

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра электротехники, электропривода
и промышленной электроники

НЕЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. РАСЧЁТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ

Методические указания
к выполнению самостоятельной работы

Новокузнецк
2019

УДК 621.3 (07)
Н 492

Составитель
Князев Валерий Семёнович

Рецензент
кандидат технических наук, доцент кафедры
открытых горных работ и электромеханики СибГИУ
Э.Е. Пугачёва

Н 492 Нелинейная электрическая цепь. Расчёт установившихся режимов [Электронный ресурс] : метод. указ. / Сиб. гос. индустр. ун-т ; сост. В.С. Князев. – Электрон. дан. (1 файл). – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2018. – Систем. требования: Adobe Acrobat 7.0. Загл. с экрана.

Приведены варианты заданий для выполнения самостоятельной работы по расчёту установившихся режимов в электрической цепи с синусоидальным источником энергии, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником. Приведены рекомендации к выполнению самостоятельной работы.

Предназначены для обучающихся всех форм обучения по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профили: «Электропривод и автоматика», «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений».

Публикуется по решению комиссии по совершенствованию учебно-методической работы в Институте информационных технологий и информационных систем (протокол № 1 от 01.02.2019).

Издано в полном соответствии с авторским оригиналом.

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Специальные главы теоретических основ электротехники» является вариативной частью дисциплин (модулей). В курсе «Специальные главы теоретических основ электротехники» знания, полученные в курсах: «Электротехника. Общая часть», «Электротехника. Специальная часть» развиваются в направлении разработки методов анализа, расчета и экспериментального исследования электрических и магнитных цепей, электрических и магнитных полей в электротехнических и электромагнитных устройствах. Эти знания в процессе подготовки получают дальнейшее развитие в дисциплинах по направлениям подготовки.

Для углубления и закрепления теоретических знаний, полученных на лекционных и практических занятиях, учебными планами предусмотрено выполнение обучающимися индивидуальной самостоятельной работы.

Предлагаемая работа посвящена методике расчёта установившихся режимов в электрических цепях с синусоидальными источниками энергии, содержащих катушку со стальным сердечником с учётом нелинейности его кривой намагничивания.

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАЧИ

1. Для заданной кривой намагничивания $B(H)$ сердечника катушки из электротехнической стали (таблицы 3 ÷ 10) получить аппроксимирующее выражение в виде степенного полинома: $H = a_1 \cdot B + a_3 \cdot B^3 + a_5 \cdot B^5 + \dots$ (рабочий диапазон изменения магнитной индукции принять: $B = 0 \div 1,3$ Тл).

По полученному аппроксимирующему выражению составить таблицу значений и построить расчётную кривую намагничивания $B(H)_{\text{расч.}}$. Сравнить расчётную кривую с заданной кривой намагничивания $B(H)$ сердечника катушки.

Примечания:

- 1) Гистерезис кривой намагничивания не учитывается;
- 2) Степени аппроксимирующего полинома выбираются нечётными, так как кривая намагничивания симметрична относительно начала координат;
- 3) Для аналитического расчёта взять три первых элемента аппроксимации (**два – при выполнении расчёта без применения ПК**).

2. Считая напряжение, приложенное к катушке синусоидальным, найти законы изменения тока в идеализированной катушке с сердечником (без учёта гистерезиса кривой намагничивания, без учёта потерь в “стали сердечника”, без учёта потерь в проводах катушки) при различных значениях амплитуды приложенного напряжения.

Наибольшее значение амплитуды синусоидального напряжения необходимо выбрать такой, чтобы ферромагнитный сердечник был насыщен (магнитная индукция в сердечнике $B \approx 1,3$ Тл). Необходимо рассмотреть 6 ÷ 7 режимов катушки с сердечником при меньших значениях амплитуды входного напряжения.

3. Для принятых значений амплитуды входного напряжения (при значениях магнитной индукции в диапазоне: $B_m = 0 \div 1,3$ Тл) найти действующие значение тока в катушке (через гармонические составляющие тока). Построить вольт-амперную характеристику (ВАХ) катушки с ферромагнитным сердечником для действующих значений $U_{LH}(I_L) = U_L(I_L)$.

4. Применяя метод условной линеаризации для индивидуальной нелинейной электрической цепи (рисунок 1), на основании полученной

ВАХ катушки по действующим значениям, рассчитать и построить ВАХ электрической цепи $U(I)$.

Параметры катушки с ферромагнитным сердечником и элементов электрической цепи для группы приведены в таблице 1, для вариантов индивидуальной задачи приведены в таблице 2 (частота напряжения f , сечение однородного сердечника катушки S , длина средней магнитной силовой линии магнитопровода ℓ , число витков катушки W).

Каждая задача контрольной (самостоятельной) работы имеет 19 вариантов. Номер варианта задачи определяется суммой двух последних цифр зачетной книжки обучающегося.

Примечания:

1) Реальные параметры линейных элементов электрической цепи (индуктивности и ёмкости) для индивидуального варианта задачи определяются на основании указанных в таблице 1 значениям базовых параметров для учебной группы (L_0 , C_0) и значениям переводных коэффициентов для параметров элементов индивидуальной задачи (таблица 2) по формулам:

$$L = k_L \cdot L_0; \quad C = k_C \cdot C_0.$$

2) Для активных сопротивлений ветвей электрической цепи принять:

$$R_1 = R; \quad R_2 = 0,5 \cdot R.$$

Таблица 1 – Параметры элементов электрической цепи вариантов задания для групп

	ЗЭ-17	
f , Гц	50	
S , см ²	8	
ℓ , см	70	
R , Ом	80	
L_0 , Гн	0,175	
C_0 , мкФ	35	

Таблица 2 – Параметры линейных элементов электрической цепи
для индивидуального варианта задачи

№ варианта задачи	№ схемы (рисунок 1)	Марка стали сердечника	Число витков W	K _L	K _C
0	1	1411	300	1, 00	1, 00
1	2	1511	320	1, 10	1, 20
2	3	1211	400	1, 15	1, 10
3	4	Ст.3	600	1, 20	1, 30
4	5	2013	250	1, 25	1, 20
5	6	3413	200	1, 30	1, 10
6	7	2412	300	1, 25	1, 00
7	8	2212	250	1, 20	0, 90
8	9	1412	320	1, 15	0, 80
9	10	1512	340	1, 10	1, 25
10	1	1212	420	1, 05	1, 20
11	2	Ст.3	650	1, 00	1, 15
12	3	2013	300	0, 90	1, 10
13	4	3413	220	0, 85	1, 00
14	5	2412	320	0, 80	1, 15
15	6	2214	270	0, 90	1, 20
16	7	1413	340	1, 00	1, 25
17	8	1513	360	1, 10	1, 30
18	9	1311	440	1, 20	1, 15

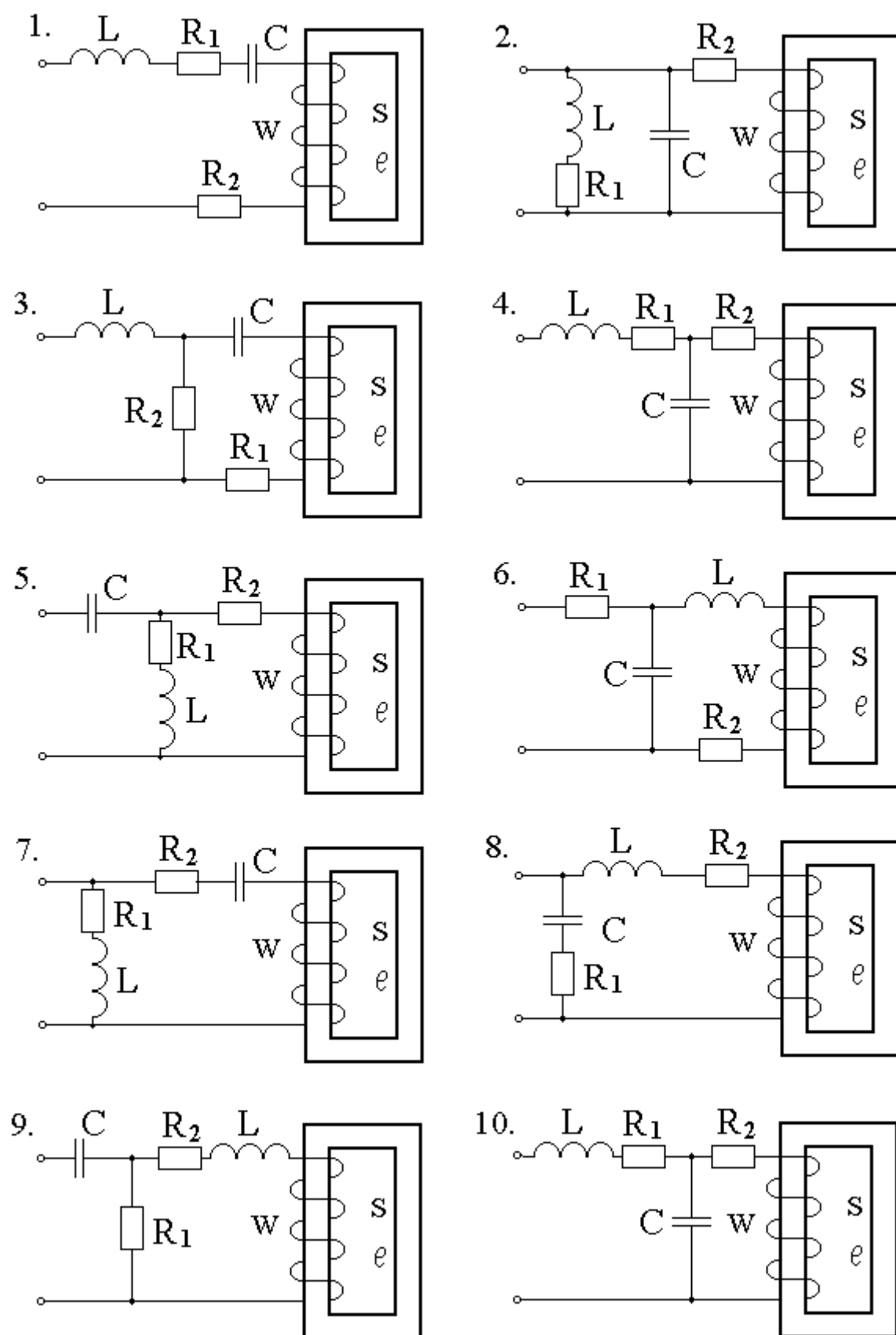


Рисунок 1 – Расчётная схема электрической цепи

Таблица 3 – Листовая электротехническая сталь, марок 1411, 1412, 1413 (повышенно-легированная) – (1)

$B, T_{\text{Л}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/M$	44	56	67	77	90	109	133	166	217	298	444	722	1410

Таблица 4 – Листовая электротехническая сталь, марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная) – (2)

$B, T_{\text{Л}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/M$	52	75	96	114	148	192	254	325	414	538	730	1080	1940

Таблица 5 – Листовая электротехническая сталь, марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная) – (3)

$B, T_{\text{Л}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/M$	86	120	140	171	211	261	318	397	502	647	843	1149	1650

Таблица 6 – Литая сталь, толстые листы (Ст.3), поковки – (4)

$B, T_{\text{Л}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/M$	160	240	320	400	488	584	682	798	924	1090	1290	1590	2090

Таблица 7 – Основная кривая намагничивания стали 2013 – (5)

$B, T_{\text{Л}}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/M$	37	50	56	63	70	78	88	99	110	125	151	200	320

Таблица 8 – Листовая электротехническая сталь (хладнокатаная)
марки 3413 – (6)

$B, Tл$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/м$	23	32	46	62	81	102	128	152	182	213	243	280	328

Таблица 9 – Основная кривая намагничивания стали 2412 – (7)

$B, Tл$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/м$	45	58	67	77	90	109	133	166	217	295	399	640	1230

Таблица 10 – Основная кривая намагничивания
стали 2212, 2214, 2312 – (8)

$B, Tл$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$H, A/м$	50	58	68	76	86	110	140	190	240	300	400	600	1000

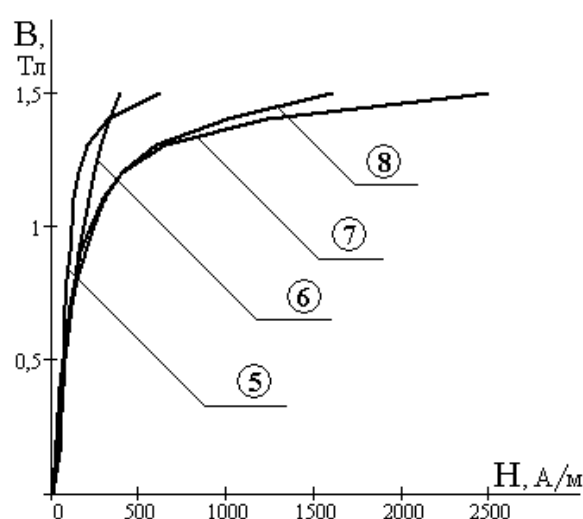
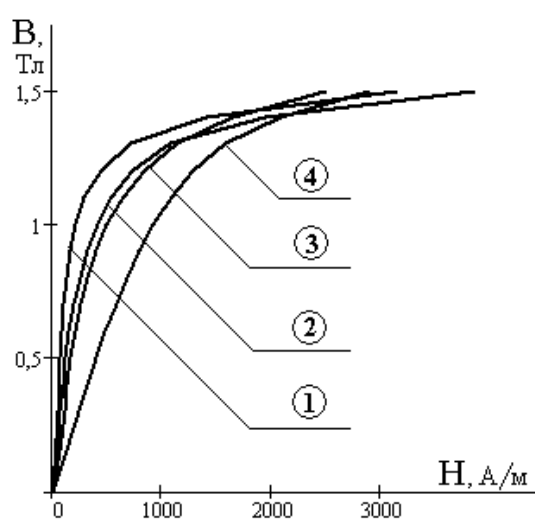


Рисунок 2 – Кривые намагничивания стали сердечника катушки

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Если принять, что в катушке со стальным сердечником магнитный поток рассеяния незначителен, сопротивление проводов катушки ничтожно мало и ими можно пренебречь – идеализированная катушка с сердечником, то магнитный поток в сердечнике (магнитопроводе) идеализированной катушки при синусоидальном приложенном напряжении $u(t) = U_m \cdot \cos(\omega t)$ определяется только ЭДС самоиндукции в катушке:

$$e_L(t) = -u(t) = -U_m \cdot \cos(\omega t); \quad e_L(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} = -W \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}.$$

Тогда магнитный поток в сердечнике изменяется по закону:

$$\Phi(t) = \frac{1}{W} \cdot \int u(t) dt = \frac{U_m}{W \cdot \omega} \cdot \sin(\omega t) + 0 = \Phi_m \cdot \sin(\omega t).$$

Здесь: W – число витков обмотки, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота источника питания.

Таким образом, при приложенном к катушке синусоидальном напряжении магнитный поток в магнитопроводе также синусоидален, изменяется с той же частотой и отстаёт по фазе от напряжения на угол $\pi/2$.

Амплитуда магнитного потока:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega \cdot W} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2\pi f \cdot W} = \frac{U}{4,44 f \cdot W}, \text{ Вб.}$$

Магнитная индукция магнитного поля в сердечнике идеализированной катушки изменяется также по синусоидальному закону:

$$B(t) = \frac{1}{S} \cdot \Phi(t) = B_m \cdot \sin(\omega t). \quad (1)$$

Амплитуда магнитной индукции:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{U_m}{\omega \cdot W \cdot S} = \frac{U}{4,44 f \cdot W \cdot S}, \text{ Тл.} \quad (2)$$

Действующее значение приложенного к катушке напряжения связано с амплитудой магнитного потока (амплитудой магнитной индукции) в сердечнике соотношением:

$$U = U_L = 4,44 f \cdot W \cdot \Phi_m = 4,44 f \cdot W \cdot S \cdot B_m. \quad (3)$$

Определим закон изменения тока в идеализированной катушке графо-аналитическим методом на основе полученного аппроксимирующего выражения для кривой намагничивания материала сердечника без учёта гистерезиса.

Аппроксимирующее выражение для кривой намагничивания материала сердечника принимаем в виде степенного полинома:

$$H = a_1 \cdot B + a_3 \cdot B^3 + a_5 \cdot B^5. \quad (4)$$

Коэффициенты аппроксимирующего полинома a_1, a_3, a_5 для заданного сердечника катушки определяются методом выбранных точек на основании заданной кривой намагничивания материала сердечника (таблицы 3 ÷ 10). Выбираем в рабочем диапазоне характеристики (рисунок 3) три расчётные точки A_1, A_2, A_3 (предварительно разбив рабочий диапазон на четыре примерно равные области) с координатами: $H_1(B_1), H_2(B_2), H_3(B_3)$.

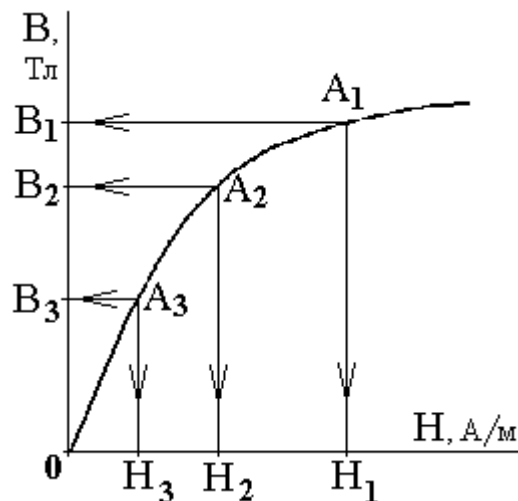


Рисунок 3 – Определение коэффициентов аппроксимирующего полинома заданной кривой намагничивания

Для определения коэффициентов аппроксимирующего выражения a_1, a_3, a_5 заданной кривой намагничивания сердечника катушки получаем систему трёх уравнений:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= a_1 \cdot B_1 + a_3 \cdot B_1^3 + a_5 \cdot B_1^5; \\ H_2 &= a_1 \cdot B_2 + a_3 \cdot B_2^3 + a_5 \cdot B_2^5; \\ H_3 &= a_1 \cdot B_3 + a_3 \cdot B_3^3 + a_5 \cdot B_3^5. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) определит коэффициенты аппроксимирующего полинома (4) заданной кривой намагничивания материала сердечника: a_1 , a_3 , a_5 .

С помощью программы компьютерной математики MathCad коэффициенты аппроксимирующего полинома кривой намагничивания сердечника определяются:

$$M := \begin{vmatrix} B_1 & B_1^3 & B_1^5 \\ B_2 & B_2^3 & B_2^5 \\ B_3 & B_3^3 & B_3^5 \end{vmatrix}; \quad N := \begin{vmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{vmatrix}; \quad a_k := M^{-1} \cdot N; \quad a_k = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_3 \\ a_5 \end{vmatrix}.$$

$$H(B)_{\text{расч.}} = a_1 \cdot B + a_3 \cdot B^3 + a_5 \cdot B^5. \quad (6)$$

Заданная (табличная) и расчётная кривые намагничивания сердечника катушки приведены на рисунке 4.

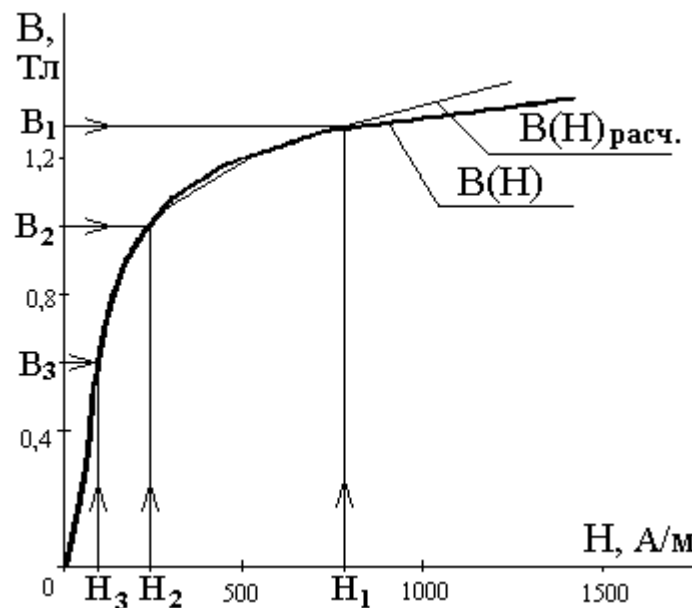


Рисунок 4 – Заданная (табличная) и расчётная кривые намагничивания материала сердечника

Связь между током в катушке и напряженностью магнитного поля в сердечнике определится на основании второго закона Кирхгофа для магнитной цепи. Для идеализированной катушки с однородной магнитной цепью имеем один участок разбиения:

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot \ell_k = F, \quad \text{где } n = 1.$$

Магнитодвижущая сила (МДС) катушки с числом витков обмотки W определяется током в катушке $i(t)$:

$$F(t) = W \cdot i(t).$$

Уравнение связи между током в катушке и магнитной индукцией магнитного поля в сердечнике с учётом аппроксимирующего выражения кривой намагничивания сердечника (4) запишется:

$$i(t) = \frac{\ell}{W} \cdot H(t) = \frac{\ell}{W} \cdot [a_1 \cdot B(t) + a_3 \cdot B^3(t) + a_5 \cdot B^5(t)]. \quad (7)$$

Здесь: W – число витков обмотки; ℓ – длина средней магнитной силовой линии магнитопровода катушки.

Магнитная индукция в сердечнике катушки изменяется по синусоидальному закону (1, 2).

Закон изменения тока в катушке со стальным сердечником определится на основании выражения (7) и закона изменения магнитной индукции в сердечнике при заданном входном напряжении (1).

После подстановки в полученное выражение для тока (7) закона изменения магнитной индукции в сердечнике (1), в результате математических преобразований получаем выражение для тока в катушке со стальным сердечником:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{\ell}{W} \cdot [a_1 \cdot B_m \cdot \sin \omega t + a_3 \cdot (B_m \cdot \sin \omega t)^3 + a_5 \cdot (B_m \cdot \sin \omega t)^5] = \\ &= \frac{\ell}{W} \cdot \left[a_1 \cdot B_m \cdot \sin \omega t + a_3 \cdot B_m^3 \cdot \frac{1}{4} (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) + \right. \\ &\quad \left. + a_5 \cdot B_m^5 \cdot \frac{1}{4} (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) \right]; \\ i(t) &= \frac{\ell}{W} \cdot \left[a_1 \cdot B_m \cdot \sin \omega t + \frac{3}{4} a_3 \cdot B_m^3 \cdot \sin \omega t - \frac{1}{4} a_3 \cdot B_m^3 \cdot \sin 3\omega t + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{8} a_5 \cdot B_m^5 \cdot (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t - 3 \sin \omega t \cdot \cos 2\omega t + \right. \\ &\quad \left. + \sin 3\omega t \cdot \cos 2\omega t) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i(t) &= \frac{\ell}{W} \cdot \left[\left(a_1 \cdot B_m + \frac{3}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{3}{8} a_5 \cdot B_m^5 \right) \cdot \sin \omega t - \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{1}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{1}{8} a_5 \cdot B_m^5 \right) \cdot \sin 3\omega t - \frac{3}{8} a_5 \cdot B_m^5 \cdot \frac{1}{2} (\sin(-\omega t) + \sin 3\omega t) \right] + \\
&\quad + \frac{1}{8} a_5 \cdot B_m^5 \cdot \frac{1}{2} (\sin \omega t + \sin 5\omega t) = \\
&= \frac{\ell}{W} \cdot \left[\left(a_1 \cdot B_m + \frac{3}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{5}{8} a_5 \cdot B_m^5 \right) \cdot \sin \omega t - \right. \\
&\quad \left. - \left(\frac{1}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{5}{16} a_5 \cdot B_m^5 \right) \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{16} a_5 \cdot B_m^5 \cdot \sin 5\omega t \right] = \\
&= I_{1m} \cdot \sin \omega t - I_{3m} \cdot \sin 3\omega t + I_{5m} \cdot \sin 5\omega t. \tag{8}
\end{aligned}$$

Амплитудные значения составляющих тока в катушке первой, третьей и пятой гармоник определяются:

$$\begin{aligned}
I_{1m} &= I_m^{(1)} = \frac{\ell}{W} \cdot \left[a_1 \cdot B_m + \frac{3}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{5}{8} a_5 \cdot B_m^5 \right]; \\
I_{3m} &= I_m^{(3)} = \frac{\ell}{W} \cdot \left[\frac{1}{4} a_3 \cdot B_m^3 + \frac{5}{16} a_5 \cdot B_m^5 \right]; \\
I_{5m} &= I_m^{(5)} = \frac{\ell}{W} \cdot \left[\frac{1}{16} a_5 \cdot B_m^5 \right].
\end{aligned} \tag{9}$$

Ток в катушке с сердечником несинусоидальный (рисунок 4).

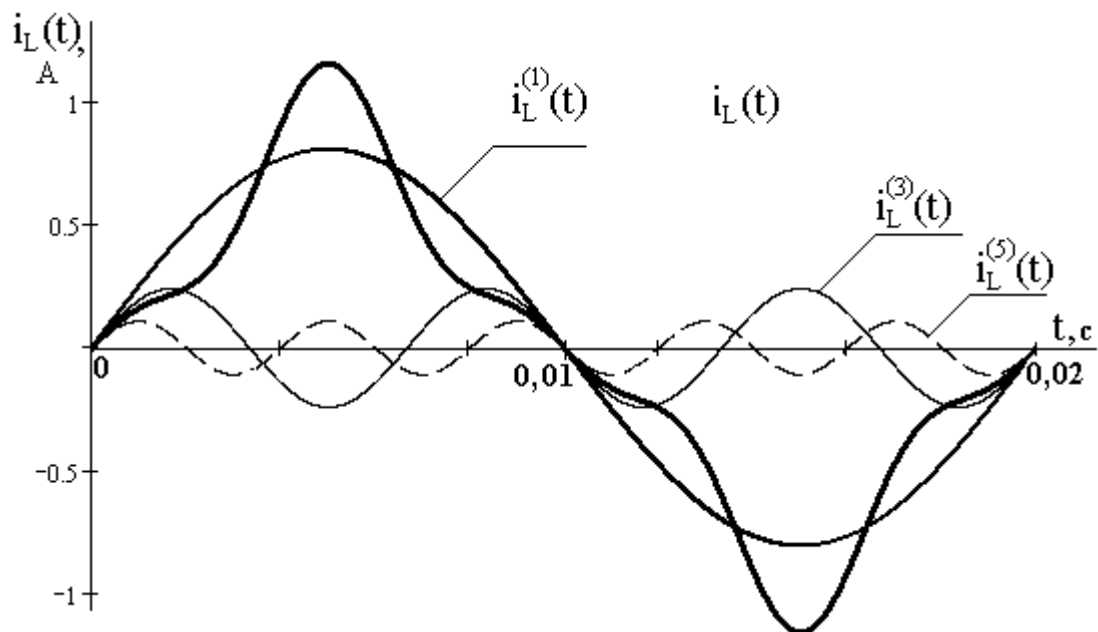


Рисунок 5 – Закон изменения тока в катушке с сердечником

Кривая тока в идеализированной катушке с ферромагнитным сердечником без учёта гистерезиса кривой намагничивания содержит только синусные составляющие нечётных гармоник (симметрия кривой тока относительно начала координат и относительно оси абсцисс). В сравнении с синусоидой кривая тока имеет заострённую (пикообразную) форму, так как максимумы составляющих тока 1-й, 3-й и 5-й гармоник совпадают при $\omega t = \frac{\pi}{2}$, $\omega t = 3 \cdot \frac{\pi}{2}$ и т. д.

Таким образом, максимальное значение тока:

$$I_{\max} = I_{1m} + I_{3m} + I_{5m}.$$

Действующее значение несинусоидального тока в катушке определится через действующие значения составляющих гармоник:

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} = \sqrt{\frac{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2}. \quad (10)$$

Задаваясь значениями магнитной индукции в рабочем диапазоне ($B_m = 0 \div 1,3$), определяем действующее значение напряжения на катушке (формула 3), значения амплитуд гармоник тока (формулы 9), действующее значение тока в катушке (формула 10). Результаты расчёта напряжений и токов сводим в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты расчёта ВАХ катушки

B_m , Тл	U_L , В	$I_m^{(1)}$, А	$I_m^{(3)}$, А	$I_m^{(5)}$, А	I_L , А
1, 3	...	...	...	...	...
1, 2	...	...	...	...	...
1	...	...	...	...	...
0, 8	...	...	...	...	...
0, 6	...	...	...	...	...
0, 4	...	...	...	...	...
0, 2	...	...	...	...	...

По результатам расчёта фиксированных режимов для катушки с сердечником (таблица 11) строим вольт-амперную характеристику (ВАХ) катушки с ферромагнитным сердечником $U_L(I_L)$.

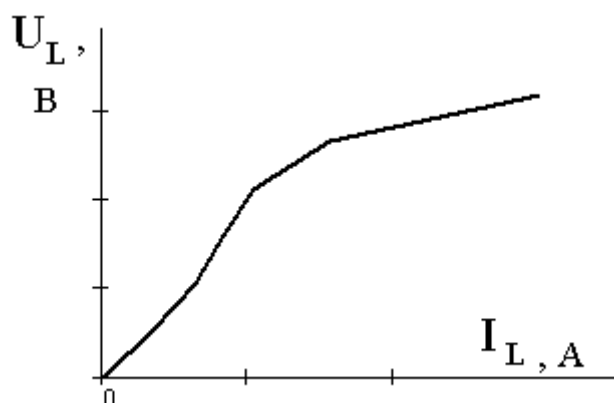


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика (ВАХ) катушки со стальным сердечником

Расчёт заданной электрической цепи, содержащей катушку с сердечником и линейные элементы (рисунок 7), выполняем на основе метода условной линеаризации (частный случай метода гармонического баланса).

Метод условной линеаризации заключается в замене фактических несинусоидальных токов и напряжений нелинейной электрической цепи их эквивалентными синусоидами. В основе метода лежит принцип замены несинусоидальных периодических величин эквивалентными синусоидами, исходя из условия равенства действующих значений несинусоидального тока и напряжения соответственно действующим значениям тока и напряжения эквивалентных синусоид. Кроме того, активная мощность необратимых потерь в катушке, определяемая через несинусоидальные токи и напряжения, должна равняться активной мощности, выраженной с помощью эквивалентных синусоидальных величин. Период соответствующей эквивалентной синусоиды равен периоду основной гармоники или периоду несинусоидальных кривых тока и напряжения.

Переход к эквивалентным синусоидам тока, напряжения, магнитного потока и т. д. даёт возможность использовать эффективные частотные методы теории линейных электрических цепей для анализа нелинейных электротехнических устройств, записывать все соотношения в комплексной форме и пользоваться векторными диаграммами.

Метод гармонической (условной) линеаризации рассмотрим на примере электрической цепи, изображённой на рисунке 7.

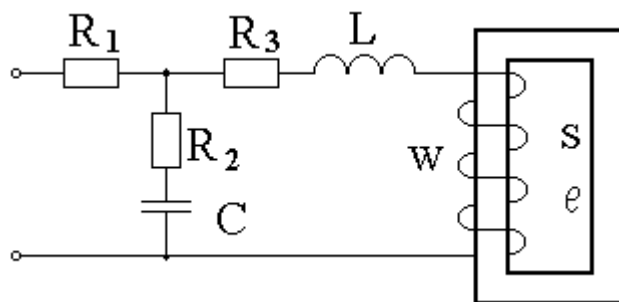


Рисунок 7 – Заданная электрическая цепь

Реальные кривые напряжения, тока и магнитного потока в катушке заменяем эквивалентными синусоидами, а индуктивность принимаем условно-нелинейной и зависящей от тока (связь между действующими значениями эквивалентных синусоид тока и напряжения в катушке нелинейная – таблица 11, рисунок 6). Активными потерями в катушке пренебрегаем.

Принятые допущения позволяют для рассмотрения режимов электрической цепи применить комплексный метод (рисунок 8). Расчёт установившихся режимов электрической цепи выполняется для отдельных точек.

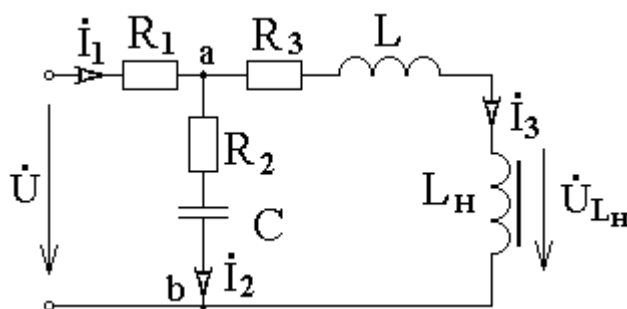


Рисунок 8 – Расчётная схема электрической цепи

Задаёмся комплексным действующим значением тока в ветви с нелинейной индуктивностью для произвольного режима (в соответствии с таблицей 11):

$$\dot{I}_3 = I_L \cdot e^{j \cdot 0^\circ}.$$

Комплексное действующее значение напряжения на нелинейной индуктивности определится по таблице 11 (рисунок 6):

$$\dot{U}_{Ll} = U_L \cdot e^{j \cdot 90^\circ} = j \cdot U_L.$$

Напряжение на параллельных ветвях электрической цепи определится на основании выражения закона напряжений Кирхгофа в комплексной форме для ветви электрической цепи с третьим током (рисунок 8):

$$\dot{U}_{ab} = R_3 \cdot \dot{I}_3 + j \cdot X_L \cdot \dot{I}_3 + \dot{U}_{Li}.$$

Здесь: $X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L.$

Ток во второй параллельной ветви электрической цепи определится на основании закона Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_2 - j \cdot X_C}.$$

Здесь: $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C}.$

Ток на входе электрической цепи (ток в источнике электрической энергии):

$$\dot{I} = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

Комплексное действующее значение напряжения на входе электрической цепи:

$$\dot{U} = R_1 \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_{ab}.$$

Результаты расчёта электрической цепи (рисунок 8) сводим в таблицу 12.

Таблица 12 – Вольт–амперная характеристика (ВАХ) цепи

$U_m,$ Тл	$I_3 = I_L,$ А	$U_L,$ В	$U_{ab},$ В	$I_2,$ А	$I = I_1,$ А	$U,$ В
1, 3	...	...	...	...	...	...
1, 2	...	...	...	...	...	...
1	...	...	...	...	...	...
0, 8	...	...	...	...	...	...
0, 6	...	...	...	...	...	...
0, 4	...	...	...	...	...	...
0, 2	...	...	...	...	...	...

По результатам выполненного расчёта строим ВАХ электрической цепи (рисунок 9).

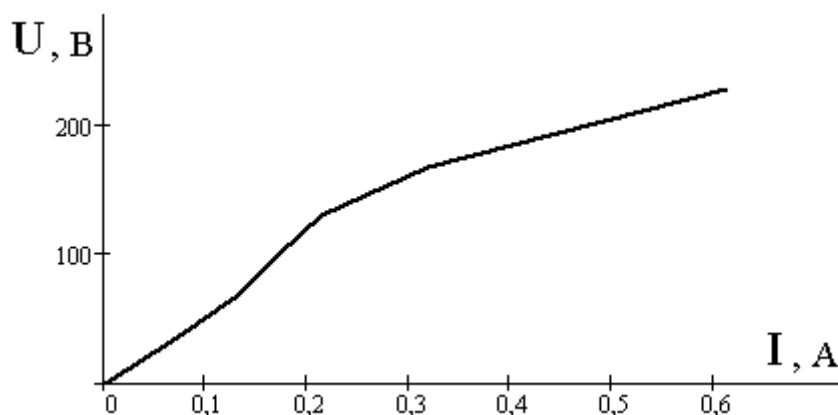


Рисунок 9 – Вольт-амперная характеристика (ВАХ) цепи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

а) основная литература

1. Электротехника и электроника в электромеханических системах горного производства [Электронный ресурс] : учебное пособие / Б. С. Заварыкин [и др.]. – Электрон. дан. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2014. - 304 с. : Режим доступа: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364473>

2. Кузовкин В. А. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебник для академического бакалавриата / В. А. Кузовкин, В. В. Филатов. — Москва : Издательство Юрайт, 2017. — 431 с. — Режим доступа : www.biblio-online.ru/book/D890C457-1709-46C0-B27B-4612963BE37A

3. Атабеков Г.И. Основы теории цепей [Текст] : учебник для вузов / Г.И. Атабеков. – Санкт-Петербург : Лань, 2006. – 424 с.

4. Астайкин А.И. Основы теории цепей [Текст] : учебное пособие для вузов : в 2 т. : Т.1 / А.И. Астайкин, А.П. Помазков. – Москва.: Академия, 2009.– 303 с.

5. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей [Текст] : учебное пособие для вузов / Ю.А. Бычков [и др.] ; под ред. Ю.А.Бычкова, В.М. Золотницкого, Э.П.Чернышёва. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 348 с.

б) дополнительная литература

6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов. – Москва : Юрайт, 2013. – 702 с.

7. Семенцов В.И. Сборник задач по теории цепей [Текст] : учебное пособие для вузов / В.И. Семенцов, В.П. Попов, В.Н. Бирюков. – Москва : Высшая школа, 2009. – 270 с.

8. Попов В.П.: Основы теории цепей [Текст] : учебник для вузов / В.П. Попов. – 5-е изд.. – Москва : Высшая школа, 2005. – 575 с.

9. Бакалов В.П. Основы теории цепей [Текст]: учебник для вузов/ В.П. Бакалов. – Москва : Радио и связь, 2000. – 589 с.

10 Основы теории цепей [Текст] : учебник для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

11. Бычков Ю.А. Основы теории электрических цепей [Текст] : учебник для вузов / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышёв. – Санкт-Петербург : Лань, 2004. – 464 с.

12. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники [Текст] : учебное пособие для вузов / В.А. Прянишников. – Санкт-Петербург : КОРОНА принт, 2000. – 366 с.