«Моделирование в энергетике»
авторский курс профессора Е.И. Забудского для магистрантов
http://zabudsky.ru/ind.html

План курса

4.1. Математическое моделирование электромагнитных режимов электротехнических устройств …… 264*
4.1.1. Постановка задачи, краткая характеристика модели …… .. 264
4.1.2. Основные допущения …… 266
4.1.3. Разработка математической модели …… 267
4.1.3.1. Электрическая схема замещения ……...…… 268
4.1.3.2. Уравнения электрического равновесия …… 269
4.1.3.3. Магнитная схема замещения ……..... 270
4.1.3.4. Уравнения магнитного состояния …….. 270
4.1.3.5. Общая форма записи математической модели …… 272
4.1.3.6. Аппроксимация кривой намагничивания кубическим сплайном. Нелинейные дифференциальные магнитные сопротивления 274
4.1.3.7. Учет потерь мощности в магнитопроводе ……... 276
4.1.4. Преобразованная система единиц физических величин …… 278
4.1.5. Алгоритм программной реализации расчёта электромагнитных режимов ……...……... 278

* нумерация страниц и разделов соответствует [1].

5. Программирование в среде PascalABC.NET.
6. Численные методы решения систем уравнений, etc: линейных (Гаусса, прогонки), нелинейных (Ньютона), обыкновенных дифференциальных (Эйлера, Рунге-Кутта).

СР. Тема: «Программирование в среде PascalABC.NET». Решение задач.
РГР. Тема: «Аппроксимация экспериментальной кривой намагничивания электротехнической стали» URL-адрес – http://zabudsky.ru/RGR_TZ_metod_uk.pdf

Заключительная часть курса (*см. далее текст в этом файле*, с. 1 – 62, разд. **А** и **Б**):

А. Расчет основных размеров трехфазного симметричного трансформатора с пространственным расположением стержней, 250 кВ·А, 10/0,69 кВ / магнитопровод стыковой/ (с. 1 – 14).

Б. Математическая модель электромагнитных режимов трансформатора, 250 кВ·А, 10/0,69 кВ, компьютерная реализация модели и анализ режимов (с. 15 – 62).

Литература к разделу Б, с. 15 – 62

1. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. (Color, pdf-формат) – Москва: ООО "Мегаполис", 2018. – 356 с. /см. главы 4 и 5, с. 264 - 305/
URL-адрес – http://zabudsky.ru/Monograph_March2018site.pdf

2. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях : Учебное пособие для вузов (Color, *.pdf): Часть 1. Трансформаторы : / Е.И. Забудский – М.: ООО “Мегаполис”, 2021. – 540 с.
URL-адрес – http://zabudsky.ru/1-Trans_1-all.pdf

3. Забудский Е.И. Электрические машины. В 4-х частях : Учебное пособие для вузов (Color, *.pdf): Часть 2. Асинхронные машины : / Е.И. Забудский – М.: ООО “Мегаполис”, 2017. – 304 с.
URL-адрес – http://zabudsky.ru/AD_UP2/1-2_UP2-AD_T.pdf

Книги можно приобрести в Интернет-магазине: ООО "Мегаполис" /в окне поиска ввести "Забудский"/ http://m-megapolis.ru/shop/540/desc/elektricheskie-mashini

Заключительная видео-лекция: дайджест курса "Моделирование в энергетике" (30'): Среда ZOOM.US. URL-адрес – http://zabudsky.ru/14may2020-Lecture-zoom.mp4

© Забудский Е. И., 2018

А. Расчет основных размеров трехфазного симметричного трансформатора с пространственным расположением стержней, 250 кВА, 10/0,69 кВ /магнитопровод стыковой/ (с. 1 – 14)

Основные размеры трансформатора (см. с. 9) используются при реализации математической модели электромагнитных режимов на компьютере (разд. **Б, с. 15,сл.**)

Б. Математическая модель электромагнитных режимов трансформатора, компьютерная реализация модели и анализ режимов, с. 15 – 62

А.1. Исходные данные для расчёта основных размеров трансформатора **2**

А.2 Определение основных электрических величин (с. 97 – 103, [1]) **2**

А2.1. Номинальные (линейные) токи на сторонах **2**

А2.2. Фазные токи обмоток на сторонах **2**

А2.3. Фазные напряжения обмоток на сторонах **2**

А.3. Выбор 42 значений исходных данных для расчёта (табл. 1, с. 13сл., [2]) **4**

А.4. Нестандартный файл ввода **TransInp.txt**; выполнимый файл **TransPas.exe**; нестандартный файл вывода **TransOut.txt**; файл **TransGr.dat** для построения графика **4**

А.5. Файл ввода **TransInp.txt** (см. графу 4 Формуляра **А.6**, с. 5) **4**

А.6. Формуляр выбора исходных данных (трансформатор 250 кВ·А, 10/0,69 кВ) **5**

А.7. Результаты расчета основных размеров трехфазного трансформатора 250 кВ·А, 10/0,69 кВ (файл **TransOut.txt**) и их анализ..... **6**

А.8. Графики зависимостей $C_{ак,ч}$, P_x, i_x, J, $\sigma_р = f(\beta)$ (файл **TransGr.dat,** с. 9) **8**

ВЫВОДЫ **9**

А.9. Pascal-программа «Расчет основных размеров трехфазного трансформатора» **10**

Литература к разделу А, с. 1 - 14

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 525 с.

URL-адрес http://zabudsky.ru/TransKR/RaschTtrans.djvu

2. Забудский Е.И. Расчёт основных размеров трёхфазных трансформаторов: учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. – 56 с.

URL-адрес http://zabudsky.ru/TransKR/Trans_K_R.pdf

3. Забудский Е.И. Pascal-программа расчёта основных размеров трансформатора. (http://zabudsky.ru/TransKR/transpas.rar скачать **rar-файл**, сохранить и распаковать в **корне** диска **C:** : выполнимый файл **TransPas.exe** и файл ввода **TransInp.txt**).

А.1. Исходные данные для расчёта основных размеров трансформатора

1. Полная номинальная мощность трансформатора …….. S = 250 кВ·А.
2. Номинальное линейное напряжение обмоток высшего напряжения (ВН) …... U_1 = 10000 В.
3. Номинальное линейное напряжение обмоток низшего напряжения (НН) … U_2 = 690 В.
4. Число фаз …….. m = 3.
5. Частота …… f = 50 Гц.
6. Схемы и группа соединения обмоток У/У$_н$-0.
7. Охлаждение трансформатора …….. масляное.
8. Режим нагрузки …….. продолжительный.
9. Установка …….. наружная.
10. Потери короткого замыкания …….. $P_к$ = 3700 Вт.
11. Напряжение короткого замыкания ….. $U_к$ = 4,5 %.
12. Потери холостого хода ……. $P_х$ = 740 Вт.
13. Ток холостого хода …… $i_х$ = 5,3 %.
14. Способ регулирования напряжения …. ПБВ, $U_2 \pm$ (2х2,5%) В.
15. Металл обмоток …… Cu.

Дополнительные условия:

конструкция магнитной системы – пространственный стыковой симметричный магнитопровод (см. рисунок на с. 3 и на с. 16). Для изготовления магнитопровода принимается холоднокатаная текстурованная рулонная сталь марки 3404 с толщиной листа 0,35 мм (с. 18 – 26, 69 – 79, [1])

А.2. Определение основных электрических величин (с. 97 – 103, [1])

А.2.1. Номинальные (линейные) токи на сторонах

ВН - $I_1 = S \cdot 10^3/\sqrt{3} \cdot U_2 = 250 \cdot 10^3/\sqrt{3} \cdot 10000 = 14{,}4$ А;

НН - $I_2 = S \cdot 10^3/\sqrt{3} \cdot U_1 = 250 \cdot 10^3/\sqrt{3} \cdot 690 = 209$ А,

где S и U_1, U_2 выражены соответственно в кВ·А и в В.

А.2.2. Фазные токи обмоток на сторонах

ВН - $I_{ф1} = I_1$;

НН - $I_{ф2} = I_2$.

А.2.3. Фазные напряжения обмоток на сторонах

ВН - $U_{ф1} = U_1/\sqrt{3} = 10000/\sqrt{3} = 5\,773{,}5$ В;

НН - $U_{ф2} = U_2/\sqrt{3} = 690/\sqrt{3} = 398{,}37$ В.

Трёхфазный трёхстержневой симметричный трансформатор с пространственным магнитопроводом, см. рис. на с. 16

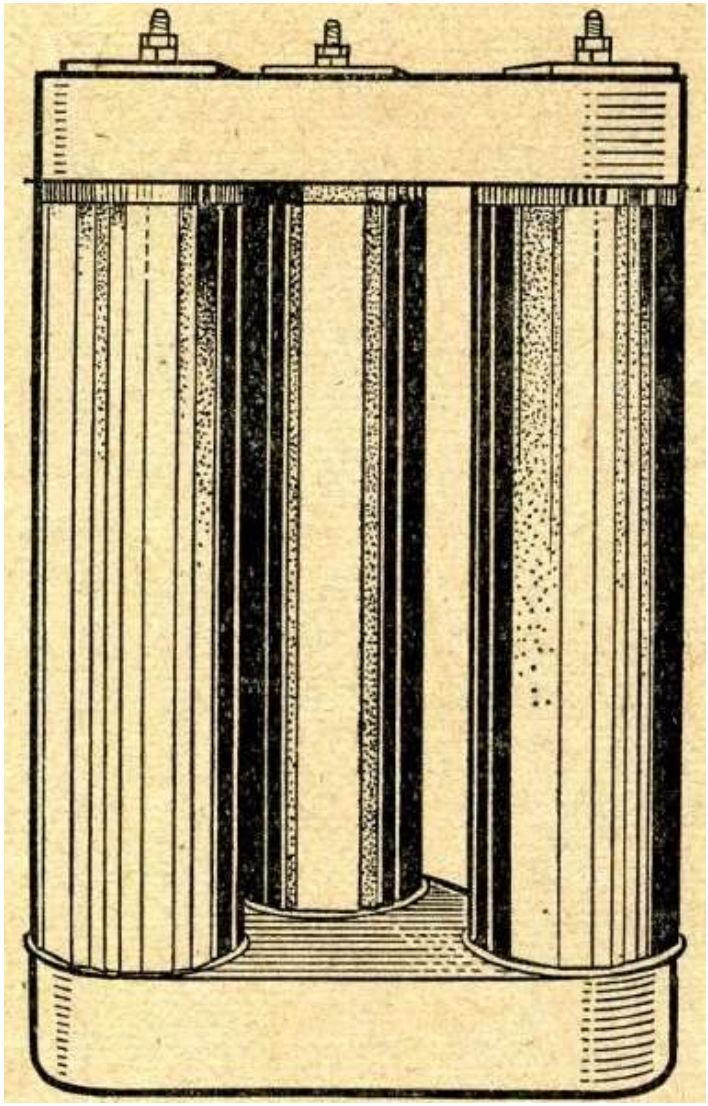
Верхнее витое ярмо

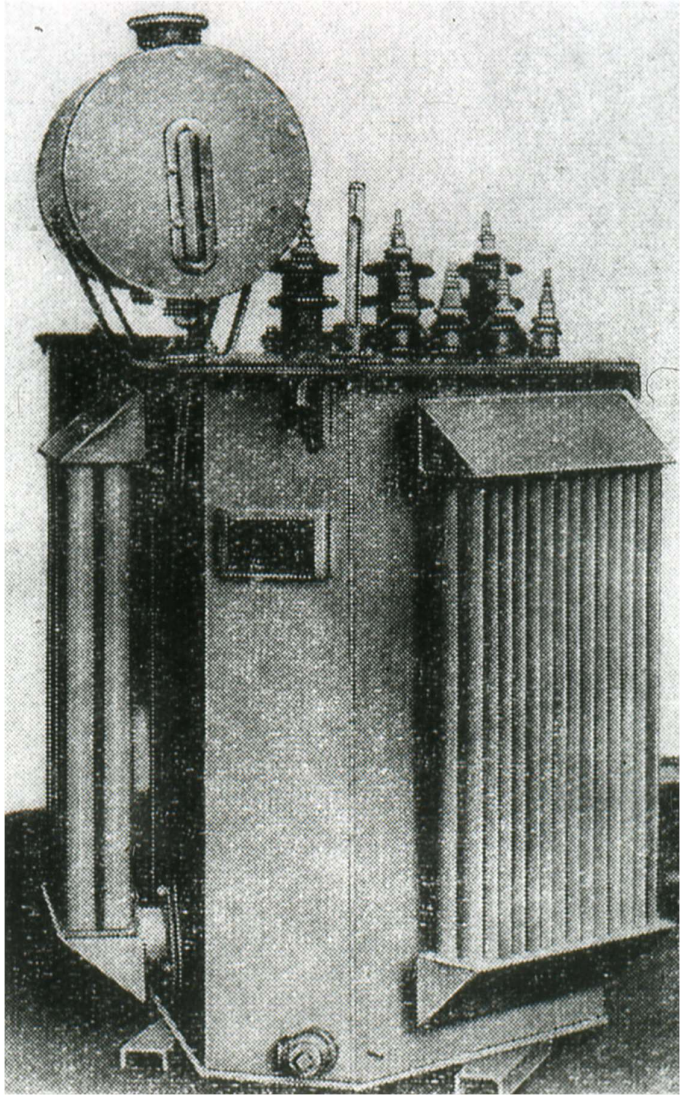
Немагнитный зазор-стык

Стержни

Немагнитный зазор-стык

Нижнее витое ярмо





А3. В соответствии с рекомендациями (табл. 1, с. 13,сл., [2]) осуществляется выбор 42 значений исходных данных, которые заносятся в Формуляр выбора исходных данных, (**А.6**, с. 5**)** /с. 37, [2]/.

А4. Выбранные значения исходных данных заносятся в нестандартный файл ввода TransInp.txt (см. **А.5**), который вместе с выполнимым файлом TransPas.exe, должен быть размещен в **корне** диска ***C:***\. После запуска программы TransPas.exe на выполнение формируется нестандартный файл вывода TransOut.txt (см. **А.7,** с. 6), который также расположен в **корне** диска ***C:***\. В этом файле находится таблица с результатами расчета основных размеров трансформатора.

Также формируется файл **TransGr.dat** для построения графика зависимостей
$C_{ак,ч}$, P_x, i_x, J, $\sigma_р = f(\beta)$ (см. **А8** и рисунок на с. 8).

А5. Файл ввода TransInp.txt (см. графу 4 Формуляра А6, с. 5)

```
83.3 3700.0 50.0    4.5   4.484 0.587 3.

 9.    10.   1.6    1.55  1.55  6.2   6.2

 2.56   0.0  2      0.88  0.57  0.95  1.1024

 1.7763 4.92 1.     1.  108.6   7.5   0.63

 0.178  1.5  0.435  0.45 1.36   1.0   1.0

 0.0   0.785 1.75    0.0   1.0    3.605 2.0
```

Окончание файла ввода TransInp.txt.

Файлы вывода **TransOut.txt и TransGr.dat** создаёт среда программирования.

А.6. Формуляр выбора исходных данных (трансформатор 250 кВ·А, 10/0,69 кВ)

# пп	Обозначение величины [1]	Обозначение величины Pascal-программа	Численное значение величины	Ед. изм. величины [1]	# стр-цы [1]	Примечание (ссылка на [1])
1	2	3	4	5	6	7
1. Заданные величины						
1.1	S	Ss	97	кВ·А	97	
1.2	$P_к$	Pk	3700	Вт	6	
1.3	f	f	50	Гц	6	
1.4	$U_к$	Uk	4,5	%	6	
1.5	$U_р$	Ur	4,484	%	99	
1.6	$U_а$	Ua	0,587	%	99	
2. Выбираемые величины						
2.1	l_0	lo	3	см	184	
2.2	a_{12}	a12	9	см	184	
2.3	a_{22}	a22	10	см	184	
2.4	$B_с$	Bs	1,6	Тл	78	
2.5	$p_с$	Pus	1,55	Вт/кг	375	
2.6	$p_я$	Puer	1,55	Вт/кг	375	
2.7	$q_с$	Qus	6,2	В·А/кг	389	
2.8	$q_я$	Quer	6,2	В·А/кг	389	
2.9	$q_{зп}$	Quzp	2,56	В·А/см^2	397	
2.10	$q_{зк}$	Quzk	0,0	В·А/см^2	397	
2. Выбираемые коэффициенты						
3.1	-	L1	**2**		-	
3.2	$k_с$	Ks	0,88		118	
3.3	$k_я$	Ker	0,57		56, 128	
3.4	$k_д$	Kdr	0,95		131	
3.5	-	Kds1	1,1024		383	
3.6	-	Kds2	1,7763		383	
3.7	-	Kds3 *	4,92		383	Расчет Kds3 *
3.8	-	Kdnm1	1,0		396	
3.9	-	Kdnm2	1,0		396	
3.10	-	Kdnm3 **	108,6		395	Расчет Kdnm3 **
3.11	-	Kdnm4	7,5		396	
3.12	k	Kmal	0,63		121	
3.13	e	E	0,178		56, 129	
3.14	$k_{о,с}$	Kos	1,5		134	
3.15	-	Kug	0,435		129	
3.16	b	B	0,45		125	
3.17	a	Amal	1,36		123	
3.18	n	NN	1		373	
3.19	-	Kxg	1		124	
3.20	-	Kpzk	0,0		136	
3.21	-	Kpzp	0,785		136	
3.22	$n_{зп}$	Nzp	1,75		397	
3.23	$n_{зк}$	Nzk	0		397	
3.24	-	S	1		-	
3.25	-	Ber	3,605		129	
3.26	-	Ob	2		-	

*Расчет коэффициента Kds3 (см. табл. 1 на с. 13 и разд. 6.1 на с. 23, [2]).

**Расчет коэффициента Kdnm3 (см. табл. 1 на с. 13 и разд. 6.2 на с. 25, [2])

А.7. Результаты расчета основных размеров трехфазного трансформатора 250 кВ·А, 10/0,69 кВ (файл **TransOut.txt**)

----------ИСХОДНЫЕ (ЗАДАННЫЕ) ВЕЛИЧИНЫ:----------
Мощность на стержень Ss = 83.3000 кВ.А
Потери короткого замыкания Pk = 3700.0000 Вт
Частота напряжения f = 50.0000 Гц
Напряжение короткого замыкания Uk = 4.5000 %
Активная составляющая напряжения к.з. Ua = 0.5870 %
Реактивная составляющая напряжения к.з. Ur = 4.4840 %
----------ПРИЗНАКИ РАССЧИТЫВАЕМОГО ТРАНСФОРМАТОРА:----------
Конструкция магнитопровода - пространственный стыковой
Материал магнитопровода - сталь холоднокатаная
Число обмоток на фазу - двухобмоточный
Металл обмоток - медь
Охлаждение - масляное
----------ВЫБРАННЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ:----------
L1 = 2 Ks = 0.880 Ker = 0.570 Kdr = 0.950 Kds1 = 1.102
Kds2 = 1.776 Kds3 = 4.920 Kdnm1= 1.000 Kdnm2 = 1.000 Kdnm3 = 108.600
Kdmn4= 7.500 Kmal= 0.630 E = 0.178 Kos = 1.500 Kug = 0.435
b = 0.450 Amal= 1.360 NN = 1.000 Kxg = 1.000 Kpzk = 0.000
Kpzp = 0.785 Nzp = 1.750 Nzk = 0.000 s = 1.000 Ber = 3.605
ob = 2.000
----------ВЫБРАННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ:----------
l0 = 3.000 см a12 = 9.000 см a22 =10.000 см
Qus = 6.200 В.А/кг Quer= 6.200 В.А/кг
Quzp= 2.560 В.А/см2 Quzk= 0.000 В.А/см2
----------РАССЧИТАННЫЁ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ:----------
ar= 10.903 см
A = 18.886 см
A1= 456.312 кг A2= 33.899 кг
B1= 242.160 кг B2= 122.546 кг
C1= 288.825 кг
Kkz= 52.106 д./е. M = 8.658 МПа
----------РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРАНСФОРМАТОРА:----------
2.1. Коэффициент Beta[I]
0.850 1.200 1.550 1.804 2.250 2.600 2.950 3.300 3.650
2.2. Значение x[j]
0.960 1.047 1.116 1.159 1.225 1.270 1.311 1.348 1.382
2.3. Значение x2[j]
0.922 1.095 1.245 1.343 1.500 1.612 1.718 1.817 1.910
2.4. Значение x3[j]
0.885 1.147 1.389 1.557 1.837 2.048 2.251 2.448 2.641
2.5. Масса стали стержней, Gs[j], кг
506.487 473.114 451.162 439.264 423.426 414.011 406.405 400.139 394.897
2.6. Масса стали ярм, Ger[j], кг
327.35 411.89 488.96 541.54 628.70 693.43 755.57 815.52 873.60
2.7. Масса стали магнитопровода, Gst[j], кг
833.84 885.00 940.13 980.81 1052.12 1107.44 1161.98 1215.66 1268.49

2.8. Масса стали угла магнитопровода, Gug[j], кг
13.012 16.852 20.418 22.880 27.003 30.095 33.085 35.988 38.814
2.9. Потери в стали стержней, Ps[j], Вт
865.44 808.42 770.91 750.58 723.52 707.43 694.43 683.73 674.77
2.10. Потери в стали ярм, Per[j], Вт
901.29 1134.03 1346.25 1491.01 1730.97 1909.19 2080.29 2245.36 2405.24
2.11. Потери в стали углов магнитопровода, Pug[j], кг
64.02 82.91 100.46 112.57 132.85 148.07 162.78 177.06 190.97
2.12.Потери холостого хода, Pst[j], Вт
1830.75 2025.37 2217.62 2354.16 2587.33 2764.69 2937.50 3106.14 3270.98
2.13.Площадь зазора для прямого стыка, Plzp[j], см2
227.166 269.914 306.761 330.943 369.595 397.303 423.200 447.602 470.740
2.14. Площадь зазора для косого стыка, Plzk[j], см2
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
2.15. Намагничивающая мощность для стержней,Qs[j], В.А
3140.22 2933.31 2797.20 2723.44 2625.24 2566.87 2519.71 2480.86 2448.36
2.16. Намагничивающая мощность для ярм, Qer[j], В.А
2029.59 2553.70 3031.58 3357.56 3897.91 4299.26 4684.54 5056.25 5416.30
2.17. Намагничивающая мощность для углов, Qug[j], В.А
1413.1 1830.1 2217.4 2484.7 2932.5 3268.4 3593.1 3908.3 4215.2
2.18. Намагничивающая мощность для зазоров,Qz[j], В.А
7632.8 9069.1 10307.2 11119.7 12418.4 13349.4 14219.5 15039.4 15816.9
2.19. Намагничивающая мощность холостого хода, Qx[j], В.А
14216 16386 18353 19685 21874 23484 25017 26485 27897
2.20. Ток холостого хода, I([j], %
5.6885 6.5571 7.3443 7.8773 8.7531 9.3973 10.0107 10.5982 11.1632
2.21. Масса металла обмоток, Go[j],кг
313.3 263.7 232.0 215.0 192.6 179.1 168.2 159.0 151.2
2.22. Масса изолиров-го провода обмоток,Gip[j], кг
332.072 279.480 245.910 227.941 204.103 189.869 178.250 168.533 160.249
2.23. Стоимость обмоточного провода, Co[j], усл.ед.
498.11 419.22 368.86 341.91 306.15 284.80 267.38 252.80 240.37
2.24. Стоимость активной части, Cakt[j], усл.ед.
1331.9 1304.2 1309.0 1322.7 1358.3 1392.2 1429.4 1468.5 1508.9
2.25.Плотность тока в обмотках J[j], А/мм2
2.16 2.36 2.51 2.61 2.76 2.86 2.95 3.04 3.11
2.26. Механ-е растягив-е напряжение в проводе,Sigma[j], МПа
7.66 9.93 12.03 13.48 15.91 17.73 19.49 21.20 22.86
2.27. Диаметр стержня магнитопровода, d[j], см
18.13 19.77 21.07 21.89 23.13 23.98 24.75 25.45 26.10
2.28. Диаметр осевого канала между обмотками, d12[j], см
24.66 26.88 28.66 29.77 31.46 32.62 33.66 34.62 35.50
2.29. Высота обмоток, l[j], см
91.11 70.34 58.06 51.81 43.90 39.39 35.83 32.94 30.54
2.30. Расстояние между осями соседних стержней, C[j], см
51.82 54.78 57.14 58.62 60.87 62.41 63.80 65.07 66.25

Окончание файла **TransOut.txt**

На основе анализа результатов расчета основных размеров трансформатора (А.7, с. 6, 7), устанавливается целесообразное значение коэффициента $\beta = \pi \cdot d_{12}/l = \pi \cdot 26.88/70.34 \approx 1{,}2$ /см. строку **2.1**/.
Указанное значение коэффициента β принято, так как ему соответствуют:

- минимум стоимости активной части трансформатора, составляющий 1304.2 усл. ед. /строка **2.24**/;
- значение потерь холостого хода 2025.37 /строка **2.12**/ (отклонение от заданной величины в пределах нормы – с. 384, [1]);
- значение тока холостого хода ~6.5 % /строка **2.20**/ (отклонение от заданной величины в пределах нормы – с. 398, [1]);
- приемлемое значение плотности тока в обмотках ~2.36 А/мм^2 /строка **2.25**/ (см. табл. 5.7 и примечания к ней на с. 257, [1]);
- допустимое механическое растягивающее напряжение в проводе 9.93 МПа /строка **2.26**/ (с. 340, 341, [1]).

Выбранному значению коэффициента β = 1,2 соответствуют три основных размера трансформатора :

- диаметр окружности, в которую вписано ступенчатое сечение стержня $d = 20$ см /строка **2.27**/ ;
- средний диаметр осевого канала между обмотками $d_{12} = 26.88$ см /строка **2.28**/;
- осевой размер (высота) обмоток $l = 70$ см /строка **2.29**/.

Расстояние между осями соседних стержней магнитопровода составляет согласно расчету $C = 54.78$ см /строка **2.30**/.

А.8. По данным расчёта строятся графики $C_{ак,ч}$, P_x, i_x, J, $\sigma_р = f(\beta)$ (файл **TransGr.dat**, с. 9)

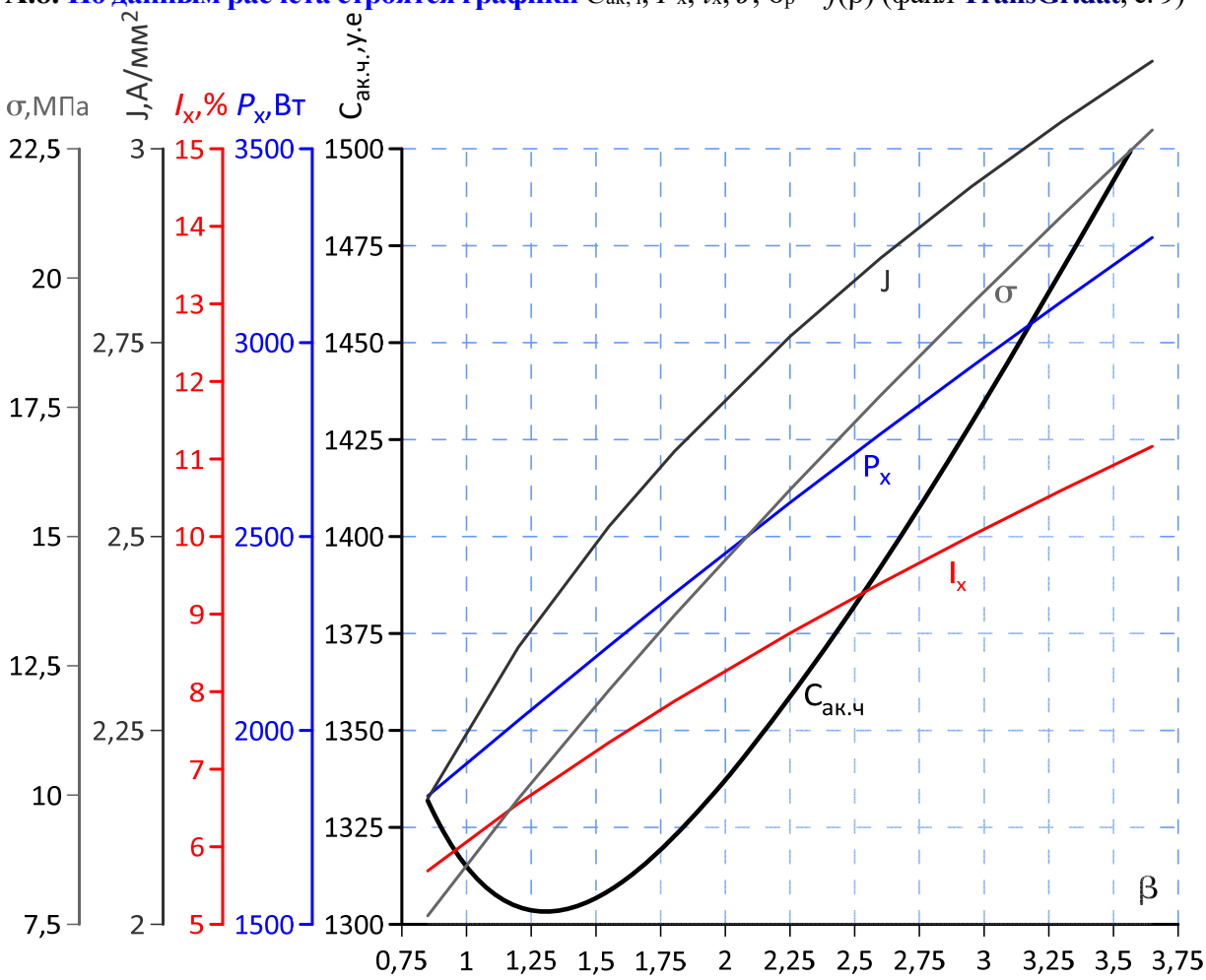


График зависимостей $C_{ак,ч}$, P_x, i_x, J, $\sigma_р = f(\beta)$.

Минимум стоимости активной части трансформатора $C_{ак,ч}$ = 1304.2 усл.ед. соответствует значению коэффициента $\beta \approx 1{,}2$

Файл **TransGr.dat** > $C_{ак,ч}$, P_x, i_x, J, $\sigma_р = f(\beta)$/

β	$C_{ак,ч}$, у.е	P_x, Вт	i_x, %	J, А/мм^2	$\sigma_р$, МПа
0.850	1331.947	1830.751	5.689	2.162	7.665
1.200	1304.221	2025.365	6.557	2.357	9.927
1.550	1308.991	2217.617	7.344	2.513	12.028
1.804	1322.718	2354.156	7.877	2.610	13.478
2.250	1358.276	2587.334	8.753	2.758	15.906
2.600	1392.244	2764.693	9.397	2.859	17.728
2.950	1429.352	2937.500	10.011	2.951	19.490
3.300	1468.463	3106.141	10.598	3.035	21.199
3.650	1508.867	3270.977	11.163	3.113	22.864

Окончание файла **TransGr.dat.**

ВЫВОДЫ

1. Разработана Pascal-программа расчета основных размеров трехфазных трансформаторов на ПК и освещена методика выбора и подготовки исходных данных, необходимых для проведения расчетов.
Реализация составленной программы на ПК позволяет осуществить рациональный выбор основных размеров трансформатора на основе вариантного расчета с оптимизацией по минимуму стоимости активной части трансформатора, с учетом ряда ограничений по нормированным параметрам.

2. На основе выполненного расчёта основных размеров трансформатора определены величины, используемые при математическом моделировании электромагнитных процессов трансформатора, 250 кВ.А, 10/0,69 кВ, а именно:

длина стержня – 77 см;

длина участка ярма между осями стержней – 55 см;

поперечное сечение стержня – 270 см^2;

поперечное сечение ярма – 156 см^2.

А.9. Pascal-программа «Расчет основных размеров трехфазного трансформатора»

```
{*********************************************************************
* ПРОГРАММА «РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»*
*                        (исходный файл TransPas.pas)                *
* Программа реализует методику  расчета основных размеров трехфазного  *
* трансформатора, изложенную в книге П.М.Тихомирова -Расчет трансформа-*
* торов-, 1986 г.                                                     *
*                                                                     *
* Программа позволяет осуществить расчет основных размеров трансфор-   *
* моторов со следующими признаками:                                   *
*  1)конструкция магнитопровода - плоский шихтованный,                *
*                               - пространственный витой,             *
*                               - пространственный стыковой;          *
*  2)материал магнитопровода - сталь горячекатаная,                   *
*                            - сталь холоднокатаная;                  *
*  3)количество обмоток на фазу - двухобмоточный,                     *
*                               - трехобмоточный;                     *
*  4)металл  обмоток - медь,                                          *
*                    - алюминий;                                      *
*  5)охлаждение - масляное,                                           *
*               - естественное воздушное.                             *
*                                                                     *
* Исходные данные, размещаются в файле ввода TransInp.txt:            *
*        -  6 заданных величин,                                       *
*        - 10 выбранных физических величин,                           *
*        - 26 выбранных коэффициентов.                                *
* Кроме того, в программе представлены в виде констант значения       *
* ещё 5 коэффициентов.                                                *
* Результаты расчета помещаются в файл вывода  TransOut.txt           *
* Программу составил профессор Забудский Е.И., январь 1982 сент.2018г. *
*********************************************************************}
        type vector10 = array[1..10] of real;
        type  vector2 = array[1..2] of real;

        var Ks,Kr,Ker,Kdr,Kds1,Kds2,Kds3,Kmal,
          Kdnm1,Kdnm2,Kdnm3,Kdnm4,Kos,Kug,Lo,NN,Kkz,M,Kpzk,Kpzp,
          Kxg,Nzp,Nzk, Ss, Pk, F, Uk, Ua, Ur, a12, a22, Bs, Pus,Puer,
          Qus,Quer,Quzp,Quzk, E, B, Amal, S, Ber,Ob,
          Ar, A, A1, A2, B1, B2, C1: real;
                                  Kmn,K,Kir,Ko: vector2;
                    x,x2,x3,Gs,Ger,Gst,Ps ,
                    Per,Pst,Gug,Plzk,Plzp,Q,Go,Co ,
                    Cakt,PLtok,Sigma,d,d12,l,Beta,Gip ,
                    C,Pug,Qs,Qer,Qug,Qz,Io: vector10;
                                          I,L1 : integer;
                                          fi,fo1,fo2 : text;

 begin
          assign(fi,'c:\Pascal\1TranPas\TransInp.txt'); reset(fi);

         assign(fo1,'c:\Pascal\1TranPas\TransOut.txt'); rewrite(fo1);

         assign(fo2,'c:\Pascal\1TranPas\TransGr.dat'); rewrite(fo2);

         BETA[1]:= 0.85; BETA[2]:= 1.2;  BETA[3]:= 1.55; BETA[4]:= 1.804;
         BETA[5]:= 2.25; BETA[6]:= 2.6;  BETA[7]:= 2.95; BETA[8]:= 3.3;
         BETA[9]:= 3.65; BETA[10]:= 4.;

       KMN[1]:=  0.00001519; KMN[2]:= 0.00002453;
         K[1]:= 12.75;         K[2]:= 2.4;
       KIR[1]:=  1.13;       KIR[2]:= 1.06;
        KO[1]:= 301000.;      KO[2]:= 616000.;
           KR:= 0.95;
```

```
{      Ввод исходнх данных}
       READ(fi, SS,PK,F,UK,UR,UA,LO,   A12,A22,BS,PUS,PUER, QUS,QUER,
     QUZP,QUZK,L1,KS,KER,KDR,KDS1,     KDS2,KDS3,KDNM1,KDNM2,KDNM3,KDNM4,KMAL,
      E,KOS,KUG,B,AMAL,NN,KXG,         KPZK,KPZP,NZP,NZK,S,BER,OB);

{*      Расчет вспомогательных величин }
       AR:=A12+KMAL*(SQRT(SQRT(SS)));
       A:=16*(SQRT(SQRT((SS*AR*KR)/(F*UR*(BS*BS)*(KS*KS)))));
       A1:=KXG*0.0566*(A*A*A)*AMAL*KS;
       A2:=KXG*0.036*(A*A)*LO*KS;
       B1:=KXG*BER*KS*KER*(A*A*A)*(AMAL+B+E)*0.01;
       B2:=KXG*BER*KS*KER*(A*A)*(A12+A22)*0.01;
       C1:=KO[L1]*3*(SS*(AMAL*AMAL))/(KDR*(KS*KS)*(BS*BS)*(F*F)*(A*A)*UA);
       KKZ:=(141/UK)*(1+(EXP(-3.14*(UA/UR))));
       M:=(KMN[L1]*(KKZ*KKZ)*KDR*KR*PK)/(AMAL*A);

{*      Расчет данных для выбора коэффициента Beta  }
       for I:=1 to 10 do begin
       X[I]:=SQRT(SQRT(BETA[I]));
       X2[I]:=X[I]*X[I];
       X3[I]:=X[I]*X[I]*X[I];
       GS[I]:=A1/X[I]+A2*X2[I];
       GER[I]:=B1*X3[I]+B2*X2[I];
       GUG[I]:=KUG*KS*KER*(A*A*A)*(X3[I])*0.01;
       GST[I]:=GS[I]+GER[I];
       PS[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS1*PUS*GS[I]);
       PER[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS2*PUER*GER[I]);
       PUG[I]:=exp(NN*Ln(F/50))*(KDS3*GUG[I]);
       PST[I]:=PS[I]+PER[I]+PUG[I];
       PLZP[I]:=KPZP*KS*(A*A)*X2[I];
       PLZK[I]:=KPZK*KS*(A*A)*X2[I];
       QS[I]:=(F/50)*KDNM1*QUS*GS[I];
       QER[I]:=(F/50)*KDNM2*QUER*GER[I];
       QUG[I]:=(F/50)*KDNM3*GUG[I];
       QZ[I]:=(F/50)*KDNM4*(QUZP*NZP*PLZP[I]+QUZK*NZK*PLZK[I]);
       Q[I]:=QS[I]+QER[I]+QUG[I]+QZ[I];
       IO[I]:=Q[I]/(30*SS);
       GO[I]:=C1/X2[I];
       GIP[I]:=KIR[L1]*GO[I];
       CO[I]:=KOS*GIP[I];
       CAKT[I]:=GST[I]+CO[I];
       PLTOK[I]:=SQRT((KDR*PK)/(K[L1]*GO[I]));
       SIGMA[I]:=M*X3[I];
       D[I]:=A*X[I];
       D12[I]:=AMAL*D[I];
       L[I]:=3.14*D12[I]/BETA[I];
       C[I]:=D12[I]+B*D[I]+A12+A22
       end;
{*      Печать исходных величин и признаков трансформатора} {WRITEln(fo1);}
     WRITEln(fo1, ' Расчет основных размеров трехфазного трансформатора'); {*
WRITEln(fo1);}
     WRITEln(fo1,' Исходные (заданные) величины'); {WRITEln(fo1);}
     WRITEln(fo1,' Мощность на стержень              Ss= ',SS:10:4,' кВ.А');
     WRITEln(fo1,' Потери короткого замыкания        Pk= ',PK:10:4,' Вт');
     WRITEln(fo1,' Частота напряжения                f = ', F:10:4,' Гц');
     WRITEln(fo1,' Напряжение короткого замыкания    Uk= ',UK:10:4,' %');
     WRITEln(fo1,' Активная составл. напряжения КЗ   Ua= ',UA:10:4,' %');
     WRITEln(fo1,' Реактив. составл. напряжения КЗ   Ur= ',UR:10:4,' %');
        WRITEln(fo1);

  WRITEln(fo1,' Признаки рассчитываемого трансформатора'); {*WRITEln(fo1);}
  IF BER < 2.55 then WRITEln(fo1,' Конструкция магнитопровода - плоский
шихтованный')
```

```
                  else if BER > 2.55 then WRITEln(fo1,' Конструкция
магнитопровода - пространственный стыковой')
                                          else WRITEln(fo1,' Конструкция
магнитопровода - пространственный ВИТОЙ');
  IF KXG = 1  then WRITEln(fo1,' Материал магнитопровода    - сталь хо-
лоднокатаная')
              else WRITEln(fo1,' Материал магнитопровода    - сталь
горячекатаная');
  IF OB = 2.0 then WRITEln(fo1,' Число обмоток на фазу      - двухобмоточный')
              else WRITEln(fo1,' Число обмоток на фазу      - трехобмоточный');
  IF L1 = 1   then WRITEln(fo1,' Металл обмоток             - алюминий')
              else WRITEln(fo1,' Металл обмоток             - медь');
  IF S = 1    then WRITEln(fo1,' Охлаждение                 - масляное')
              else WRITEln(fo1,' Охлаждение                 - естественное
воздушное');

  {*     Печать выбранных коэффициентов} WRITEln(fo1);
  WRITEln(fo1,' Выбранные коэффициенты');    { WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' l1   =',L1:2,'        Ks  =',KS:6:3,'    Ker  =',KER:6:3,'    Kdr
=',KDR:6:3,'    Kds1 = ',KDS1:6:3);
  WRITEln(fo1,' Kds2 =',KDS2:6:3,'    Kds3=',KDS3:6:3,'    Kdnm1=',KDNM1:6:3,'
Kdnm2=',KDNM2:6:3,'    Kdnm3= ',KDNM3:6:3);
  WRITEln(fo1,' Kdmn4=',KDNM4:6:3,'    Kmal=',KMAL:6:3,'    E    =',E:6:3,'
Kos  =',KOS:6:3,'    Kug  = ',KUG:6:3);
  WRITEln(fo1,' b    =',B:6:3,'    Amal=',AMAL:6:3,'    NN   =',NN:6:3,'    Kxg
=',KXG:6:3,'    Kpzk = ',KPZK:6:3);
  WRITEln(fo1,' Kpzp =',KPZP:6:3,'    Nzp =',NZP:6:3,'    Nzk  =',NZK:6:3,'    s
=',S:6:3,'    Ber  = ',BER:6:3);
  WRITEln(fo1,' ob   =',OB:6:3);
  WRITEln(fo1);

{*    Печать выбранных физических величин }
    WRITEln(fo1,' Выбранные физические величины');  {* WRITEln(fo1);  }
    WRITEln(fo1,' l0 = ',Lo:6:3,' см ','  a12 = ',A12:6:3,' см ','      a22 =
',A22:6:3,' см ');
    WRITEln(fo1,' Bs = ',BS:6:3,' Тл ','  Pus = ',PUS:6:3,' Вт/кг','    Puer=
',PUER:6:3,' Вт/кг ');
    WRITEln(fo1,'                  Qus = ',QUS:6:3,' В.А/кг ','  Quer=
',QUER:6:3,' В.А/кг ');
    WRITEln(fo1,'                  Quzp= ',QUZP:6:3,' В.А/см2 ',' Quzk=
',QUZK:6:3,' В.А/см2 ');

{*    Печать рассчитанных вспомогат. величин }  WRITEln(fo1);
  WRITEln(fo1,' Рассчитанные вспомогат. величины');   {*WRITEln(fo1);}
    WRITEln(fo1,' ar=   ',AR:6:3,' см');
    WRITEln(fo1,' A =   ',A:6:3,' см');
    WRITEln(fo1,' A1=  ',A1:6:3,' кг ','    A2=  ',A2:6:3,' кг ');
    WRITEln(fo1,' B1=  ',B1:6:3,' кг ','    B2=  ',B2:6:3,' кг ');
    WRITEln(fo1,' C1=  ',C1:6:3,' кг ');
    WRITEln(fo1,'Kkz=   ',KKZ:6:3,' д./е.','  M =  ',M:6:3,' МПа');

{*     Печать таблицы результатов предварительного расчета трансформатора}
WRITEln(fo1);
    WRITEln(fo1,' Результаты расчета основных размеров трехфазного трансформа-
тора '); {* WRITEln(fo1);}
{*     Печать строки результатов расчета }
         WRITEln(fo1,'             2.1. Коэффициент  Beta[I]');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',beta[I]:7:3,' ');  WRITEln(fo1);
         WRITEln(fo1,'             2.2. Значения  x[I]');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',X[I]:7:3,' ');     WRITEln(fo1);
         WRITEln(fo1,'             2.3. Значения  x2[I]');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',X2[I]:7:3,' ');    WRITEln(fo1);
         WRITEln(fo1,'             2.4. Значения  x3[I]');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',X3[I]:7:3,' ');    WRITEln(fo1);
```

```
        WRITEln(fo1,'              2.5. Масса стали стержней, Gs[I], кг ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',GS[I]:7:3,' ');             WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.6. Масса стали ярм, Ger[I], кг ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',GER[I]:7:2,' ');            WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.7. Масса стали магнитопровода, Gst[I], кг
');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Gst[I]:7:2,' ');             WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.8. Масса стали угла магнитопровода,
Gug[I], кг ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Gug[I]:7:3,' ');            WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.9. Потери в стали стержней, Ps[I], Вт');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Ps[I]:7:2,' ');              WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.10. Потери в стали ярм, Per[I], Вт ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Per[I]:7:2,' ');             WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.11. Потери в стали углов магнитопровода,
Pug[I], Вт ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Pug[I]:7:2,' ');             WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.12. Потери холостого хода, Pst[I], Вт ');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Pst[I]:7:2,' ');              WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.13. Площадь зазора для прямого стыка,
Plzp[I], см2');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Plzp[I]:7:3,' ');            WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.14. Площадь зазора для косого стыка,
Plzk[I], см2');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',PLZK[I]:7:3,' ');            WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.15. Намагничив. мощность для стержней,
Qs[I], В.А');
     for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',QS[I]:7:2,' ');               WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.16. Намагничив. мощность для ярм, Qer[I],
В.А');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',QER[I]:7:2,' ');              WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.17. Намагничив. мощность для углов,.
Qug[I], В.А');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',QUG[I]:7:1,' ');              WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.18. Намагничив. мощность для зазоров,
Qz[I], В.А');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',QZ[I]:7:2,' ');               WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.19. Намагничивающая мощность холостого
хода, Qx[I], В.А');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Q[I]:7:0,' ');                WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.20. Ток холостого хода , Ix[I], %');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',IO[I]:7:4,' ');               WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.21. Масса металла обмоток, Go[I], кг');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',GO[I]:7:1,' ');              WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.22. Масса изолиров. провода обмоток,
Gip[I], кг');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',GIP[I]:7:3,' ');              WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.23. Стоимость обмоточного провода, Co[I],
усл.ед.');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',CO[I]:7:2,' ');               WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.24. Стоимость активной части, Cakt[I],
усл.ед.');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',CAKT[I]:7:2,' ');             WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.25. Плотность тока в обмотках, J[I],
А/мм2');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',PLTOK[I]:7:3,' ');             WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.26. Механ. растяг. напряжение в проводе,
Sigma[I], МПа');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',Sigma[I]:7:3,' ');            WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.27. Диаметр стержня магнитопровода, d[I],
см');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',D[I]:7:3,' ');                WRITEln(fo1);
       WRITEln(fo1,'               2.28. Диаметр осевого канала между
обмотками, d12[I], см');
```

```
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',D12[I]:7:3,' ');              WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.29. Высота обмоток, l[I], см');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',L[I]:7:3,' ');                WRITEln(fo1);
        WRITEln(fo1,'              2.30. Расстоян. между осями соседн.
стержней, C[I], см');
    for I:=1 to 9 do  WRITE(fo1,' ',C[I]:7:3,' ');                WRITEln(fo1);

{Формирование файла TransGr.dat для построения графика}
for I:=1 to 9 do begin WRITEln(fo2); WRITE(fo2,' ',beta[I]:7:3,' ',Cakt[i]:7:3,'
',Pst[i]:7:3,
                        ' ',Io[i]:7:3,' ',  PLtok[i]:7:3,' ',Sigma[i]:7:3)
end;

{*    Методические указания студенту-расчетчику} WRITEln(fo1);
WRITEln(fo1,' Методические указания студенту-расчетчику ');
WRITEln(fo1,' /Даны ссылки на книгу П.М.Тихомирова -Расчет трансформаторов-,1986
г./');  {*WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' На основе анализа данной таблицы реультатов расчета основных
размеров');
WRITEln(fo1,' трансформатора необходимо:'); {*WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' 1. Выбрать значение коэффициента Beta, соответствующее минимуму');
WRITEln(fo1,'    стоимости активной части Cakt трансформатора;');
{WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' 2. Проверить соответствуют ли выбранному значению коэффициента
Beta:'); { *WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' 2.1. Заданное значение потерь холостого хода (см. с. 384),');
WRITEln(fo1,' 2.2. Заданное значение тока холостого хода (см. с. 398),');
WRITEln(fo1,' 2.3. Рекомендованное значение плотности тока В обмотках (см.
табл.5.7 на с.257),');
WRITEln(fo1,' 2.4. Допустимое механическое растягивающее напряжение в проводе
(см. с. 340);');  {* WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' 3. При соблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2, следует
продолжить');
WRITEln(fo1,'    расчет трансформаторов далее согласно методике профессора
П.М.Тихомирова;');                { *  WRITEln(fo1);}
WRITEln(fo1,' 4. При несоблюдении условий, указанных в пунктах 1 и 2,
следует:');   { WRITEln(fo1); }
WRITEln(fo1,' 4.1. Ввести соответствующие коррективы (см. главу 11) в выполнен-
ный расчет ');
WRITEln(fo1,'      основных размеров трансформатора,');
WRITEln(fo1,' 4.2  В соответствии с введенными коррективами произвести
изменения');
WRITEln(fo1,'      в исходных данных,');
WRITEln(fo1,' 4.3. Запустить программу на счет с измененными исходными данны-
ми');
WRITEln(fo1,'      для выполнения еще раз расчета основных размеров трансформа-
тора на ПК.');
        close(fi); close(fo1); close(fo2)
      END.
```

Окончание файла TransPas.pas

Б. Математическая модель электромагнитных режимов трансформатора (250 кВ·А, 10/0,69 кВ), компьютерная реализация модели и анализ режимов

Схемы устройства и математическая модель режимов рассматриваются на лекциях

Б.1 Рис. Активная часть трансформатора с пространственным расположением стержней **16**

Б.2 Рис. Электрическая схема замещения первичной обмотки трансформатора **17**

Б.3 Рис. Электрическая схема замещения вторичной обмотки трансформатора **17**

Б.2а Табл. Обозначения величин в схеме первичной обмотки трансформатора **17**

Б.3а Табл. Обозначения величин в схеме вторичной обмотки трансформатора **17**

Б.4 Рис. Магнитная схема замещения трансформатора **18**

Б.4а Табл. Обозначения величин в магнитной схеме замещения трансформатора **18**

Б.5 Алгоритм программной реализации математической модели электромагнитных режимов **19**

Б.6 Математическая модель электромагнитных режимов трансформатора **20**

Б.7 Результаты анализа электромагнитных режимов трансформатора **21**

Б.7.1. Включение трансформатора на холостой ход **21**

Б.7.2. Включение трансформатора при нагрузке **24**

Б.7.3. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) первичного напряжения **28**

Б.7.4. Переходный процесс при несимметричном напряжении, подведённом к первичной обмотке **31**

Б.7.5. Переходный процесс при отсутствии напряжения на одной фазе первичной обмотки (обрыв фазы) **34**

Б.7.6. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) нагрузки, подключённой к вторичной обмотке **37**

Б.7.7. Переходный процесс при несимметричной нагрузке, подключённой к вторичной обмотке **40**

Б.7.8. Подключение нагрузки к вторичной обмотке на холостом ходу трансформатора ... **43**

Б.8 Fortran-программа реализующая алгоритм математической модели электромагнитных режимов устройств электроэнергетики с произвольной конструкцией магнитопровода и схемами устройства обмоток **46**

Б.9 Файл **NR.txt** с исходными данными **60**

ВЫВОДЫ **62**

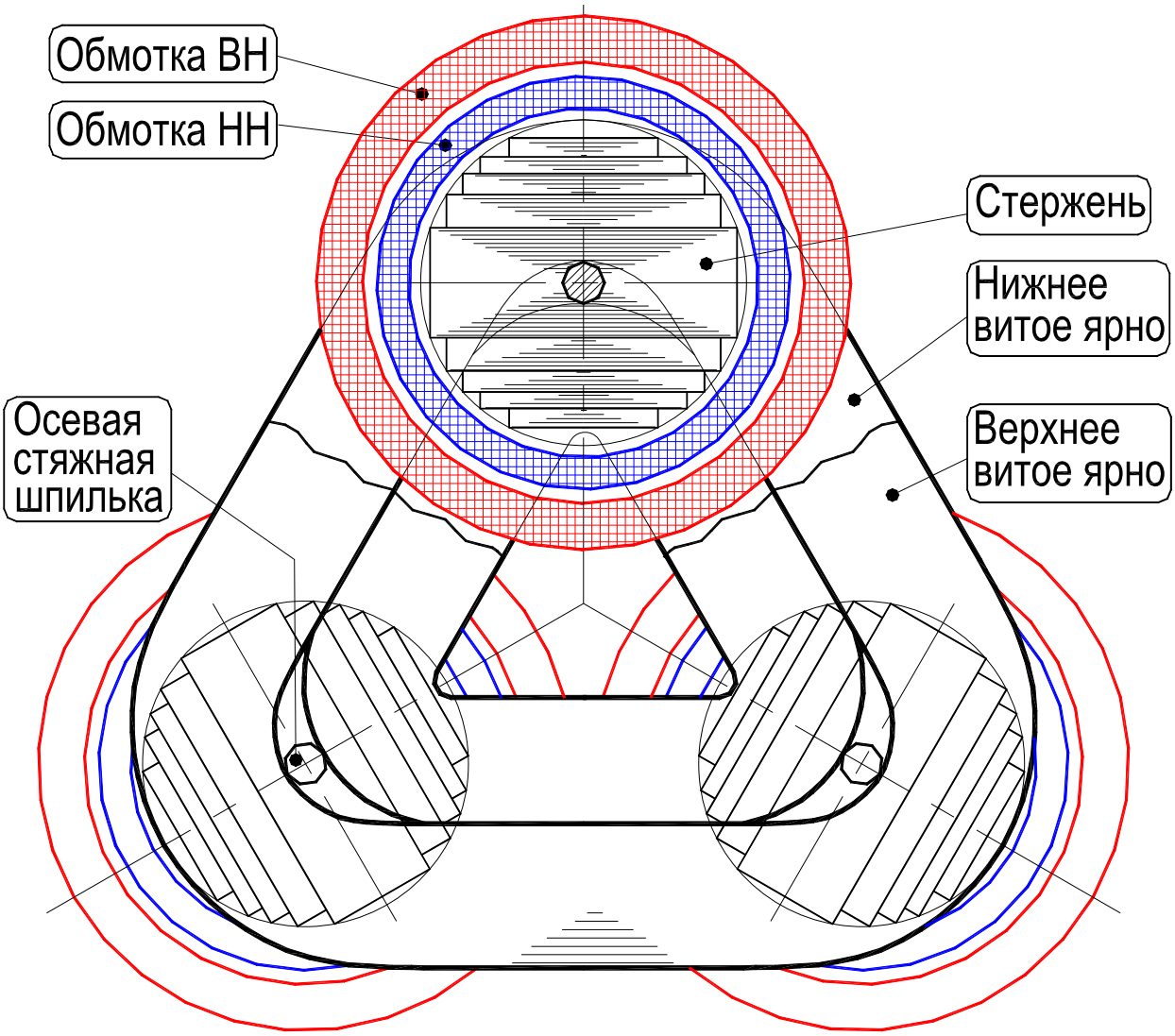


Рис. Б.1. Активная часть трансформатора с пространственным расположением стержней (сочленение стержней и ярм – встык; изображение схематическое, см. рис. на с. 3)

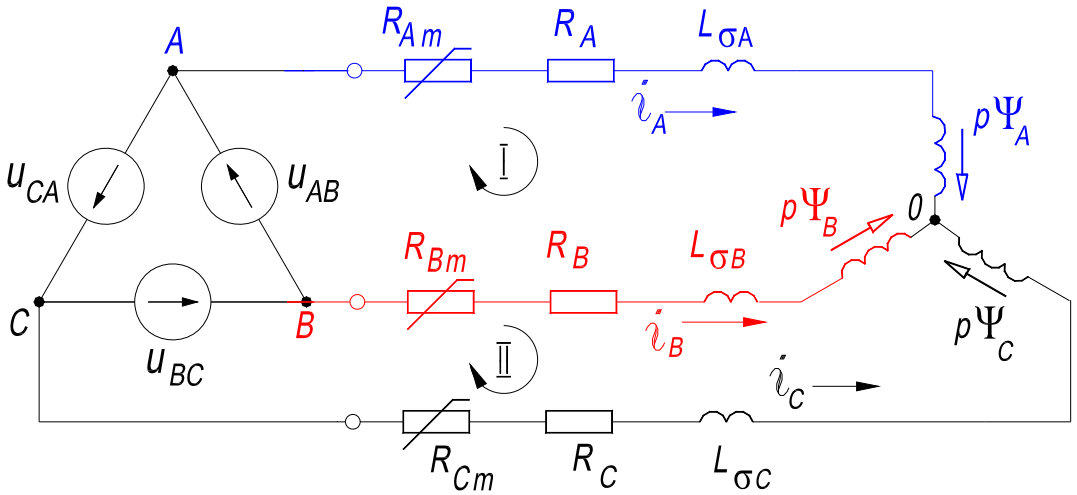


Рис. Б.2. Электрическая схема замещения первичной обмотки трансформатора

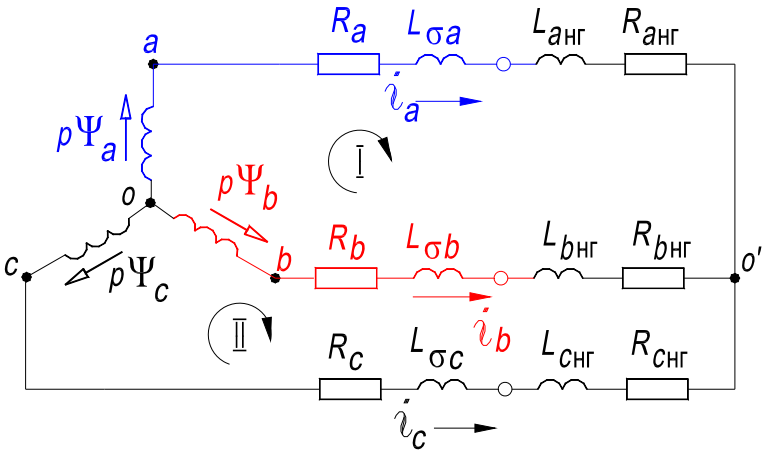


Рис. Б.3. Электрическая схема замещения вторичной обмотки трансформатора

Таблица Б.2. Обозначения величин в схеме первичной обмотки трансформатора; рис. Б.2	
i_A, i_B, i_C	Фазные (линейные) токи фаз первичной обмотки – искомые величины
u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}	Мгновенные линейные напряжения сети
R_A, R_B, R_C	Активные сопротивления фаз первичной обмотки
$L_{\sigma A}$, $L_{\sigma B}$, $L_{\sigma C}$	Индуктивности фаз первичной обмотки
$p\Psi_A$, $p\Psi_B$, $p\Psi_C$	Производные от потокосцепление фаз первичной обмотки; $p= d/dt$
R_{Am}, R_{Bm}, R_{Cm}	Нелинейные сопротивления: приближённый учёт потерь в стали магнитопровода
I; II	Направления обхода контуров: *A-0-B-A*; *B-0-C-B*
Таблица Б.3. Обозначения величин в схеме вторичной обмотки трансформатора; рис. Б.3	
I_a, i_b, i_c	Фазные (линейные) токи фаз вторичной обмотки – искомые величины
R_a, R_b, R_c	Активные сопротивления фаз вторичной обмотки
$L_{\sigma a}$, $L_{\sigma b}$, $L_{\sigma c}$	Индуктивности фаз вторичной обмотки
$p\Psi_a$, $p\Psi_a$, $p\Psi_c$	Производные от потокосцепление фаз вторичной обмотки; $p= d/dt$
$R_{анг}$, $R_{bнг}$, $R_{снг}$	Активные сопротивления нагрузки, подключённой к фазам обмотки
$L_{анг}$, $L_{bнг}$, $L_{снг}$	Индуктивности нагрузки, подключённой к фазам обмотки
I; II	Направления обхода контуров: *a-0'-b-0-a*; *b-0'-c-0-b*

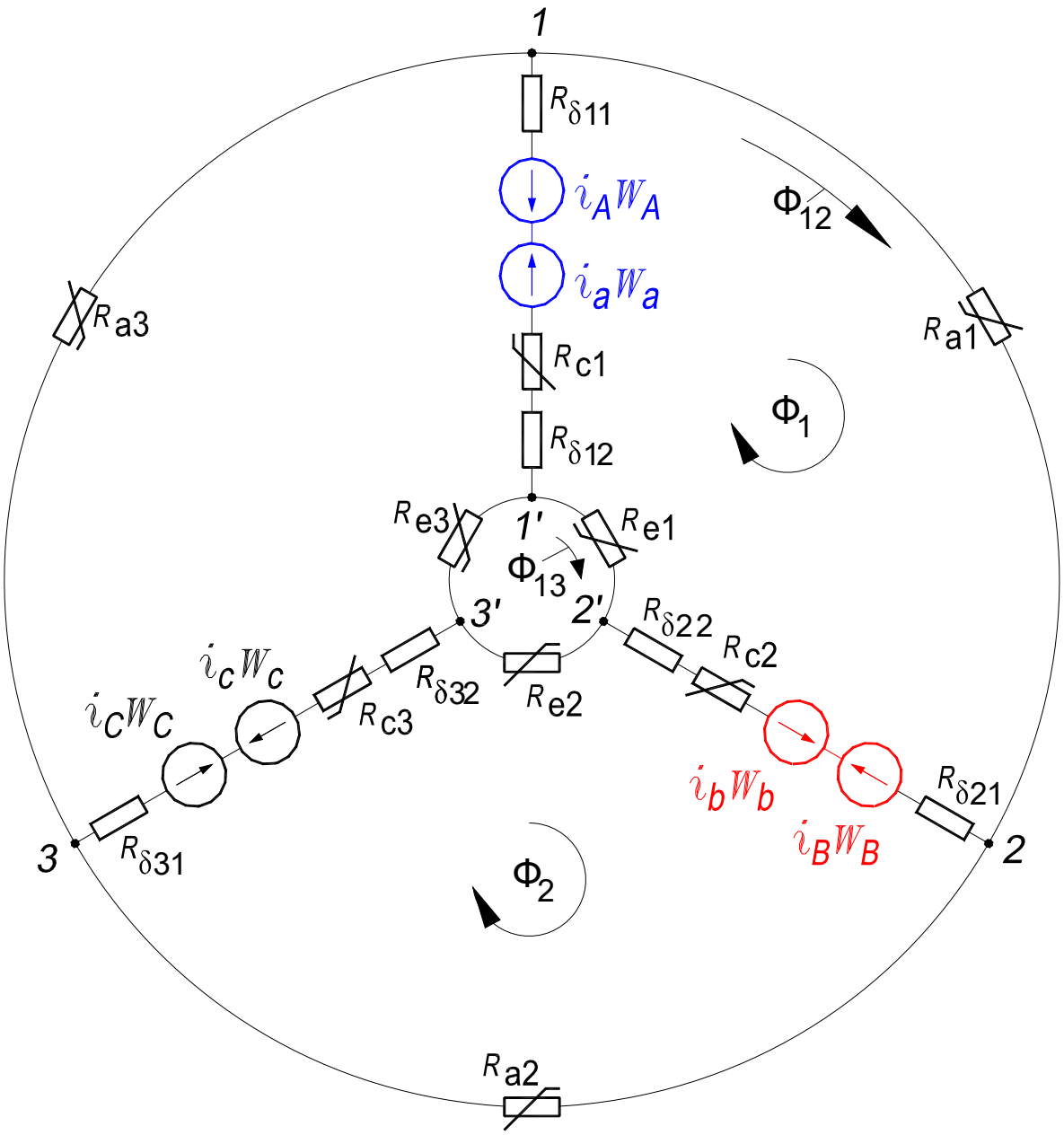


Рис. Б.4. Магнитная схема замещения трансформатора

Таблица Б.4. Обозначения величин в магнитной схеме замещения трансформатора; рис. Б.4	
Φ_1; Φ_2; Φ_{12}; Φ_{13}	Контурные магнитные потоки – искомые величины; контуры: *1-2-2'-1*; *2-3-3'-2*; *1-2-3-1*; *1'-2'-3'-1'*
W_A, W_B, W_C	Числа витков фазы первичной обмотка
W_a, W_b, W_c	Числа витков фазы вторичной обмотка
i_AW_A, i_BW_B, i_CW_C	МДС фазы первичной обмотки
i_aW_a, i_bW_b, i_cW_c	МДС фазы вторичной обмотки
R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}	Нелинейные дифференциальные сопротивления стержней магнитопровода
R_{a1}, R_{a2}, R_{a3}	Нелинейные дифференциальные сопротивления участков верхнего ярма (1/3)
R_{a1}, R_{a2}, R_{e3}	Нелинейные дифференциальные сопротивления участков нижнего ярма (1/3)
$R_{\delta 11}$, $R_{\delta 12}$,,, $R_{\delta 32}$	Сопротивления зазоров-стыков (стержень-ярмо); принято $R_{\delta 11}=R_{\delta 12}=\ldots=R_\delta$

В соответствии со схемами замещения разработана математическая модель электромагнитных режимов трансформатора, **с. 20.**

Для других устройств, содержащих магнитопровод и обмотки, математическая модель будет подобной по структуре. Также подобной будет компьютерная (программная) реализация модели **с. 46 – 60**.

Б.5. Алгоритм программной реализации математической модели электромагнитных режимов

Алгоритм и структурная-схема программной реализации математической модели электромагнитных режимов электроэнергетических устройств и явлений, возникающих при намагничивании их магнитопроводов, предусматривают следующие основные операции:

1) ввод исходных данных и начальных условий, представленных в преобразованной системе единиц физических величин, сглаживание экспериментальной кривой намагничивания и расчет коэффициентов кубического сплайна, аппроксимирующего кривую намагничивания;

2) расчет на основе принятых начальных условий или на основе данных, полученных на предыдущем шаге интегрирования, значений нелинейных дифференциальных магнитных сопротивлений и нелинейных сопротивлений, приближенно учитывающих потери в стали магнитопровода;

3) формирование матрицы коэффициентов **A** и вектора-столбца свободных членов **B** системы ЛАУ (**см. с. 20**);

4) решение системы ЛАУ методом Гаусса с выбором главного элемента и определение значений производных от токов и магнитных потоков;

5) интегрирование с заданной точностью методом Рунге-Кутта с модификацией Фельберга значений производных от токов и магнитных потоков и определение мгновенных значений искомых токов и магнитных потоков для текущего момента времени t;

6) найденные в пункте 5) мгновенные значения токов и потоков принимаются в качестве исходных на последующем шага интегрирования и далее реализуются пункты 2) – 5) до тех пор, пока не будет пройден с заданной точностью интервал интегрирования $t_{нач} \le t \le t_{кон}$, значений производных.

В результате решения определяются искомые токи обмоток, магнитные потоки, магнитные индукции, ЭДС и другие величины, получаемые как функции времени.

Математическая модель (**с. 20**) позволяет анализировать различные электромагнитные режимы устройств, в частности, изменяя соответствующим образом значения активных сопротивлений обмоток, индуктивностей рассеяния обмоток или числа их витков, реализуем несимметричный режим работы устройств, обусловленный несимметрией обмоток. Если варьировать значения геометрических размеров участков магнитопровода, реализуется несимметричный режим работы устройств, обусловленный несимметрией магнитопровода. Если же изменять соответствующим образом значения напряжений, подводимых к обмоткам устройства, то моделируется работа его при несимметрии подводимых напряжений. Задавая равными нулю число витков катушек фаз той или иной обмотки, можно исследовать роль и воздействие этой обмотки на работу устройства. Изменяя величины сопротивлений нагрузки, можно переходить от режима холостого хода к режиму нагрузки, в том числе, и к несимметричному, и далее – к короткому замыканию (результаты анализа электромагнитных режимов трёхфазного трансформатора с пространственным магнитопроводом, 250 кВ·А, 10/0,69 кВ, представлены на **с. 21 – 45**; анализ выполнен в соответствии с разработанной Fornran-программой, **см. с. 46– 60**).

Б.6. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСФОРМАТОРА (матричная форма представления)

$R_{c1}+R_{a1}+R_{c2}+R_{e1}+4R_{\delta}$	$-(R_{c2}+2R_{\delta})$	R_{a1}	R_{e1}	W_A	$-W_a$	$-W_B$	W_b				$p\Phi_1$		0
$-(R_{c2}+2R_{\delta})$	$R_{c2}+R_{a2}+R_{c3}+R_{e2}+4R_{\delta}$	R_{a2}	R_{e2}			W_B	$-W_b$	$-W_C$	W_c		$p\Phi_2$		0
R_{a1}	R_{a2}	$R_{a1}+R_{a2}+R_{a3}$									$p\Phi_{12}$		0
R_{e1}	R_{e2}		$R_{e1}+R_{e2}+R_{e3}$								$p\Phi_{13}$		0
$-(W_A+W_B)$	W_B			$L_{\sigma A}$		$-L_{\sigma B}$				x	pi_A	=	$u_{AB}-i_A(R_A+R_{Am})+i_B(R_B+R_{Bm})$
W_a+W_b	$-W_b$				$L_{\sigma a}+$ $+L_{a\text{нг}}$		$-(L_{\sigma b}+$ $+L_{b\text{нг}})$				pi_a		$-i_a(R_a+R_{a\text{нг}})+i_b(R_b+R_{b\text{нг}})$
W_B	$-(W_B+W_C)$					$L_{\sigma B}$		$-L_{\sigma C}$			pi_B		$U_{BC}-i_B(R_B+R_{Bm})+i_C(R_C+R_{Cm})$
$-W_b$	W_b+W_c						$L_{\sigma b}+$ $+L_{b\text{нг}}$		$-(L_{\sigma c}+$ $+L_{c\text{нг}})$		pi_b		$-i_b(R_b+R_{b\text{нг}})+i_c(R_c+R_{c\text{нг}})$
				1		1		1			pi_C		0
					1		1		1		pi_c		0

A x X = B. /обозначение величин – см. табл. Б.2 – Б.4; вывод математической модели выполняется на лекциях в аудитории/

A – матрица коэффициентов, B – вектор-столбец свободных членов, X – вектор-столбец искомых величин.

Математическая модель относительно искомых производных от токов и магнитных потоков является системой линейных алгебраических уравнений (ЛАУ); система ЛАУ решается методом Гаусса. Найденные численные значения производных интегрируются методом Рунге-Кутта на заданном интервале времени. В результате определяются искомые величины: мгновенные значения токов фаз и магнитных потоков в участках магнитопровода как функции времени t.

Задаваясь значениями величин, входящих в матрицу коэффициентов A и вектор-столбец свободных членов B, анализируют электромагнитные режимы устройства: симметричные установившиеся, несимметричные, переходные и пр. (см. результаты анализа на **с. 21 – 45**)

Алгоритм программной реализации математической модели представлен на **с. 19**. Компьютерная Fortran-программа (исходный код; файлы *.F95; среда программирования Plato32 Version 4.9.0) – на **с. 46 – 60.**

Б.7. Результаты анализа электромагнитных режимов трансформатора 250 кВ·А, 10/0,69 кВ

Б.7.1. Включение трансформатора на холостой ход

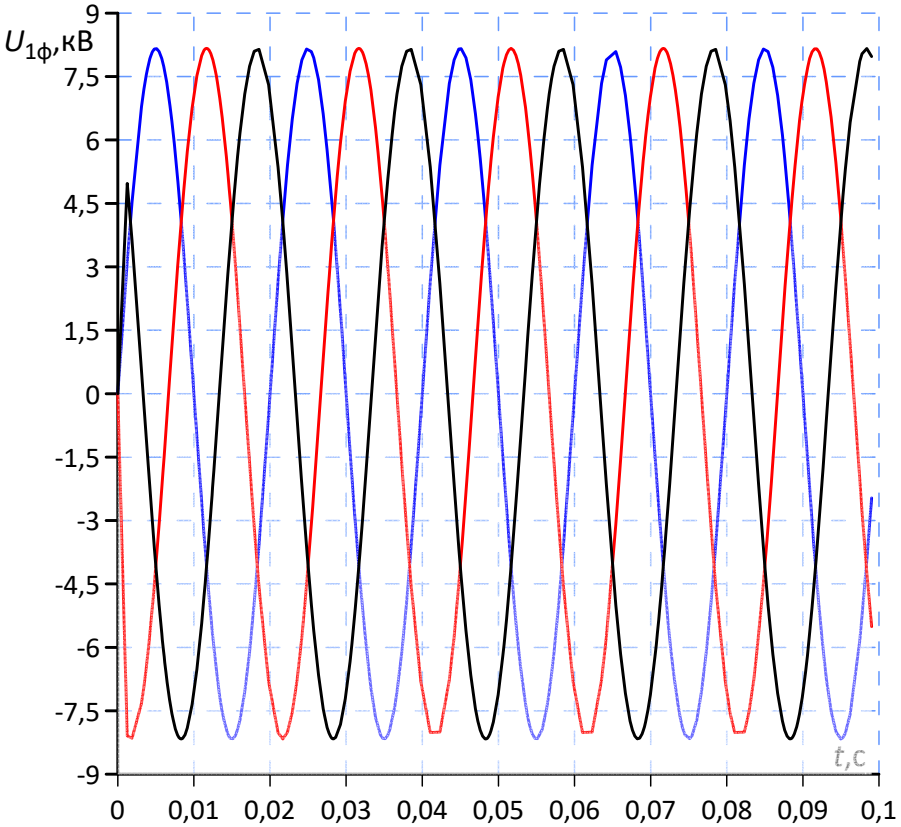


Рис. 1.1. Изменение первичного напряжения

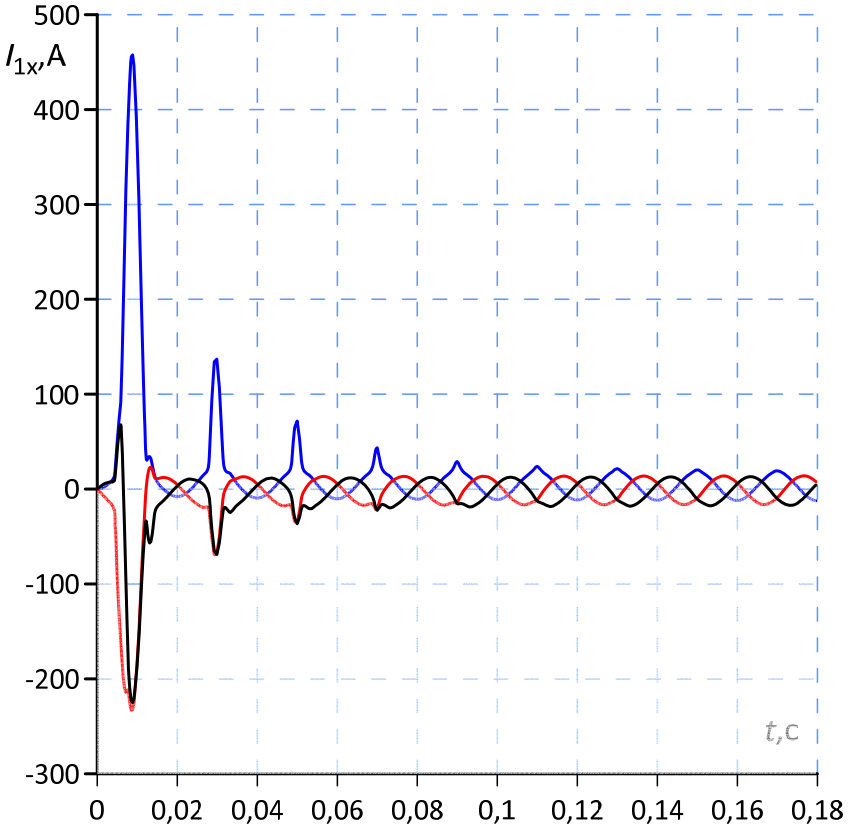
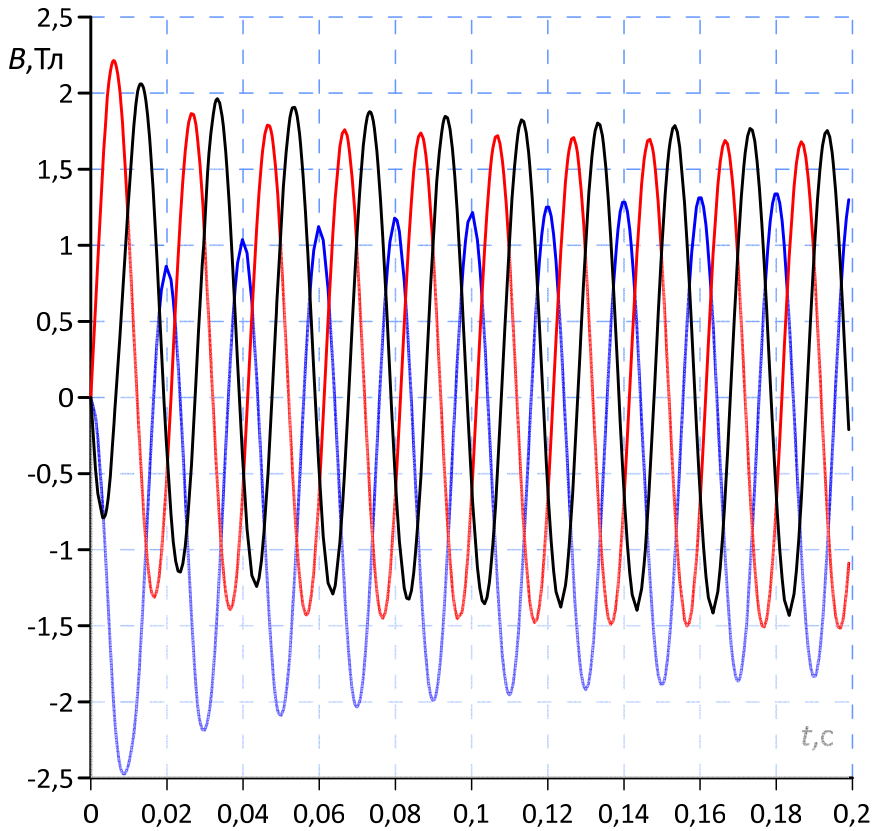
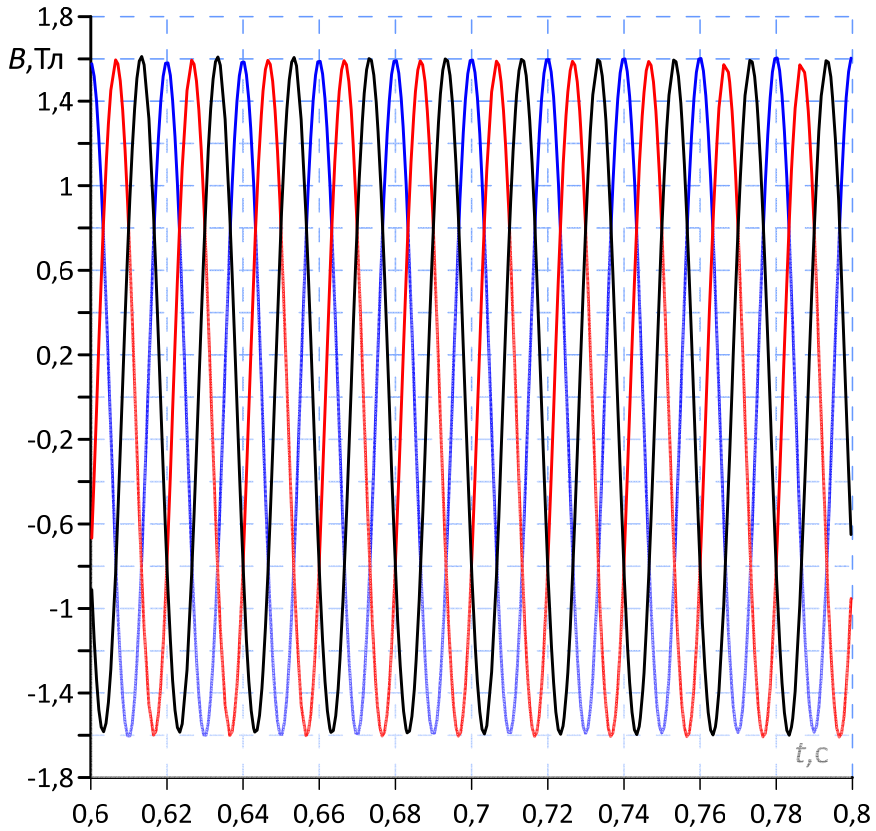


Рис. 1.2. Изменение первичного тока включения



а



б

Рис. 1.3. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Выводы к разделу 1 (рис. 1.1 – 1.3)

1.1. К первичной обмотке трансформатора подведено номинальное трёхфазное симметричное синусоидальное напряжение 10 кВ (это действующее значение; рис. 1.1);

1.2. Примерно через 0,01 с после включения трансформатора под напряжения имеет место бросок магнитного потока (магнитной индукции, рис. 1.3*а*). Причём величина броска в фазах *A*, *B* и *C* различная. Из анализа следует, что в этот момент времени апериодическая и периодическая составляющие магнитного потока суммируются [2, разд. 17, с. 308 – 313];

1.3. В связи с перенасыщением магнитопровода в начале переходного процесса имеет место бросок тока холостого хода (рис. 1.2) в первичной обмотке трансформатора. Причём величина броска в фазах также различная. Максимальный бросок (синяя кривая) происходит в той фазе, к которой подводится напряжение величина которого близка к нулевому значению в момент начала переходного процесса;

1.4. Максимальный бросок тока х. х. может быть ~100-кратным по отношению к току х. х. в установившемся режиме. Для трансформатора этот бросок не опасен, так как установившийся ток х. х. составляет несколько процентов от номинального первичного тока;

1.5. Амплитуда магнитной индукции в установившемся процессе в стержнях трансформатора составляет ~ 1,6 Тл (рис. 1.3*б*);

Б.7.2. Включение трансформатора при нагрузке

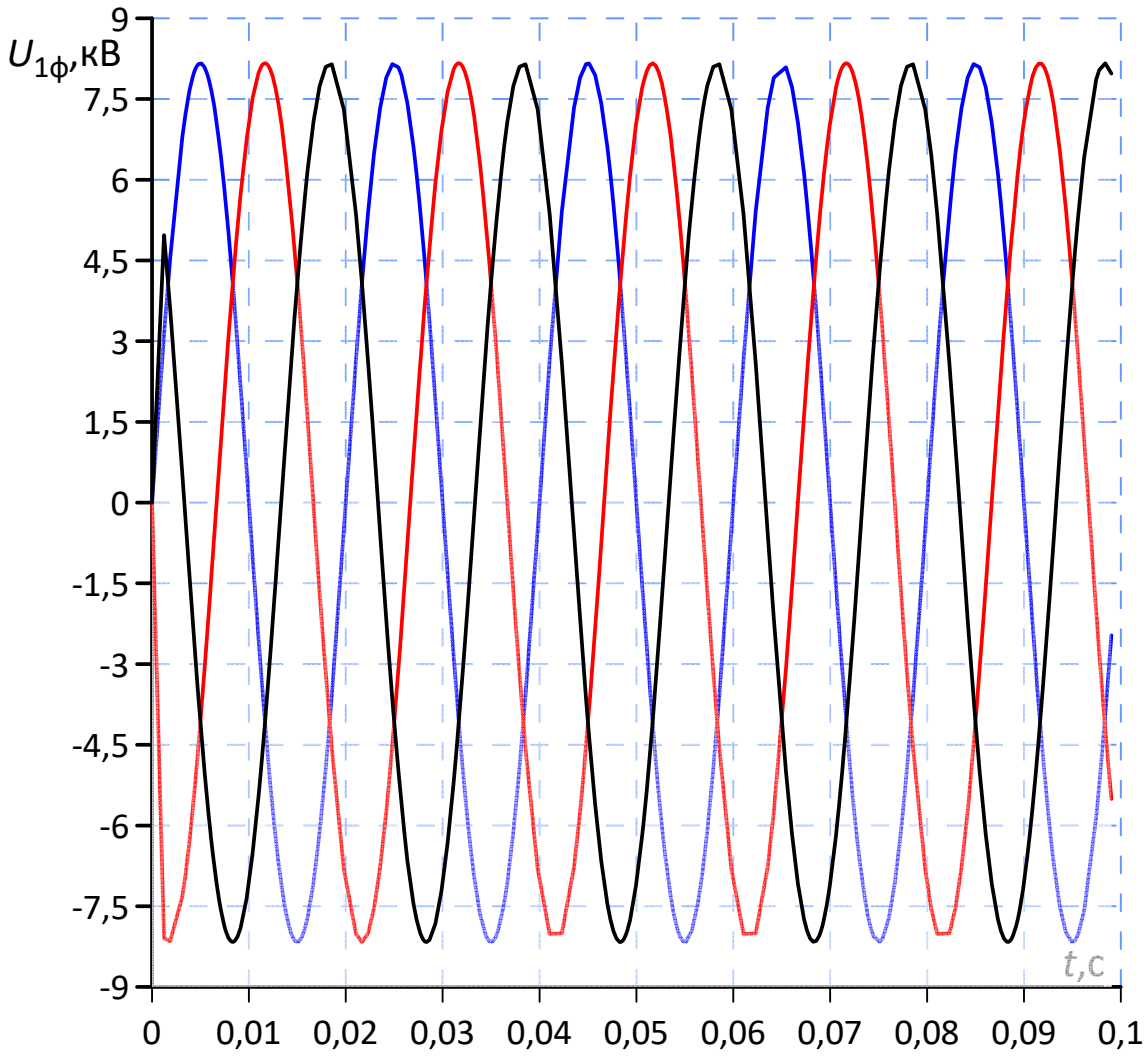


Рис. 2.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 2 (рис. 2.1 – 2.4)

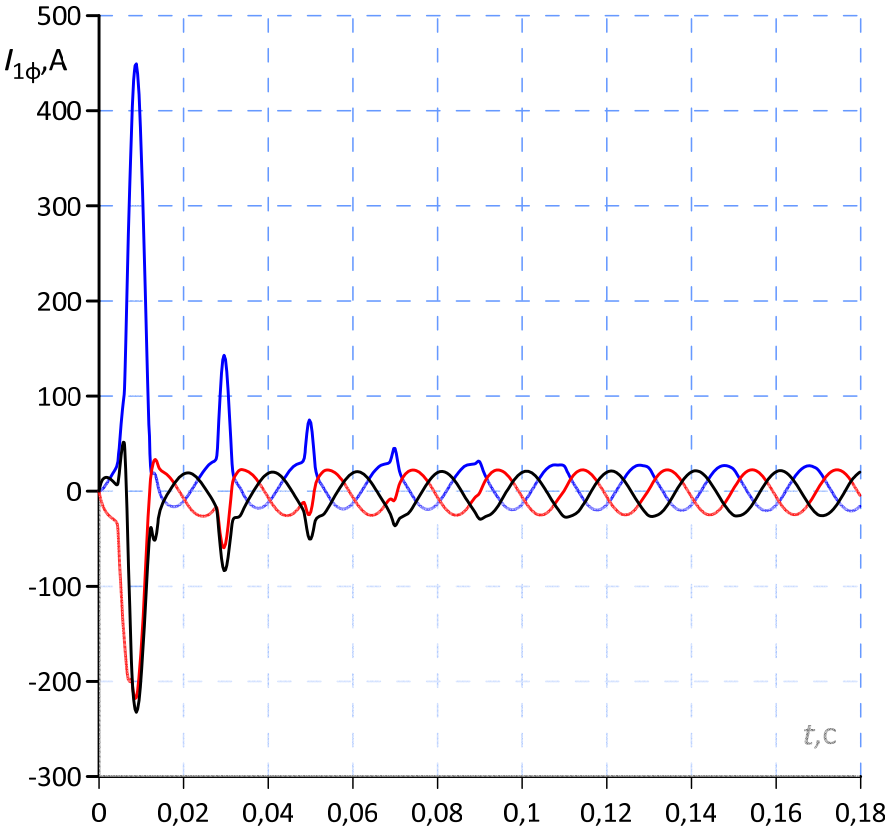
2.1. Броски тока х. х. (рис. 1.2) и тока, протекающего в первичной обмотке при нагрузке (рис. 2.2*а*), близки;

2.2. Ток в первичной обмотке при нагрузке в установившемся процессе практически симметричен и синусоидален (рис. 2.2*б*);

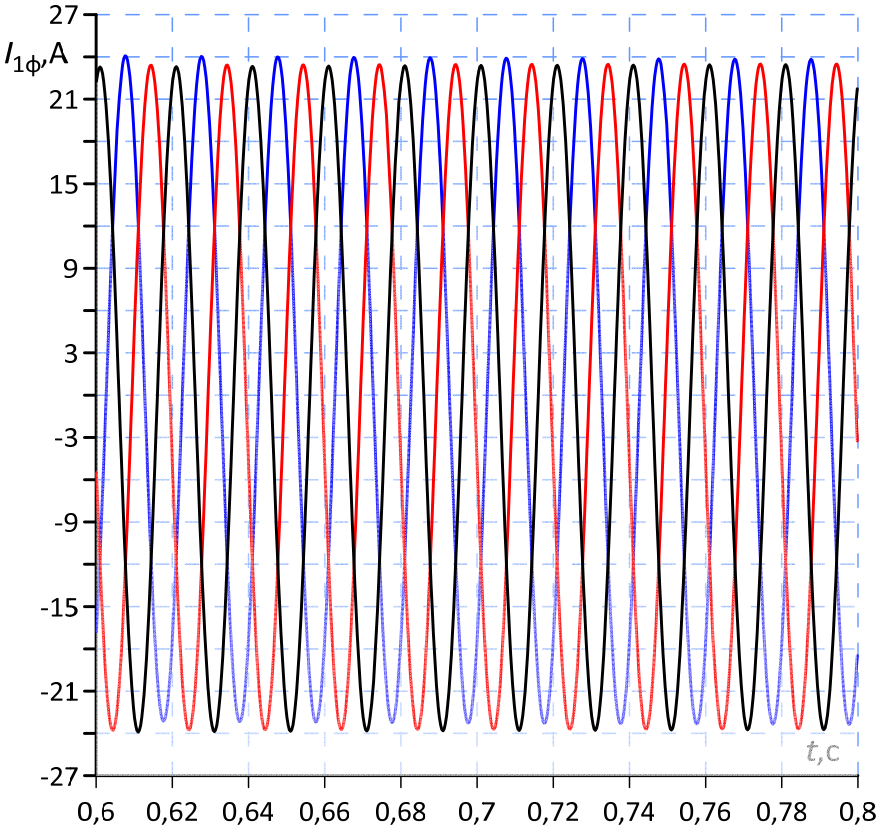
2.3. Длительность переходного процесса во вторичной обмотке составляет ~ 0,01 с (рис. 2.3*а*);

2.2. Ток в вторичной обмотке при нагрузке практически симметричен и синусоидален во всём процессе его изменения, при t > 0,01 с (рис. 2.3);

2.4. Характер изменения магнитного потока при х. х. и при нагрузке практически одинаков (рис. 1.3 и 2.4). Амплитуда магнитной индукции в обоих режимах ~ неизменна.



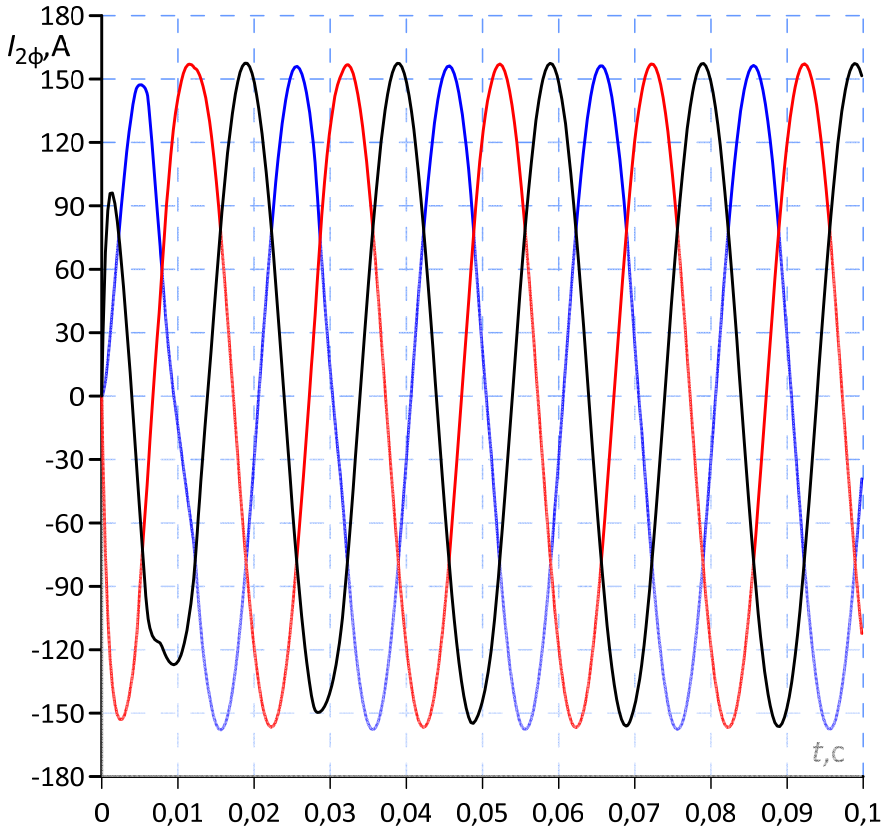
а



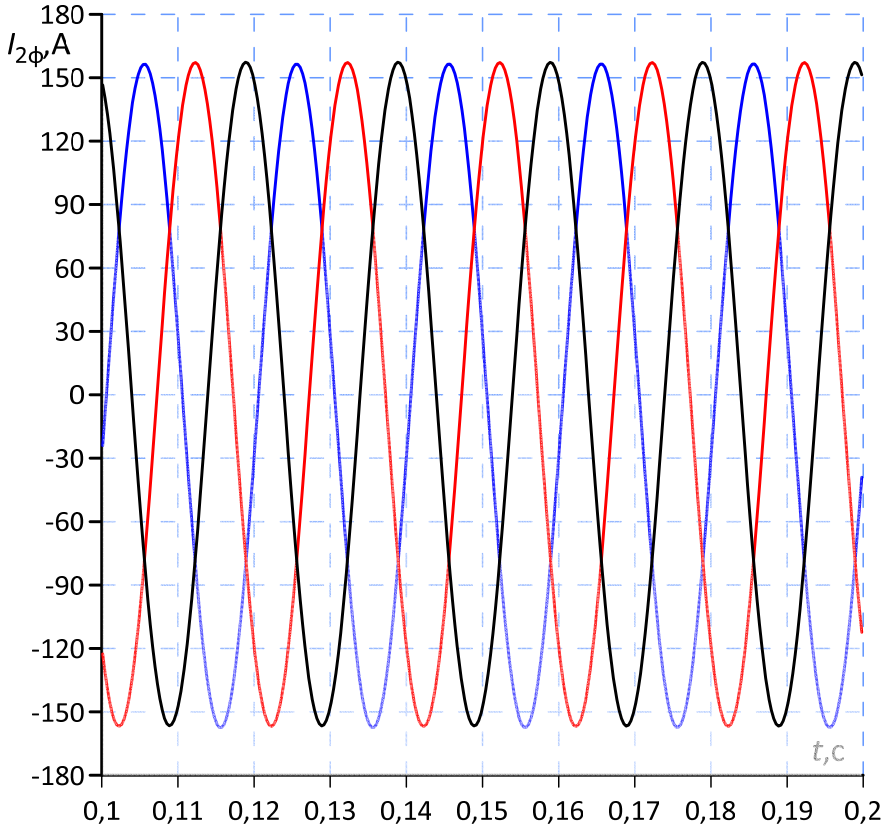
б

Рис. 2.2. Изменение первичного тока:

а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс



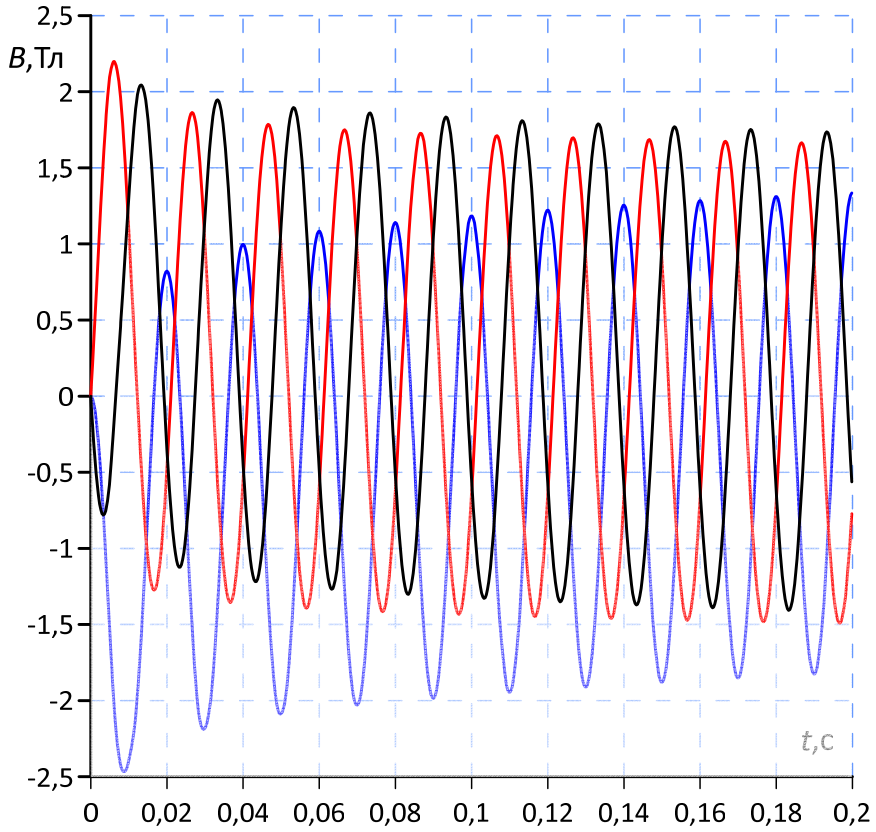
а



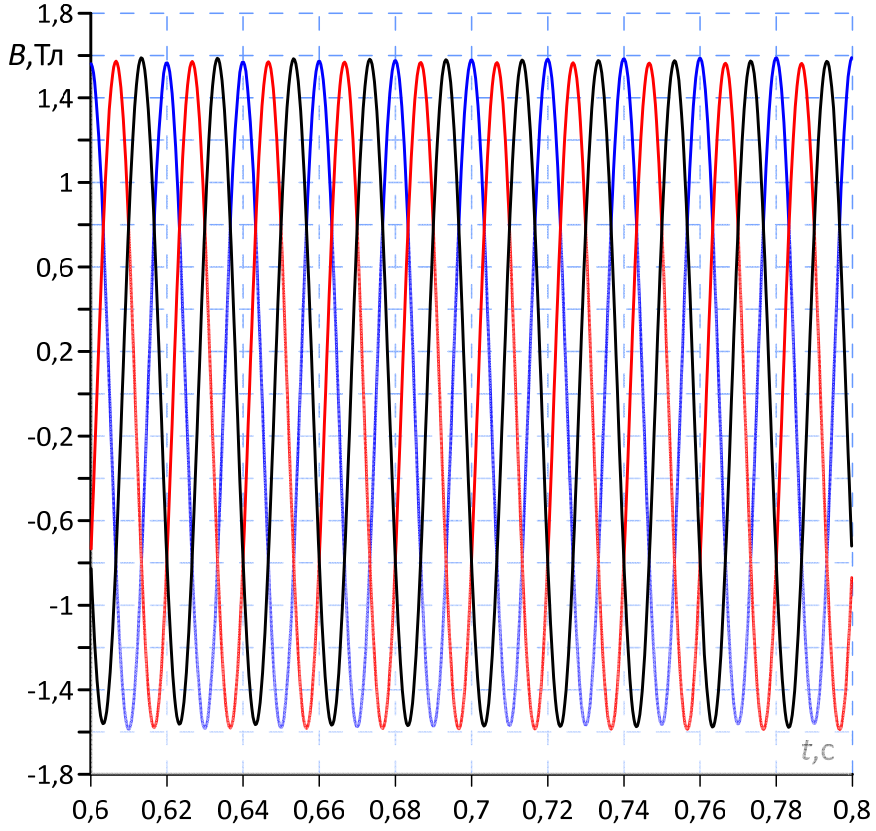
б

Рис. 2.3. Изменение вторичного тока:

а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс



а



б

Рис. 2.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7.3. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) первичного напряжения

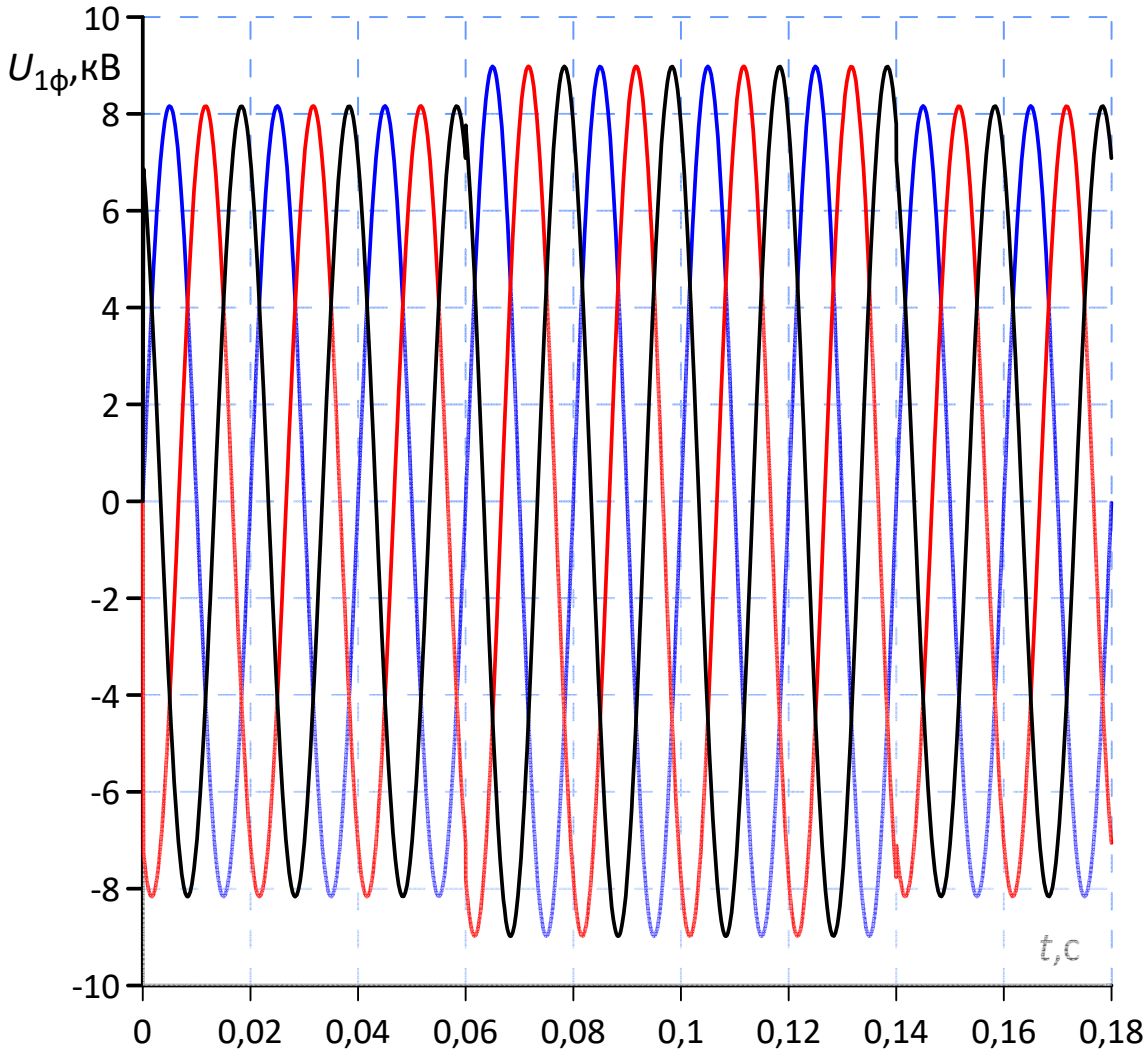


Рис. 3.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 3 (рис. 3.1 – 3.4)

3.1. Гармоническая форма кривой первичного напряжения при набросе (+10 %), в момент $t = 0{,}06$ с, и при сбросе (-10 %), в момент $t = 0{,}14$ с, сохраняется (рис. 3.1);

3.2. В первичном токе при набросе напряжения возникают броски тока ($t >= 0{,}06$ с; рис. 3.2), что обусловлено увеличением насыщения магнитопровода (рис. 3.4*а* и 2.4*а*);

3.3. Наброс и сброс первичного напряжения приводят к соответствующим изменениям величины вторичного тока, но не влияют на его форму и практически не вызывают переходного процесса (рис. 3.3);

3.4. Амплитуда магнитной индукции ~ неизменна (рис. 1.3***б***, 2.4*б* и 3.4*б*).

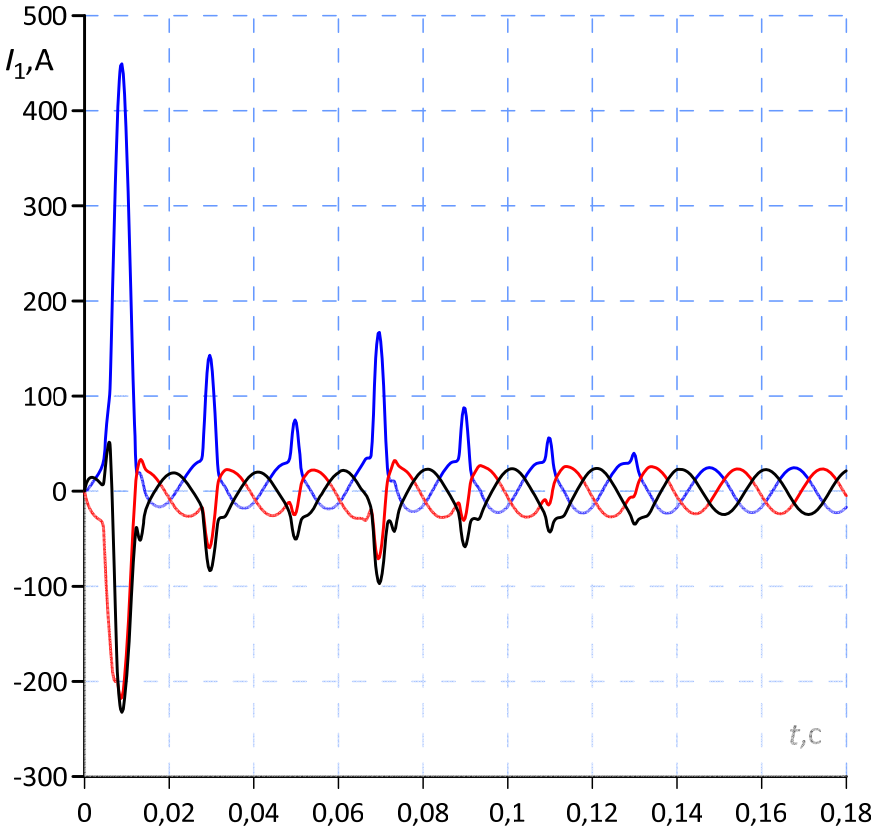


Рис. 3.2. Изменение первичного тока

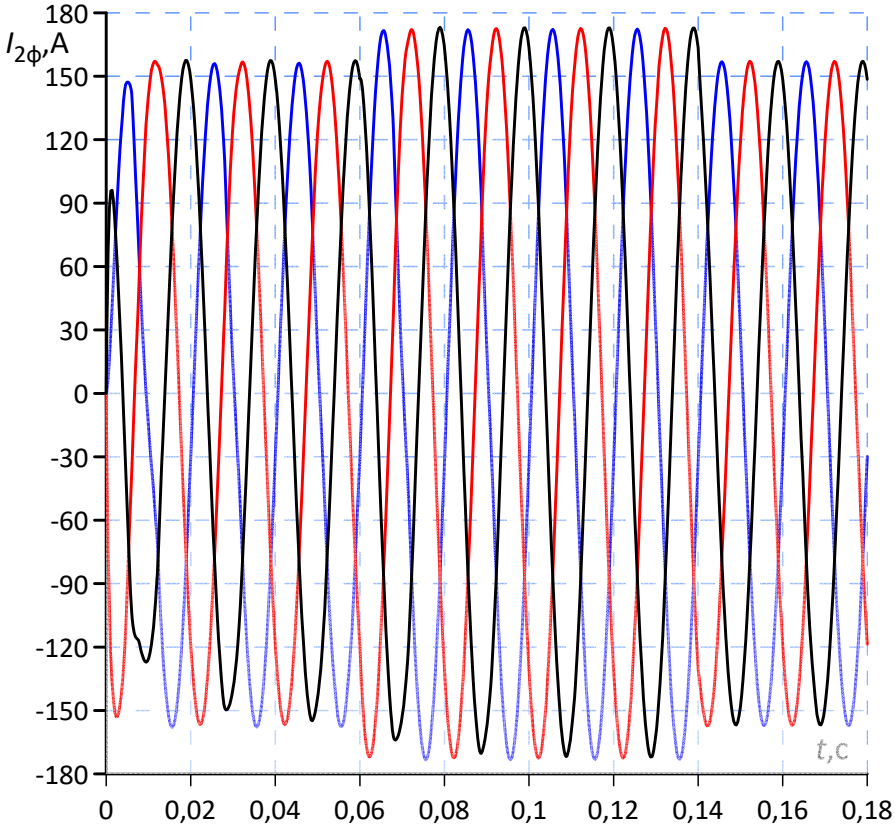
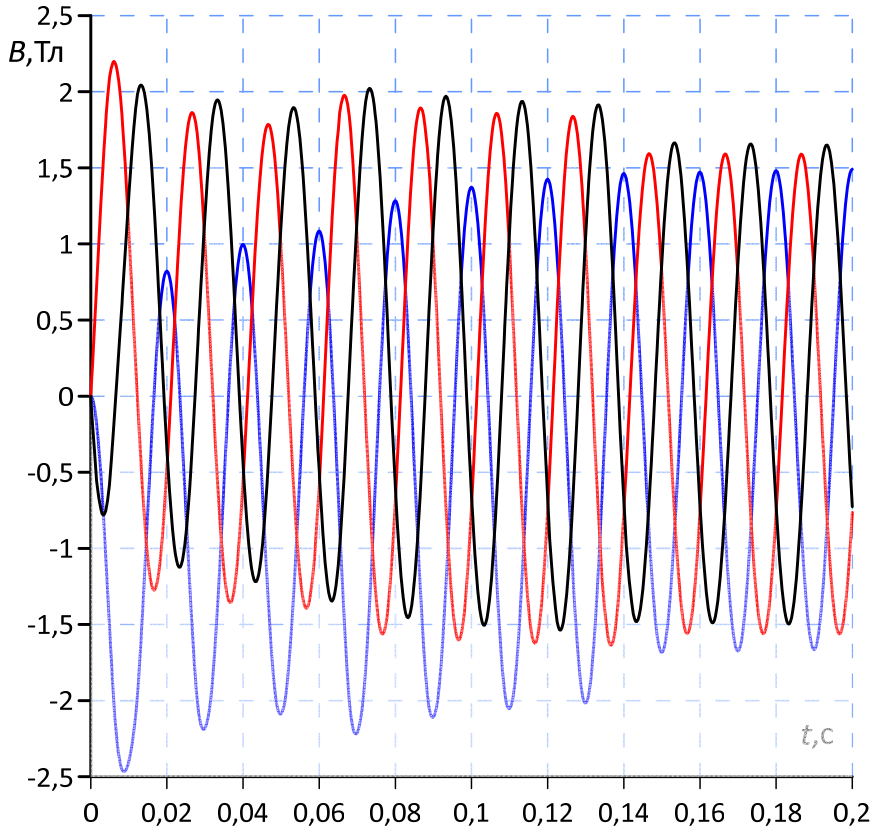
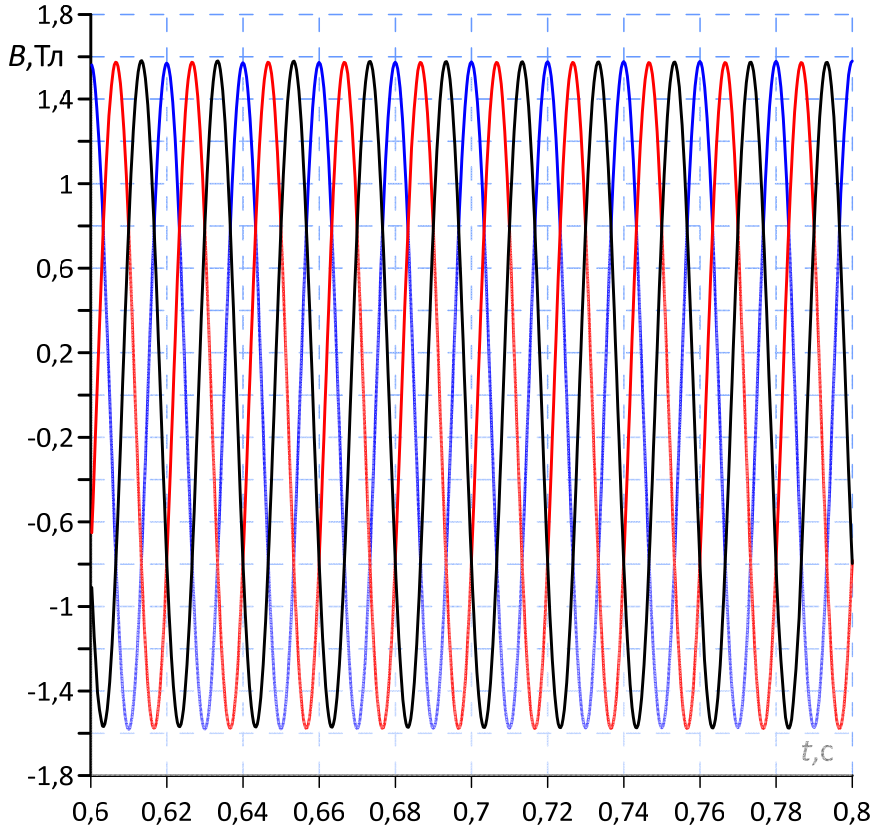


Рис. 3.3. Изменение вторичного тока



а



б

Рис. 3.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7.4. Переходный процесс при несимметричном напряжении, подведённом к первичной обмотке

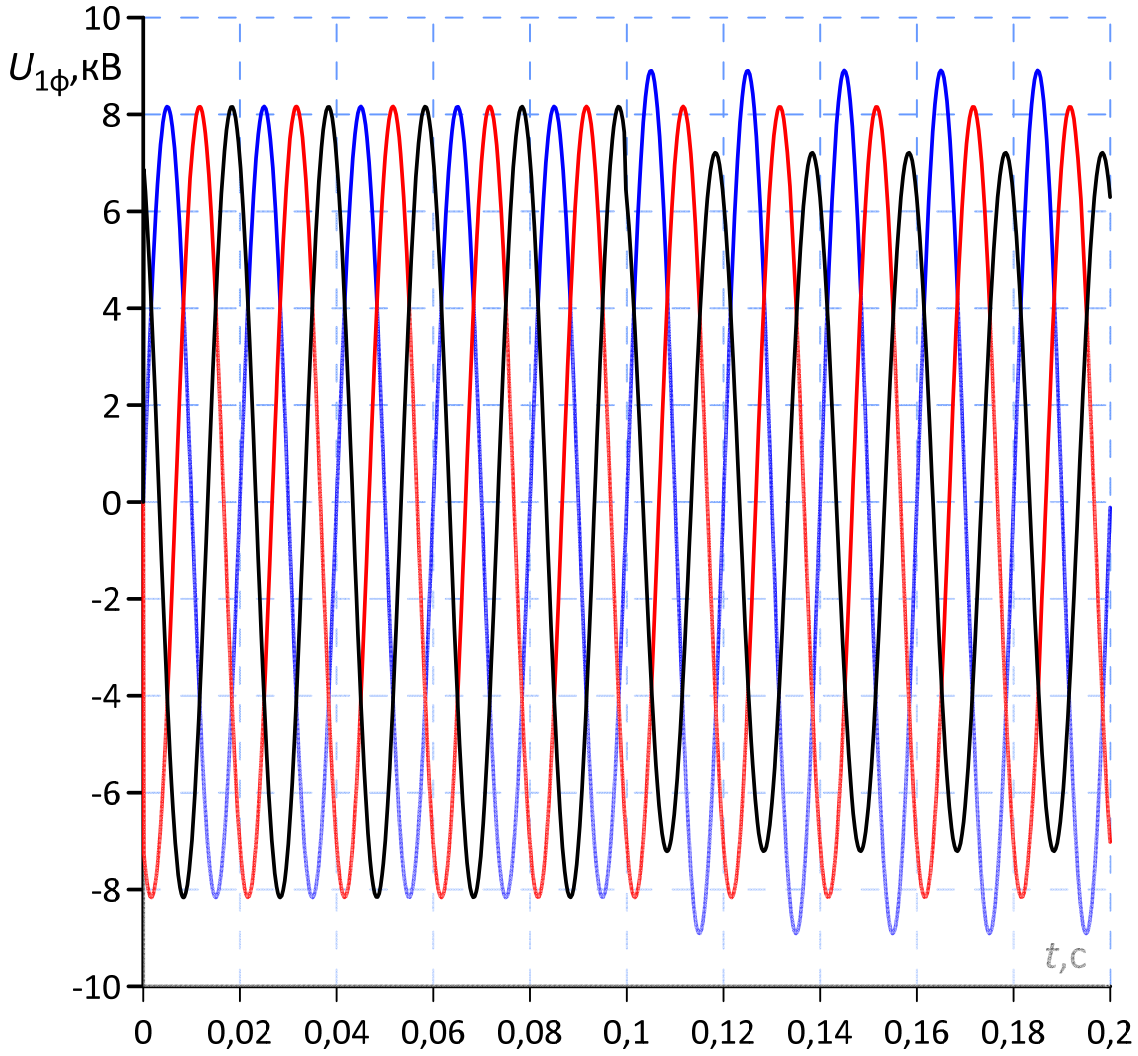


Рис. 4.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 4 (рис. 4.1 – 4.4)

1.1. В период времени t >= 0,1 с первичное напряжение несимметрично по модулю (рис. 4.1);

1.2. В первичном токе возникает выброс в момент времени $t \approx 0{,}1$ с; при t > 0,1 с наблюдается несимметрия (рис. 4.2);

1.3. Вторичный ток при t > 0,1 с – несимметричен (рис. 4.3);

1.4. Магнитный поток в стержнях трансформатора – несимметричен (рис. 4.4);

1.5. Несимметричный режим отрицательно влияет на потребителей, в особенности на трёхфазные асинхронные двигатели: уменьшение момента, увеличение потерь, снижение к. п. д., ..[3, Прил. 2, с. 221 – 223].

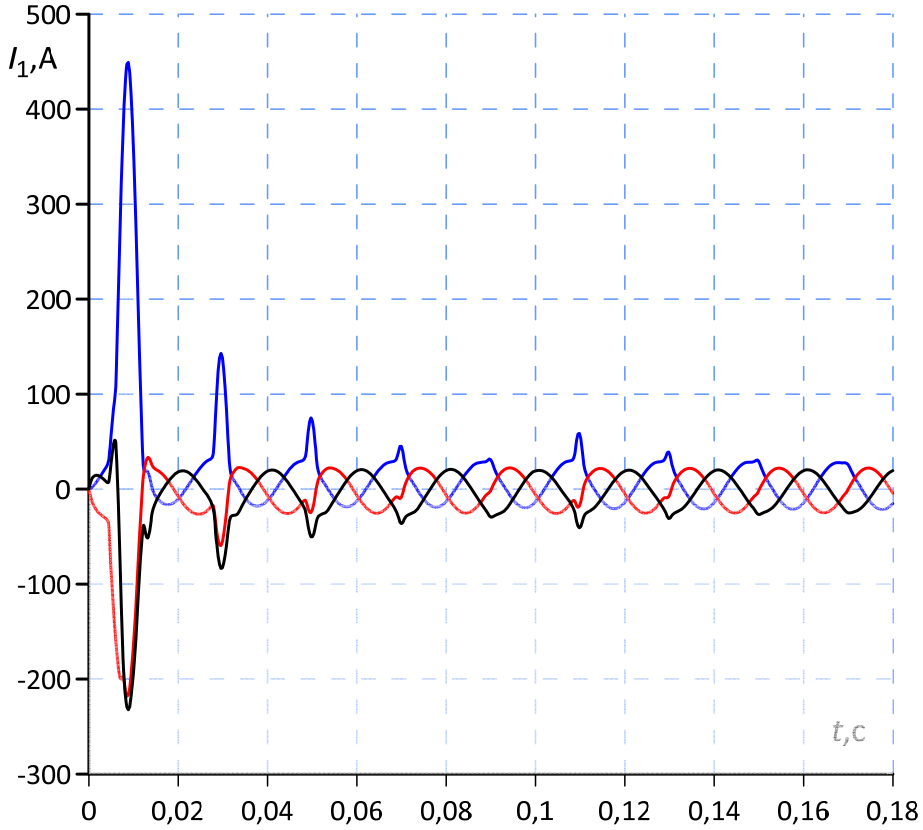


Рис. 4.2. Изменение первичного тока

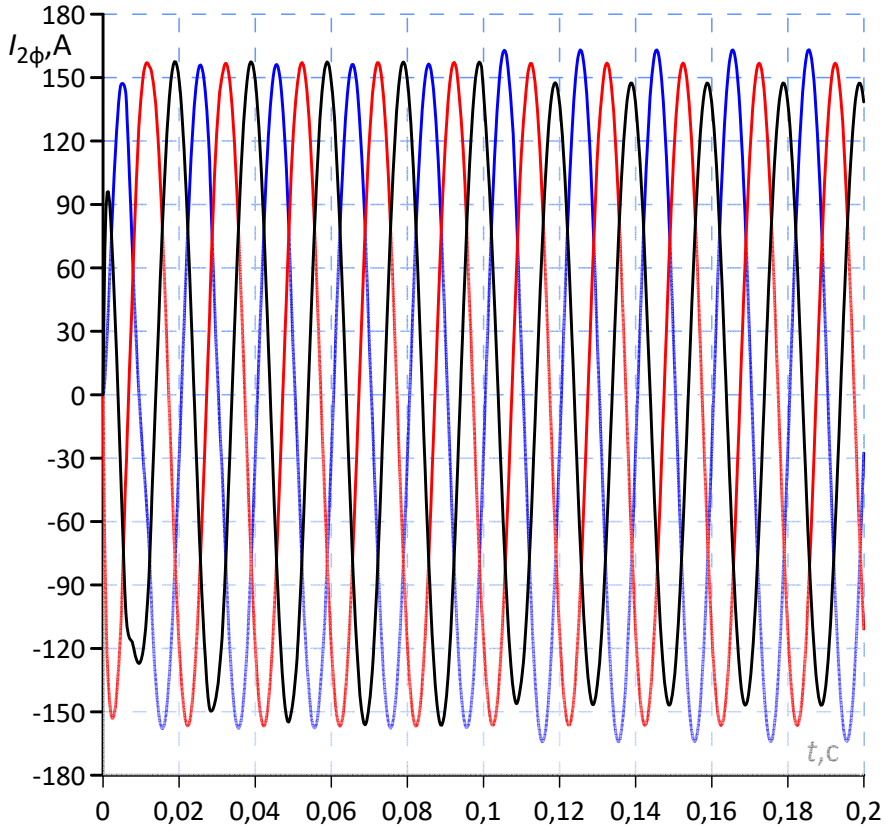
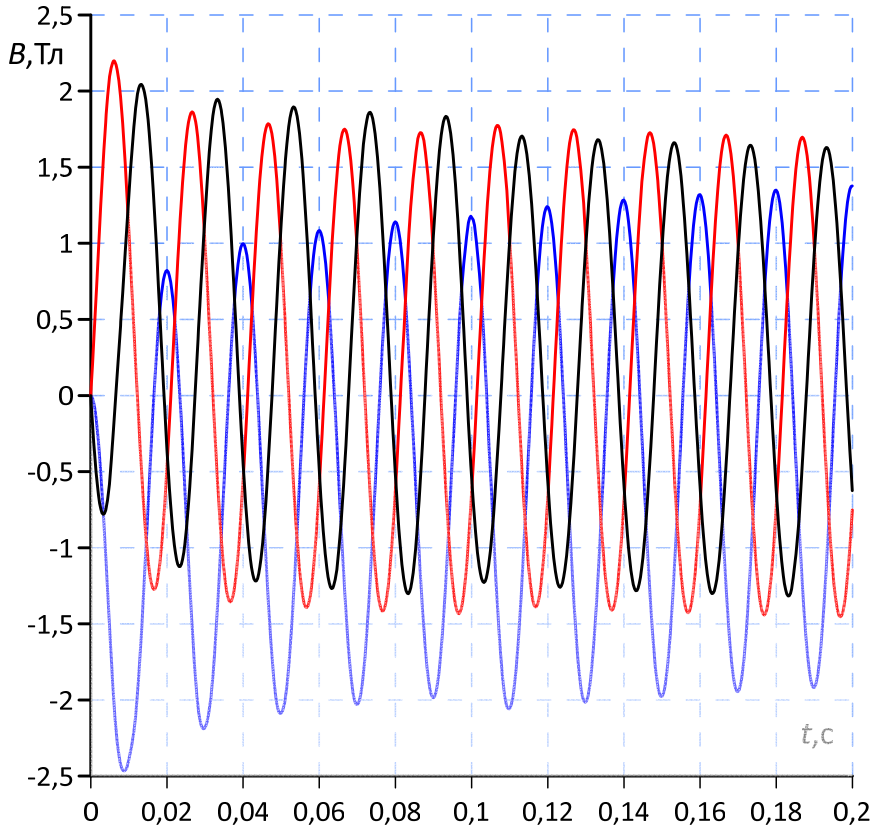
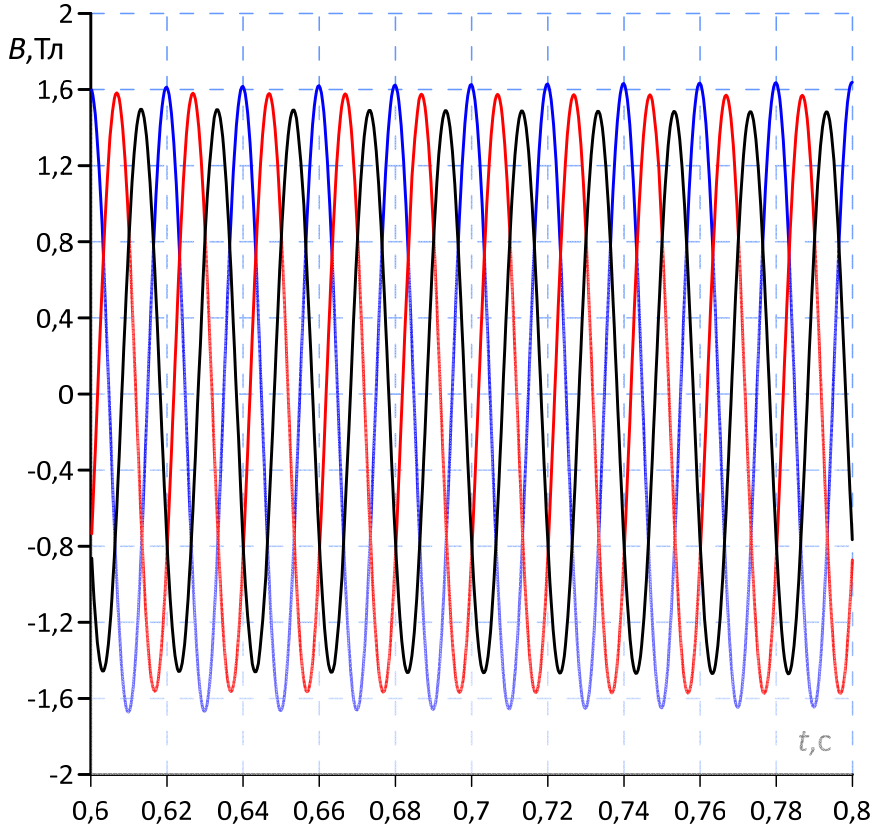


Рис. 4.3. Изменение вторичного тока



а



б

Рис. 4.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7.5. Переходный процесс при отсутствии напряжения на одной фазе первичной обмотки (обрыв фазы)

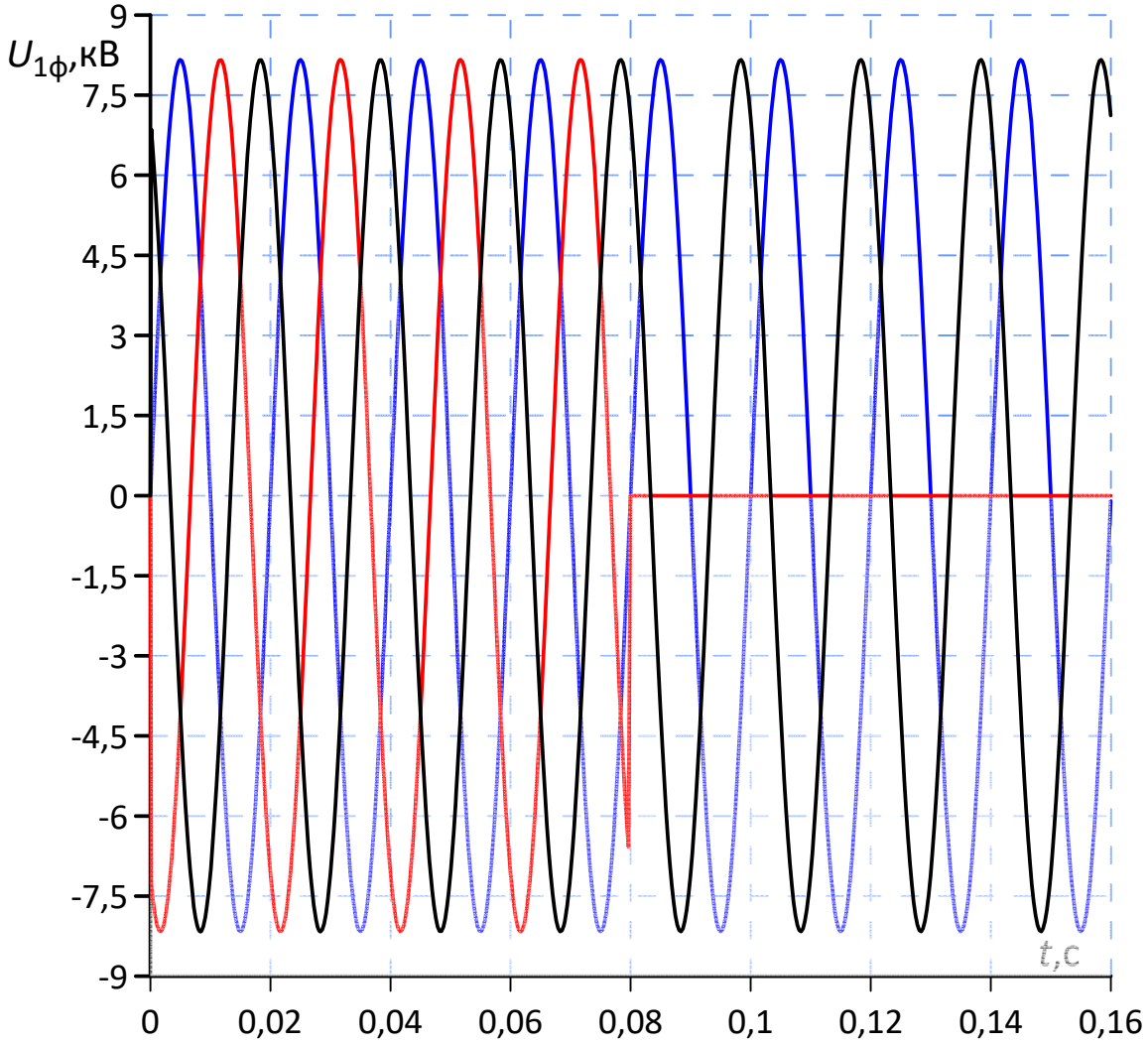


Рис. 5.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 5 (рис. 5.1 – 5.4)

1.1. При $t > 0{,}08$ с происходит обрыв фазы (см. красную кривую, рис. 5.1);

1.2. Первичный ток в этой фазе приближается к нулю (рис. 5.2, $t > 0{,}08$ с);

1.3. Вторичный ток существенно изменяется по величине: в фазе, соответствующей «оборванной», он уменьшился почти в 3 раза; в двух других фазах амплитуда тока уменьшилась на ~ 20 А (рис. 5.3);

1.4. При $t > 0{,}08$ с в магнитном потоке наблюдается несимметрия (рис. 5.4*а*);

1.5. В установившемся режиме изменение магнитного потока (рис. 5.4*б*) формально соответствует изменению вторичного тока (рис. 5.3);

1.6. Работа потребителей при обрыве фазы невозможна.

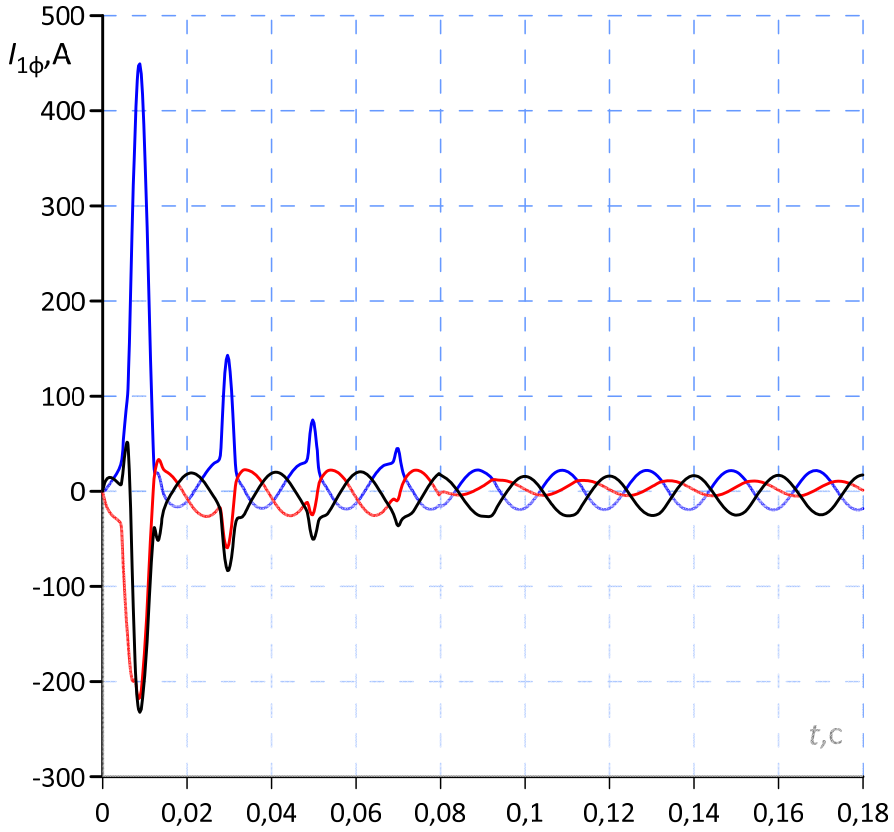


Рис. 5.2. Изменение первичного тока

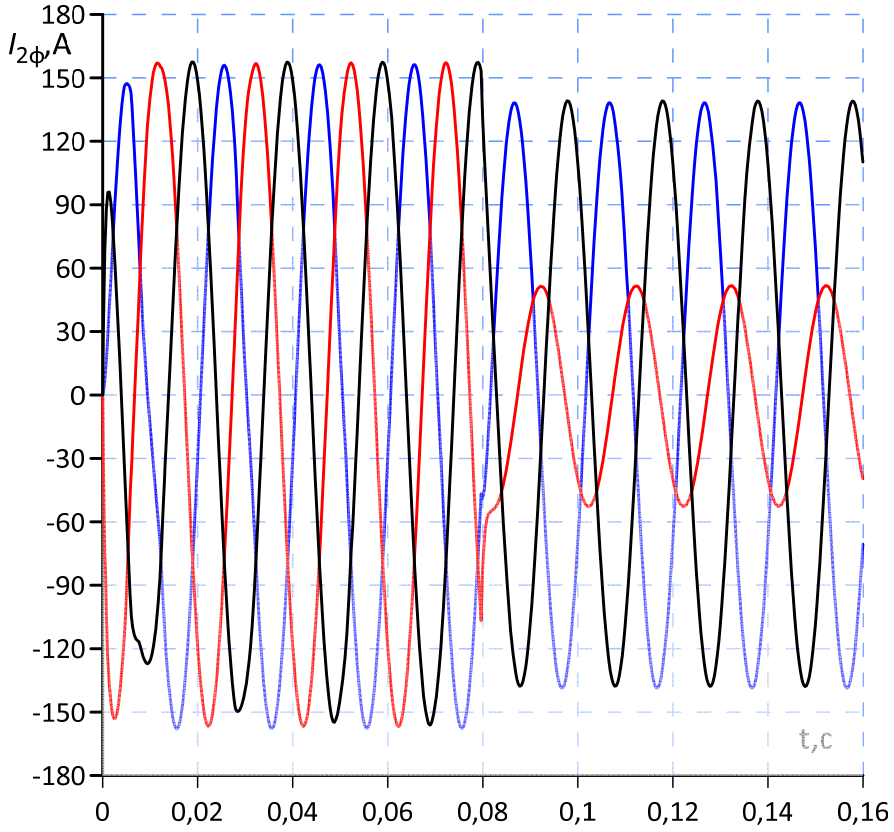
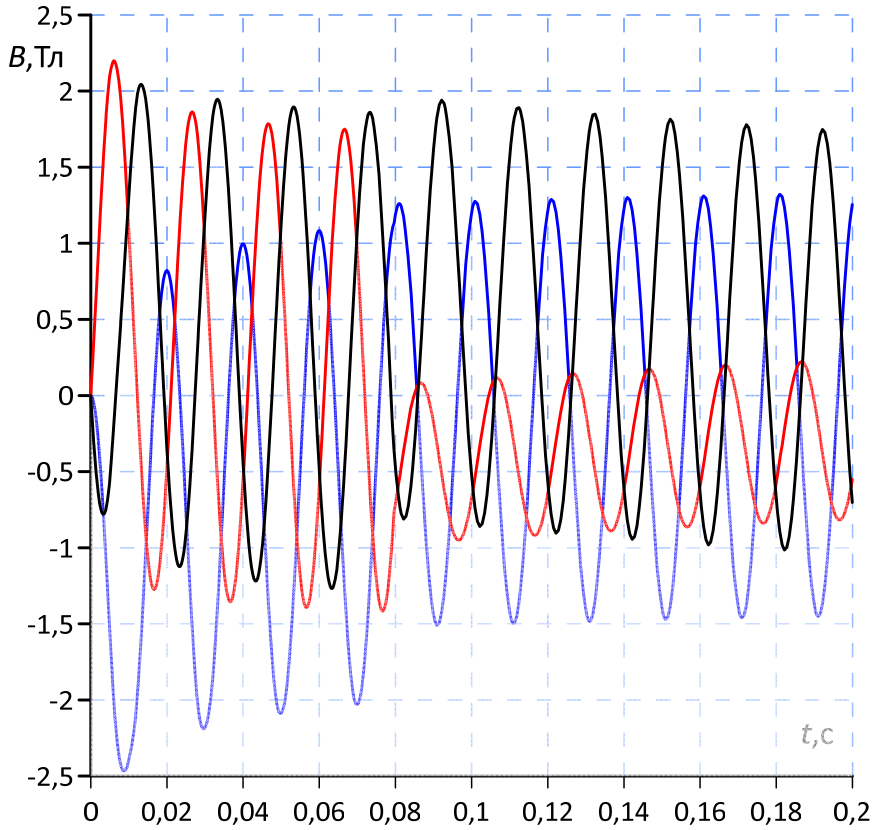
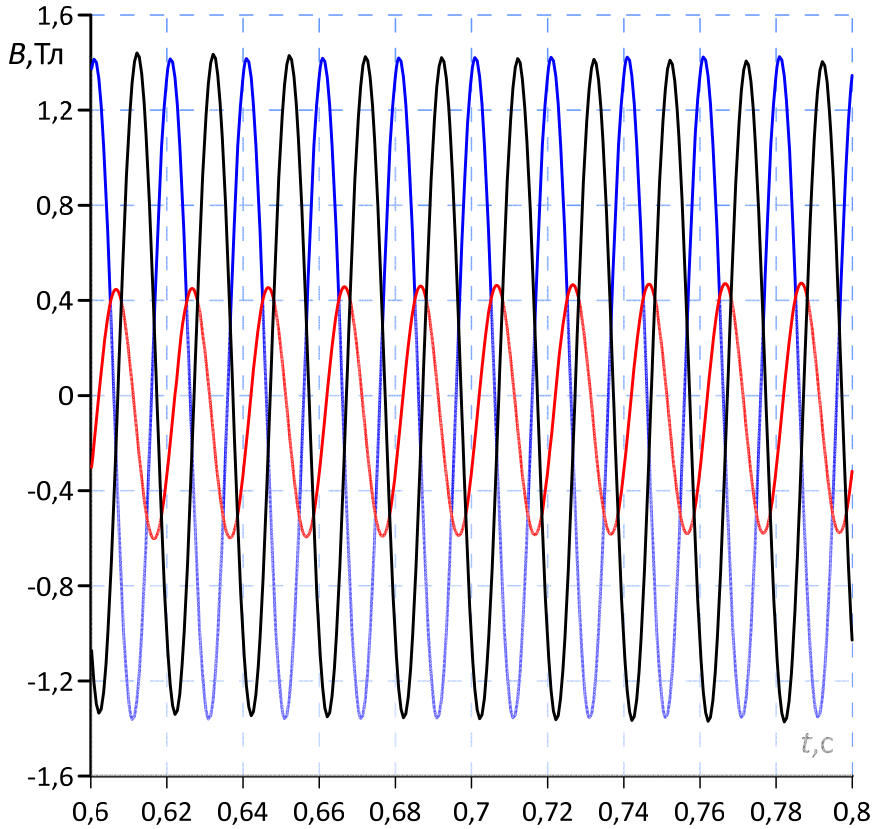


Рис. 5.3. Изменение вторичного тока



а



б

Рис. 5.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7.6. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) нагрузки, подключённой к вторичной обмотке

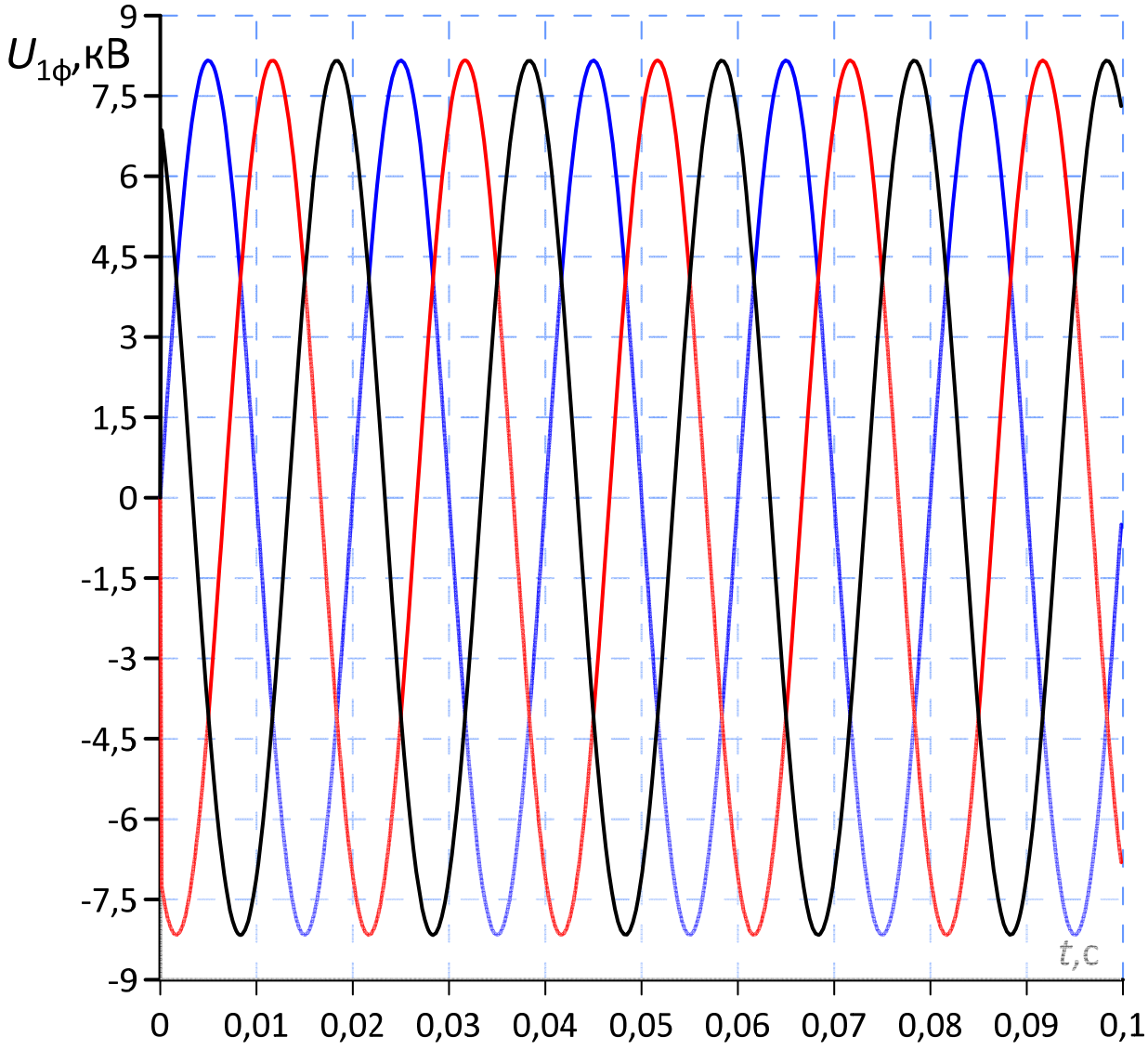


Рис. 6.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 6 (рис. 6.1 – 6.4)

6.1. В диапазоне времени 0.06 =< t < 0.14 с активная составляющая нагрузки, подключённой к вторичное обмотке, изменена на 10 % (рис. 6.3);

6.2. Первичное напряжение, задано сетью, и не изменяется (рис. 6.1);

6.3. Вторичный ток в указанном диапазоне времени уменьшается на ~ 10 А (рис. 6.3);

6.4. Первичный ток в указанном диапазоне времени также несколько уменьшается (рис. 6.2);

6.5. Значительного изменения в магнитном потоке не наблюдается (рис. 1.3 и 6.4).

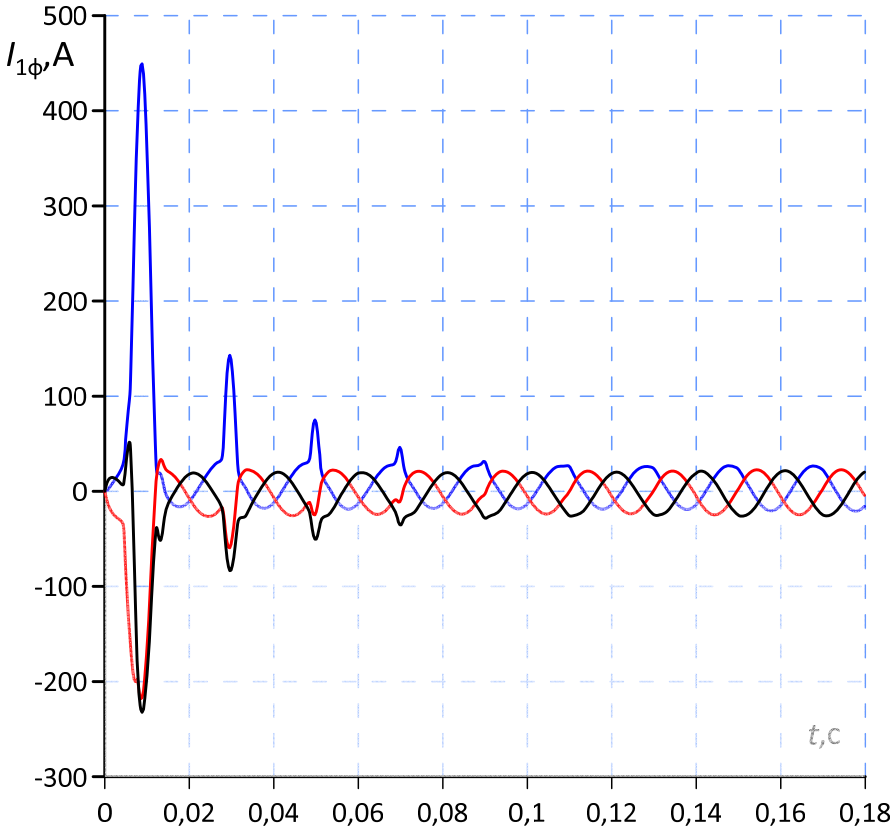


Рис. 6.2. Изменение первичного тока

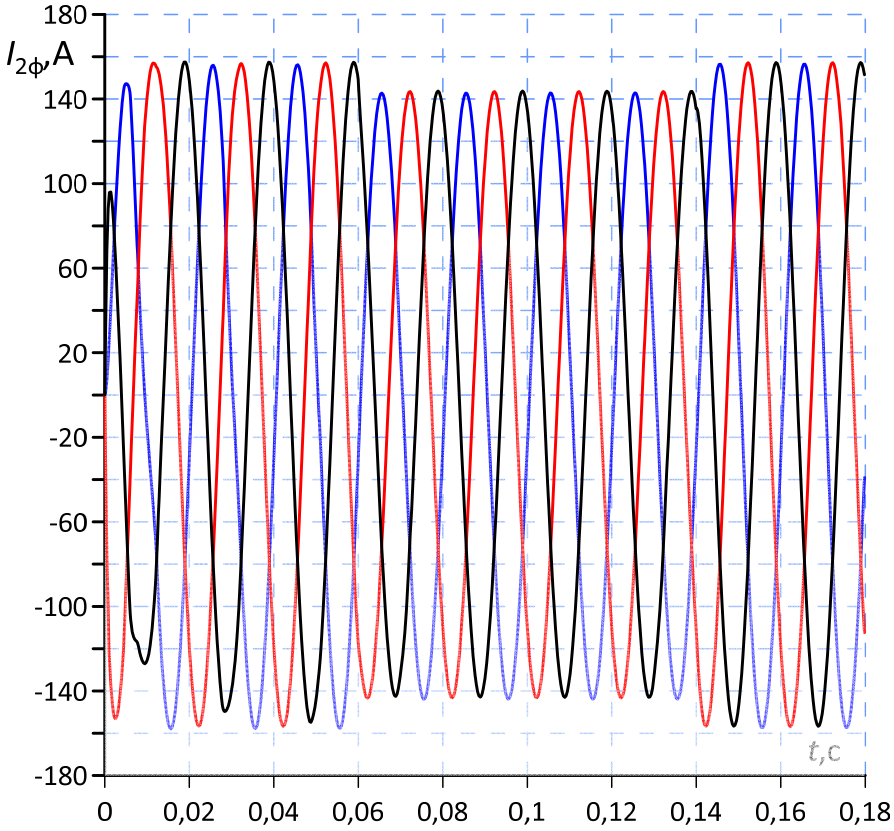
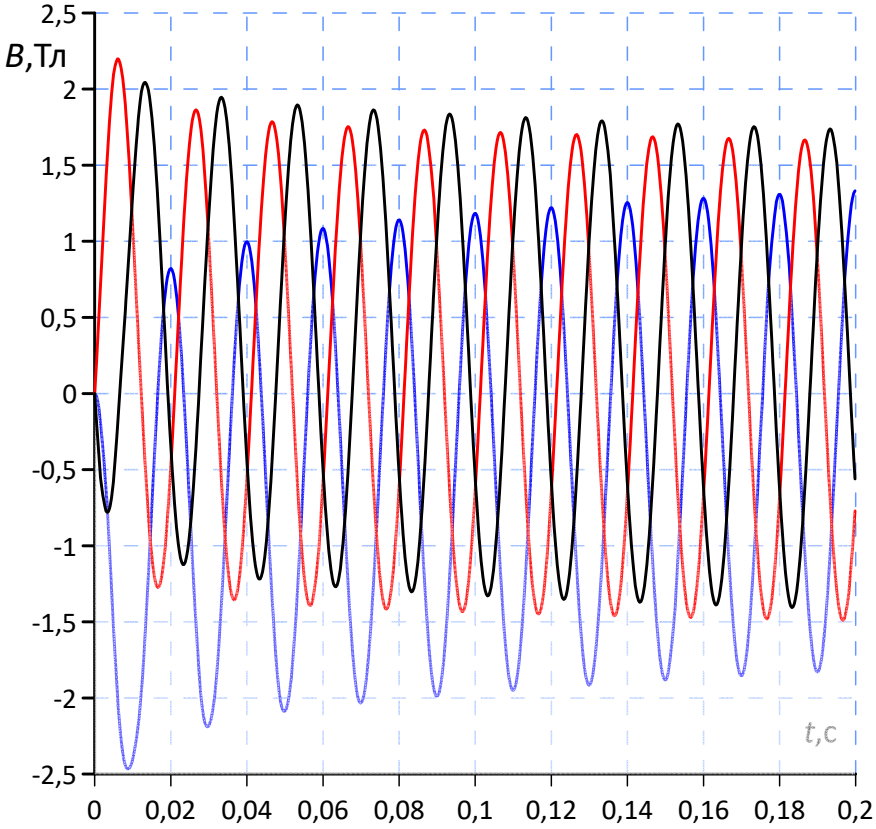
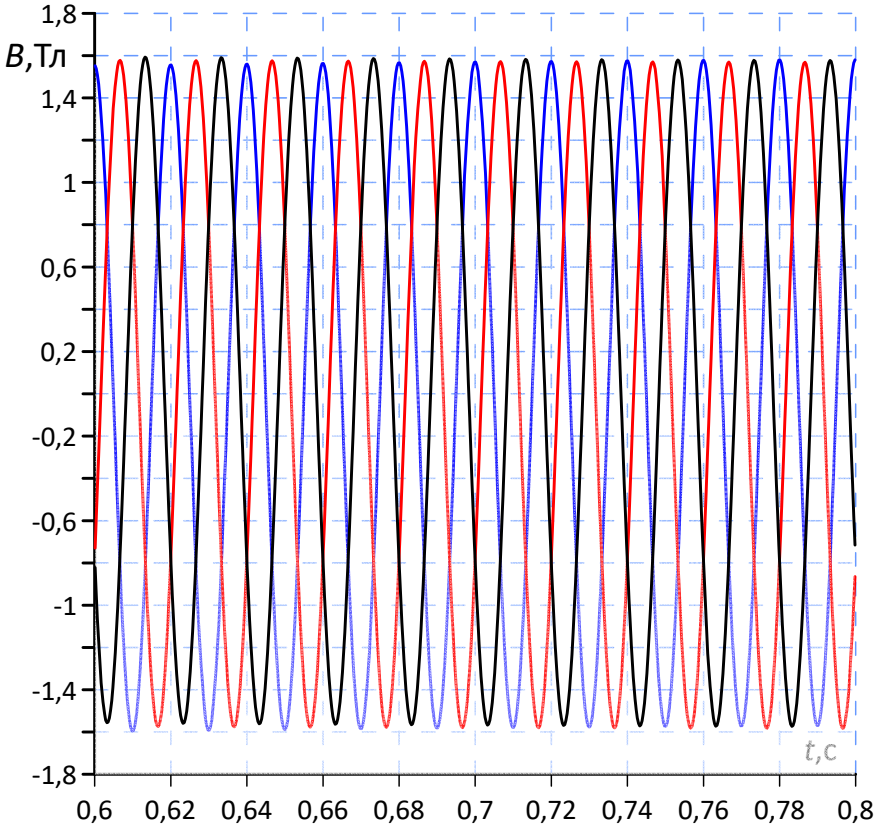


Рис. 6.3. Изменение вторичного тока



а



б

Рис. 6.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7. 7. Переходный процесс при несимметричной нагрузке, подключённой к вторичной обмотке

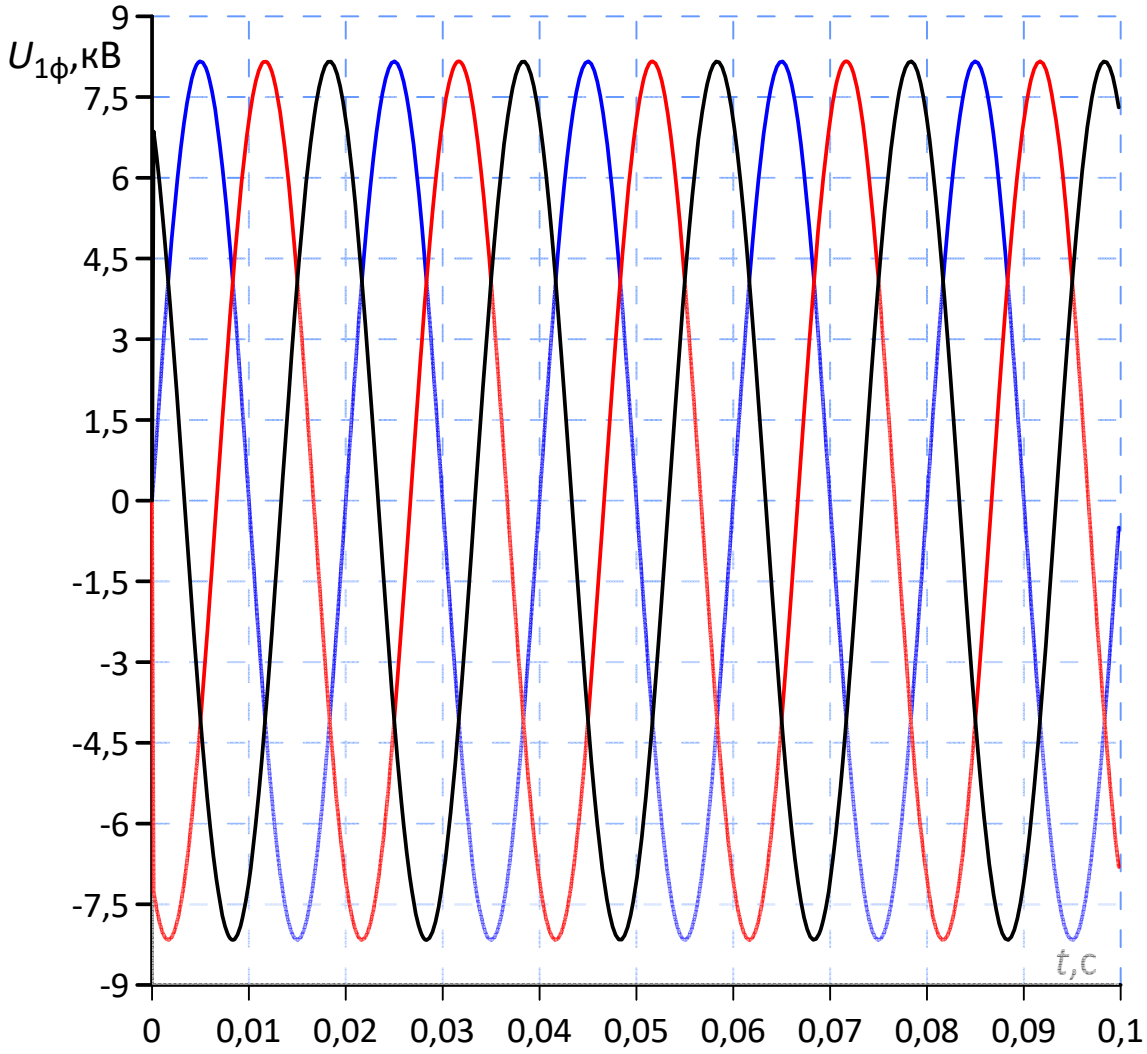


Рис. 7.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 7 (рис. 7.1 – 7.4)

1.1. При t => 0,1 с нарушается симметрия трёхфазной нагрузки за счёт активной составдяющей (рис. 7.3);

1.2. Существенно нарушается симметрия трёхфазного вторичного тока (рис. 7.3), что отрицательно влияет на потребителей, в особенности на трёхфазные асинхронные двигатели: уменьшение момента, увеличение потерь, снижение к. п. д… [3, Прил. 2, с. 221 – 223];

1.3. Также нарушается симметрия трёхфазного первичного тока (рис. 7.2, t > 0,1 с);

1.4. Наблюдается незначительное различие амплитуд магнитного потока в стержнях магнитопровода в установившемся режиме (рис. 7.4*б*)

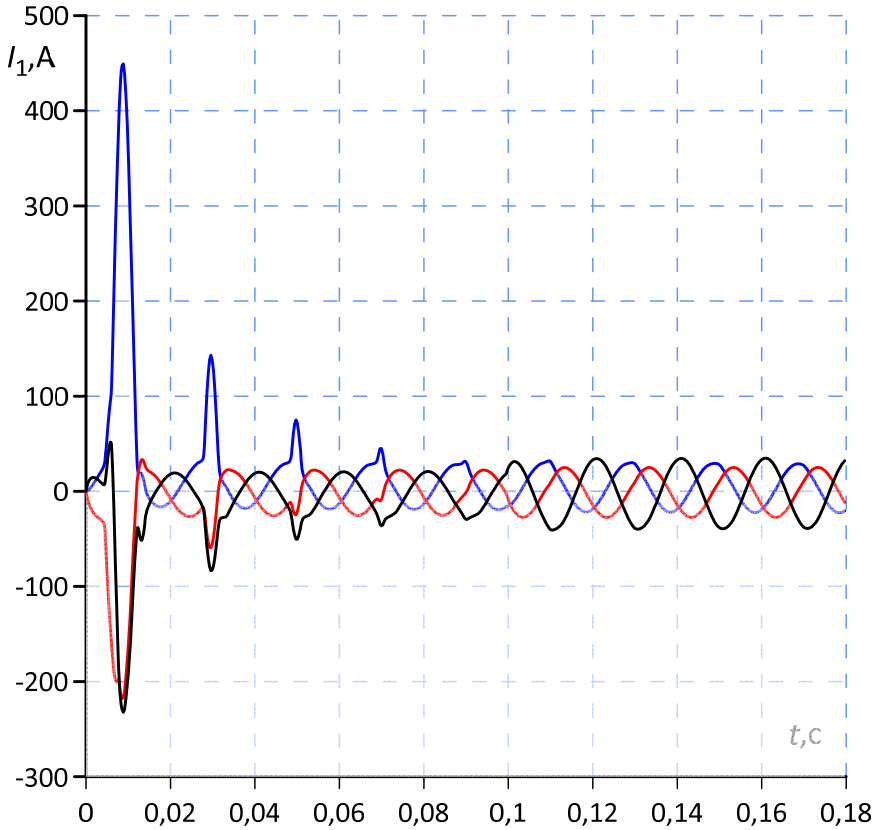


Рис. 7.2. Изменение первичного тока

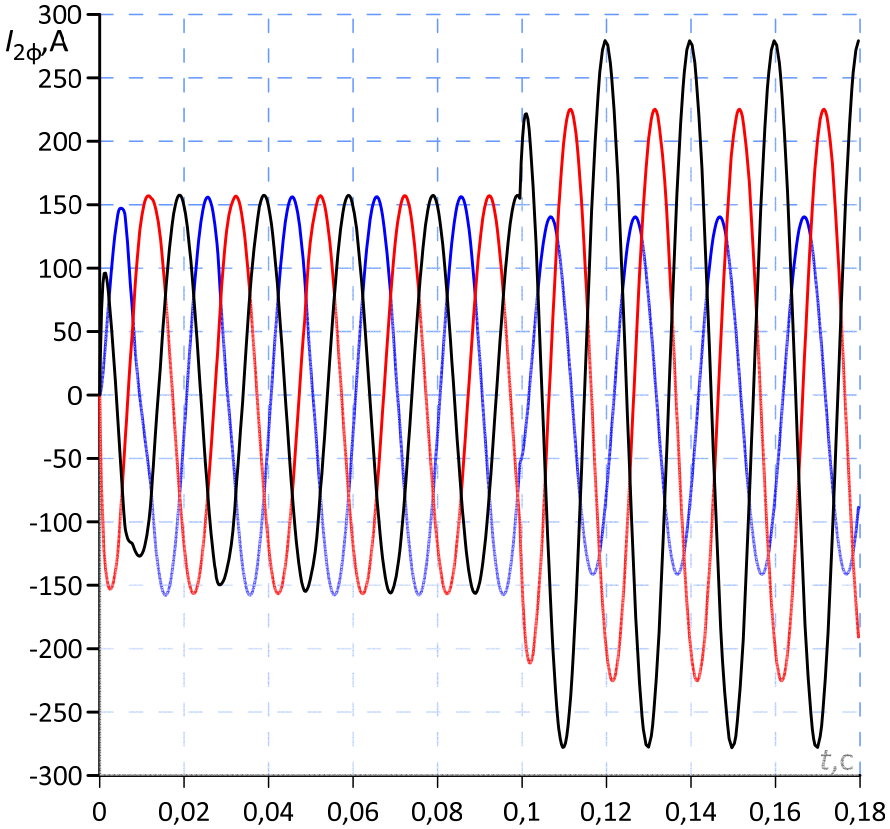
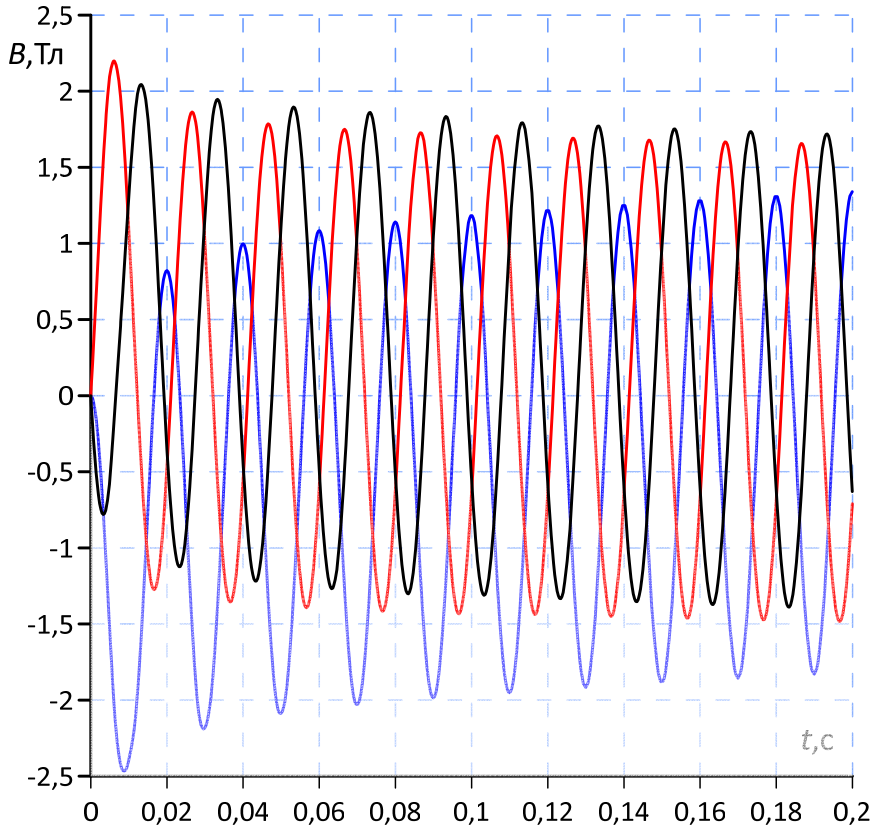
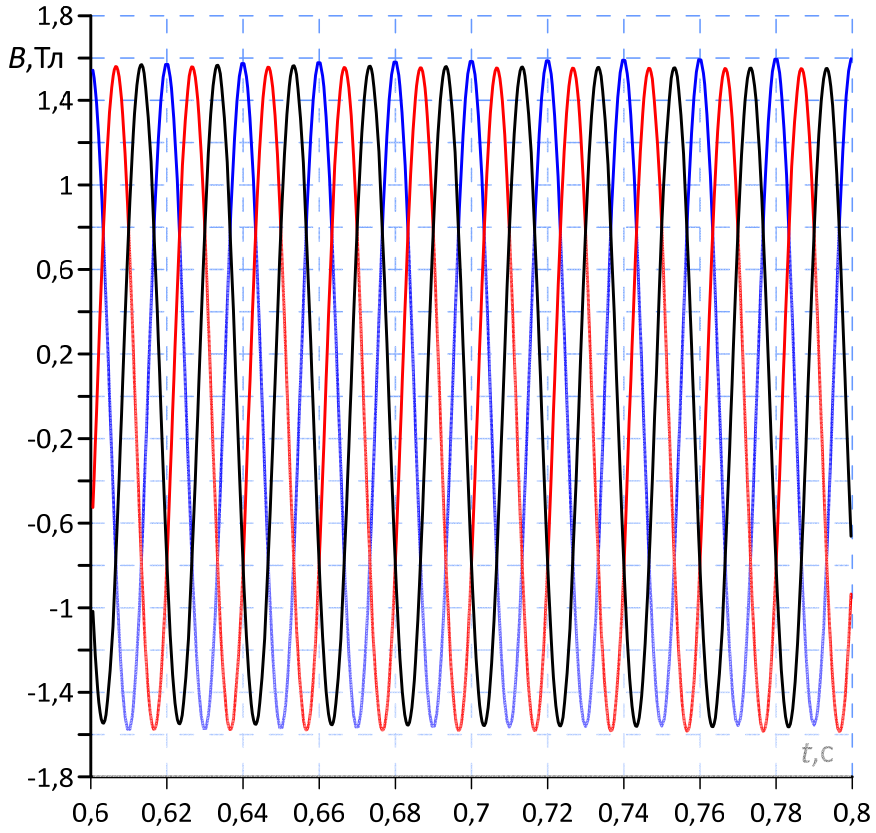


Рис. 7.3. Изменение вторичного тока



а



б

Рис. 7.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:
а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.7.8. Подключение нагрузки к вторичной обмотке на холостом ходу трансформатора

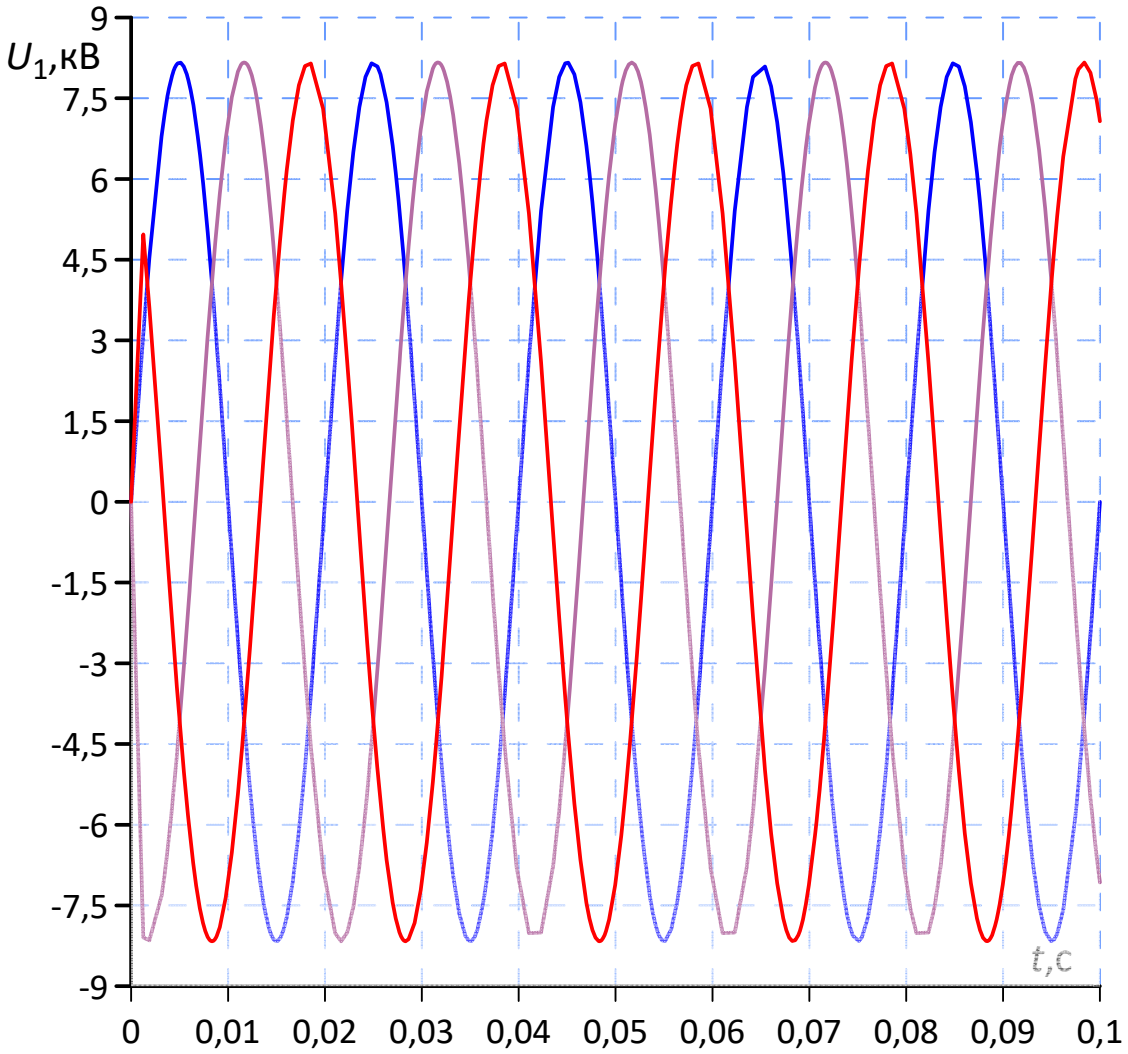


Рис. 8.1. Изменение первичного напряжения

Выводы к разделу 8 (рис. 8.1 – 8.4)

1.1. Трансформатор работает в режиме холостого хода в диапазоне времени 0.0 =< t < 0.1 с, вторичный ток равен нулю (рис. 8.3);

1.2. При подаче напряжения на первичную обмотку (t = 0 с) наблюдается бросок тока холостого хода (рис. 8.2) /см. Выводы к разделу 1, с. **21**/;

1.3. При t => 0.1 с к вторичной обмотке подключается нагрузка; вторичный ток, менее чем за 0,01 с, достигает установившегося значения;

1.4. Первичный ток также возрастает, за счёт нагрузочной составляющей (рис. 8.2);

1.5. В установившемся режиме амплитуда магнитной индукции остаётся практически неизменной (рис. 8.4, 1.3*б*, 2.4*б*, 3.4*б* и 6.4*б*); следовательно потери в стали магнитопровода можно считать постоянными при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной.

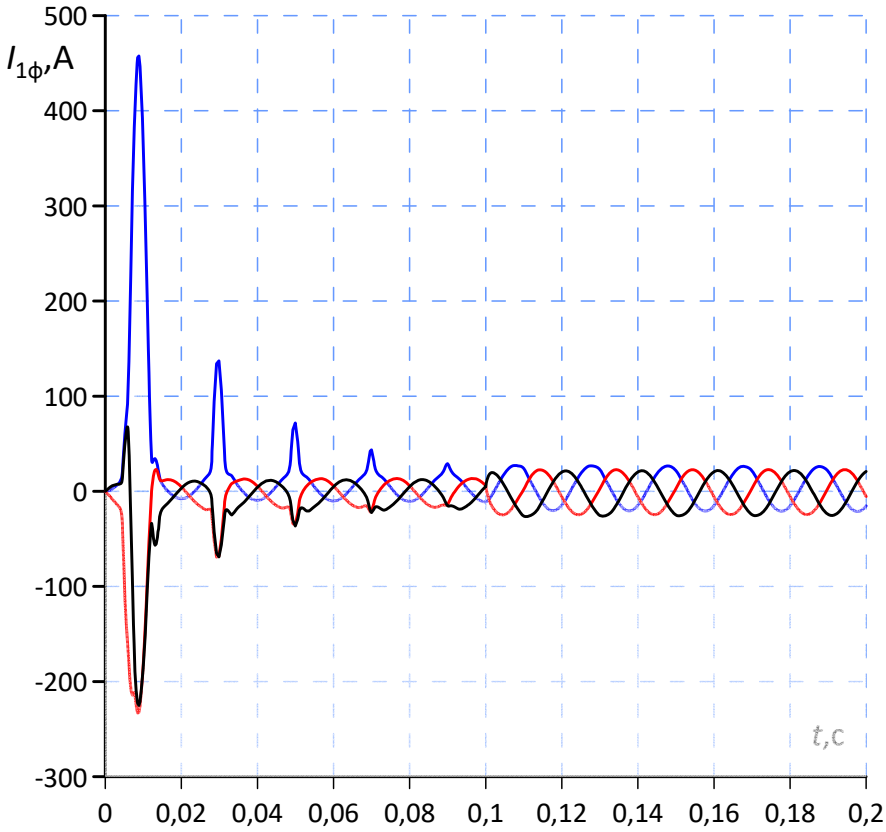


Рис. 8.2. Изменение первичного тока

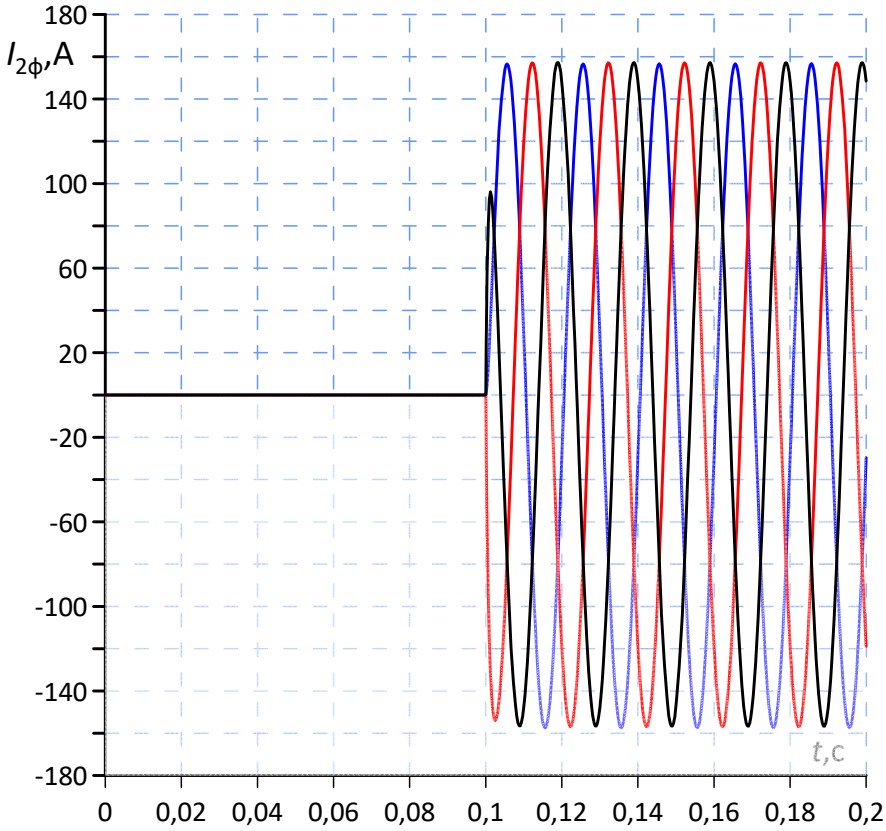
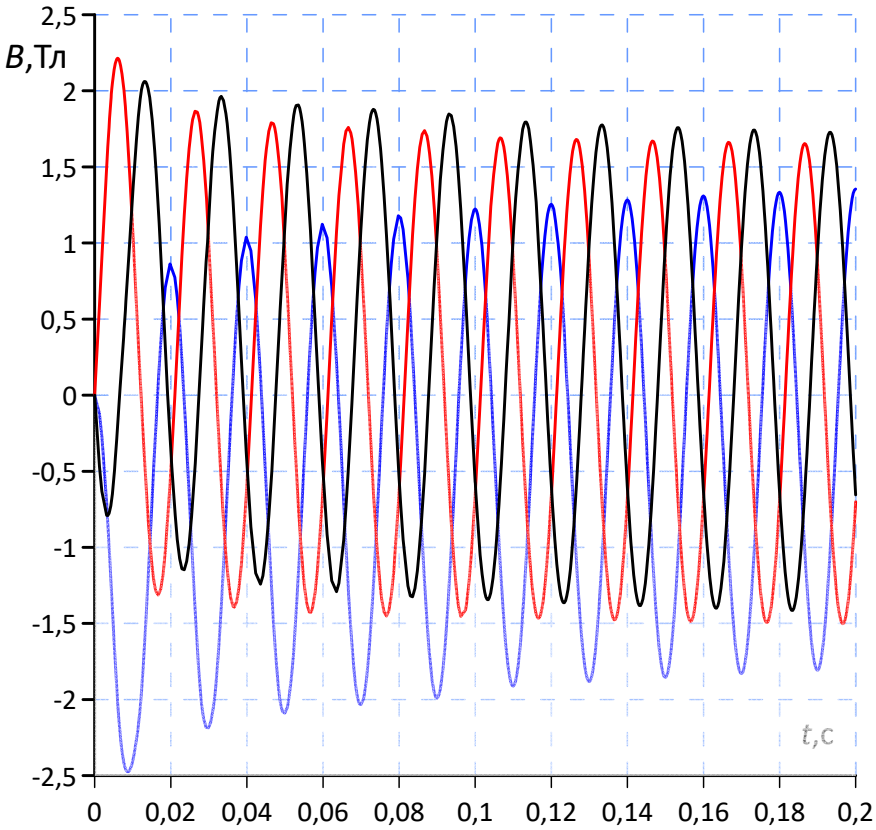
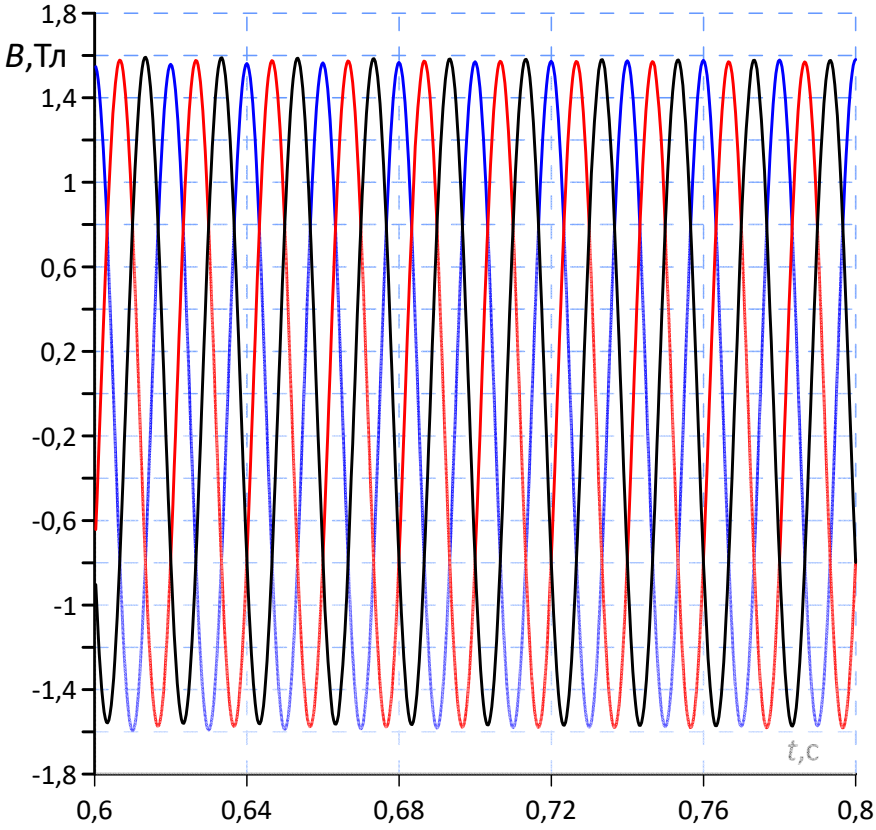


Рис. 8.3. Изменение вторичного тока



а



б

8.4. Изменение магнитной индукции в стержнях магнитопровода:

а – переходный процесс; *б* – установившийся процесс

Б.8. Fortran-программа, реализующая алгоритм математической модели электромагнитных режимов устройств электроэнергетики с различными конструкцией магнитопровода и схемами устройства обмоток

(на примере 3-фазного трансформатора с пространственным магнитопроводом, 250 кВ·А, 10/0,69 кВ)

Программа реализует следующие численные методы и алгоритмы:

1. Метод сглаживания экспериментальной кривой намагничивания (модуль SG13).
2. Метод расчёта коэффициентов кубического сплайна, аппроксимирующего экспериментальную кривую намагничивания (модуль SPLAIN).
3. Метод прогонки – решения системы ЛАУ с трёхдиагональной матрицей коэффициентов – определение коэффициентов кубического сплайна (модуль PROG).
4. Метод Гаусса – решение систем ЛАУ с произвольной матрицей коэффициентов – определение значений производных от электрических токов и магнитных потоков (модуль GAUS2).
5. Метод Рунге-Кутта с модификацией Фельберга определение искомых величин – мгновенных значений электрических токов и магнитных потоков как функций времени (модуль RKF4).
6. Метод дихотомического деления – поиск интервалов на дифференциальной кривой намагничивания, соответствующих текущему значению магнитной индукции в участках магнитной цепи (в модуле RKF4).

Программные единицы:

1) головной модуль NR,
2) модуль SG13,
3) модуль SPLAIN,
4) модуль GAUS2,
5) модуль RKF4.

Среда программирования Plato32 Version 4.9.0

1) головной модуль NR

```
      external SG13, SPLAIN, rkf4
 ! Head module
      DIMENSION BEXPER(42),HEXPER(42), ASPLA(42), DIFKUR(42), p(4), Rsi(42),
COFs(42),Reri(42), COFer(42), w(10)
     integer i, m, nexper, n
     real  LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn
   !  double precision UAB, UBC, ULMAB, ULMBC,Ua2x,Ub2x,Uc2x
     COMMON /EU1/ ULMAB, ULMBC,UAB,UBC,Ua2x,Ub2x,Uc2x, Ea1 &
       /EU1a/ UfAm,UfBm,UfCm, UfA,UfB,UfC, UfAmm, UfBmm, UfCmm, UfAm1,UfBm1,UfCm1 &
            /EU2/ WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,Wa2x,Wb2x,Wc2x  &
          /EU3/ RA1,RB1,RC1,Ra2,Rb2,Rc2,Ran,Rbn,Rcn , Rd   &
          /EU4/ DLs,DLer, Ss,Ser,ks   &
          /EU5/ UF,ii   &
          /EU6/ NEXPER,BEXPER,HEXPER   &
          /EU7/ Rsi,COFs, Reri, COFer    &
          /EU8/ Bst,fi,bst3  &
          /EU10/  LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn
                                                open(unit=5,file="NR.txt")
                                                open(unit=6,file="dat.txt")
```

```
                    open(unit=10,file="B-1-2-3-ng.dat")
                     open(unit=12,file="Fi_1-ng.dat")
                      open(unit=14,file="Fi_2-ng.dat")
                       ! open(unit=15,file="U_2-ng.dat")
                        open(unit=16,file="U_1-ng.dat")
                       !  open(unit=17,file="Ea1-ng.dat")
                                ks = 4 ! 4 loop magnetic fluxes
          NEXPER=42
     read(5,*) (BEXPER(I),HEXPER(I),I=1,NEXPER)
!   write(6,*) "B=f(H) - experiment"
 !     write(6,*) (BEXPER(I),HEXPER(I),I=1,NEXPER)
 ! External procedure SG13 - smoothing the experimental magnetization curve
CALL SG13(BEXPER,HEXPER,NEXPER)
 !    write(6,*) "B=f(h), sg13"
!      write(6,*) (BEXPER(I),HEXPER(I),I=1,NEXPER)

                                BEXPER(1)=0.
                                HEXPER(1)=0.
 ! External procedure SPLAIN - for determining the coefficients of a cubic spline
    CALL SPLAIN(BEXPER,HEXPER,NEXPER,ASPLA)
 !              write(6,*) "Aspa - splain"
! write(6,*) (ASPLA(M),M=1,NEXPER)

     !!              4     FORMAT('aspla x4',12G12.4)
               NEXPM1=NEXPER-1
DO  M=1,NEXPER
          DO  I=1,NEXPM1
    IF(BEXPER(M)>BEXPER(I+1)) GOTO 101
                              NL=I
       GOTO 120
101 CONTINUE
Enddo
120  CONTINUE
                              NR=NL+1
    DB =BEXPER(NR)-BEXPER(NL)
    DB2=0.5/DB
    BBT=BEXPER(NR)-BEXPER(M)
    BTB=BEXPER(M) -BEXPER(NL)
    DH =HEXPER(NR)-HEXPER(NL)
    DASP=ASPLA(NR)-ASPLA(NL)
    DIFKUR(M)=(-ASPLA(NL)*(BBT*BBT))*DB2+ (ASPLA(NR)*(BTB*BTB))*DB2+(DH)/DB-
((DASP)*0.16666)*DB
Enddo

!write(6,*) "B, dH/dB, H"
! write(6,*) (bexper(m),DIFKUR(M),hexper(m),M=1,NEXPER)
```

```
      READ(5,*) n, UfA,UfB,Ufc,  WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,
RA1,RB1,RC1,Ra2,Rb2,Rc2,Ran,Rbn,Rcn, &
             Rd,   LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn, DLs,DLer, Ss,Ser, F

     write(6,*) "n, UfA,UfB,Ufc,  WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,
RA1,RB1,RC1,Ra2,Rb2,Rc2,Ran,Rbn,Rcn"
     write(6,*)     " Rd,   LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn, DLs,DLer, Ss,Ser, F "
        write(6,*) n, UfA,UfB,Ufc,  WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,
RA1,RB1,RC1,Ra2,Rb2,Rc2,Ran,Rbn,Rcn, &
                                   Rd,   LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn, DLs,DLer, Ss,Ser, F

      read(5,*) (p(i),i=1,4)
                                   write(6,*) "t_bedin, t_end, dt_initial step, accuracy"
             write(6,*)(P(I),I=1,4)

!          read(5,*) Wa2x,Wb2x,Wc2x
!          write(6,*) "Wa2x,Wb2x,Wc2x"
!          write(6,*)Wa2x,Wb2x,Wc2x

 !   54              FORMAT(' PR(I)=',4G13.5)
 !    10  FORMAT (i3,2x,2G13.4/  3G13.4  /  3G13.4/  3G13.4/ 2G13.4/ G13.4)

           DO   I=1,NEXPER
   Rsi(I)=DIFKUR(I)*DLs/Ss
   Reri(I)=DIFKUR(I)*Dler/Ser
Enddo
                !   write(6,*) "Rst_i, i"
                 !              write(6,*)(RSTI(I),I=1,NEXPER)

           DO   KK=1,NEXPM1
     BTEKT=(BEXPER(KK+1)-BEXPER(KK))
     BTEKT1=1./BTEKT
     COFs(KK)=(Rsi(KK+1)-Rsi(KK))*BTEKT1
     COFer(KK)=(Reri(KK+1)-Reri(KK))*BTEKT1
Enddo
  !   ULMAB=SQRT(2.)*UAB
   !  ULMBC=SQRT(2.)*UBC
      UfAm1=SQRT(2.)*UfA
      UfBm1=SQRT(2.)*UfB
      UfCm1=SQRT(2.)*UfC

     UF=2.0*3.14159*F
DO   I=1,n
              w(I)=0.0
Enddo
```

```
!External procedure RKf4(Runge-Kutta method)- determination of instantaneous values
! of currents and magnetic fluxes
    CALL RKf4(P,w,N,f1)
        Write(*,*)
    Write(*,*) "The program has finished work"
    STOP
  END
```

2) модуль SG13,

```
      subroutine sg13(b,h,kt)
! Smoothing the experimental magnetization curve of electrical steel
      DIMENSION H(kt),B(kt),HR(kt)
      DO  J=0,KT-3
      K=J+2
      B3=0.
      H3=0.
      DO  I=1+J,3+J
      B3=B3+B(I)
     H3=H3+H(I)
 End do
      B3S=B3/3.
      H3S=H3/3.
      CH=0.
      ZN=0.
      DO  I=1+J,3+J
      CH=CH+(B(I)-B3S)*(H(I)-H3S)
     ZN=ZN+(B(I)-B3S)**2
 End do
      A=CH/ZN
      HR(K)=A*(B(K)-B3S)+H3S
      IF(J==0)HR(1)=A*(B(1)-B3S)+H3S
      IF(J==(KT-3))HR(KT)=A*(B(KT)-B3S)+H3S
End do
                          do  ii=1,kt
         h(ii)=hr(ii)
 End do
      return
      END
```

3) модуль SPLAIN,

```
    SUBROUTINE SPLAIN(B,H,N,Z)
    ! Определение коэффициентов кубического сплайна
  !   external gaus
    integer i, j, n
   DIMENSION B(N),H(N),A(N,N),Z(N),DB(100),DH(100),C(2), x(n)
!write(*,*) "splain-tect simq n = ", n
!write(6,*) "splain-tect simq n= ", n
```

```
  DO 11 I=1,N
    DO 10 J=1,N
 10  A(I,J)=0.0
 11 continue
    NM1=N-1
    DO 20 I=2,N
    DB(I)=B(I)-B(I-1)
 20  DH(I)=H(I)-H(I-1)
    DO 50 I=2,NM1
    A(I,I-1)=DB(I)/6.0
    A(I,I+1)=DB(I+1)/6.0
    A(I,I)=(DB(I)+DB(I+1))/3.0
    Z(I)=DH(I+1)/DB(I+1)-DH(I)/DB(I)
 50  CONTINUE
    BS=(B(1)+B(2))/2.0
    DO  65 I=1,2
 65  C(I)=((BS-B(I))/DB(2))**2
    A(1,1)=3.0*(1.0-C(2))
    A(1,1)=3.0*(1.0-C(2))
    A(1,2)=3.0*C(1)
!     Z(1)=DH(2)/DB(2)*(6.0/DB(2)-1.0)
    Z(1)=0.
    BS=(B(N-1)+B(N))/2.0
    DO 75 I=1,2
 75  C(I)=((BS-B(N-2+I))/DB(N))**2
    A(N,N-1)=3.0*C(2)
    A(N,N)=3.0*(1.0-C(1))
!     Z(N)=DH(N)/DB(N)*(1.0-6.0/DB(N))
    Z(N)=0.
   !                    write(*,1) (z(M),M=1,n)
   ! Метод прогонки: расчёт коэффициентов кубического сплайна
    CALL Prog(A,Z,N,X)
     !                    write(*,2) (z(M),M=1,n)
        !                  write(*,3) (x(M),M=1,n)

              !  1    FORMAT(' z1',12G12.4)
               !     2    FORMAT(' z2',12G12.4)
                  !     3    FORMAT(' x3',12G12.4)
    RETURN

  CONTAINS
! Решение системы ЛАУ с трёхдиагональной матрицей коэффициентов.
      subroutine Prog(A,B,N,X)
  DIMENSION a(N,N),b(N),x(N)
  real  f
 integer    i,im1,ip1,nm1
```

```
 !          прямой ход
          do  i=2, n
           im1 =i-1
            f =a(i,im1)/a(im1,im1)
           a(i,i)=a(i,i)-f*a(im1,i)
           b(i)=b(i)-f*b(im1)
           end do

! обратный ход - оределение искомых коэффициентов кубического сплайна
      x(n)=b(n)/a(n,n)
      nm1=n-1
      do i=nm1, 1
        ip1=i+1
      x(i)=(b(i)-x(ip1)*a(i,ip1))/a(i,i)
      end do

 end SUBROUTINE
  END
```

4) модуль GAUS2,

```
      subroutine GAUS2(A,B,N,X)
! External procedure GAUS2(Gaussian method) - determination of derivatives of currents and magnetic
fluxes
           DIMENSION a(N,N),b(N),x(N)
  !                          write(6,*) "Gaus2-test1 rkf4 N=" , N
  !                          write(*,*) "Gaus2-test1 rkf4 N=" , N
           NM1=N-1
           DO 303 K=1,NM1
!         aa
           KP1=K+1
           L=K
           DO 400 I=KP1,N
           IF(ABS(A(I,K))-ABS(A(L,K))) 400,400,401
 401         L=I
 400         CONTINUE
           IF(L-K) 500,500,405
 405         DO 410 J=K,N
           TEMP=A(K,J)
           A(K,J)=A(L,J)
 410         A(L,J)=TEMP
  !                          write(6,*) "Gaus-test2"

           TEMP=B(K)
           B(K)=B(L)
           B(L)=TEMP
!          xx
```

```
!        yy
 500              DO 300  I=KP1,N
                F=A(I,K)/A(K,K)
                        !  write(6,*) "Gaus-test3", F, i, k, a(i,k), a(k,k)
                A(I,K)=0.
                        !  write(6,*) "Gaus-test4"
                DO 301 J=KP1,N
                        ! write(6,*) "Gaus-test5", F ,i, j, A(I,J), k, a(k,j)
              A(I,J)=A(I,J)-F*A(K,J)
  301         continue
                        !  write(6,*) "Gaus-test6", F ,i, j, A(I,J)
              B(I)=B(I)-F*B(K)
                        !  write(6,*) "Gaus-test7", F, i, b(i)
  300           continue
                        ! write(6,*) "Gaus-test8", F, i, b(i)
   303            continue
                        ! write(6,*) "Gaus-test9", F, i, b(i)

!        zz
                    X(N)=B(N)/A(N,N)
                    I=NM1
 710                  IP1=I+1
                    S=0
                    DO 700 J=IP1,N
 700                  S=S+A(I,J)*X(J)
                    X(I)=(B(I)-S)/A(I,I)
                    I=I-1
                   IF(I) 800,800,710
  800         RETURN
            END
```

5) модуль RKF4.

```
      SUBROUTINE RKf4(P,W,N,f)
  !    external fct, outp
  !Implementation of the Runge-Kutta method with Felberg's modification:
!   determination of the required quantities - instantaneous values
!   of currents and magnetic fluxes as a function of time
        DIMENSION y(n), w(n), a(n),b(n),c(n),d(n),e(n),u(n), f(n), P(5)
        integer e3
 !        write(*,*) "RKtest1"  , n
        X =P(1) ! begin X = 0 c
        XK=P(2) ! end X = 0.2 c
        H =P(3) ! initial value of step h = 0.0002
        E1=P(4) ! specified accuracy -  0.00001
        do 13 i=1,n
 13       Y(i)=W(i)
                C1=1./9.
```

```
                C2=1./64.
                C3=1./2.4
                C4=1./15.
                C5=1./144.
                C6=1./6.
      C7=1./45.
      C8=1./75.
                C9=1./150.
      C10=1./12.
      C11=1./432.
                C13=1./27
!               write(*,*) "RKtest2"
        CALL OUTP(X)
!                 write(*,*) "RKtest3"
 110          e3 = 0
!       write(*,*) "RKtest4"
        CALL FCT(X,Y,F,N)
        N1=0
        DO 1 J=1,N
        A(J)=F(J)*H
 1       Y(J)=W(J)+2.*A(J)*c1
        X=X+2.*H*c1
!                 write(*,*) "RKtest5"
        CALL  FCT(X,Y,F,N)
        DO 2 J=1,N
        B(J)=H*F(J)
 2       Y(J)=W(J)+A(J)*c10+b(J)*0.25
        x=x+h*c1
        CALL FCT(X,Y,F,N)
        DO 3 J=1,N
        C(J)=F(J)*H
 3       Y(J)=W(J)+(34.5*a(j)-121.5*b(j)+135.*c(j))*c2
        X=X+H*c3
        CALL FCT(X,Y,F,N)
        DO 4 J=1,N
        D(J)=F(J)*H
        Q=W(J)-17.*A(J)*C10+6.75*B(J)
 4       Y(J)=Q-5.4*C(J)+16.*D(J)*C4
        X=X+H*0.25
        CALL FCT(X,Y,F,N)
        DO 5 J=1,N
        E(J)=F(J)*H
        Q=W(J)+65.*A(J)*C11-0.3125*B(J)
 5        Y(J)=Q+0.8125*C(J)+4.*D(J)*C13+5.*E(J)*C5
        X=X-H*C6
        CALL FCT(X,Y,F,N)
```

```
        DO 260 J=1,N
        U(J)=H*F(J)
        Y(J)=W(J)+A(J)*C1+0.45*C(J)+16.*D(J)*C7+E(J)*C10
              Q=A(J)*C9-0.03*C(J)+16.*D(J)*C8+E(J)*0.05
        E2=ABS(Q-0.24*U(J))
        IF(E2<=E1) GOTO 250
        E3=1
        GOTO 260
250       IF(E2<(E1*0.05))  N1=N1+1
260       CONTINUE
        X=X+H*C6
        CALL FCT(X,Y,F,N)
        IF(E3==0)  GOTO  290
        X=X-H
        DO 6 J=1,N
6         Y(J)=W(J)
        H=H*0.5
        GOTO  110
290       IF(N1==n)  H=H+H
        if(h>p(3))  h=p(3)
        CALL OUTP(X)
        do 15 j=1,n
15         W(j)=Y(j)
        IF(X>=XK)  GOTO 7
 goto  110
 7        RETURN
CONTAINS

  SUBROUTINE OUTP(X)
  !Procedure OUTP - Output of results: instantaneous values
  ! of currents, voltages, magnetic inductions
    DIMENSION Bst(3),fi(10),bst3(3)
    COMMON /EU1/ ULMAB, ULMBC,UAB,UBC,Ua2x,Ub2x,Uc2x,Ea1 &
      /EU1a/ UfAm,UfBm,UfCm, UfA,UfB,UfC, UfAmm, UfBmm, UfCmm,UfAm1,UfBm1,UfCm1 &
    /EU2/ WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,Wa2x,Wb2x,Wc2x   &
          /EU8/ Bst,fi,bst3
!          WRITE(*,*) "RKtest2a"
!                  IF(ABS(X-A)-0.000001) 8,8,6
  !   WRITE(7,99) X,(bst(I),I=1,3)
  !   WRITE(8,*) X,(bst3(I),I=1,3)
  !    WRITE(9,*) X,bst9

    WRITE(10,*) X,bst(1),bst(2),bst(3)
    WRITE(12,*) X,fi(5),fi(7) ,fi(9)
    WRITE(14,*) X,fi(6),fi(8),fi(10)
  !   WRITE(15,*) X,Ua2x,Ub2x,Uc2x
```

```
      WRITE(16,*) X,UfAmm, UfBmm, UfCmm
  !    WRITE(17,*) X,Ea1
        RETURN
 !   99   FORMAT(10G16.6)
  !  5 FORMAT(T2,F9.7,1X,9(F6.3,1X))
  !  7 FORMAT(T2,F9.7,1X,3(F9.4,1X))
!    9 FORMAT('+',T35,3(F8.2,1X))
 !  20     FORMAT(' ',F9.7,1X,-4P4F9.1)
!   30     FORMAT('+',T55,4(F7.3,1X))
        END SUBROUTINE

      SUBROUTINE FCT(X,Y,ff,n)
 ! Procedure FCT - formation of a matrix of coefficients and a column vector of free members
external gaus2
        REAL       LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn
      DIMENSION Y(10),FI(10),PC(4),BST(3),BerV(3),BerN(3), B(10),bst3(3),&
             BEXPER(42),HEXPER(42),Rsi(42), COFs(42),Reri(42), COFer(42), &
             A(10,10),UMGN(2),BTEK(10),ff(10),x3(10),Rs(3),RerV(3),RerN(3)
      COMMON /EU1/ ULMAB, ULMBC,UAB,UBC,Ua2x,Ub2x,Uc2x,Ea1 &
         /EU1a/ UfAm,UfBm,UfCm, UfA,UfB,UfC, UfAmm, UfBmm, UfCmm,UfAm1,UfBm1,UfCm1 &
            /EU2/ WA1,WB1,WC1,Wa2,Wb2,Wc2,Wa2x,Wb2x,Wc2x   &
           /EU3/ RA1,RB1,RC1,Ra2,Rb2,Rc2,Ran,Rbn,Rcn,Rd   &
           /EU4/ DLs,DLer, Ss,Ser,ks  &
           /EU5/ UF,ii   &
           /EU6/ NEXPER,BEXPER,HEXPER   &
           /EU7/ Rsi,COFs, Reri, COFer    &
           /EU8/ Bst,fi,bst3   &
           /EU10/  LA1,LB1,LC1,La2,Lb2,Lc2,Lan,Lbn,Lcn
       APRLIN(X2,X1,Y1,X2Y2)=Y1+(X2Y2)*(X2-X1)
 !                          write(*,*) "FCTtest1" , n

       ii=1
      T=X
   !                            write(*,666) T,(Y(I),I=1,n)
             DO 2001 I=ks+1,n
 2001 FI(I)=Y(I)
             DO 3001 I=1,ks
 3001                   PC(I)=Y(I)
!  Ua2x = PC(1)* Wa2x * 0.001
!  Ub2x = (PC(2)-PC(1))* Wb2x * 0.001
 ! Uc2x = -PC(2)* Wc2x * 0.001
 ! Ea1 = PC(1)* Wa1 * 0.0001

            !                            do 1 i=1,11
               Bst(1)= PC(1)/Ss
               Bst(2)=(PC(2)-PC(1))/Ss
```

```
            Bst(3)= -PC(2)/Ss
          BerV(1)=(PC(1)+PC(3))/Ser
          BerV(2)=(PC(2)+PC(3))/Ser
          BerV(3)= PC(3)/Ser
          BerN(1)=(PC(1)+PC(4))/Ser
          BerN(2)=(PC(2)+PC(4))/Ser
          BerN(3)= PC(4)/Ser
                                do 1 i=1,3
              Btek(i)=Bst(i)
              Btek(i+3)=BerV(i)
1              Btek(i+6)=BerN(i)

                          nn=0
33        continue
                                                DO 3 K=1,3
                  knn=k+nn
                   if(BTEK(Knn)>=0.) GOTO 15
            BTEK(Knn)=ABS(BTEK(Knn))
  15 CONTINUE
                    NNEXP=21
    IF(BTEK(Knn)>BEXPER(NNEXP)) GOTO 300
                   NL=1
                   NR=11
                   ND=10
    GOTO 299
  300 CONTINUE
                   NL=22
                   NR=32
                   ND=10
    IF(BTEK(Knn)<BEXPER(22)) GOTO 38
  299 CONTINUE
              DO 301 I=NL,NR,ND
    IF(BTEK(Knn)>BEXPER(I+ND)) GOTO 301
                              NL=I
    GOTO 302
  301 CONTINUE
                   NL=41
!                  NR=42
        GOTO 295
  302 CONTINUE
                   NR=NL+ND
           IF(ND==5) GOTO 296
           IF(ND==1) GOTO 295
                   ND=5
                   NR=NR-5
    GOTO 299
```

```
 296 CONTINUE
                    ND=1
                    NR=NR-1
    GOTO 299
 295 CONTINUE
                    goto 19
38                    nL=21
19      continue
                                        if(nn.eq.3) goto 101
                            if(nn.eq.6) goto 102
        Rs(K)=APRLIN(BTEK(K),BEXPER(NL),Rsi(NL),COFs(NL))
     !          write(*,779) NL,BEXPER(NL),K,BTEK(K),Rsi(NL),RST(K)
!                       write(1,777) NL,BEXPER(NL),k,BTEK(K)
                                        if(nn.eq.0) goto 3
101      continue
        RerV(K) =APRLIN(BTEK(Knn),BEXPER(NL),Reri(NL),COFer(NL))
        if(nn.eq.3) goto 3
102      RerN(K) =APRLIN(BTEK(Knn),BEXPER(NL),Reri(NL),COFer(NL))
3       continue
        if(nn.eq.3) goto 202
        if(nn.eq.6) goto 203
        nn=3
        goto 33
202       nn=6
        goto 33
203       continue
!    3 CONTINUE
             DO 18 I=1,n
             DO 18 J=1,n
   18            A(I,J)=0.
!                do 58 j=1,ks
!58                a(j,j)=Rst(j)
!----------------
    !               if(t>0.1) Lan= 0.00032
      !             if(t>0.1) Lbn=3200.0
        !           if(t>0.1) Lcn=3200.0

     !     Wa2 = 0.0
        ! Wb2 = 0.0
       !  Wc2 = 0.0
 !                  if(t>=0.1) Wa2=60.0
  !                 if(t>=0.1) Wb2=60.0
   !                if(t>=0.1) Wc2=60.0
 A(1,1)= Rs(1)+Rs(2)+RerV(1)+RerN(1)+4*Rd
  A(1,2)=-(Rs(2)+2*Rd)
  A(1,3)= RerV(1)
```

```
 A(1,4)= RerN(1)
 A(1,5)= WA1
 A(1,6)=-Wa2
 A(1,7)=-WB1
 A(1,8)= Wb2
        A(2,1)=-(Rs(2)+2*Rd)
   A(2,2)= Rs(2)+Rs(3)+RerV(2)+RerN(2)+4*Rd
   A(2,3)= RerV(2)
   A(2,4)= RerN(2)
        A(2,7)= WB1
        A(2,8)=-Wb2
        A(2,9)=-WC1
        A(2,10)=Wc2
              A(3,1)=  RerV(1)
                   A(3,2)=  RerV(2)
              A(3,3)=  RerV(1)+ RerV(2)+ RerV(3)
                      A(4,1)= RerN(1)
                           A(4,2)= RerN(2)
                      A(4,4)= RerN(1)+RerN(2)+RerN(3)
                   A(5,1)=-(WA1+WB1)
                   A(5,2)= WB1
                   A(5,5)= LA1
                   A(5,7)=-LB1
                                  A(6,1)= Wa2+Wb2
                                  A(6,2)=-Wb2
                                        A(6,6)=  La2+Lan
                                        A(6,8)=-(Lb2+Lbn)
                                         A(7,1)=  WB1
                                         A(7,2)=-(WB1+WC1)
                                               A(7,7)= LB1
                                               A(7,9)=-LC1
                                                  A(8,1)= -Wb2
                                                  A(8,2)=  Wb2+Wc2
                                                         A(8,8)=   Lb2+Lbn
                                                       A(8,10)=-(Lc2+Lcn)
                   DO 77 L=5,9,2
                     A(9,L)= 1.
 77                   A(10,L+1)= 1.
!-----------------------------------
            !    write(*,111)ii
      !     if(ii.le.9)    WRITE(*,88)((A(I,J),J=1,n),I=1,n)
         DO 50 I=1,n
  50        b(I)=0.0
!  xx
           ! if(t>=0.04) ulmab=sqrt(2.)*Uab*1.03
           ! if(t>=0.04) ulmbc=sqrt(2.)*Ubc*1.03
```

```
! yy

!   if(t<0.06) UfAm=UfAm1
!  if(t<0.06) UfBm=UfBm1
! if(t<0.06) UfCm=UfCm1
!  if(t>=0.06) UfAm=UfAm1*1.1
!  if(t>=0.06) UfBm=UfBm1*1.1
!  if(t>=0.06) UfCm=UfCm1*1.1
!   if(t>0.14) UfAm=UfAm1
!   if(t>0.14) UfBm=UfBm1
!  if(t>0.14) UfCm=UfCm1

!   if(t<0.06) Ran=50000.0
!   if(t<0.06) Rbn=50000.0
!   if(t<0.06) Rcn=50000.0
!   if(t>=0.06) Ran=50000.0*1.1
!  if(t>=0.06) Rbn=50000.0*1.1
!   if(t>=0.06) Rcn=50000.0*1.1
!   if(t>0.14) Ran=50000.0
!    if(t>0.14) Rbn=50000.0
!   if(t>0.14) Rcn=50000.0
! zz
!    if(t>=0.14) ulmab=sqrt(2.)*UAB
!   if(t>=0.14) ulmbc=sqrt(2.)*UBC
! kz                ulmab=sqrt(2.)*UAB
!    if(t>=0.08) ulmbc=sqrt(2.)*UBC*0
                        TUFa= UF*T
                  TUFb=TUFa-2.094395
                  TUFc=TUFa-4.18879
!    if(t>=0.1) UfAm1 = sqrt(2.0)*6.3005027E+7
!                        if(t>=0.1) UfBm1 = sqrt(2.0)*5.7735027E+7
                        !        if(t>=0.1) UfCm1 = sqrt(2.0)*5.1005027E+7

UfAmm= UfAm1*sin(tufa)
UfBmm= UfBm1*sin(tufb)
UfCmm= UfCm1*sin(tufc)
UMGN(1)=(UfAmm-UfBmm)
UMGN(2)=(UfBmm-UfCmm)

!                  TUF= UF*T
!        UMGN(1)=ULMAB*SIN(TUF)
!                  TUFP=TUF-2.094395
!      UMGN(2)=ULMBC*SIN(TUFP)
Rm = 0.   !   Rm =500000.
!    if(t>=0.1) Ran=7.0E+04
!  if(t>=0.1) Rbn=5.0E+04
```

```
                ! if(t>=0.1) Rcn=1.0E+04

        b(5)= UMGN(1)-FI(5)*RA1 +FI(7)*RB1 - Rm*fI(5)+Rm*fI(7)
        b(6)=       -FI(6)*Ra2 +FI(8)*Rb2 - Ran*fI(6)+Rbn*fI(8)
        b(7)= UMGN(2)-FI(7)*RB1 +FI(9)*RC1 - Rm*fI(7)+Rm*fI(9)
        b(8)=       -FI(8)*Rb2 +FI(10)*Rc2 - Rbn*fI(8)+Rcn*fI(10)
    !     if(ii.le.9)         write(1,99) (b(I),I=1,n)
 !                    write(*,*) "FCTtest2"
! n = 10
!External Procedure gaus2 (Gaussian method) - determination of values of derivatives
! of currents and magnetic fluxes
          CALL gaus2(A,B,n,x3)
        !  if(ii.le.9)            write(*,66) (x3(I),I=1,n)
              !       write(*,*) "FCTtest3"
!  if(ii.le.9)    WRITE(*,88)((A(I,J),J=1,n),I=1,n)

          DO 407 I=1,n
  407     ff(i)   =x3(i)
!             ii=ii+1
     RETURN
!   666                         FORMAT(' T=',F7.5,' K    T ',12G11.4)
 ! 779 FORMAT(' NL=',I2,' BEXP=',F5.2,' K=',I2,' BTEK=',F5.2,2X,2(G11.4,2X))

 !  777                     FORMAT(' NL=',I2,' BEXP=',F5.2,' K=',I2,' BTEK=',F6.3)

 !  88                  FORMAT(' A ',10G11.4)
 ! 99                                  FORMAT(10G13.6)
! 66                                   FORMAT(' x3',12G12.4)
! 111            format(' ii=',i3)
     END SUBROUTINE
          END
```

Окончание текста программы (с. 46 – 60)

Б.9. Файл NR.txt с исходными данными (см. головной модуль NR, с. 46,сл.)

```
0.    0.    0.6    0.81   0.7    1.1   0.8   1.3   0.9   1.52   1.     1.82
1.1    2.13   1.2    2.43   1.3    2.75  1.4   3.2   1.45  3.5    1.5    3.9
 1.55   4.5    1.57   4.78   1.6    5.2   1.63  5.88  1.65  6.32   1.67   6.98
 1.7    8.     1.73   9.4    1.75  10.4   1.77 12.24  1.8  15.     1.83  19.22
 1.84  21.44   1.85  23.66   1.86  25.88  1.87 28.2   1.9  38.25   1.91  42.
 1.92  46.     1.93  52.     1.94  58.    1.95 70.    1.96 82.     1.97  94.
 1.98 109.     1.99 134.     2.   160.    2.01 200.   2.02 250.    2.03 300.
10
57735027.00  57735027.00  57735027.00  600.  600.  600. 60.  60.  60.
   70000.00000    70000.00000    70000.00000
 70.00000    70.00000    70.00000
```

50000.00000 50000.00000 50000.00000 10.
63.0000 63.0000 63.0000
0.0630000 0.063000 0.0630000
32.0000 32.00000 32.0000
77. 55. 270. 270.
50.
0. 0.8 0.0025 0.01
Окончание файла NR.txt

Исходные данные представлены в преобразованной системе единиц ПСЕ [1, с. 278]
Результаты моделирование представлены в системе единиц SI (см. графики на рисунках, с. **21 – 45**)
На основе компьютерной реализации программы проанализированы электромагнитные режимы трёхфазного трансформатора с пространственным магнитопроводом, 250 кВ·А, 10/0,69 кВ:

1. Включение трансформатора на холостой ход, с. 21,сл.
2. Включение трансформатора при нагрузке, с. 24,сл.
3. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) первичного напряжения, с. 28,сл.
4. Переходный процесс при несимметричном напряжении, подведённом к первичной обмотке, с. 31,сл.
5. Переходный процесс при отсутствии напряжения на одной фазе первичной обмотки (обрыв фазы), с. 34,сл.
6. Переходный процесс при набросе (+10 %) и сбросе (-10 %) нагрузки, подключённой к вторичной обмотке, с. 37,сл.
7. Переходный процесс при несимметричной нагрузке, подключённой к вторичной обмотке, с. 40,сл.
8. Подключение нагрузки к вторичной обмотке на холостом ходу трансформатора, с. 43,сл.

При моделировании электромагнитных режимов другого электроэнергетического устройства (другое функциональное назначение или другое устройство магнитопровода или другие схемы обмоток) используется вышеприведённая программа с небольшой модификацией отражающей структуру заполнения ячеек матрицы коэффициентов **A** и вектора- столбца свободных членов **B** в математической модели (**с. 20**).

ВЫВОДЫ

1. Разработана универсальная математическая модель (с. 20) электромагнитных режимов электроэнергетических устройств различного функционального назначения, активная часть которых содержит магнитопровод любой реальной конструкции и любые схемы обмоток.

2. Модель разработана на базе теории нелинейных магнитных и электрических цепей и компьютерных технологий. Модель составляется на основе эквивалентного представления устройств электрической и магнитной схемами с нелинейными сосредоточенными параметрами (с. 17, 18) в соответствии с законами Кирхгофа (нем. *Gustav Robert Kirchhoff*).

3. Кривая намагничивания электротехнической стали и дифференциальная кривая намагничивания аппроксимируются аппаратом кубических сплайнов.

4. Разработана компьютерная Fortran-программа (файлы *.f95; среда программирования Plato32 Version 4.9.0), реализация которой на ПК позволяет проанализировать различные электромагнитные режимы устройств. Для различных устройств программа модифицируется в части касающейся заполнения ячеек матрицы коэффициентов и вектора-столбца свободных членов модели /см. с. 20 и SUBROUTINE FCT(X,Y,ff,n), с. 55 – 60/.

5. В курсе «Моделирование в энергетике» составлена модель электромагнитных режимов (с. 20) трехфазного трёхстержневого симметричного трансформатора с пространственным расположением стержней (рисунки на с. 3 и 16) и проанализированы различные режимы работы (см. графики на с. 21 – 45 и выводы к ним).

6. На основе модификации модели исследованы электромагнитные режимы управляемых электроэнергетических устройств, являющихся предметом научной работы проф. Е.И. Забудского, а именно: насыщающихся и управляемых реакторов, а также умножителей частоты, реализованных на базе магнитопроводов трансформаторного типа и магнитопроводов, выполненных по типу электрической машины с неявновыраженными полюсами, но с неподвижным «ротором» [1].

7. Совокупность учтённых факторов при разработке модели, принятые допущения и сопоставление с данными экспериментальных исследований свидетельствуют об адекватности модели.

Профессор Е. И. Забудский
15 января 2018