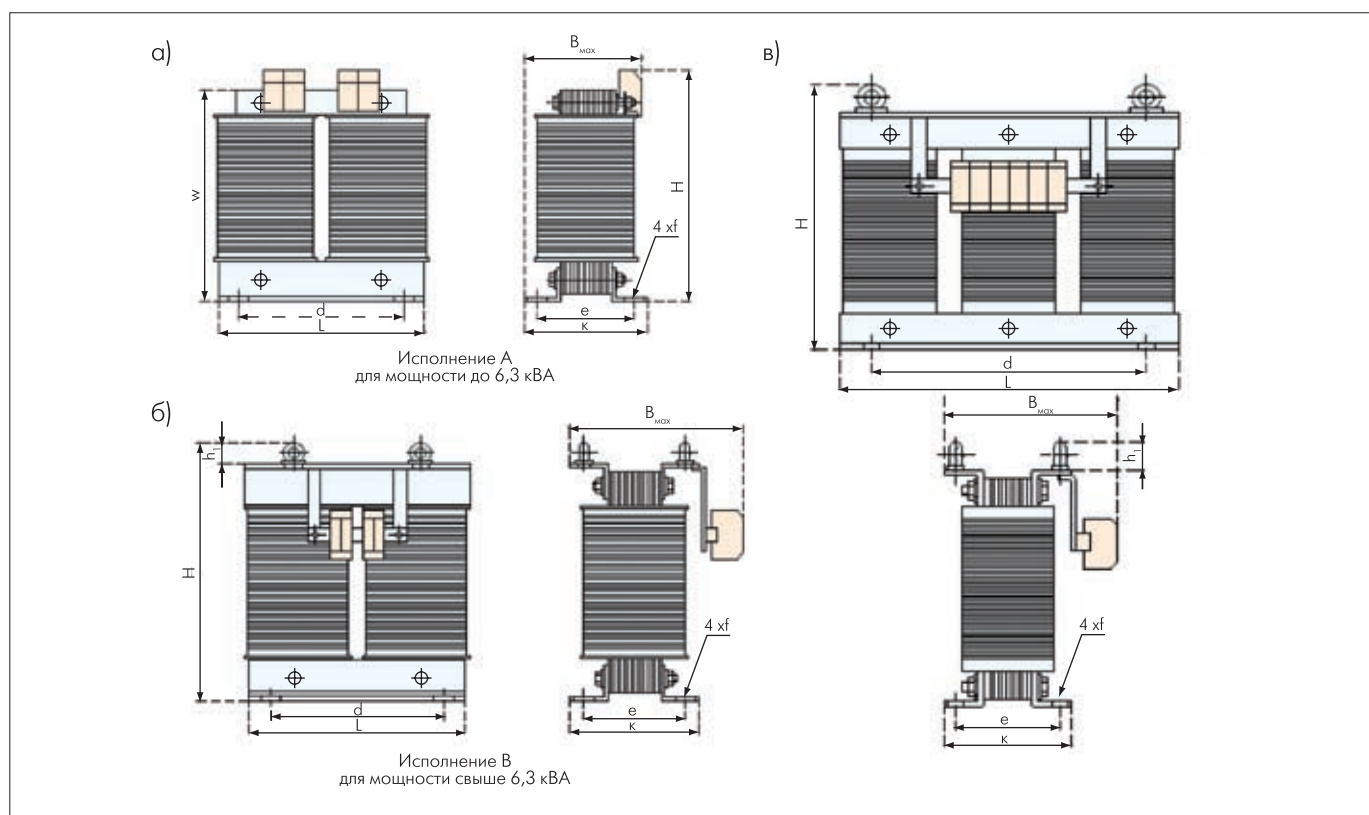


Рис.5. Трехфазные силовые трансформаторы ET3S мощностью 10–630 кВА



**Таблица 2. Массогабаритные показатели трехфазных силовых трансформаторов ET3S**

Тип	Мощность, кВА	L, мм	B <sub>max</sub> , мм	H, мм	d, мм	e, мм	k, мм	h <sub>1</sub> , мм	f, мм	Масса, кг
ET1S-10.0	10,0	360	260	360	310	155	193	53	11×15	80
ET1S-12.5	12,5	420	280	410	370	166	208	53	11×15	90
ET1S-15.0	15,0	420	290	410	370	181	223	53	11×15	110
ET1S-16.0	16,0	420	290	410	370	181	223	53	11×15	115
ET1S-20.0	20,0	480	310	485	430	200	240	65	13×25	125
ET1S-22.5	22,5	480	310	485	430	200	240	65	13×25	125
ET1S-25.0	25,0	480	310	485	430	200	240	65	13×25	130
ET1S-30.0	30,0	480	320	485	430	210	250	65	13×25	150
ET1S-40.0	40,0	540	380	545	490	240	280	65	13×25	210
ET1S-50.0	50,0	540	400	545	490	240	280	65	13×25	250
ET1S-63.0	63,0	690	410	610	590	220	310	71	13×25	300
ET1S-75.0	75,0	690	440	610	590	240	330	71	13×25	340
ET1S-80.0	80,0	690	480	610	590	260	350	71	13×25	365
ET1S-100.0	100,0	690	500	610	590	270	360	71	13×25	400
ET1S-115.0	115,0	690	540	610	590	290	380	71	13×25	460
ET1S-120.0	120,0	720	550	715	620	280	390	71	17×25	480
ET1S-125.0	120,	720	550	715	620	290	400	71	17×25	525
ET1S-160.0	125,0	720	550	880	560	290	400	80	17×25	680
ET1S-200.0	160,0	870	590	880	560	330	440	80	17×25	820
ET1S-225.0	225,0	870	610	880	560	350	460	80	17×25	910
ET1S-250.0	250,0	870	630	880	560	370	480	80	17×25	980
ET1S-315.0	315,0	975	650	1020	620	400	500	100	17×25	1280
ET1S-400.0	400,0	975	670	1020	620	420	520	100	17×25	1460
ET1S-500.0	500,0	1050	660	1100	650	430	540	122	17×25	1750
ET1S-630.0	630,0	1050	680	1100	650	450	560	122	17×25	2080



**Рис.6. Исполнение силовых трансформаторов ET1S мощностью до 6,3 кВА (а) и свыше 6,3 кВА (б); ET3S (в)**

теля типа push-pull коэффициент мощности  $k = 1/\sqrt{2 \cdot \tau_m}$ , где  $\tau_m = 0,5 \cdot \tau_{max} \cdot (1 + U_{E,min}/U_{E,max})$  – пульсации преобразователя.

Число витков первичной обмотки  $N_p$  подбирают так, чтобы при напряжении питания  $U_E$  магнитная индукция сердечника не превышала значение оптимальной индукции  $\Delta B_{opt}$ . Число витков вторичной обмотки  $N_s$  зависит от значения постоянного напряжения на выходе  $U_A$  [3]. Таким образом,  $N_p = (\tau_{max} \cdot U_{E,min}) / (f \cdot A_{fe} \cdot \Delta B_{opt})$  и  $N_s = (U_A \cdot N_p) / (\tau_{max} \cdot U_{E,min})$ . После определения параметров обмоток следует выполнить контрольный расчет и проверить соответствие размеров обмоток отверстию сердечника с учетом изолирующих материалов.

### ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ КОМПАНИИ ELHAND TRANSFORMATORY

Одно- и трехфазные силовые трансформаторы, соответственно, типа ET1S и ET3S, поставляемые компанией Elhand Transformatory (рис.4, 5), отвечают требованиям стандарта МЭК IEC60726. Они предназначены для питания энергоемкого электрооборудования. Частота составляет 50/60 Гц, напряжение первичной и вторичной обмоток – до 1000 В. При мощности до 10 кВА класс изоляции трансформаторов – E (максимальная температура "горячей точ-

ки" 120°C), при мощности свыше 10 кВА – F (155°C) или H (180°C). Класс защищенности – IP00.

По требованию заказчика трансформаторы могут быть собраны в корпусах со степенями защиты IP 23, IP 44 и IP 54 и с возможностью вывода питающих кабелей через дроссельные катушки. Число выводов со стороны первичной и вторичной обмоток соответствует требованиям заказчика. В стандартном исполнении трансформаторы приспособлены к монтажу на четыре винта с помощью крепежных уголков и имеют порошковое лаковое покрытие цвета RAL 7032.

Размеры трансформаторов ET1S и ET3S приведены на рис.6 и в табл.1 и 2.

Дополнительную информацию можно получить на сайте <http://www.argussoft.ru> и <http://www.elhand.com>

### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://schmidt-walter.fbe.fh-darmstadt.de> Dr Ing. Heinz Schmidt-Walter, Switched Mode Power Supplies.
2. [www.vacuumschmelze.de](http://www.vacuumschmelze.de) Nanocrystalline VITROPERM/EMC components.
3. [www.vacuumschmelze.de](http://www.vacuumschmelze.de) Tape-wound cores in power transformers for switched mode power supplies.