

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КОМБИНИРОВАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Д.С. Борисов, Ю.С. Игольников

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева
Тел.47-47-60. E-mail: selta08@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты моделирования и экспериментальной проверки трехфазного комбинированного трансформатора, выполненного по патенту Мордовского государственного университета: RU 2210827 7Н 01F29/02 20. 08. 2003 Бюл. №23. Работа выполнена впервые. Трансформатор позволяет получить два вида вольтамперных характеристик: жесткую (в силовом режиме) и мягкую (в сварочном). Моделирование проводилось в системе «ЭЛТРАН». Экспериментальная проверка на изготовленном в лабораторных условиях трансформаторе. В статье приводятся основные электрические параметры и характеристики трансформатора.

Ключевые понятия: трехфазный трансформатор, напряжение, ток, моделирование, ЭЛТРАН, схема трансформатора, вольтамперные характеристики.

Введение

В данной работе проводится исследование комбинированного трансформатора. Комбинированный трансформатор представляет собой цельное устройство трансформаторного типа, позволяющее осуществить по отдельности полноценные режимы работы как трехфазного силового, так и однофазного сварочного трансформаторов [1]. Рассмотрение и исследование трансформатора проводится с применением системы моделирования вентильных преобразователей «ЭЛТРАН» [2].

Комбинированный трансформатор

Как уже отмечалось выше, комбинированный трансформатор представляет собой устройство трансформаторного типа, позволяющее осуществить по отдельности режимы работы как трехфазного силового, так и однофазного сварочного трансформаторов. Каждый из этих режимов достигается соответствующим конструктивным исполнением трансформатора, призванного обеспечить тот или иной режим, при этом каждый из них характеризуется своими особенностями хода выходной вольтамперной характеристики.

Комбинированный же трансформатор, являясь одиночным устройством, совмещает в себе функции силового и сварочного трансформаторов в отдельности со всеми присущими им свойствами (такими, как вольтамперная характеристика), что и определило его название – комбинированный.

Рассмотрим подробнее конструкцию трансформатора (рис. 1).

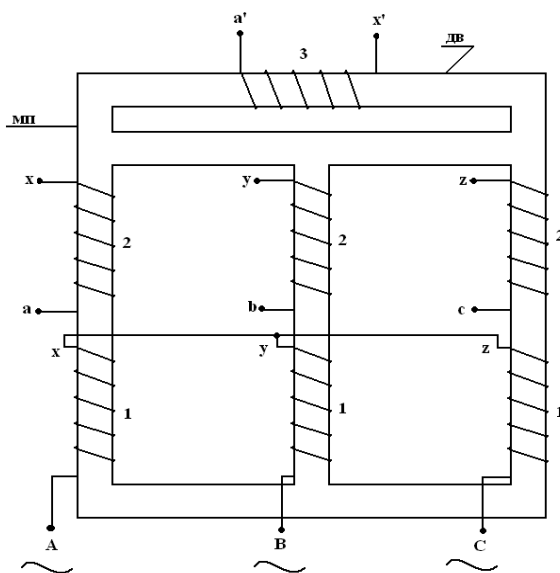


Рис. 1. Схема комбинированного трансформатора. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – фазные первичные обмотки. 2 – фазные вторичные обмотки. 3 – дополнительная обмотка. Буквенные обозначения: А, В, С – точки подключения источника питания трехфазной системы и одновременно начала фазных первичных обмоток 1. x, y, z – концы фазных первичных обмоток 1. a, b, c – начала фазных вторичных обмоток 2. x, y, z (относятся к обмоткам, обозначенным двойкой) – концы фазных вторичных обмоток 2. a' и x' – соответственно начало и конец дополнительной обмотки 3. «мп» – магнитопровод трансформатора. «дв» – дополнительная ветвь магнитопровода.

Трансформатор выполнен на стальном магнитопроводе «мп». На нем присутствуют обмотки: «1» - первичные, для подключения к питающей сети трехфазной системы, «2» - вторичные, предназначенные для питания силовой нагрузки и дополнительная вторичная обмотка «3» - для получения сварочного режима. При подключении к какой-либо нагрузке вторичных обмоток «2», обмотка «3» разомкнута и не используется. При этом трансформатор работает в обычном режиме как трехфазный силовой, обеспечивая жесткую вольтамперную характеристику. При использовании вторичной обмотки «3» и разомкнутых и незадействованных обмотках «2» получается сварочный режим с присущей ему «мягкой» вольтамперной характеристикой. Стоит отметить некоторые особенности сварочного режима комбинированного трансформатора: так как обмотка «3» расположена на дополнительной ветви «дв», а магнитный поток в этой ветви имеет меньшее значение, чем в стержнях, то ЭДС, наводимая в этой

обмотке, имеет меньшую величину, следовательно, не обеспечивается достаточный ток короткого замыкания, и характеристика имеет слишком «мягкий» ход. Ниже (рис. 2) представлена вольтамперная характеристика обмотки «3» реального трансформатора, имеющего габаритную мощность порядка 300 ВА:

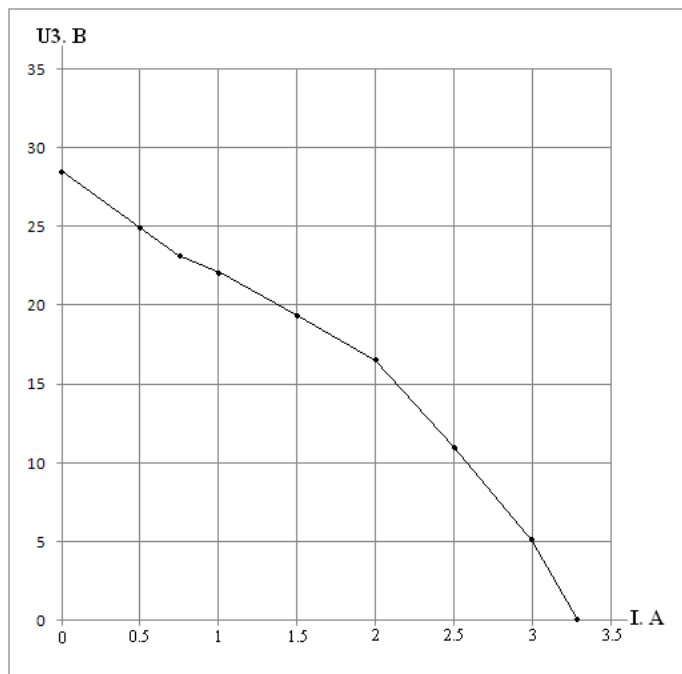


Рис. 2. Вольтамперная характеристика обмотки "3".

Сделать характеристику обмотки «3» более жесткой можно несколькими способами:

1. Соединением обмотки «3» с одной из фазных обмоток «2».
2. Уменьшением магнитного сопротивления дополнительной ветви и (или) увеличением магнитного сопротивления двух ветвей, заключенных между стержнями.

Для проверки этих способов, а также для исследования режимов работы комбинированного трансформатора была создана его модель в системе моделирования «ЭЛТРАН», при этом за основу были взяты параметры реального трансформатора, мощностью 300 ВА (с дополнительной обмотки «3» которого и снималась ВАХ, представленная на рис. 2). Так как для моделирования потребовались некоторые данные трансформатора, то сначала они были найдены расчетным путем, а затем использовались при создании компьютерной модели.

Весь путь моделирования трансформатора в этой работе можно разделить на три этапа:

1. Снятие характеристик реального трансформатора и расчет, или измерение его основных электрических, геометрических и магнитных параметров.
2. Создание описания модели на основе измеренных и вычисленных данных.
3. Запуск модели в работу, снятие характеристик модели трансформатора и сравнение их с характеристиками реального трансформатора, при этом возможно внесение изменений в исходное описание модели, с целью

нахождения оптимальных конструктивных параметров, обеспечивающих наилучшие характеристики.

Этап №1

При создании модели понадобятся параметры магнитной системы, такие как магнитное сопротивление и веберамперная характеристика каждого из участков магнитопровода. Для их расчета были сняты геометрические параметры магнитопровода (рис. 3):

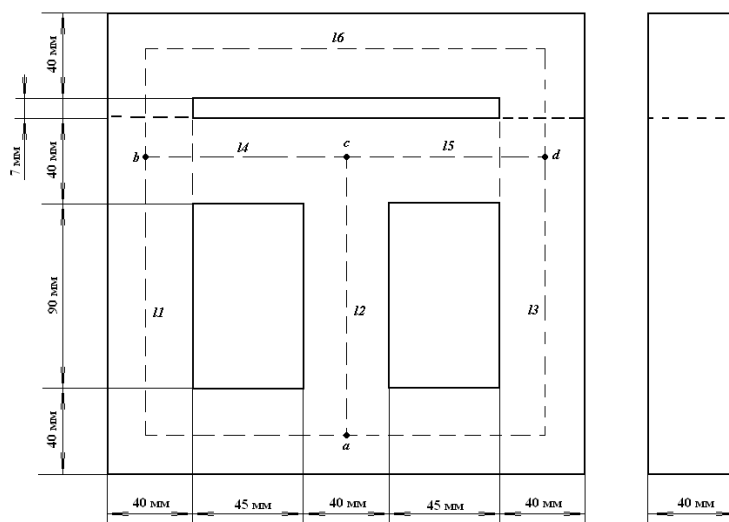


Рис. 3. Геометрические параметры магнитопровода.

Для данных параметров (рис. 3), сечения всех стержней и ярм $S=0.0016\text{м}^2$, а длины средних силовых линий для них (см. рис. 3, отмечены тонкой пунктирной линией): $l1=0.215\text{м}=l3$, $l2=0,13\text{м}$, $l4=0,085\text{м}=l5$, $l6=0,264\text{м}$. Для дальнейших расчетов нам понадобится основная кривая намагничивания трансформаторной стали марки Э330 с толщиной листа 0.35мм. Кривая представлена на рис. 4 [4].

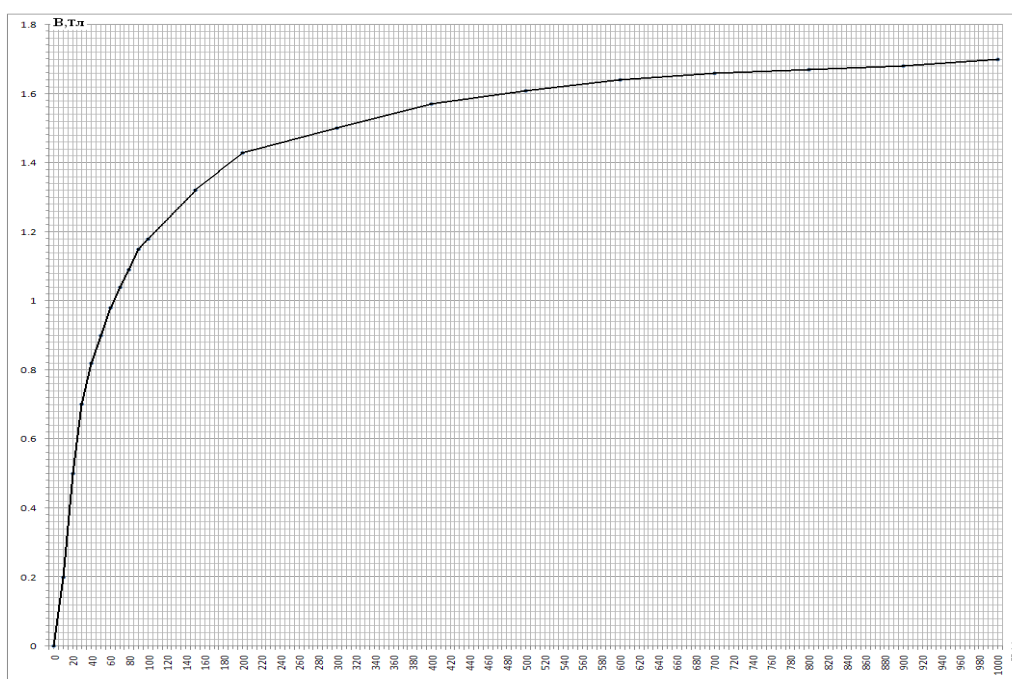


Рис. 4. Основная кривая намагничивания стали марки Э330, толщина листа 0.35мм.

Для нахождения величин магнитных сопротивлений участков магнитопровода найдем сначала зависимости потоков Φ от падений магнитных напряжений U_M для данного магнитопровода. Для этого зададимся произвольно рядом численных значений Φ и для каждого значения его найдем индукцию B по формуле $B=\Phi/S$, и по кривой намагничивания напряженность H . Далее, так как $U_M=H \cdot l$, найдем магнитные напряжения на всех участках магнитопровода. Пользуясь законом Ома для магнитной цепи: $U_M=\Phi \cdot (l/(\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S))=\Phi \cdot R_M$, находим магнитное сопротивление для каждого участка магнитопровода: $R_M=U_M/\Phi$ [3]. Сведем все результаты расчетов в таблицу №1 (номер магнитного сопротивления R соответствует номеру участка магнитопровода l).

Таблица №1

Φ , Вб	$B1$, Тл	$H1$, А/м	$U_{M1,3}$, А	U_{M2} , А	$U_{M4,5}$, А	U_{M6} , А	$R_{1,3}$, Гн ⁻¹	R_2 , Гн ⁻¹	$R_{4,5}$, Гн ⁻¹	R_6 , Гн ⁻¹
0.00025	0.15625	7	1.505	0.91	0.595	1.848	6020	3640	2380	7392
0.0005	0.3125	14	3.01	1.82	1.19	3.696	6020	3640	2380	7392
0.00075	0.46875	19	4.085	2.47	1.615	5.016	5446.7	3293.3	2153.333	6688
0.001	0.625	26	5.59	3.38	2.21	6.864	5590	3380	2210	6864
0.00125	0.78125	36.5	7.8475	4.745	3.1025	9.636	6278	3796	2482	7708.8
0.0015	0.9375	54	11.61	7.02	4.59	14.256	7740	4680	3060	9504
0.00175	1.09375	80	17.2	10.4	6.8	21.12	9828.57	5942.86	3885.714	12068.6
0.002	1.25	124	26.66	16.12	10.54	32.736	13330	8060	5270	16368
0.00225	1.40625	186	39.99	24.18	15.81	49.104	17773	10746.7	7026.667	21824
0.0025	1.5625	386	82.99	50.18	32.81	101.904	33196	20072	13124	40761.6
0.00275	1.71875	1100	236.5	143	93.5	290.4	86000	52000	34000	105600
0.003	1.875	4000	860	520	340	1056	286667	173333	113333.3	352000

Очевидно, что R_M является функцией магнитного потока [3]. Веберамперные характеристики различных участков магнитопровода представлены на рис. 5, причем, номер кривой соответствует номеру участка магнитопровода: например, кривая **14,5** иллюстрирует веберамперные характеристики участков **14** и **15** магнитопровода, а так как параметры (поперечное сечение и длина) обоих этих участков одинаковы, то и веберамперная характеристика для них будет одна.

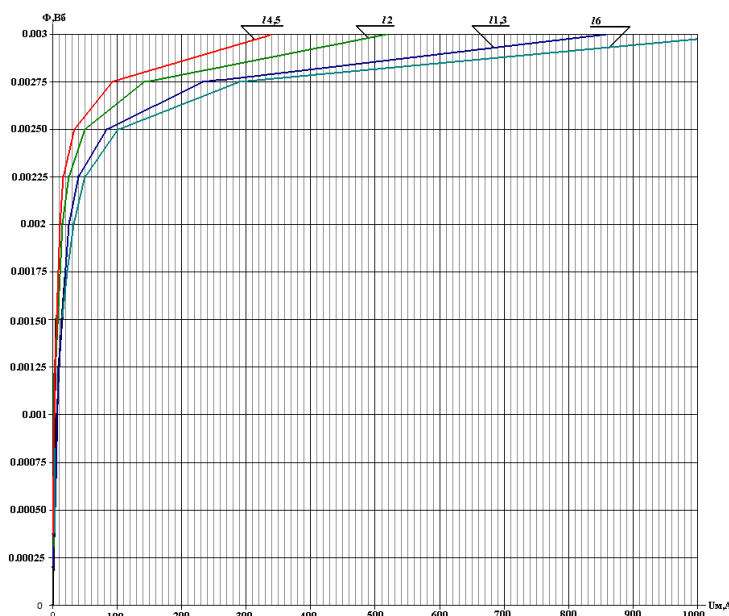


Рис. 5. Веберамперные характеристики различных участков магнитопровода.

Итак, теперь нам известны необходимые параметры магнитопровода, поэтому можно приступить к выполнению этапа №2, то есть к составлению описания модели.

Этап №2

При описании модели будем пользоваться следующей схемой трансформатора и обозначениями элементов (рис. 6):

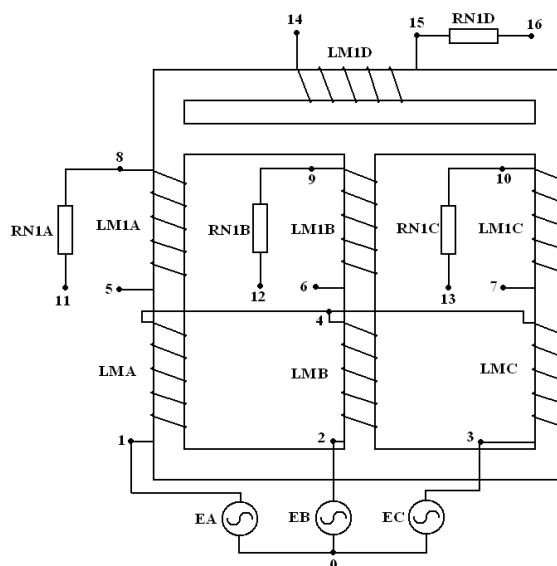


Рис. 6. Комбинированный трансформатор. Электрическая схема.

Схема электрической цепи трансформатора, представленная на рис. 6, содержит: источник питания трехфазной системы, представленный как три соединенных по схеме «звезда» источника э. д. с. синусоидальной формы и одинаковой частоты (50Гц) EA, EB, EC. Каждый из этих источников соответствует отдельной фазе трехфазной симметричной системы э. д. с. Соответственно, как и в трехфазной системе, синусоидальные э. д. с. всех трех источников будут иметь сдвиг по фазе на 120^0 относительно друг друга, что и отразилось в структуре описания источников:

$$\begin{aligned} SIN A-1 \quad K1=1.8 \quad TF=0.0 \quad TP=0.02; \\ SIN B-1 \quad K1=1.8 \quad TF=-6.66666667E-3 \quad TP=0.02; \\ SIN C-1 \quad K1=1.8 \quad TF=6.66666667E-3 \quad TP=0.02; \end{aligned}$$

где элементом *SIN* задается независимый синусоидальный источник с амплитудой выходного сигнала *K1* (так как амплитуды э. д. с. всех трех источников одинаковы и выбраны равными 180 В, а масштаб по напряжению выбран равным 100, то амплитуда запишется, как 1.8), начальной фазой *TF* (задана в секундах) и периодом *TP* (в секундах). Каждая из трех строк в структуре описания источников соответствует только одному из трех источников э. д. с., который обозначен соответствующей буквой у элемента *SIN*. Точка «0» объединяет по одному выводу от каждого источника э. д. с. Точки «1», «2» и «3» - соответственно точки соединения источника EA с фазной первичной обмоткой LMA, источника EB с фазной первичной обмоткой LMB, источника EC с фазной первичной обмоткой

ЛМС. Все три первичных обмотки соединены точкой «4» в «звезду». Вторичные фазные обмотки обозначены так: LM1A с точкой начала «5» и конца «8», LM1B с точкой начала «6» и конца «9», LM1C с точкой начала «7» и конца «10», резисторы RN1A, RN1B, RN1C подсоединены к концам соответствующих вторичных обмоток и представляют собой активные нагрузочные сопротивления, причем свободные выводы резисторов «11», «12» и «13», и начала вторичных фазных обмоток «5», «6» и «7» могут соединяться в различные схемы как между собой, так и с дополнительной обмоткой LM1D (начало – точка «14», конец – точка «15») и с нагрузочным активным сопротивлением RN1D со свободным концом «16» [2].

Магнитная цепь будет выглядеть следующим образом (рис. 7):

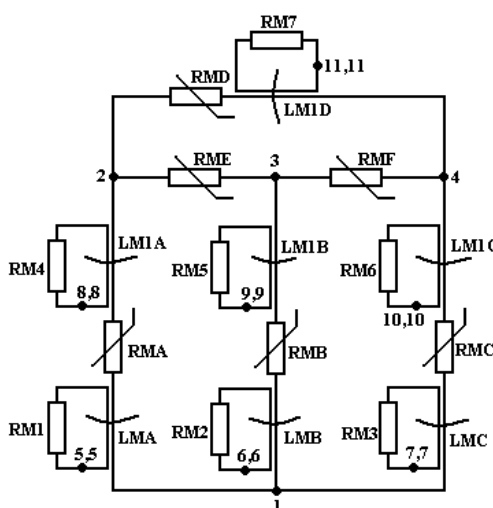


Рис. 7. Магнитная цепь комбинированного трансформатора.

Магнитная цепь трансформатора состоит из тринадцати магнитных сопротивлений, обозначенных как RM, и семи обмоток LM (см. рис. 6), с помощью которых отображается сцепление обмоток трансформатора с магнитными потоками. Значком $\text{---} \diagup \text{---}$ обозначено нелинейное магнитное сопротивление, ветви которого соответствуют стержням и ярмам магнитопровода, значком $\text{---} \square \text{---}$ - потоки рассеяния первичных и вторичных обмоток по воздуху. Точки «1», «2», «3» и «4» соответствуют точкам соединения участков магнитопровода, на которые он был разбит на этапе №1 (см рис. 3). Так как потоки рассеяния замкнуты сами на себя, то магнитные сопротивления, соответствующие этим потокам тоже будут замкнуты на себя соответствующей точкой соединения. Например, точка 5,5 на рис. 7 означает, что началом и концом магнитной цепи с сопротивлением RM1 является одна и та же точка (точка 5,5) и сопротивление RM1, следовательно, замкнуто само на себя.

Таким образом, модель трансформатора содержит электрическую и магнитную цепи, основные параметры которых нам известны. Следующий шаг – непосредственное описание модели трансформатора в системе «ЭЛТРАН»:

Модель комбинированного трансформатора

Масштаб тока-1.

Масштаб напряжения-100.
 Масштаб времени-0.0001
 Имя КТ-t3
 BLOCK E1;
 EA NY=0,1 BX1=1,SINA,11;
 EB NY=0,2 BX1=1,SINB,11;
 EC NY=0,3 BX1=1,SINC,11;
 LMA NY=1,4;
 LMB NY=2,4;
 LMC NY=3,4;
 LM1A NY=5,8;
 RN1A R=100. NY=8,11;
 LM1B NY=6,9;
 RN1B R=100. NY=9,12;
 LM1C NY=7,10;
 RN1C R=100. NY=10,13;
 LM1D NY=14,15 I=-4.0;
 RN1D R=0.0 NY=15,16;
 END E1;
 BLOCK M1;
 RMA RM=350000.0 NY=1,2 S=1;
 RMB RM=250000.0 NY=1,3 S=1;
 RMC RM=350000.0 NY=1,4 S=1;
 RME RM=200000.0 NY=2,3 S=1;
 RMF RM=200000.0 NY=3,4 S=1;
 RMD RM=8000.0 NY=2,4 S=1;
 RM1 RM=45400000.0 NY=5,5 S=1;
 RM2 RM=45400000.0 NY=6,6 S=1;
 RM3 RM=45400000.0 NY=7,7 S=1;
 RM4 RM=2300000.0 NY=8,8 S=1;
 RM5 RM=2300000.0 NY=9,9 S=1;
 RM6 RM=2300000.0 NY=10,10 S=1;
 RM7 RM=50000000.0 NY=11,11 S=1;
 WA W=400.0 WRM=1*RMA,1*RM1 BX1=1,LMA,E1;
 WB W=400.0 WRM=1*RMB,1*RM2 BX1=1,LMB,E1;
 WC W=400.0 WRM=1*RMC,1*RM3 BX1=1,LMC,E1;
 W1A W=150.0 WRM=1*RMA,1*RM4 BX1=1,LM1A,E1;
 W1B W=150.0 WRM=1*RMB,1*RM5 BX1=1,LM1B,E1;
 W1C W=150.0 WRM=1*RMC,1*RM6 BX1=1,LM1C,E1;
 W1D W=107.0 WRM=1*RMD,1*RM7 BX1=1,LM1D,E1;
 END M1;
 BLOCK II;
 SINA-1 K1=1.8 TF=0.0 TP=0.02;
 SINB-1 K1=1.8 TF=-6.66666667E-3 TP=0.02;
 SINC-1 K1=1.8 TF=6.66666667E-3 TP=0.02;
 END II;
 BLOCK F1;
 END F1;
 &&&&

Этап №3

Проведем исследование модели трансформатора, сняв вольтамперные характеристики с различных обмоток. Ниже представлена таблица значений токов и напряжений на обмотках трансформатора при всех разомкнутых вторичных обмотках:

Таблица №2

Обмотка LM1D	Обмотка LM1A	Обмотка LM1B	Обмотка LM1C	Обмотка LMA		Обмотка LMB		Обмотка LMC	
Напряжение XX, В	Напряжение XX, В	Напряжение XX, В	Напряжение XX, В	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А
28,7	47,44	47,33	47,32	127,5	1,988	127,18	0,937	127,167	1,63

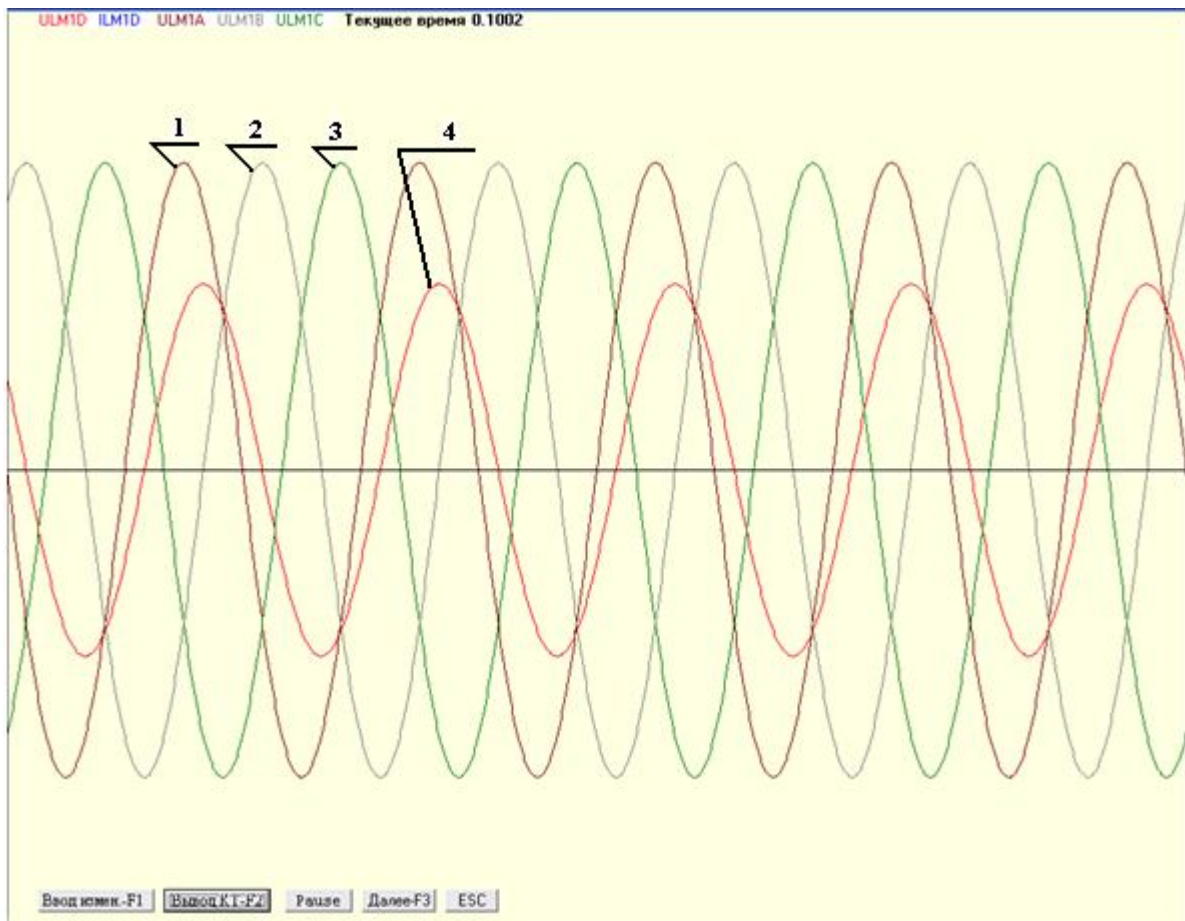


Рис. 8. Мгновенные значения напряжений на вторичных обмотках на холостом ходу. Кривая 1 – напряжение на обмотке LM1A, кривая 2 - напряжение на обмотке LM1B, кривая 3 - напряжение на обмотке LM1C, кривая 4 - напряжение на обмотке LM1D.

Снимем вольтамперную характеристику обмотки LM1D, соединив точки «16» и «14» (для этого достаточно в описании модели трансформатора переобозначить «16» на «14»). Изменяя значение сопротивления нагрузочного резистора RN1D, будем отслеживать значения токов и напряжений обмотки LM1D, и заносить их в таблицу №3.

Таблица №3

Обмотка LM1D	
$U_{доп},$ В	$I_{доп},$ А
28,7	0
26	1,3
21	2,1
19	2,4
16	2,6
11,2	2,9
6,2	3,1
3,2	3,19
0	3,2

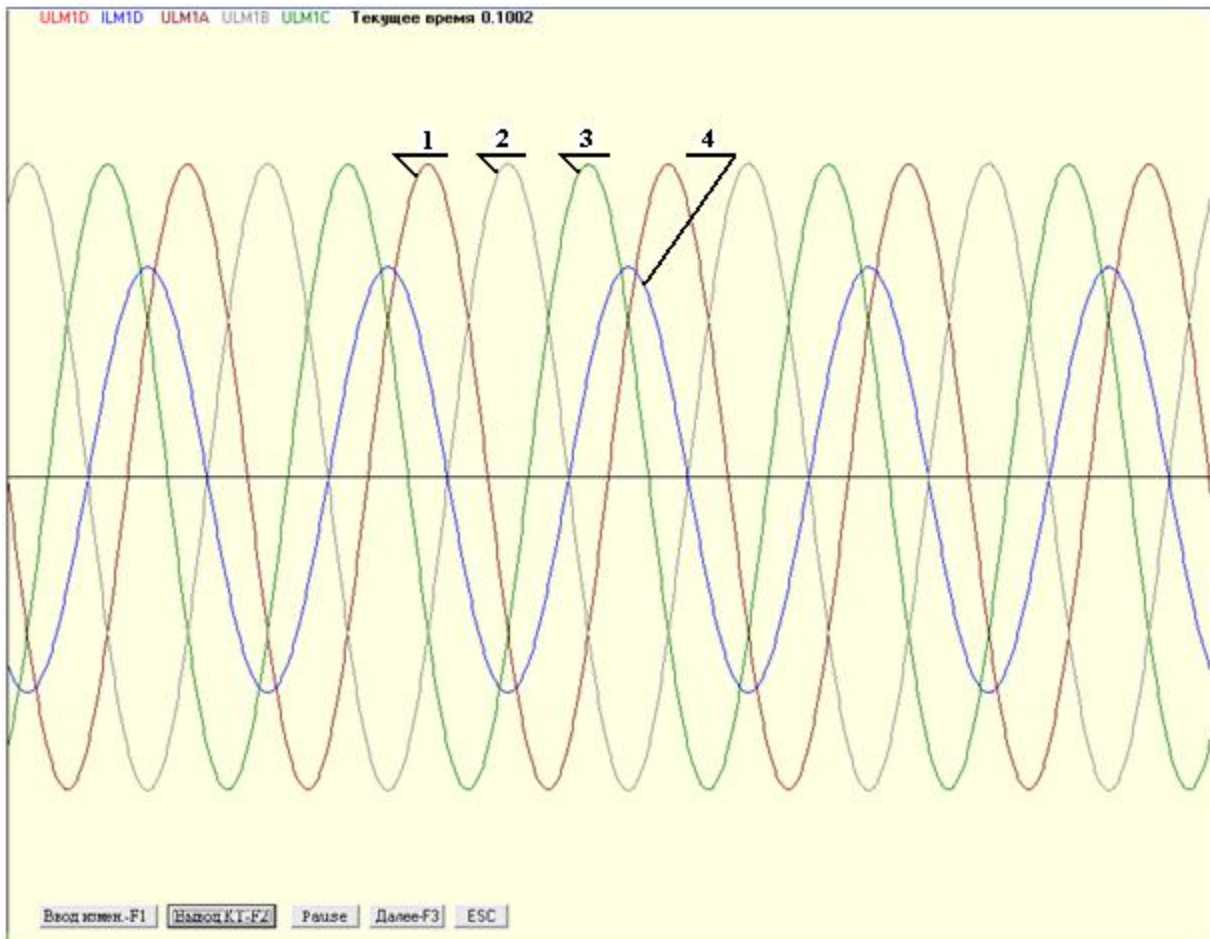


Рис. 9. Мгновенные значения напряжений на вторичных обмотках и тока замкнутой накоротко дополнительной обмотки. Кривая 1 – напряжение на обмотке LM1A, кривая 2 - напряжение на обмотке LM1B, кривая 3 - напряжение на обмотке LM1C, кривая 4 - ток в обмотке LM1D.

По данным, взятым из таблицы №3, построим графически вольтамперную характеристику обмотки LM1D (рис. 10)

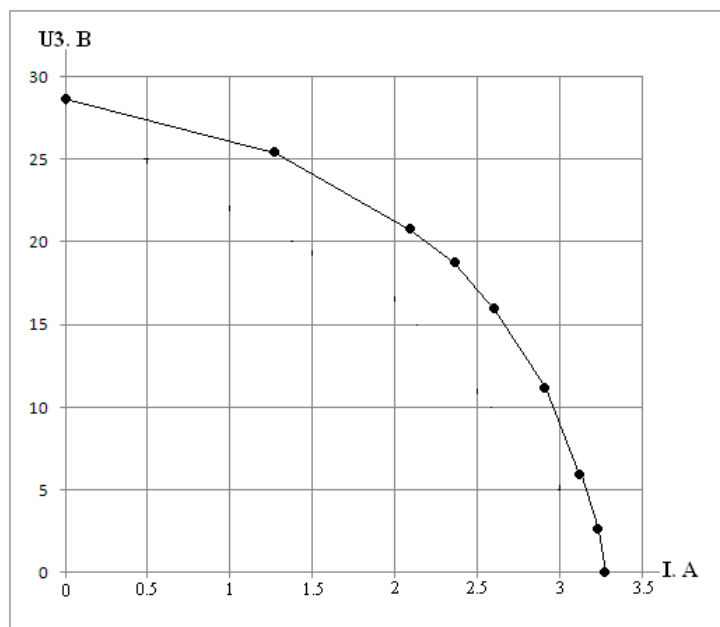


Рис. 10. ВАХ обмотки LM1D.

Для наглядности разместим на одном графике реальную ВАХ дополнительной обмотки (рис. 2) и ВАХ, снятую с дополнительной обмотки LM1D на модели трансформатора (рис. 11).

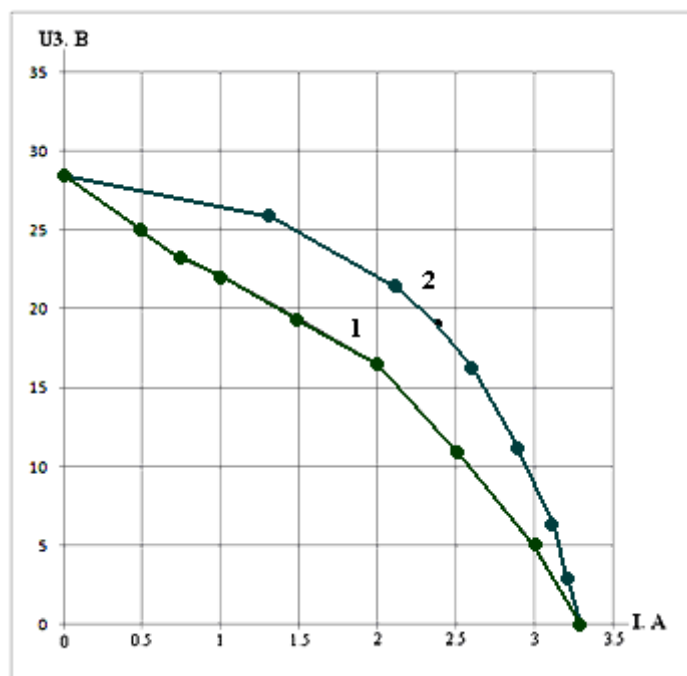


Рис. 11. ВАХ дополнительной обмотки: 1 - реального трансформатора, 2 - модели трансформатора.

Отличия между ВАХ дополнительной обмотки реального трансформатора (кривая 1) и дополнительной обмотки модели трансформатора (кривая 2) заключается главным образом в том, что при составлении модели крайне трудно, а иногда и невозможно учесть абсолютно все процессы, сопровождающие работу трансформатора. Кроме того, степень достоверности модели во многом зависит от системы моделирования и, главным образом, от опыта и профессионализма

исследователя, составляющего модель устройства, однако всегда следует стремиться к максимальной приближенности работы модели и реального устройства.

Теперь снимем вольтамперные характеристики фазных обмоток LM1A, LM1B, LM1C и занесем данные в таблицу №4.

Таблица №4

Обмотка LM1A		Обмотка LM1B		Обмотка LM1C	
Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А
47,44	0	47,33	0	47,32	0
47,4	0,47	47,3	0,47	47,3	0,47
47,43	1,186	47,32	1,18	47,31	1,18
47,4	2,37	47,3	2,37	47,3	2,36
47,3	4,7	47,26	4,7	47,23	4,7
47,25	5,9	47,2	5,9	47,2	5,9
47,2	7,87	47,1	7,86	47,1	7,85
47	11,7	47	11,7	47	11,7
45,7	22,8	45,7	22,8	45,6	22,8
44,5	29,7	44,5	29,7	44,4	29,6
41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5
39	48,9	39	48,9	39	48,8
35	58	35	58	35	58
28	70	28	70	28	70
16	81	16	81	16	81
8,5	85	8,5	85	8,5	85
0	86	0	86	0	87

Как видно из таблицы №4, токи короткого замыкания во всех фазных обмотках получились большими, что при относительно небольшом напряжении холостого хода даст соответственно «жесткую», медленно спадающую вольтамперную характеристику. Таким образом, разместив на одном графике вольтамперные характеристики всех вторичных обмоток, мы увидим ярко выраженную разницу в ходе ВАХ дополнительной обмотки (рис. 10) и ВАХ фазных обмоток, что подтверждает тот факт, что трансформатор может обеспечивать по отдельности два различных режима работы – сварочный и силовой. Для наглядности разместим на одном графике (рис. 12) все четыре вольтамперных характеристики, снятых с дополнительной обмотки LM1D и с фазных вторичных обмоток LM1A, LM1B, LM1C модели трансформатора (ВАХ трех фазных вторичных обмоток отразим одной кривой, так как различия в значениях их токов и напряжений крайне малы).

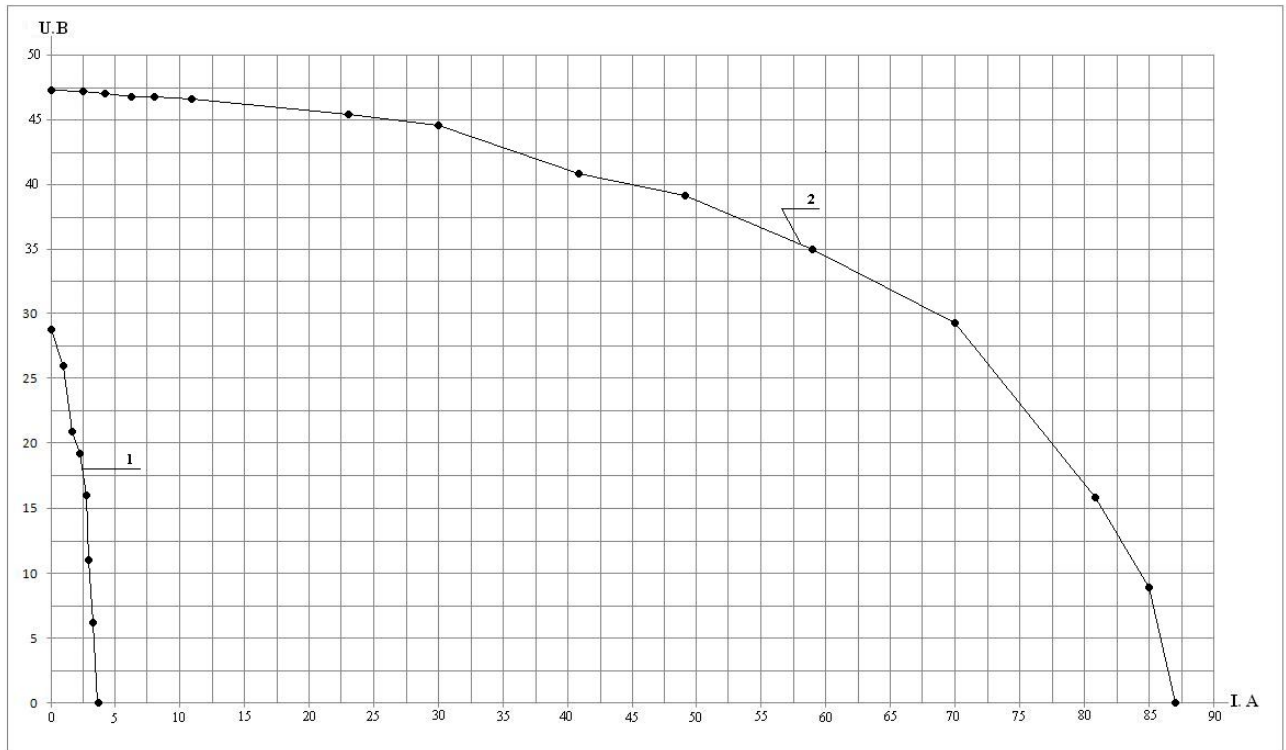


Рис. 12. Вольтамперные характеристики вторичных обмоток. Кривая 1 - ВАХ дополнительной обмотки LM1D, кривая 2 – усредненная ВАХ обмоток LM1A, LM1C, LM1B.

На графике рис. 12 отчетливо видна разница в ходе вольтамперных характеристик фазных обмоток (кривая 2, «жесткий» ход характеристики) и ВАХ дополнительной обмотки (кривая 1, «мягкий» ход характеристики). Также четко виден и главный недостаток кривой 1 – это ее чрезмерно «мягкий» ход, не позволяющий достичь необходимого для целей сварки значения тока короткого замыкания. Однако, и это будет показано ниже, данный недостаток вполне реально исправить.

Следующая задача этапа №3, устранение главного недостатка комбинированного трансформатора, а именно – чрезмерно «мягкого» хода вольтамперной характеристики в сварочном режиме. Как уже отмечалось выше, существует несколько способов решения этой проблемы. Начнем с первого способа – соединение дополнительной обмотки с одной из фазных вторичных обмоток, соединение проводилось по схеме рис. 13.

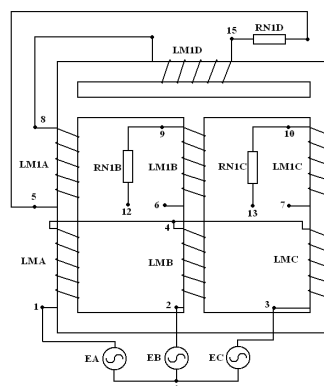


Рис. 13. Метод улучшения хода ВАХ в сварочном режиме.

Характеристика снималась с нагрузочного сопротивления R_{N1D} и приведена в таблице №5:

Таблица №5

$U_{RN1D,B}$	$I_{RN1D,A}$
74	0
73,3	0,73
73,1	0,91
72,7	1,2
71,6	1,79
66,48	3,32
53,26	5,326
47,3	5,91
39,2	6,53
28,45	7,1
15,1	7,55
0	7,7

По значениям из таблицы №5 построим графически ВАХ (рис. 14):

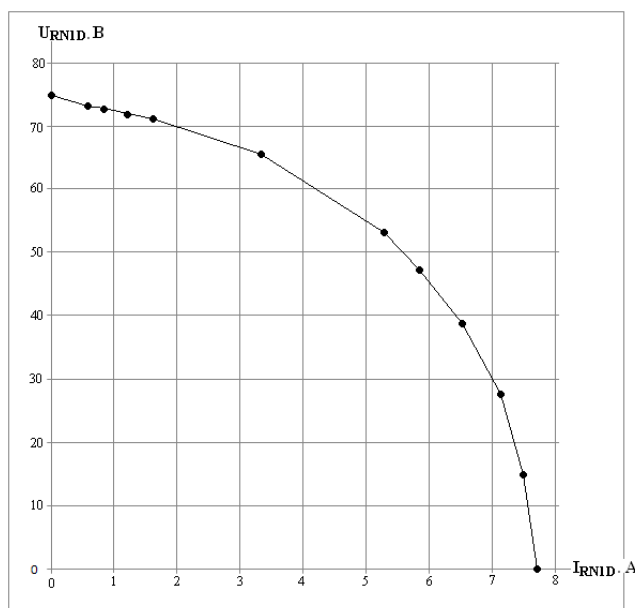


Рис. 14. ВАХ последовательно соединенных обмоток LM1A и LM1D (вторичной фазной и дополнительной, см. рис. 13).

Как видно из рис. 14, при последовательном соединении дополнительной обмотки и какой-либо из вторичных фазных, происходит ужесточение выходной ВАХ при сохранении ее резко падающего характера. Таким образом, путем подбора числа витков в фазной и дополнительной обмотках можно получить приемлемые параметры сварочного режима. На практике, при исследовании работы реального трансформатора, был применен следующий метод улучшения ВАХ сварочного режима: дополнительная обмотка 3 соединялась последовательно с одной из фазных вторичных 2, которые соединялись в «треугольник» (рис. 15).

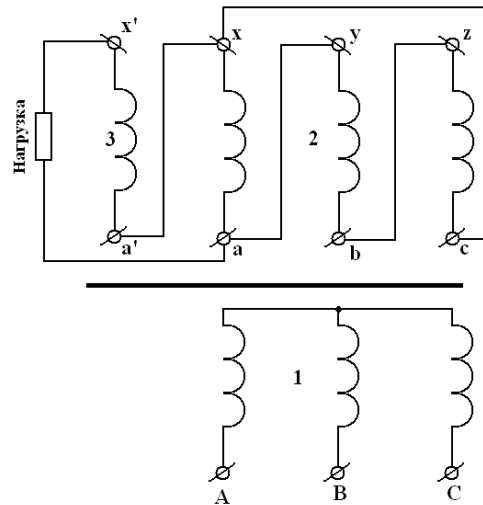


Рис. 15. Один из способов соединения вторичных обмоток.

Причем, в зависимости от числа витков в дополнительной обмотке и фазировки ее подключения к основной обмотке ход вольтамперной характеристики может изменяться в широких пределах. На рис. 16 представлена вольтамперная характеристика реального трансформатора, снятая с последовательно соединенных обмоток 2 и 3 (обмотки 2 соединялись в треугольник).

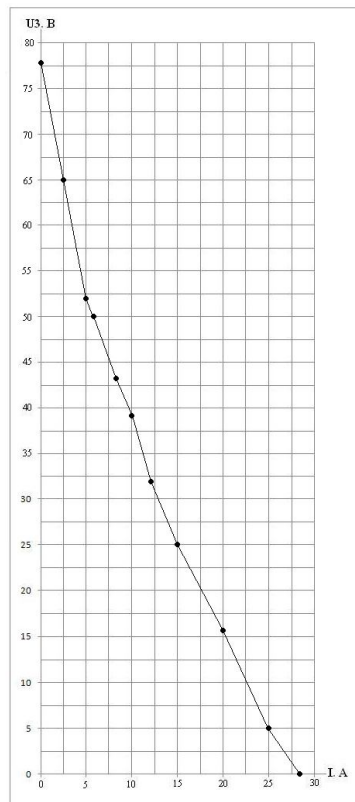


Рис. 16. Вольтамперная характеристика последовательно соединенных обмоток 2 и 3 (обмотки 2 соединялись в треугольник).

Опробуем этот метод на модели трансформатора, соединив обмотки по следующей схеме (рис. 17):

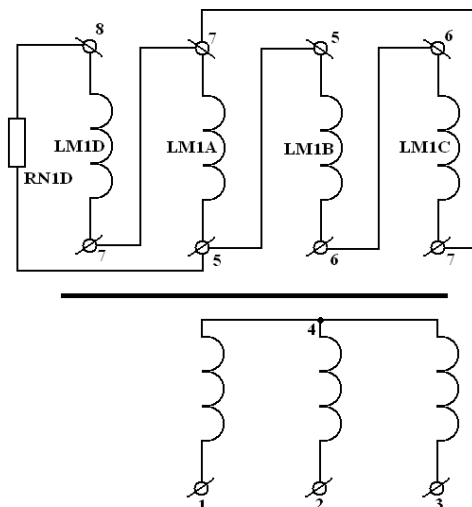


Рис. 17. Соединение обмоток для снятия ВАХ в сварочном режиме.

Снимем ВАХ последовательно соединенных обмоток LM1D и LM1A, включенных по схеме на рис. 17, то есть обмотки LM1D и LM1A включались последовательно и согласно (конец обмотки LM1A соединялся с началом обмотки LM1D). ВАХ представлена в таблице №6.

Таблица №6

Обмотки LM1D – LM1A	
U, В	I, А
73,7	0
73,4	0,734
73,2	0,92
72,8	1,2
71,7	1,8
66,6	3,33
53,6	5,36
47,67	5,96
39,56	6,6
28,8	7,2
15,3	7,65
0	7,82

График ВАХ, построенный по значениям таблицы №6 имеет вид (рис. 18)

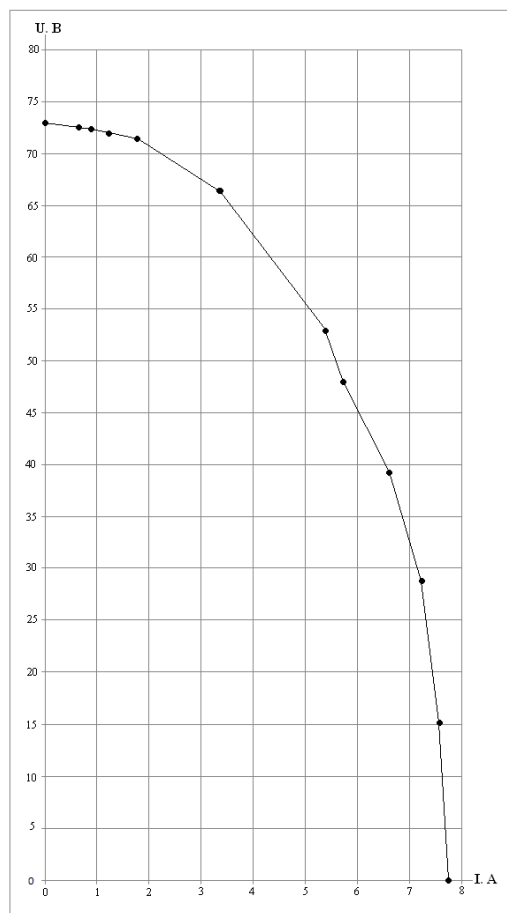


Рис. 18. Вольтамперная характеристика последовательно соединенных обмоток LM1A и LM1D (фазные вторичные обмотки LM1A, LM1B и LM1C соединялись в треугольник).

Как видно из графика на рис. 18, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания возросли более чем в два раза при вышеупомянутом способе соединения. Теперь, оставив последовательность соединения обмоток без изменения (рис. 17), уменьшим число витков в дополнительной обмотке LM1D до пятидесяти и снимем ВАХ последовательно соединенных обмоток LM1D и LM1A (таблица №7):

Таблица №7

Обмотки LM1D – LM1A	
U, В	I, А
60	0
59,45	0,742
59,4	0,99
59,3	1,48
59	2,95
57,8	5,78
57	7,1
55,3	9,2
51	12,8
38	19
23	23
0	25,3

График ВАХ, построенный по значениям таблицы №7 имеет вид (рис. 19)

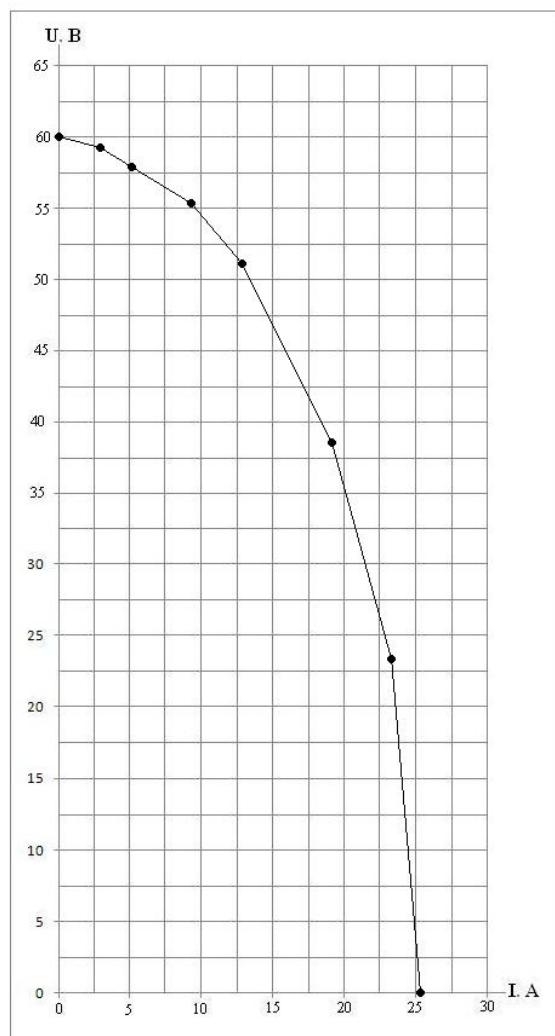


Рис. 19. Вольтамперная характеристика последовательно соединенных обмоток LM1A и LM1D (фазные вторичные обмотки LM1A, LM1B и LM1C соединялись в треугольник) при пятидесяти витках в обмотке LM1D.

Из графика на рис. 19 видно, что с уменьшением числа витков в дополнительной обмотке, при вышеупомянутом методе соединения (см. рис. 17) уменьшается напряжение холостого хода.

Теперь соединим обмотку LM1D (с числом витков, равным 50) и обмотку LM1A тоже последовательно, но встречно (соединим концы обмоток) по схеме рис. 20, и, сняв их ВАХ и занеся значения в таблицу №8, построим соответствующий график.

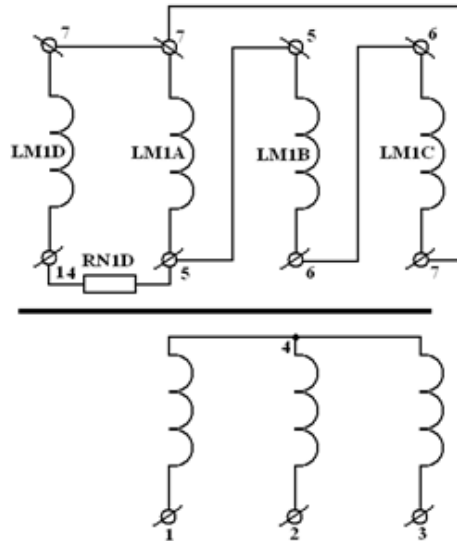


Рис. 20. Схема соединения обмоток.

Таблица №8

Обмотки LM1D – LM1A	
U, В	I, А
36,4	0
36,38	0,91
36,2	1,81
35,5	3,55
35	4,38
34,1	5,68
31,7	7,95
24,1	12
14,7	14,7
0	16

Благодаря встречному соединению обмоток LM1D и LM1A ток короткого замыкания и напряжение холостого хода снизились, чего и следовало ожидать при таком соединении.

Таким образом, из вышеприведенных опытов с соединением обмоток модели трансформатора, можно говорить о том, что дополнительная обмотка, помимо выполнения ею своей главной функции – обеспечения сварочного режима, открывает еще один эффект, а именно – при соединении с основными вторичными обмотками, дополнительная обмотка может выполнять функцию индуктивного сопротивления [1], и при соответствующем выборе числа витков в ней, можно добиться нужного хода вольтамперной характеристики. В этом случае целесообразно выполнить дополнительную обмотку с отводами через определенное число витков.

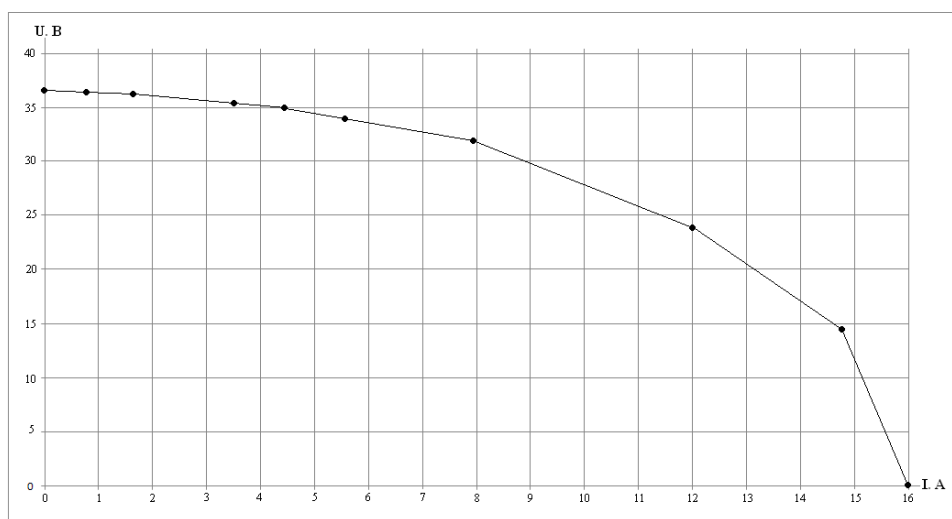


Рис. 21. Вольтамперная характеристика последовательно - встречно соединенных обмоток LM1A и LM1D (фазные вторичные обмотки LM1A, LM1B и LM1C соединялись в треугольник) при пятидесяти витках в обмотке LM1D.

Второй метод улучшения ВАХ сварочного режима - это увеличение магнитного потока в дополнительной ветви. Увеличить в этой ветви магнитный поток можно несколькими путями: либо увеличивая ее сечение, либо уменьшая сечение двух ярм, заключенных между стержнями, либо применяя оба метода. Опробуем на модели трансформатора все три пути увеличения потока в дополнительной ветви, результаты отразим в соответствующих таблицах и на графиках вольтамперных характеристик.

1. Увеличение сечения дополнительной ветви

Увеличим в два раза сечение дополнительной ветви, магнитное сопротивление которой в модели трансформатора отображает элемент RMD, соответственно, значение его сопротивления уменьшится при увеличении сечения ветви, что вызовет увеличение магнитного потока в ней и, как следствие, увеличение тока короткого замыкания в дополнительной обмотке. Снимем ВАХ одной дополнительной обмотки LM1D, данные занесем в таблицу №9.

Таблица №9

Обмотка LM1D	
U _{доп} , В	I _{доп} , А
29	0
28,7	0,72
28,5	0,95
27,8	1,39
24,8	2,48
23,1	2,89
20,4	3,4
16	4
9,1	4,54
4,72	4,72
0	4,79

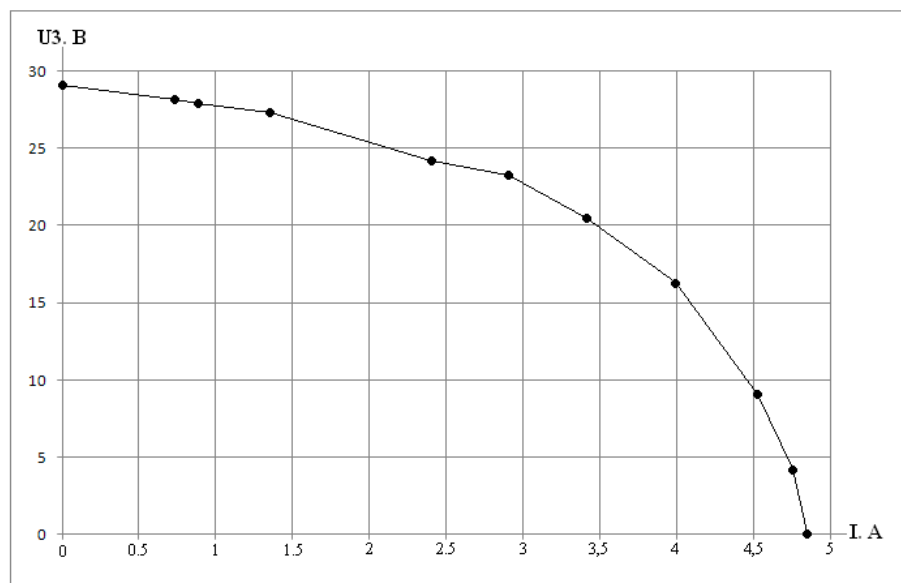


Рис. 22. ВАХ дополнительной обмотки LM1D при увеличенном в два раза сечении дополнительной ветви магнитопровода.

Как можно увидеть из графика на рис. 22, ток короткого замыкания в дополнительной обмотке увеличился, чего и следовало ожидать при увеличении сечения дополнительной ветви, на которой эта обмотка расположена. Однако, не очень большой прирост тока короткого замыкания (около 1,5 ампера) заставляет уделить особое внимание второму методу улучшения ВАХ сварочного режима, который был обозначен выше, а именно – уменьшение сечения двух верхних ярм, заключенных между стержнями.

2. Уменьшение сечения двух верхних ярм, заключенных между стержнями при неизменном сечении дополнительной ветви

Уменьшим в два раза сечения двух верхних ярм, магнитные сопротивления которых в модели трансформатора отображают элементы RME и RMF, а сечение дополнительной ветви оставим без изменения, т. е. таким, каким оно было в первоначальной конструкции (см. рис. 3). Соответственно, значения магнитных сопротивлений RME и RMF увеличатся, что вызовет увеличение магнитного потока в дополнительной ветви и, как следствие, увеличение тока короткого замыкания в дополнительной обмотке. Снимем ВАХ одной дополнительной обмотки LM1D, данные занесем в таблицу №10.

Таблица №10

Обмотка LM1D	
U _{доп} , В	I _{доп} , А
29	0
28,9	0,72
28,7	0,96
28,4	1,42
26,8	2,68
25,8	3,23
24	4
20,3	5,1
12,8	6,38
6,9	6,9
0	7,1

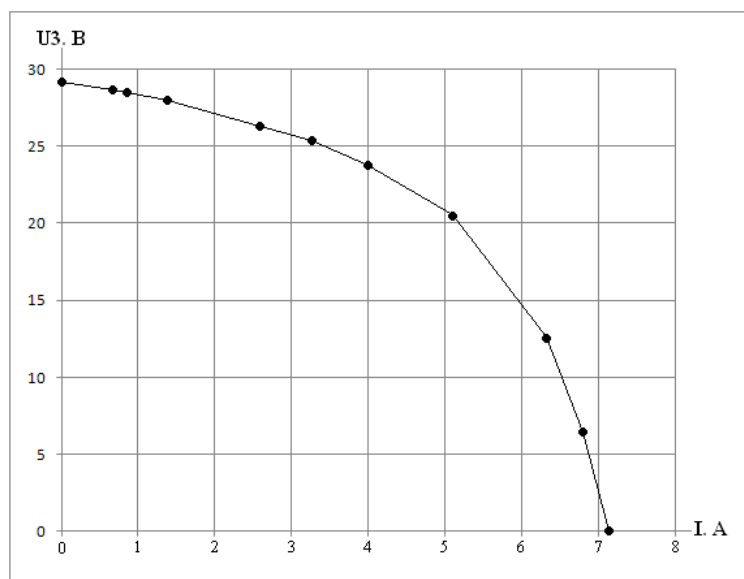


Рис. 23. ВАХ дополнительной обмотки при уменьшенных сечениях двух верхних ярм, заключенных между стержнями.

Из графика на рис. 23 видно, что метод уменьшения сечений двух верхних основных ярм является более действенным, чем только увеличение сечения дополнительной ветви, и дает в данном случае увеличение значения тока короткого замыкания в два раза, по сравнению с величиной тока КЗ дополнительной обмотки при первоначальных параметрах магнитной системы (см. рис. 3).

3. Одновременное увеличение сечения дополнительной ветви и уменьшение сечений двух верхних основных ярм

Применим одновременно оба предыдущих метода, т. е. увеличим в два раза сечение дополнительной ветви и уменьшим в два раза сечения двух верхних ярм, заключенных между стержнями. Снимем ВАХ дополнительной обмотки, результаты занесем в таблицу №11 и по ним построим графически вольтамперную характеристику дополнительной обмотки LM1D (рис. 24).

Таблица №11

Обмотка LM1D	
$U_{доп},$ В	$I_{доп},$ А
29,2	0
29	0,73
28,98	0,97
28,76	1,44
27,62	2,762
26,85	3,36
25,4	4,23
22,27	5,57
14,86	7,43
8,28	8,28
0	8,63

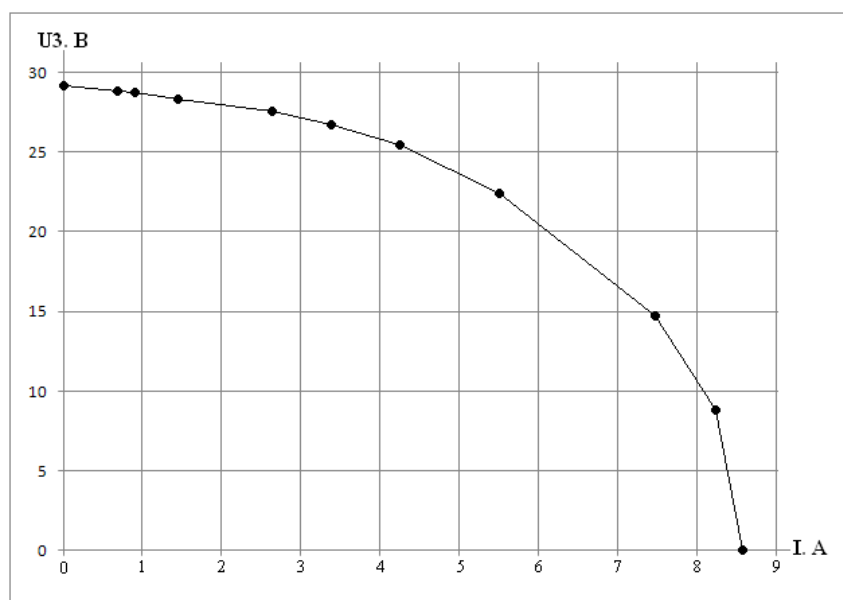


Рис. 24. ВАХ дополнительной обмотки LM1D при одновременном увеличении сечения дополнительной ветви и уменьшении сечений двух основных ярм.

Очевидно, что применение сразу обоих методов дает более ощутимый прирост тока КЗ в дополнительной обмотке, чем при применении каждого из методов по отдельности.

Так как напряжение $XX=29$ В недостаточно для надежного зажигания дуги при сварочных работах, то для увеличения напряжения XX обмотки LM1D, увеличим число витков в ней до 230, причем сечения дополнительной ветви и основных ярм оставим измененными в два раза (т. е. по методу №3), значения токов и напряжений занесем в таблицу №12.

Таблица №12

Обмотка LM1D	
$U_{\text{доп.}}$ В	$I_{\text{доп.}}$ А
62,7	0
61,5	0,77
60,65	1
58,37	1,46
49,4	2,47
33,8	3,38
28,6	3,57
22,5	3,75
15,6	3,89
7,98	3,99
0	4

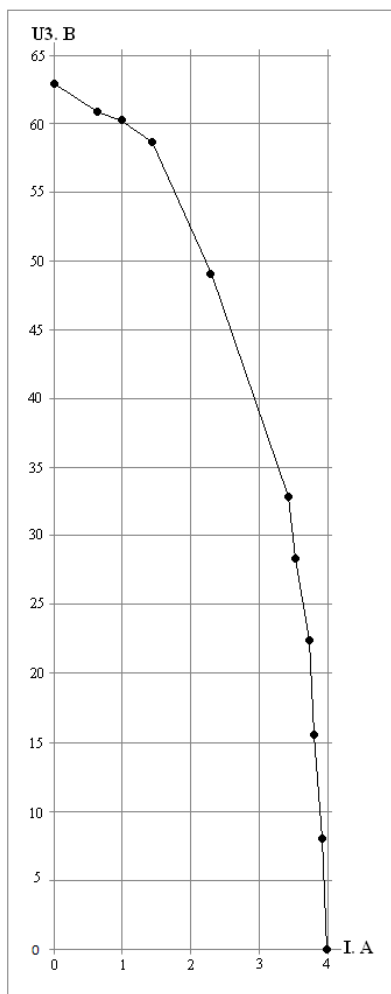


Рис. 25. ВАХ обмотки LM1D при 230 витках в ней.

Как видно из графика на рис. 25, напряжение холостого хода увеличилось до необходимого нам значения, однако, соответственно уменьшился ток короткого замыкания.

Теперь, после того, как были исследованы все основные методы улучшения ВАХ сварочного режима, целесообразно обобщить полученные результаты, разместив на одном графике вольтамперные характеристики, снятые при всех применявшихся методах исследования работы модели трансформатора. Этот график представлен на следующей странице (рис. 26).

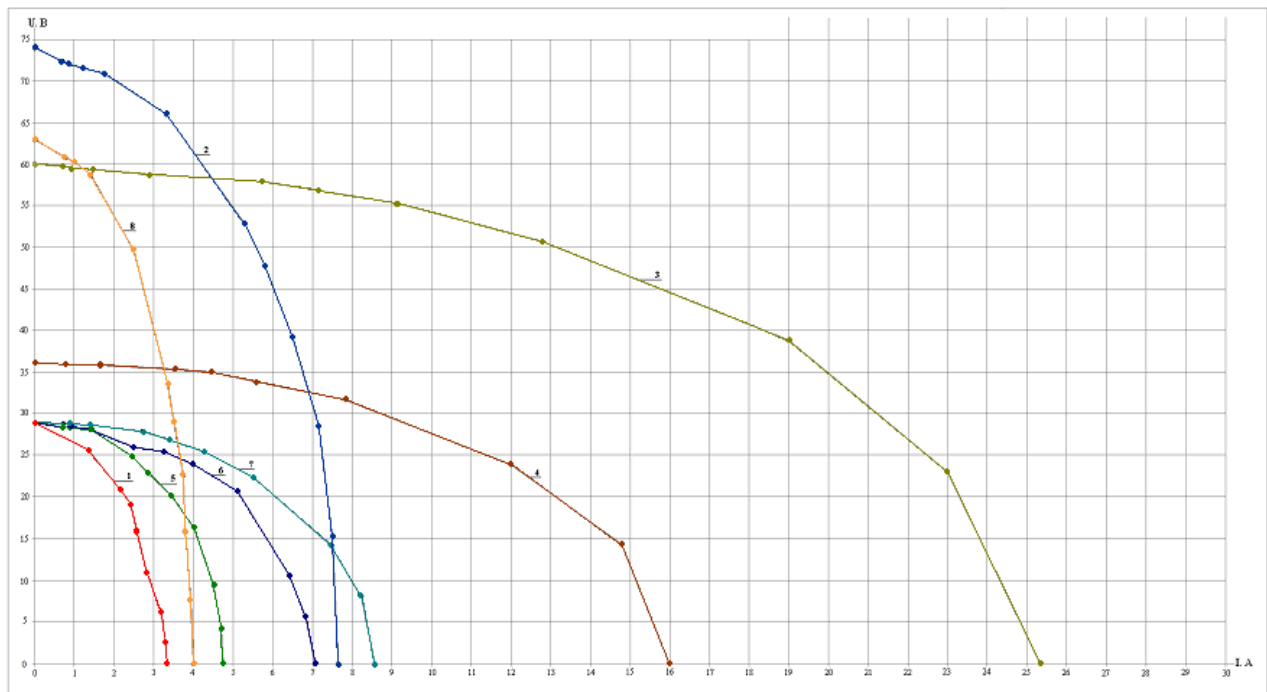


Рис. 26. Кривые вольтамперных характеристик: 1 – дополнительной обмотки LM1D при первоначальных параметрах, 2 – последовательно и согласно соединенных дополнительной и фазной вторичных обмоток, так же, ввиду практически одинаковых значений токов и напряжений, эта же кривая отображает и ВАХ последовательно и согласно соединенных дополнительной и фазной вторичных обмоток, при соединении фазных вторичных обмоток в «треугольник», 3 – последовательно и согласно соединенных дополнительной и фазной вторичных обмоток, при соединении фазных вторичных обмоток в «треугольник» и при пятидесяти витках в дополнительной обмотке LM1D, 4 – последовательно и встречно соединенных дополнительной и фазной вторичных обмоток, при соединении фазных вторичных обмоток в «треугольник» и при пятидесяти витках в дополнительной обмотке LM1D, 5 – дополнительной обмотки LM1D при 107 витках в ней и увеличенном вдвое сечении дополнительной магнитной ветви, 6 – дополнительной обмотки LM1D при 107 витках в ней и уменьшенных вдвое сечениях верхних ярм, заключенных между стержнями, 7 – дополнительной обмотки LM1D при 107 витках в ней, уменьшенных вдвое сечениях верхних ярм, заключенных между стержнями и увеличенном вдвое сечении дополнительной магнитной ветви одновременно, 8 – дополнительной обмотки LM1D при 230 витках в ней, уменьшенных вдвое сечениях верхних ярм, заключенных между стержнями и увеличенном вдвое сечении дополнительной магнитной ветви одновременно.

Вывод

Комбинированный трансформатор оправдывает свое название, обеспечивая два различных режима работы по отдельности, и, при соответствующем подборе параметров, возможно достижение необходимых выходных характеристик при каждом из этих режимов, что наглядно продемонстрировано на компьютерной модели трансформатора, выполненной и исследованной в системе моделирования «ЭЛТРАН».

Список использованной литературы

1. Игольников Ю. С. Трехфазный трансформатор. RU 2210827 7Н 01F29/02 20.08.2003 Бюл. №23.
2. Федотов Ю. Б. Математическое моделирование вентильных преобразователей: Учебное пособие. Саранск: 1991.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник.-10-е изд., стереотип. -М.: Гардарики, 2002. – 638с.
4. Буль Б. К. и др. Основы теории электрических аппаратов: Учебник.-М.: Высшая школа, 1970. – 600с.

Сведения об авторах

Игольников Юрий Соломонович – доцент кафедры теоретической и общей электротехники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева. Закончил физико-математический и электротехнический факультеты этого университета, кандидат технических наук. Закончил аспирантуру Московского Энергетического института на кафедре промышленной электроники, где и защитил диссертацию.

Борисов Дмитрий Сергеевич – студент III курса факультета электронной техники (специальности Промышленная электроника) Мордовского госуниверситета.