

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

***ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И  
АППАРАТЫ***

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к выполнению расчетно-графических работ  
для студентов специальности 1-36 08 01 «Машины и аппараты легкой,  
текстильной промышленности и бытового обслуживания»**

**Витебск  
2015**

УДК 621.3(07)

Электротехника, электрические машины и аппараты: методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 1-36 08 01 «Машины и аппараты легкой, текстильной промышленности и бытового обслуживания»

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2014 .

Составители: к.т.н., доц. Попов Ю.В.,  
к.т.н., доц. Новиков Ю.В.

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой курса «Электротехника, электрические машины и аппараты». Приведены требования к выполнению и оформлению расчетно-графических работ, варианты заданий, методические указания к выполнению работ и примеры расчетов.

Одобрено кафедрой «Автоматизации технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» «29» августа 2014 г., протокол № 1 .

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Сычев И.Ю.  
Редактор: к.т.н. Надежная Н.Л.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» «18» сентября 2014 г., протокол № 6 .

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 17.12.15. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 1.9.  
Печать ризографическая. Тираж 50 экз. Заказ № 356.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий N 1 / 172 от 12 февраля 2014 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие методические указания к выполнению расчетно-графических работ.....	4
2	Задание к расчетно-графической работе № 1 Расчет цепи синусоидального тока.....	5
3	Значения параметров пассивных элементов цепи и электродвижущей силы источника.....	5
4	Схемы электрических цепей синусоидального тока.....	7
5	Методические указания к выполнению расчетно-графической работы № 1.....	12
6	Пример расчета цепи синусоидального тока.....	15
7	Задание к расчетно-графической работе № 2 Расчет и построение статических характеристик электропривода постоянного тока.....	18
8	Каталожные данные значений параметров электродвигателей, используемых в электроприводе.....	19
9	Методические указания к выполнению расчетно-графической работы № 2.....	21
10	Пример расчета и построения статических характеристик электропривода постоянного тока.....	22
	Литература.....	29

## ***1. Общие методические указания к выполнению расчетно-графических работ***

Рабочей программой курса предусмотрено выполнение двух расчетно-графических работ. Приступить к выполнению очередной работы следует после изучения необходимого учебного материала. При оформлении каждой задачи следует приводить исходную схему с принятыми буквенными обозначениями и числами заданных значений. Схемы и графики должны быть выполнены аккуратно с помощью чертежных инструментов и с использованием стандартных графических обозначений элементов и буквенных обозначений величин, на осях координат должны быть указаны откладываемые значения и единицы их измерения. Решения необходимо сопроводить краткими пояснениями. При использовании справочных материалов необходимо назвать источник, делая ссылку на перечень литературы, приведенный в конце работы. Перечень литературы должен быть оформлен в полном соответствии с требованиями библиографического описания документов.

Все расчеты производятся в абсолютных единицах с использованием системы СИ. Решения следует выполнять сначала в общем виде, затем подставлять числовые величины. При наличии значительных однотипных вычислений, приводя два-три расчета в качестве примера, результаты внести в таблицу. Результаты вычислений записывать с точностью до третьей значащей цифры. Арифметическая правильность вычислений и указание размерности является обязательным.

Графики и схемы необходимо приводить в работе по ходу расчета. Выводы формул и уравнений, имеющих в литературе, приводить в тексте работ не следует. Текстовая часть работы должна быть написана аккуратно, четким почерком (или отпечатана). Листы должны быть пронумерованы, слова не сокращать.

Если преподаватель предложит переписать какой-то раздел работы, то в этом случае исправления вносятся в текст с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переписать. Замечания преподавателя не разрешается ни стирать, ни заклеивать.

В методических указаниях предусмотрено 50 вариантов расчетно-графических работ. Номер варианта определяется преподавателем при выдаче задания. На последней странице расчетно-графической работы студент указывает дату и ставит свою подпись.

## 2 Задание к расчетно-графической работе №1 Расчет цепи синусоидального тока

**Задание 1.** Для электрической цепи, схема которой изображена на рисунках 1.1 - 1.50, по заданным в таблице 1.1 параметрам пассивных элементов и э.д.с. источника определить действующие значения и начальные фазы токов во всех ветвях цепи и значение напряжений на отдельных участках. Рассчитать активные, реактивные и полные мощности отдельных участков и всей цепи. Составить уравнения баланса активных и реактивных мощностей. Указать показания приборов, изображенных на рисунке.

### 3 Значения параметров пассивных элементов и э.д.с. источника

Согласно заданному преподавателем варианту, студент из таблицы 1.1 для указанной схемы выписывает значения параметров пассивных элементов цепи, действующее значение э.д.с. и частоту источника. Изображения схем приведены на рисунках в разделе 4.

Таблица 1.1 – Значения параметров элементов цепи и э.д.с. источника

Номера		E, В	f, Гц	C <sub>1</sub> , мкФ	C <sub>2</sub> , мкФ	C <sub>3</sub> , мкФ	L <sub>1</sub> , мГн	L <sub>2</sub> , мГн	L <sub>3</sub> , мГн	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом
Варианта	Рисунков											
1	1. 1	150	50	637	300	---	---	---	15,9	2	3	4
2	1. 2	100	50	---	---	100	15,9	9	15,9	8	3	4
3	1. 3	120	50	637	---	---	---	15,9	15,9	8	3	4
4	1. 4	200	50	---	300	---	15,9	---	15,9	8	3	4
5	1. 5	220	50	637	---	100	---	47,7	---	8	-	4
6	1. 6	100	50	100	300	---	15,9	---	115	10	-	100
7	1. 7	120	50	---	---	100	15,9	---	115	---	4	100
8	1. 8	200	50	---	159	---	---	---	115	10	4	100
9	1. 9	220	50	---	318	---	15,9	---	---	10	4	100
10	1. 10	50	50	---	637	---	15,9	6,37	115	5	---	8
11	1. 11	100	50	637	---	100	---	---	115	---	10	8
12	1. 12	120	50	---	300	100	31,8	---	---	5	---	8
13	1. 13	200	50	---	---	100	31,8	---	---	5	10	8
14	1. 14	220	50	637	---	200	---	15,9	---	5	10	8

Продолжение таблицы 1.1

15	<i>l. 15</i>	150	50	100	---	200	---	15,9	---	10	2	10
16	<i>l. 16</i>	100	50	---	1600	200	31,8	---	---	---	8	10
17	<i>l. 17</i>	120	50	100	---	200	---	15,9	---	10	8	10
18	<i>l. 18</i>	200	50	637	---	200	---	31,8	---	---	8	10
19	<i>l. 19</i>	220	50	---	1600	---	31,8	---	95	10	8	-
20	<i>l. 20</i>	50	50	---	159	---	31,8	---	95	15	10	10
21	<i>l. 21</i>	100	50	---	159	200	15,9	---	---	15	---	10
22	<i>l. 22</i>	120	50	---	159	200	15,9	---	---	---	10	20
23	<i>l. 23</i>	200	50	637	159	200	---	31,8	95	15	10	20
24	<i>l. 24</i>	220	50	637	159	---	---	---	95	---	10	20
25	<i>l. 25</i>	150	50	---	159	---	25	---	95	6	10	20
26	<i>l. 26</i>	100	50	637	159	637	---	---	95	6	---	20
27	<i>l. 27</i>	100	50	---	159	---	25	---	95	6	4	---
28	<i>l. 28</i>	200	50	---	159	637	25	---	95	6	---	20
29	<i>l. 29</i>	220	50	637	---	637	---	9	---	6	---	20
30	<i>l. 30</i>	50	50	318	637	---	---	---	31,8	---	10	40
31	<i>l. 31</i>	100	50	318	---	300	---	---	31,8	---	10	10
32	<i>l. 32</i>	120	50	---	---	300	19,1	15,9	31,8	40	---	10
33	<i>l. 33</i>	200	50	318	---	300	---	15,9	31,8	10	10	40
34	<i>l. 34</i>	220	50	318	---	300	---	15,9	31,8	---	---	10
35	<i>l. 35</i>	50	50	---	318	---	19,5	---	31,8	8	10	4
36	<i>l. 36</i>	100	50	637	---	200	---	31,8	95	8	---	4
37	<i>l. 37</i>	150	50	637	---	200	---	31,8	---	8	10	4
38	<i>l. 38</i>	200	50	---	318	200	15,9	---	95	8	---	4
39	<i>l. 39</i>	220	50	---	---	200	15,9	31,8	95	8	---	4
40	<i>l. 40</i>	50	50	637	---	200	---	31,8	95	4	40	40
41	<i>l. 41</i>	100	50	---	318	200	9,55	---	---	4	40	4
42	<i>l. 42</i>	120	50	500	---	---	---	15,9	95	4	---	4
43	<i>l. 43</i>	200	50	500	---	159	---	15,9	---	40	10	40
44	<i>l. 44</i>	220	50	---	318	159	9,55	---	95	---	10	40
45	<i>l. 45</i>	50	50	500	159	159	---	---	31,8	35	20	40
46	<i>l. 46</i>	100	50	500	---	---	---	15,9	31,8	35	---	40
47	<i>l. 47</i>	120	50	---	159	---	15,9	---	31,8	35	20	80
48	<i>l. 48</i>	200	50	318	318	159	---	---	31,8	35	20	80
49	<i>l. 49</i>	220	50	318	---	159	---	31,8	31,8	35	20	80
50	<i>l. 50</i>	50	50	---	318	---	15,9	---	31,8	5	10	80

## 4 Схемы электрических цепей синусоидального тока

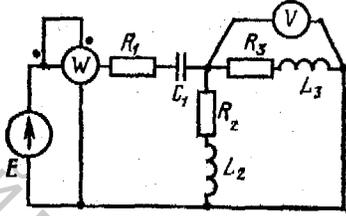


Рисунок 1.1

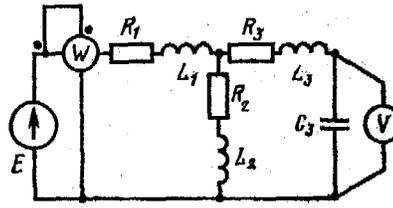


Рисунок 1.2

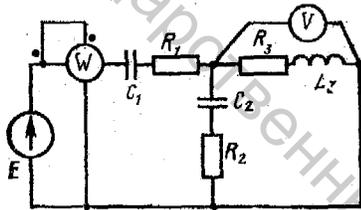


Рисунок 1.3

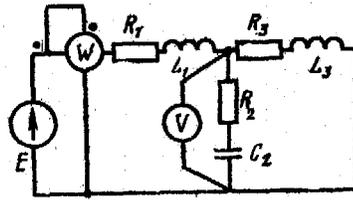


Рисунок 1.4

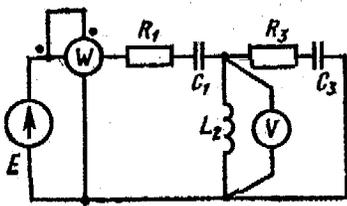


Рисунок 1.5

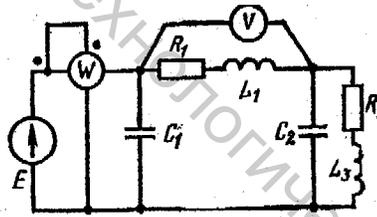


Рисунок 1.6

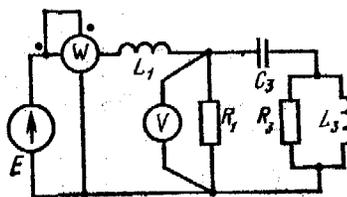


Рисунок 1.7

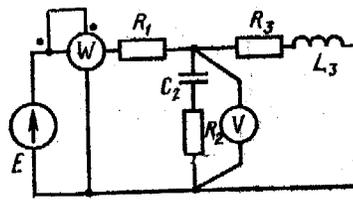


Рисунок 1.8

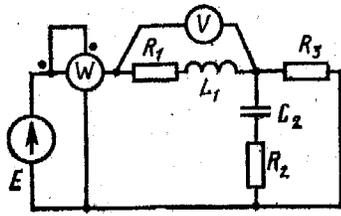


Рисунок 1.9

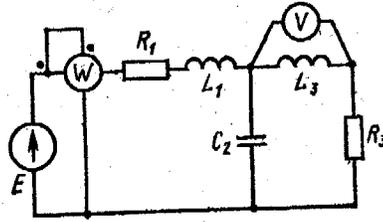


Рисунок 1.10

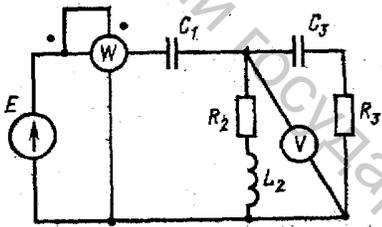


Рисунок 1.11

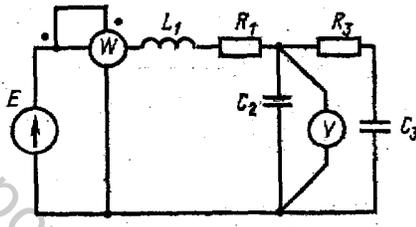


Рисунок 1.12

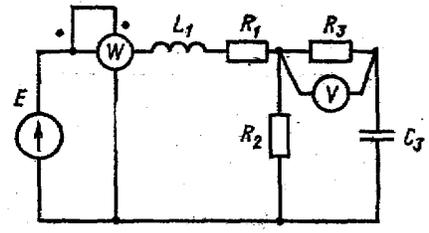


Рисунок 1.13

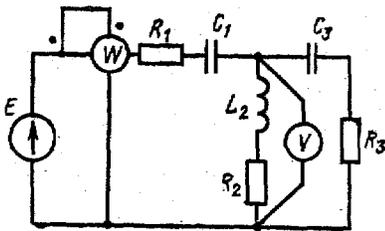


Рисунок 1.14

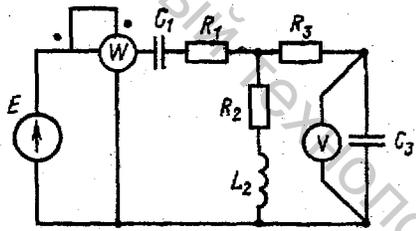


Рисунок 1.15

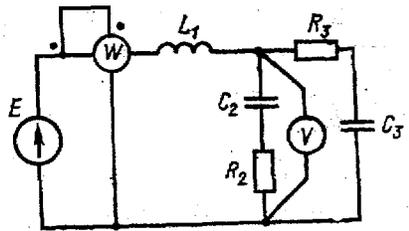


Рисунок 1.16

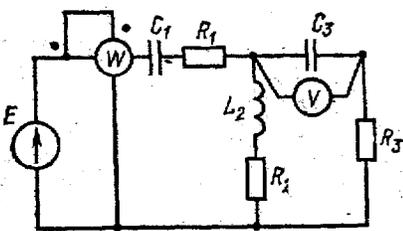


Рисунок 1.17

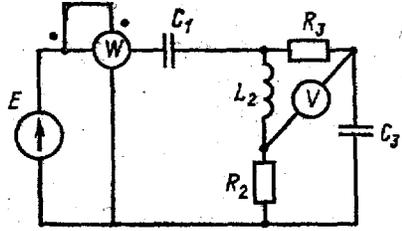


Рисунок 1.18

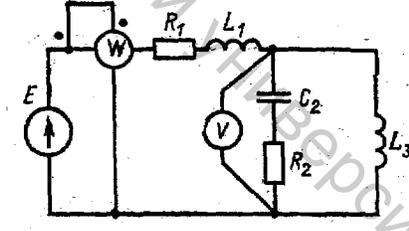


Рисунок 1.19

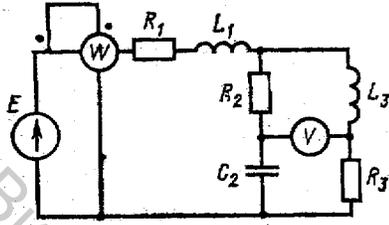


Рисунок 1.20

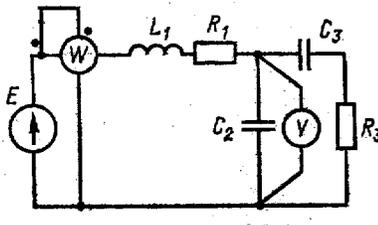


Рисунок 1.21

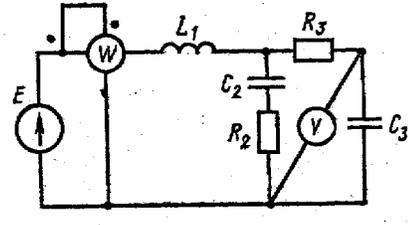


Рисунок 1.22

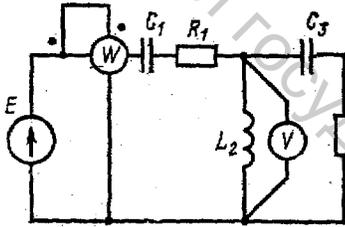


Рисунок 1.23

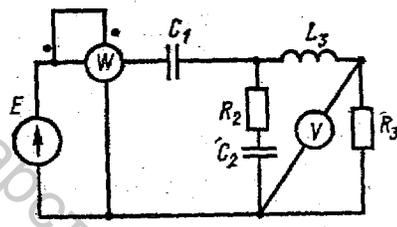


Рисунок 1.24

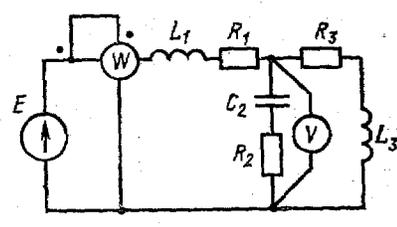


Рисунок 1.25

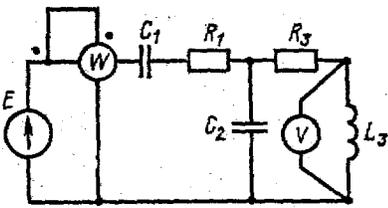


Рисунок 1.26

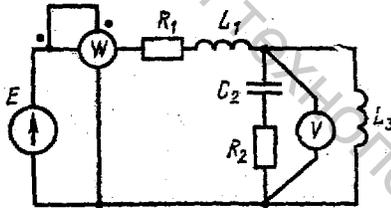


Рисунок 1.27

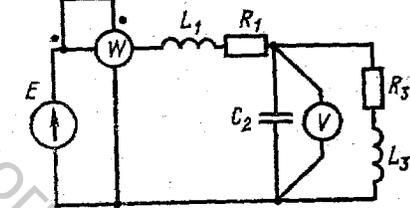


Рисунок 1.28

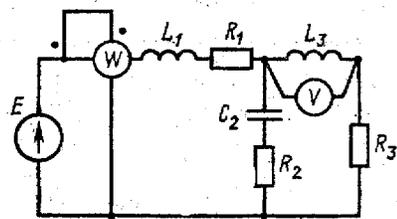


Рисунок 1.29

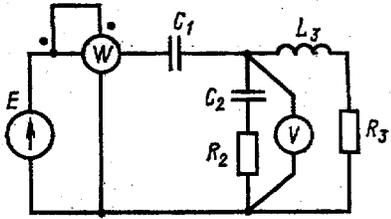


Рисунок 1.30

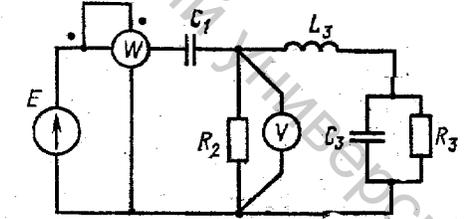


Рисунок 1.31

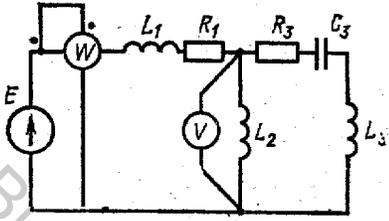


Рисунок 1.32

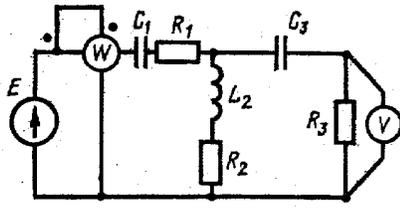


Рисунок 1.33

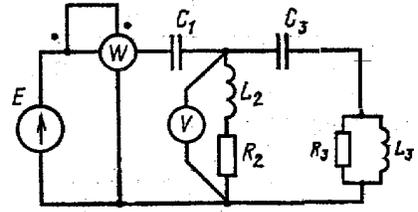


Рисунок 1.34

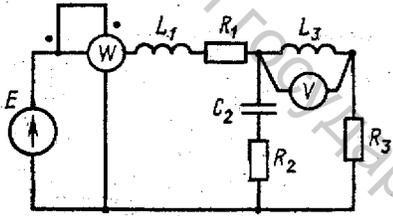


Рисунок 1.35

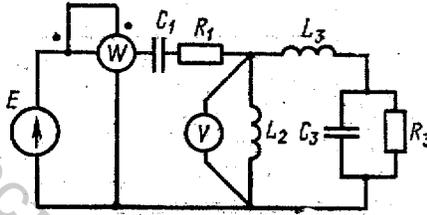


Рисунок 1.36

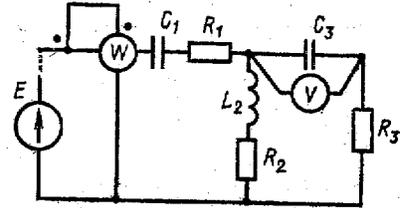


Рисунок 1.37

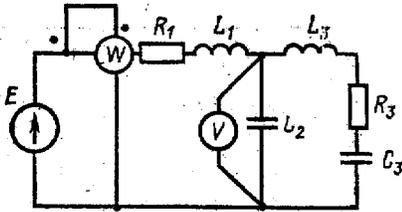


Рисунок 1.38

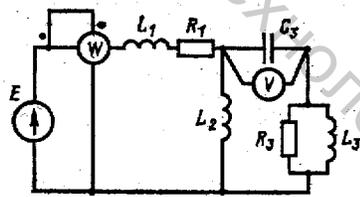


Рисунок 1.39

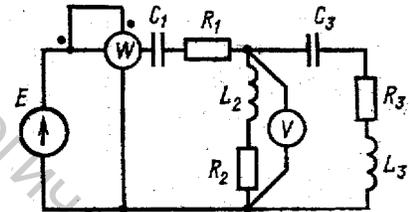


Рисунок 1.40

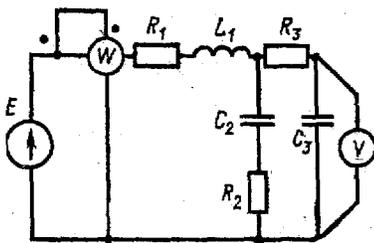


Рисунок 1.41

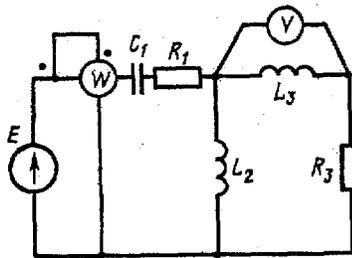


Рисунок 1.42

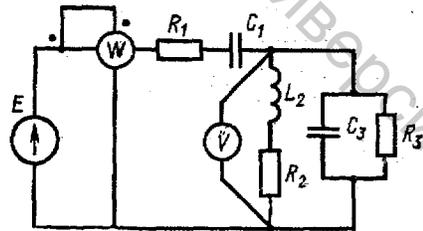


Рисунок 1.43

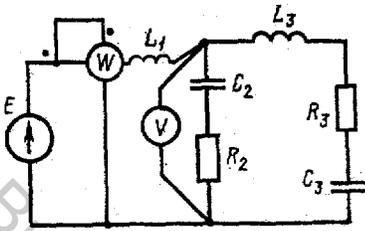


Рисунок 1.44

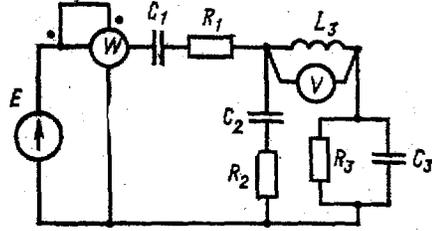


Рисунок 1.45

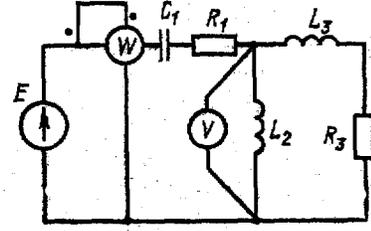


Рисунок 1.46

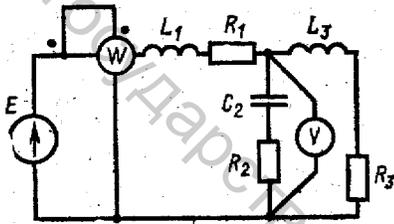


Рисунок 1.47

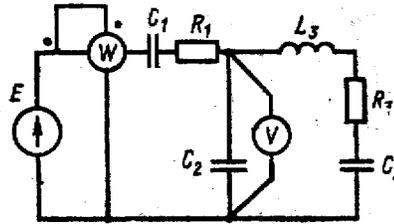


Рисунок 1.48

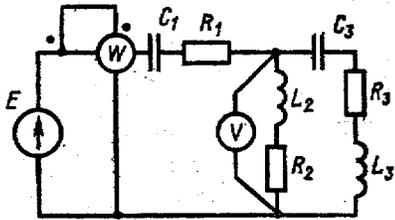


Рисунок 1.49

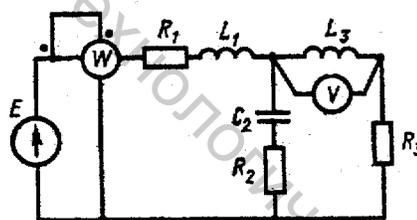


Рисунок 1.50

### 5 Методические указания к выполнению расчетно-графической работы № 1

При выполнении данной расчетно-графической работы необходимо произвести расчет простой цепи синусоидального тока. Расчет таких цепей значительно сложнее расчета простых цепей постоянного тока, т.к. токи и напряжения изменяются во времени синусоидально. Поэтому при вычислениях приходится учитывать не только действующие значения, но и сдвиги по фазе между синусоидальными величинами.

Расчет цепи можно упростить и сделать его аналогичным расчету цепи постоянного тока, если воспользоваться символическим методом. Этот метод базируется на использовании комплексных чисел. Для этого вводятся понятия комплексных действующих значений тока, напряжения и э.д.с.:

$$\dot{I} = I e^{j\alpha_I}, \dot{U} = U e^{j\alpha_U}, \dot{E} = E e^{j\alpha_E},$$

где  $\dot{I}$ ,  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}$  – комплексные действующие значения, или просто комплексы тока, напряжения и э.д.с.;

$I$ ,  $U$ ,  $E$  – действующие значения тока, напряжения и э.д.с.;

$\alpha_I$ ,  $\alpha_U$ ,  $\alpha_E$  – начальные фазы тока, напряжения и э.д.с.;

$j = \sqrt{-1}$  – называется в теории комплексных чисел мнимой единицей.

Если, например, ток в цепи меняется по закону

$$i = 14,2 \sin(314t + 60^\circ),$$

то комплекс этого тока будет равен

$$\dot{I} = 10 e^{j60^\circ} \text{ A},$$

$$\text{т.к. } I = \frac{\text{Im}}{\sqrt{2}} = \frac{14,2}{\sqrt{2}} = 10 \text{ A}.$$

В комплексной форме можно выразить сопротивления и проводимости. При этом комплексное сопротивление цепи обозначается  $\underline{Z}$ , а комплексная проводимость –  $\underline{Y}$ . При обозначении комплексных величин принято ставить точки только над теми комплексами, которые изображают синусоидально изменяющиеся величины. Поэтому для комплексов сопротивления и проводимости вместо точки над буквой ставят черту снизу.

Комплексное сопротивление определяют по выражениям

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = Ze^{j\varphi} = Z \cos\varphi + jZ \sin\varphi = R + jX,$$

где  $Z$  – полное сопротивление, равное  $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \frac{U}{I}$ ;

$R$  – активное сопротивление;

$X$  – реактивное сопротивление;

$\varphi = \alpha_U - \alpha_I$  – угол сдвига по фазе между напряжением и током.

В качестве примера выразим сопротивление цепи, изображенной на рисунке 1.51, в комплексной форме

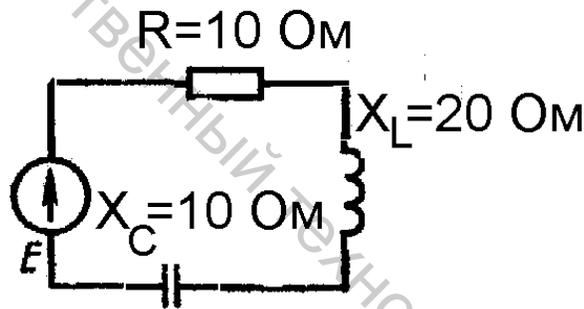


Рисунок 1.51 – Схема цепи

$$\underline{Z} = R + j \cdot x = R + j \cdot (X_L - X_C) = 10 + j \cdot 10 \hat{h}$$

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \arctg \frac{X}{R}} = 10\sqrt{2} \cdot e^{j45^\circ} \hat{h}$$

Выражение  $\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}$  называют законом Ома в комплексной форме. В

комплексной форме можно выразить и законы Кирхгофа. Первый закон Кирхгофа записывают в виде:  $\sum I = 0$ , т.е. алгебраическая сумма комплексных токов, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю. Второй закон Кирхгофа в применении к контуру цепи в комплексной форме записывается в виде:

$\sum \dot{E} = \sum \dot{I} Z$ , т.е. алгебраическая сумма действующих в контуре комплексных э.д.с. равна алгебраической сумме комплексных падений напряжений на пассивных элементах.

Так как выражения законов Ома и Кирхгофа в комплексной форме для цепи синусоидального тока полностью совпадают с выражениями этих законов для цепи постоянного тока, то все формулы и соотношения, которые использовались в цепях постоянного тока, можно применить для цепей синусоидального тока при расчете их в комплексной форме.

Комплексное значение мощности определяется по формуле

$$\underline{S} = \underline{\dot{U}} \dot{I}^*$$

где  $\dot{I}^*$  – комплекс тока, отмеченный звездочкой, является сопряженным комплексу тока  $\dot{I}$ , т.е. если  $\dot{I} = I e^{j\alpha_i}$ , то  $\dot{I}^* = I e^{-j\alpha_i}$ .

Тогда

$$\underline{S} = U e^{j\alpha_u} \cdot I e^{-j\alpha_i} = UI e^{-j\varphi} = S e^{-j\varphi},$$

где  $\underline{S}$  – полная мощность цепи,  $B \cdot A$ .

Переходя к алгебраической форме записи комплексного числа, получаем

$$\underline{S} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + j Q,$$

где  $P$  – активная мощность, Вт;

$Q$  – реактивная мощность, вар.

Т.е. рассчитав комплексную мощность, мы определяем и значения полной, активной и реактивной мощностей.

Пример. Комплекс тока в цепи  $\dot{I} = 10 e^{j30^\circ}$ , комплекс напряжения  $\dot{U} = 120 e^{j60^\circ}$ . Определить комплексное значение мощности.

По формуле  $\underline{S} = \underline{\dot{U}} \dot{I}^*$  находим

$$S = 120 e^{j60^\circ} \cdot 10^{-j30^\circ} = 1200 e^{j30^\circ} = 1200 \cos 30^\circ + j \cdot 1200 \sin 30^\circ = 1032 + j \cdot 600 \text{ B} \cdot A.$$

Отсюда следует, что  $S = 1200 \text{ B} \cdot A$ ,  $P = 1032 \text{ Вт}$ ,  $Q = 600 \text{ вар}$ .

Таким образом, используя символический метод, расчет простой цепи синусоидального тока можно выполнить аналогично расчету цепи постоянного тока, т.е. методом свертывания. Отличие состоит лишь в том, что расчет осуществляется в комплексной форме. Рассчитав комплексные значения, легко определить действующие значения, а при необходимости – и начальные фазы токов, напряжений, а также все необходимые мощности.

### 6 Пример расчета цепи синусоидального тока

Для электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 1.52, по заданным параметрам пассивных элементов, э.д.с. и частоте источника определить действующие значения и начальные фазы токов во всех ветвях цепи и напряжений на отдельных участках.

Рассчитать активные, реактивные и полные мощности отдельных участков и всей цепи. Составить уравнение баланса активных и реактивных мощностей. Указать показания приборов, изображенных на рисунке.

**Дано:**  $E = 100$  В,  $f = 50$  Гц,  $C_2 = 318$  мкф,  $L_3 = 15,9$  мГн,  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом,  $R_3 = 4$  Ом.

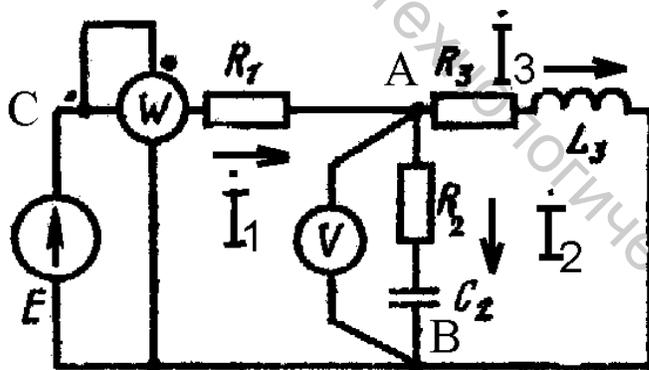


Рисунок 1.52 – Схема цепи синусоидального тока

**Решение:**

1. Указать направления токов в ветвях.
2. Определить сопротивления реактивных элементов.

$$X_{L3} = \omega \cdot L_3 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_3 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом},$$

$$X_{C_2} = \frac{1}{\omega \cdot C_2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ Ом.}$$

3. Выражают ЭДС источника и сопротивления ветвей в комплексной форме.

$$\dot{E} = E \cdot e^{j\alpha e} = 100 \cdot e^{j0^\circ} = 100 \text{ В,}$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j \cdot 0 = 2 = 2 \cdot e^{j0^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j \cdot x_{C_2} = 10 - j \cdot 10 = \sqrt{10^2 + 10^2} \cdot e^{-j45^\circ} = 10\sqrt{2} \cdot e^{-j45^\circ} = 14 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j \cdot x_{L_3} = 4 + j \cdot 5 = \sqrt{4^2 + 5^2} \cdot e^{j51^\circ} = \sqrt{41} \cdot e^{j51^\circ} \text{ Ом.}$$

4. Рассчитывают эквивалентное комплексное сопротивление цепи:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{10\sqrt{2} \cdot e^{-j45^\circ} \cdot \sqrt{41} \cdot e^{j51^\circ}}{10 - j \cdot 10 + 4 + j5} = \frac{10\sqrt{82} \cdot e^{j51^\circ - j45^\circ}}{14 - j5} = \frac{10\sqrt{82} \cdot e^{j6^\circ}}{\sqrt{14^2 + 5^2} \cdot e^{-j20^\circ}} = \frac{10\sqrt{82} \cdot e^{j6^\circ}}{\sqrt{221} \cdot e^{-j20^\circ}} =$$

$$10\sqrt{\frac{82}{221}} \cdot e^{j26^\circ} = 6,09 \cdot \cos 26^\circ + j6,09 \cdot \sin 26^\circ = 5,48 + j \cdot 2,6814 \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_{ЭКВ} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 2 + 5,48 + j \cdot 2,68 = 7,48 + j \cdot 2,68 = \sqrt{7,48^2 + 2,68^2} \cdot e^{j19,7^\circ} = 7,95 \cdot e^{j19,7^\circ} \text{ Ом.}$$

5. Определяют комплекс тока в ветви, содержащей источник, а затем комплексы напряжений и токов других ветвей:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_{ЭКВ}} = \frac{100}{7,95 \cdot e^{j19,7^\circ}} = 12,6 \cdot e^{-j19,7^\circ} \text{ А,}$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = 12,6 \cdot e^{-j19,7^\circ} \cdot 6,09 \cdot e^{j26^\circ} = 76,9 \cdot e^{j6,3^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_2} = \frac{76,9 \cdot e^{j6,3^\circ}}{14 \cdot e^{-j45^\circ}} = 5,5 \cdot e^{j51,3^\circ} \text{ A,}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_3} = \frac{76,9 \cdot e^{j6,3^\circ}}{6,4 \cdot e^{j51^\circ}} = 12 \cdot e^{-j44,7^\circ} \text{ A,}$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = 12,6 \cdot e^{-j19,7^\circ} \cdot 2 \cdot e^{j0^\circ} = 25,2 \cdot e^{-j19,7^\circ} \text{ В.}$$

6. Зная комплексные значения токов и напряжений, определяют их действующие значения и начальные фазы:

$$I_1 = 12,6 \text{ A, } \alpha_{I_1} = 19,7^\circ,$$

$$I_2 = 5,5 \text{ A, } \alpha_{I_2} = 51,3^\circ,$$

$$I_3 = 12 \text{ A, } \alpha_{I_3} = -44,7^\circ,$$

$$U_{AB} = 76,9 \text{ В, } \alpha_{U_{AB}} = 6,3^\circ,$$

$$U_{CA} = 25,2 \text{ В, } \alpha_{U_{CA}} = -19,7^\circ.$$

7. Рассчитывают мощности отдельных участков и всей цепи:

$$\underline{S}_1 = \dot{U}_{CA} \cdot \dot{I}_1^* = 25,2 \cdot e^{-j19,7^\circ} \cdot 12,6 \cdot e^{j19,7^\circ} = 318 \cdot e^{j0^\circ} = 318 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{P}_1 = 318 \text{ Вт}, \underline{Q}_1 = 0, \underline{S}_1 = 318 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{S}_2 = \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_2^* = 76,9 \cdot e^{j6,3^\circ} \cdot 5,5 \cdot e^{-j51,3^\circ} = 423 \cdot e^{-j45^\circ} = 423 \cdot \cos 45^\circ - j \cdot 423 \cdot \sin 45^\circ = 299 - j \cdot 299 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{P}_2 = 299 \text{ Вт}, \underline{Q}_2 = -299 \text{ вар}, \underline{S}_2 = 423 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{S}_3 = \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_3^* = 76,9 \cdot e^{j6,3^\circ} \cdot 12 \cdot e^{j44,7^\circ} = 923 \cdot e^{j51^\circ} = 923 \cdot \cos 51^\circ + j \cdot 923 \cdot \sin 51^\circ = 581 + j \cdot 717 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{P}_3 = 581 \text{ Вт}, \underline{Q}_3 = 717 \text{ вар}, \underline{S}_3 = 923 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$\underline{S} = \dot{E} \cdot \dot{I}_1^* = 100 \cdot 12,6 \cdot e^{j19,7^\circ} = 1260 \cdot e^{j19,7^\circ} = 1260 \cdot \cos 19,7^\circ + j \cdot 1260 \cdot \sin 19,7^\circ = 1198 + j \cdot 418 \text{ В} \cdot \text{А},$$

$$P = 1198 \text{ Вт}, Q = 418 \text{ вар}, S = 1260 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

8. Составляют уравнения баланса активных и реактивных мощностей цепи. Из закона сохранения энергии следует, что должны выполняться равенства:

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

$$1198 = 318 + 299 + 581 = 1198 \text{ Вт},$$

$$418 = 0 - 299 + 717 = 418 \text{ вар}.$$

Баланс активных мощностей и баланс реактивных мощностей соблюдается. Показания ваттметра 1198 Вт. Вольтметр измеряет действующее значение напряжения на участке АВ.  $U_{AB} = 76,9 \text{ В}$ .

### **7 Задание к расчетно-графической работе №2 Расчет и построение статических характеристик электропривода постоянного тока**

**Задание.** Для электропривода постоянного тока с заданным электродвигателем, параметры которого приведены в табл. 2.1, необходимо:

- 1) считая источник питания идеальным, построить механические характеристики  $\omega(M)$  для следующих случаев:
  - а) при номинальном магнитном потоке ( $\Phi = \Phi_n$ ) и напряжениях на якровой цепи равных:  $U_{я} = U_{ян}; 0,5 U_{ян}; 0,25 U_{ян}; 0; -0,25 U_{ян}; -0,5 U_{ян}; -U_{ян}$ ;
  - в) при магнитном потоке  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_{ном}$  и напряжениях на обмотке якоря, равных значениям пункта 1.а.
- 2) рассчитать жесткость механических характеристик привода;
- 3) построить электромеханические характеристики  $\omega(\zeta_{я})$  для тех же случаев, что и в пункте 1;
- 4) полагая, что момент нагрузки, создаваемый рабочей машиной  $M_c$ , равен номинальному моменту двигателя, определить скорости вращения привода при работе в первом квадранте.

### 8 Каталогные данные значений параметров электродвигателей, используемых в электроприводе

Согласно выданному преподавателем варианту, из таблицы 2.1 выписать значения параметров электродвигателя для исследуемого электропривода.

Таблица 2.1 – Значение параметров электродвигателей из каталога

№ варианта	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения (номинальная)	КПД, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом		
					якоря	добавочных полюсов	возбуждения
1	2	3	4	5	6	7	8
Тип 2ПБ112МГУХА4							
1	0,45	110	1060	64,5	1,29	1,12	111
2	0,45	220	1060	66	5,07	4,5	403
3	0,75	110	1500	70	0,565	0,565	84,3
4	0,75	220	1500	71	2,48	2,13	303
5	1,1	110	2200	74	0,308	0,304	84,3
6	1,1	220	2200	75	1,29	1,12	303
7	1,4	110	3000	78,5	0,196	0,134	111
8	1,4	220	3000	78,5	0,788	0,682	403
Тип 2ПБ112ЛГУХА4							
9	0,5	110	800	65	1,18	0,892	80
10	0,5	220	800	65,5	4,74	3,79	303
11	0,5	110	1000	68,5	0,74	0,74	80
12	0,63	220	1060	68,5	3,13	3,16	303
13	1	110	1600	74	0,378	0,378	80
14	1	220	1500	75	1,66	1,45	303
15	1,5	110	2240	79	0,139	0,128	80
16	1,5	220	2240	80	0,74	0,74	303
17	2	110	3000	81	0,103	0,11	80
18	2	220	3150	81	0,413	0,411	303

Продолжение таблицы 2.1

Тип 2ПН132МГУХЛ-4							
19	1,6	110	750	68	0,472	0,308	35
20	1,6	220	750	68,5	1,88	1,39	134
21	2,5	110	1000	72	0,271	0,204	35
22	2,5	220	1000	73,5	1,08	0,763	134
23	4	110	1500	77,5	0,14	0,094	35
24	4	220	1500	79	0,564	0,336	134
25	7	110	2200	81	0,067	0,049	25,6
26	7	220	2240	83	0,226	0,166	111
27	10,5	220	3000	84	0,14	0,094	111
Тип 2ПН132ЛГУХЛ-4							
28	1,9	110	750	71	0,322	0,27	37,5
29	1,9	220	750	72	1,28	1	138
30	3	110	950	74,5	0,22	0,196	37,5
31	10,5	220	1000	75,5	0,88	0,64	138
32	5,5	110	1500	80	0,08	0,066	27,8
33	5,5	220	1500	80,5	0,322	0,27	101
34	8,5	220	2200	84	0,167	0,124	89
35	14	220	3150	86	0,08	0,066	76
Тип 2ПБ160МГУХЛ4							
36	2,1	110	800	77	0,235	0,151	46,4
37	2,1	220	750	76,5	0,99	0,72	177
38	2,5	110	1000	80,5	0,145	0,101	46,4
39	2,5	220	1000	80	0,59	0,43	177
40	4,2	110	1500	83,5	0,081	0,056	46,4
41	4,2	220	1500	84,5	0,326	0,208	177
42	6	220	2120	86,5	0,145	0,101	177
43	7,1	220	3000	85,5	0,081	0,056	201
Тип 2ПБ160ЛГУХЛ4							
44	2,5	110	750	78,5	0,171	0,131	49,4
45	2,5	220	800	79,5	0,609	0,526	181
46	3,2	110	1060	82	0,096	0,073	49,4
47	3,2	220	1060	82,5	0,385	0,364	181
48	5,3	220	1500	85,5	0,216	0,175	181
49	7,5	220	2240	88	0,096	0,073	181
50	8,1	220	3350	86,5	0,044	0,031	181

### 9 Методические указания к выполнению расчетно-графической работы № 2

К статическим характеристикам привода относятся электромеханическая и механическая характеристики. Первая для приводов постоянного тока представляет собой зависимость скорости вращения двигателя от тока в обмотке якоря  $\omega = f(I_\beta)$ . Уравнение электромеханической характеристики имеет вид [6, 7]:

$$\omega = \frac{U_\beta}{e \cdot \hat{O}} - \frac{R_{\beta\hat{O}}}{e \cdot \hat{O}} \cdot I_\beta,$$

где  $k$  – конструктивная постоянная машины,

$R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи привода, равное при питании двигателя от идеального источника сопротивлению якорной цепи двигателя

$$R_{яц} = K_t \cdot (R_\beta + R_{дл}) + R_{щ},$$

где  $K_t$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве,

$R_{щ}$  – сопротивление щеток, которое в каталоге не приводится и может быть определено по приближенной формуле

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_\beta} \approx \frac{2}{I_\beta}$$

Механическая характеристика привода представляет собой зависимость скорости  $\omega$  от вращающего момента  $M$  [6,7]:

$$\omega = \frac{U_\beta}{e \cdot \hat{O}} - \frac{R_{\beta\hat{O}}}{(e \cdot \hat{O})^2} \cdot M.$$

Если в приводе применяется двигатель с независимым возбуждением, то магнитный поток от нагрузки не зависит, и обе характеристики будут представлять собой прямые линии. Характеристики имеют наклон, и с увеличением момента нагрузки скорость двигателя уменьшается. Степень наклона механической характеристики в теории электропривода оценивают величиной, которая называется жесткостью. Жесткость рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}.$$

Используя выражение механической характеристики, можно получить, что:

$$\beta = -\frac{(\hat{e}\hat{O})^2}{R}.$$

Если бы  $R = 0$ , то  $\beta = -\infty$ , и такая характеристика называется абсолютно жесткой. С уменьшением магнитного потока жесткость характеристик по абсолютной величине уменьшается.

Задаваясь различными значениями  $U_{я}$  и  $\Phi$ , можно построить семейства статических характеристик и проследить их влияние на свойства электропривода. Характеристики будут располагаться в четырех квадратах. При этом в первом и в третьем квадратах, где направления  $\omega$  и  $M$  совпадают, машина работает в режиме двигателя. Когда во второй и четвертой четвертях на графике  $\omega$  и  $M$  направлены в разные стороны, электродвигатель создает тормозной момент.

Перед построением статических характеристик необходимо предварительно определить ряд величин, которые непосредственно в каталоге не указаны. К ним относятся номинальные значения скорости вращения, момента, тока и значение произведения  $\hat{e} \cdot \hat{O}$ . Используемые при этом формулы приведены в примере расчета раздела 10.

### **10 Пример расчета и построения статических характеристик электропривода постоянного тока**

**Дано:**

- номинальная мощность,  $P_n = 250$  Вт,
- номинальное напряжение якоря,  $U_{ян} = 110$  В,
- номинальное напряжение обмотки возбуждения,  $U_{вн} = 110$  В,
- номинальная частота вращения,  $n_n = 1120$  об/мин,
- номинальное значение КПД,  $\eta_n = 61,5\%$ ,
- сопротивление обмоток при  $t = 15^\circ$  С, Ом:
- якоря  $R_{я} = 13,25$ ;
- добавочных полюсов  $R_{ДП} = 8,65$ ;
- возбуждения  $R_B = 192$ .

**Решение**

1. Определяют номинальную скорость вращения ротора двигателя:

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1120}{60} = 117,23 \text{ с}^{-1},$$

2. Определяют номинальное значение момента нагрузки двигателя:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{250}{117,23} = 2,13 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Номинальный ток якоря рассчитывают, используя выражение

$$\eta_H = \frac{P_H}{P_{\text{ПОТР}}} = \frac{P_H}{U_{ЯН} I_{ЯН} + I_{ВН} U_{ВН}}.$$

Откуда

$$I_{ЯН} = \frac{P_H - \eta_H \cdot I_{ВН} \cdot U_{ВН}}{\eta_H \cdot U_{ЯН}}.$$

Номинальный ток обмотки возбуждения:

$$I_{\hat{A}i} = \frac{U_{\hat{A}i}}{K_t \cdot R_B} = \frac{110}{1,28 \cdot 192} = 0,45 \text{ А},$$

где  $K_t$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве,  $K_t = 1,28$ .

$$I_{ЯН} = \frac{P_H - \eta_H \cdot I_{ВН} \cdot U_{ВН}}{\eta_H \cdot U_{ЯН}} = \frac{250 - 0,615 \cdot 0,45 \cdot 110}{0,615 \cdot 220} = 1,62 \text{ А}.$$

4. Сопротивление якорной цепи

$$R_{ЯЦ} = K_t \cdot (R_{Я} + R_{ДЛ}) + R_{Щ},$$

$$R_{Щ} = \frac{\Delta U_{Щ}}{I_{ЯН}} \approx \frac{2}{1,62} = 1,23 \text{ Ом.}$$

Тогда с учетом этого:

$$R_{ЯЦ} = K_t \cdot (R_{Я} + R_{\Delta n}) + R_{Щ} = 1,28 \cdot (13,25 + 8,65) + 1,23 = 29,26 \text{ Ом.}$$

5. Значение  $k \cdot \Phi_H$  двигателя определяют на основании электромеханической характеристики привода:

$$\omega = \frac{U_{Я}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{ЯЦ}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{Я}.$$

Для номинального режима

$$\omega_H = \frac{U_{ЯН}}{k \cdot \Phi_H} - \frac{R_{ЯЦ}}{k \cdot \Phi_H} \cdot I_{ЯН},$$

$$k \cdot \Phi_H = \frac{U_{ЯН} - R_{ЯЦ} \cdot I_{ЯН}}{\omega_H} = \frac{1}{117,23} (220 - 29,26 \cdot 1,62) = 1,47 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

6. Механические характеристики привода строят на основании значений, вычисленных по выражению

$$\omega = \frac{U_{Я}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{ЯЦ}}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M.$$

Графики – прямые линии, которые строят по двум точкам.

Принимаем  $M = 0$ , тогда скорость холостого хода равна

$$\omega_0 = \frac{U_{Я}}{k \cdot \Phi_H}.$$

Значения скорости при  $\Phi = \Phi_H$  и указанных в задании напряжениях приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

U <sub>я</sub> , В	220	110	55	0	-55	-110	-220
$\omega_o, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	149,66	74,83	37,41	0	-37,41	-74,83	-149,66

Когда  $M = 2 \cdot M_H = 2 \cdot 2,13 = 4,26$  (н·м), угловая скорость будет равна

$$\omega = \frac{U_{Я}}{k \cdot \Phi_H} - 2 \cdot \frac{R_{ЯЦ}}{(k \cdot \Phi_H)^2} \cdot M_H.$$

Значения скорости, рассчитанные по данной формуле при разных напряжениях, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения скорости при разных напряжениях

U <sub>я</sub> , В	220	110	55	0	-55	-110	-220
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	91,98	17,15	-20,27	-57,68	-95,1	-132,5	-207,3

Аналогично рассчитываются значения скоростей при  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_H$  (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Значения скорости при разных напряжениях

U <sub>я</sub> , В	220	110	55	0	-55	-110	-220
$\omega_o, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	199,5	99,8	49,9	0	-49,9	-99,8	-199,5
$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	97	-2,8	-52,7	-102,5	-152,4	-202,3	-302,1

Графики механических характеристик привода, построенные по значениям таблиц 2.2, 2.3 и 2.4, представлены на рисунках 2.1а (при  $\Phi = \Phi_H$ ) и 2.1б (при  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_H$ ).

Числовые значения на графиках соответствуют порядковому номеру напряжения в таблицах.

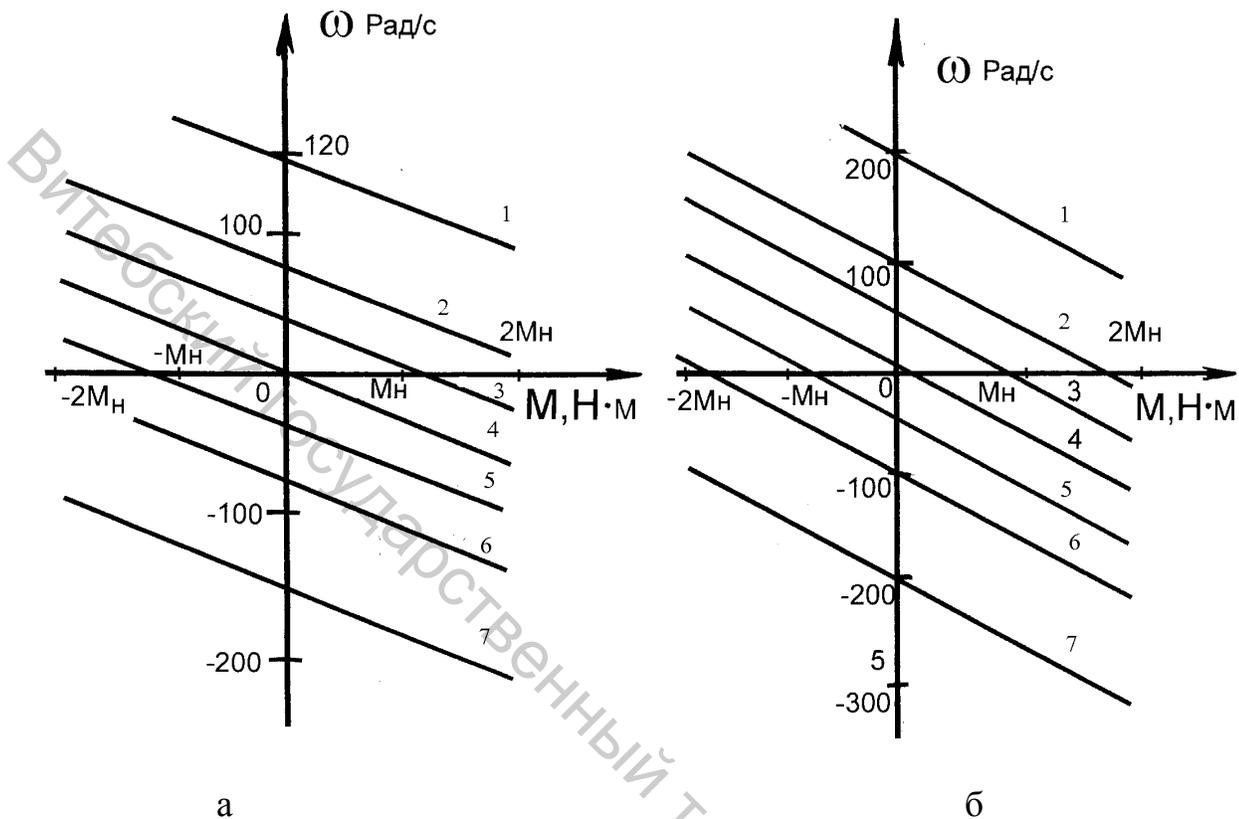


Рисунок 2.1 – Механические характеристики привода: а – при  $\Phi = \Phi_H$ ,

б – при  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_H$ .

7. Жесткости механических характеристик определяют по формуле

$$\beta = \frac{(k \cdot \Phi)^2}{R_{ЯЦ}}$$

Когда:

$$\Phi = \Phi_H, \quad \beta_1 = -\frac{(1,47)^2}{29,26} = -0,074,$$

$$\Phi = \frac{3}{4} \Phi_H, \quad \beta_2 = -\frac{(\frac{3}{4} \cdot 1,47)^2}{29,26} = -0,042.$$

8. Электромеханические характеристики привода  $\omega(I_{Я})$  строят по выражению

$$\omega = \frac{U_{\text{Я}}}{k \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{ЯЦ}}}{k \cdot \Phi} \cdot I_{\text{Я}}.$$

Значения скоростей при  $I_{\text{Я}} = 0$  совпадают со значениями  $\omega_0$ , приведенными в таблицах 2.2 и 2.4. Когда  $I_{\text{Я}} = 2 \cdot I_{\text{ЯН}}$ , значения скорости рассчитываются по формулам:

$$\text{при } \Phi = \Phi_{\text{Н}}, \quad \omega' = \frac{U_{\text{Я}}}{k \cdot \Phi_{\text{Н}}} - 2 \frac{R_{\text{ЯЦ}}}{k \cdot \Phi_{\text{Н}}} \cdot I_{\text{Я}},$$

$$\text{при } \Phi = \frac{3}{4} \Phi_{\text{Н}}, \quad \omega'' = \frac{U_{\text{Я}}}{\frac{3}{4} k \cdot \Phi_{\text{Н}}} - 2 \frac{R_{\text{ЯЦ}}}{\frac{3}{4} k \cdot \Phi_{\text{Н}}} \cdot I_{\text{Я}}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Значения скоростей при разных напряжениях

$U_{\text{Я}}, \text{В}$	220	110	55	0	-55	-110	-220
$\omega', \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	91,98	17,15	-20,27	-57,68	-95,1	-132,5	-207,3
$\omega'', \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	95	-4,7	-54,6	-104,5	-154,4	-204,3	-304,1

Графики электромеханических характеристик привода, построенные по значениям таблиц 2.2, 2.4 и 2.5, представлены на рисунке 2.2а (при  $\Phi = \Phi_{\text{Н}}$ ) и рисунке 2.2б

(при  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_{\text{Н}}$ ).

9. Для определения скоростей вращения привода при моменте нагрузки, равном  $M_{\text{с}} = M_{\text{Н}}$ , необходимо в первом квадранте рисунка 2.1 провести вертикальные линии для значений  $M_{\text{с}} = M_{\text{Н}} = 2,13(\text{Н} \cdot \text{м})$ .

Точки пересечения проведенных линий с графиками характеристик привода определяют значения скоростей для разных напряжений  $U_{\text{Я}}$  и магнитных потоков.

Анализируя полученные статические характеристики электропривода, можно сделать вывод:

1. При изменении напряжение на якорной цепи двигателя, можно плавно и в широком диапазоне регулировать скорость вращения двигателя. Т.к. напряжение  $U_{\text{Я}}$  не может превышать номинальные значения, то скорость регулируется с уменьшением от номинального значения  $\omega_{\text{Н}}$ .

2. При регулировании скорости изменением  $U_{\text{я}}$  наклон характеристик, т.е. их жесткость, не изменяется.

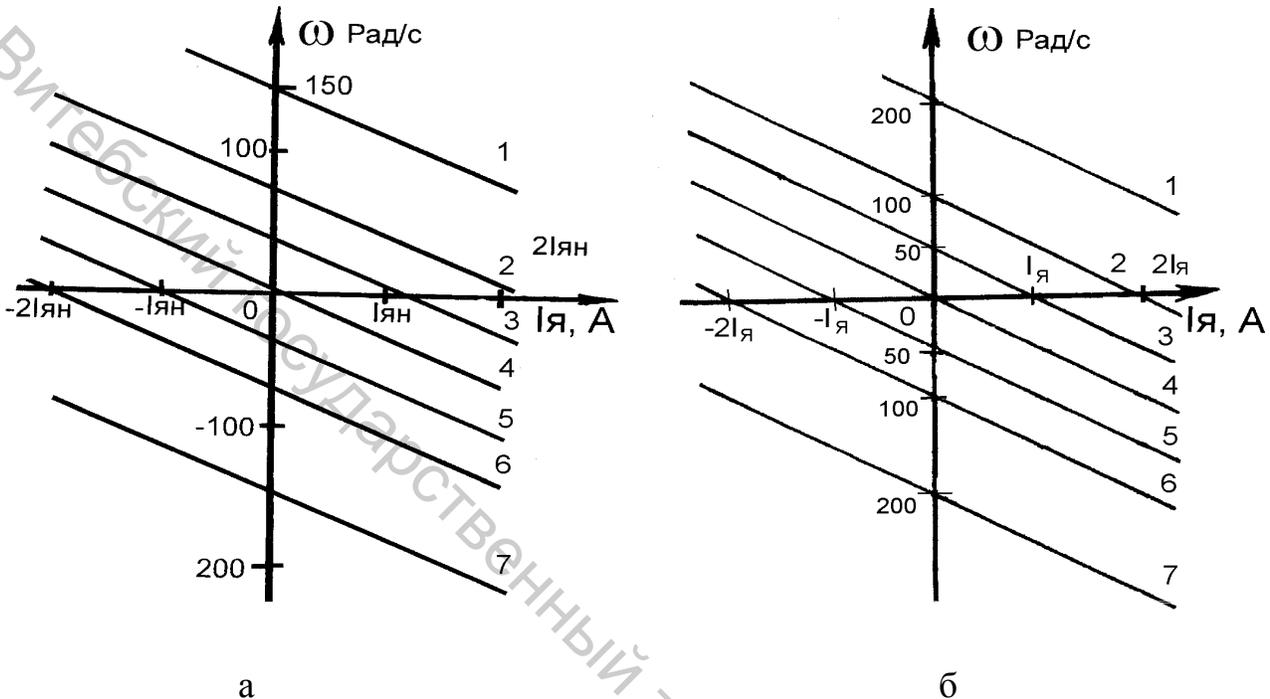


Рисунок 2.2 – Электромеханические характеристики привода: а – при  $\Phi = \Phi_{\text{H}}$ ,  
 б – при  $\Phi = \frac{3}{4} \Phi_{\text{H}}$ .

3. При уменьшении магнитного потока скорость холостого хода двигателя увеличивается, но жесткость характеристик по абсолютной величине уменьшается. Поэтому при увеличении нагрузки происходит более значительное уменьшение скорости. Регулирование скорости изменением магнитного потока используют в тех случаях, когда необходимо увеличить скорость выше номинального значения при  $U_{\text{я}} = U_{\text{ян}}$ .

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с.
2. Электротехника / В. Г. Герасимов [и др.] ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 768 с.
3. Рыбаков, Н. С. Электротехника / Н. С. Рыбаков. – Москва : РИОР, 2007. – 160 с.
4. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.
5. Бутырин, П. А. Электротехника / П. А. Бутырин. – Москва : Академия, 2007. – 272 с.
6. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 2000. – 368 с.
7. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода / Н. Ф. Ильинский. – Москва : Издат. дом МЭИ, 2007. – 224 с.
8. Справочник по электрическим машинам / Том 1 / под. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.