	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»	Методические указания
		Б1.О.23 Электротехника и электроника

Кафедра электрических машин и  
электрооборудования

## **Б1.О.23 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к расчетно-графической работе по дисциплине  
ч.1 Электротехника

Направление подготовки  
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки  
Энергообеспечение предприятий

Квалификация (степень) выпускника  
бакалавр

Уфа 2024

Рассмотрена и одобрена на заседании методической комиссии энергетического факультета «21» марта 2024 г. (протокол № 7).

Составитель: канд. техн. наук, доцент Кафиев И.Р.

Ответственный за выпуск: и.о. заведующего кафедрой электрических машин и электрооборудования канд. техн. наук Акчурин С.В.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	4
1	Задание на расчетно-графическую работу	5
2	Требования к оформлению и содержание расчетно- графической работы	6
3	Краткие теоретические сведения	6
4	Рекомендации к выполнению заданий	9
	Библиографический список	12
	Приложение А Задание на расчетно-графическую работу	13
	Приложение Б Варианты индивидуального задания и параметры электрической цепи	14

## **ВВЕДЕНИЕ**

Методические указания к выполнению расчетно-графической работы по дисциплине Б1.О.23 «Электротехника и электроника» призваны способствовать освоению рабочей программы по указанной дисциплине.

Структура методических указаний включает пять разделов. Тема расчетно-графической работы соответствует содержанию рабочей программы дисциплины Б1.О.23 «Электротехника и электроника» для подготовки бакалавров по направлению 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профилю подготовки «Энергообеспечение предприятий».

Содержание методических указаний направлено на углубленное изучение обучающимися наиболее важных разделов теоретического курса и включает методические рекомендации, примеры решения типовых задач, варианты заданий и исходные данные для выполнения расчетно-графической работы.

## «РАСЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

**Цель работы:** приобрести навыки расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока.

### 1 Задание на расчетно-графическую работу

#### Расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока

Задана электрическая цепь, один из элементов которой является нелинейным (рисунок 1.1, а-г). ВАХ нелинейного элемента задана таблицей. Вариант индивидуального задания и параметры элементов электрической цепи назначаются преподавателем.

По данным индивидуального задания:

- построить график ВАХ нелинейного элемента.
- определить ток через заданный нелинейный элемент и напряжение на нем методом эквивалентного генератора.

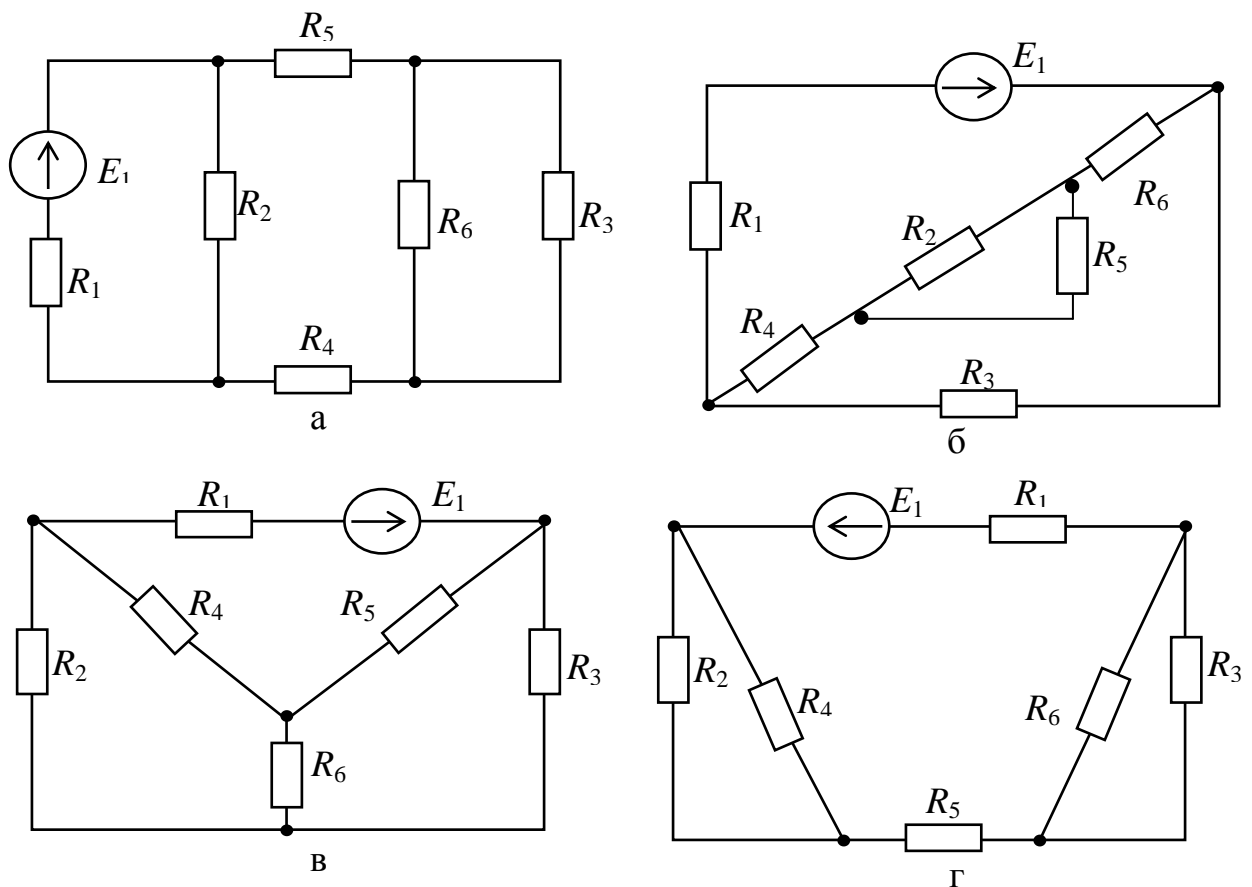


Рисунок 1.1 - Варианты расчетных схем

## 2 Требования к оформлению и содержание расчетно-графической работы

При выполнении РГР следует пользоваться общепринятыми обозначениями, расшифровывая их при первом применении. Решение должно сопровождаться краткими, но четкими пояснениями. Текст, формулы и числовые выкладки должны быть написаны четко и аккуратно. Все единицы измерения должны соответствовать Международной системе единиц СИ. Схемы, графики и векторные диаграммы должны вычерчиваться с соблюдением масштаба и ГОСТов.

РГР должна состоять из пояснительной записки, которая выполнена на листах стандартного формата А4 (297×210) мм с рамкой. Рекомендуемый объем пояснительной записки составляет– 8...15 с.

Пояснительная записка оформляется согласно требованиям СТО БГАУ 2018 и должна включать:

- титульный лист;
- задание на работу с указанием типовых схем и исходных данных для ее расчета;
- оглавление;
- расчет электрической цепи с применением программных продуктов (Math Cad);
- проверку правильности решения;
- библиографический список.

## 3 Краткие теоретические сведения

Электрические цепи, содержащие нелинейные элементы, сопротивления которых зависят от величины и направления тока или от напряжения на их зажимах, называются нелинейными [1].

У линейных элементов вольтамперная характеристика (ВАХ – зависимость тока от напряжения) представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат  $O$  (рисунок 1.1, а), и точку  $A$ , которая получается вычислением тока  $I_A$  при определенном значении напряжения  $U_A$ .

$$I_A = U_A/R,$$

где  $R$  – сопротивление линейного элемента, величина постоянная.

У нелинейного элемента вольтамперная характеристика нелинейная (рисунок 3.1, б). Сопротивление нелинейного элемента – величина непостоянная, зависящая от величины тока.

У нелинейных элементов различают статические и динамические сопротивления.

Статическим сопротивлением в данной точке  $a$  вольтамперной характеристики (рисунок 3.1, б) называют отношение напряжения к току, соответствующему этой точке [2]

$$R_{ст} = U_a/I_a = m_R \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.1)$$

где  $m_R = m_u/m_i$  - масштаб сопротивления.

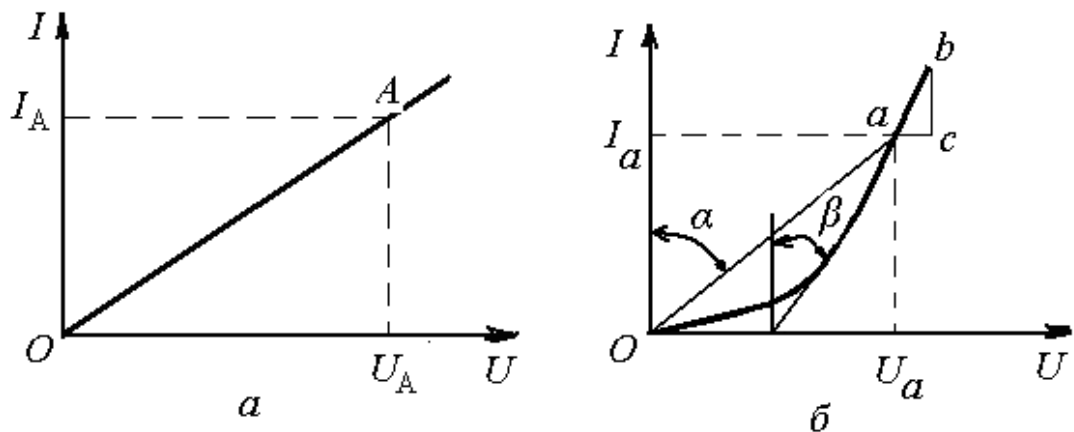


Рисунок 3.1 - Вольтамперные характеристики:  
*а* – линейного элемента; *б* – нелинейного элемента

Динамическим сопротивлением в данной точке *a* вольтамперной характеристики (рисунок 3.1, *б*) называют отношение бесконечно малых приращений напряжения  $dU$  и тока  $dI$  [3]

$$R_{\text{дин}} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u \overline{ac}}{m_i \overline{bc}} = m_R \operatorname{tg} \beta. \quad (3.2)$$

Динамическое сопротивление пропорционально тангенсу угла наклона касательной к вольтамперной характеристике в точке *a*.

Нелинейные элементы, не имеющие линейных участков ВАХ, не имеют аналитического выражения. Расчеты цепей с такими элементами выполняются, в основном, графическими методами. Исходные данные для решения таких задач задаются графиками или таблицами.

**Последовательное соединение нелинейных элементов.** Рассмотрим схему с последовательным соединением нелинейных элементов (рисунок 3.2, *а*) [3].

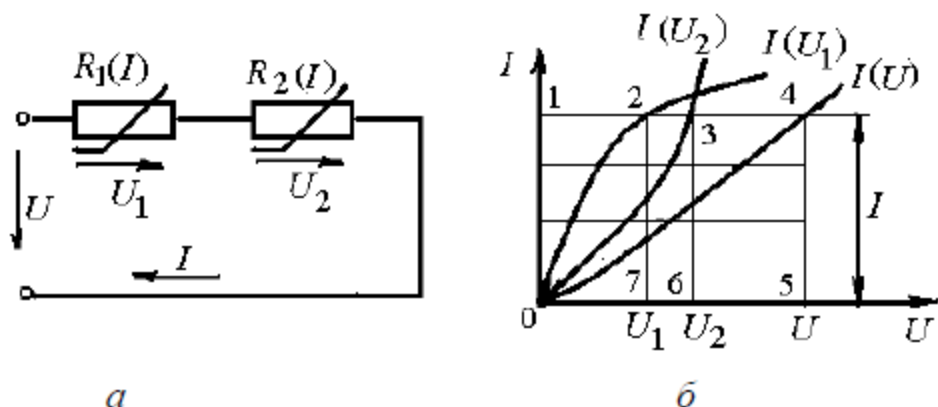


Рисунок 3.2 - Последовательное соединение нелинейных элементов:  
*а* – схема соединения; *б* – вольтамперные характеристики

Два нелинейных сопротивления  $R_1(I)$  и  $R_2(I)$  соединены последовательно и присоединены к источнику с напряжением  $U$ . Ток в цепи

1. Зависимость тока от напряжения на сопротивлениях заданы ВАХ (рисунок 1.2, б).

Напряжения на сопротивлениях  $U_1$  и  $U_2$  в неразветвленной цепи

$$U_1 + U_2 = U.$$

Чтобы определить общую вольтамперную характеристику, достаточно сложить абсциссы исходных характеристик  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$ . Для этого проведем прямую, параллельную оси абсцисс, соответствующую току  $I$  (отрезок 0 – 1). Отрезки 1 – 2 и 1 – 3 представляют собой в выбранном масштабе падения напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на сопротивлениях  $R_1(U)$  и  $R_2(U)$ .

Сложив эти отрезки, на той же прямой получим точку 4, которая будет принадлежать общей ВАХ. Аналогично определим еще ряд точек для построения общей ВАХ при разных значениях тока. Если в неразветвленной цепи включено линейное сопротивление  $R$ , то для определения общей вольтамперной характеристики строится линейная ВАХ этого сопротивления и производится суммирование напряжений (абсцисс) на каждом сопротивлении. Графический метод позволяет решать задачи по определению тока в цепи, падений напряжений на каждом из участков, если известно общее напряжение цепи.

**Параллельное соединение нелинейных элементов.** Рассмотрим схему с параллельным соединением нелинейных элементов (рисунок 3.3, а) [4].

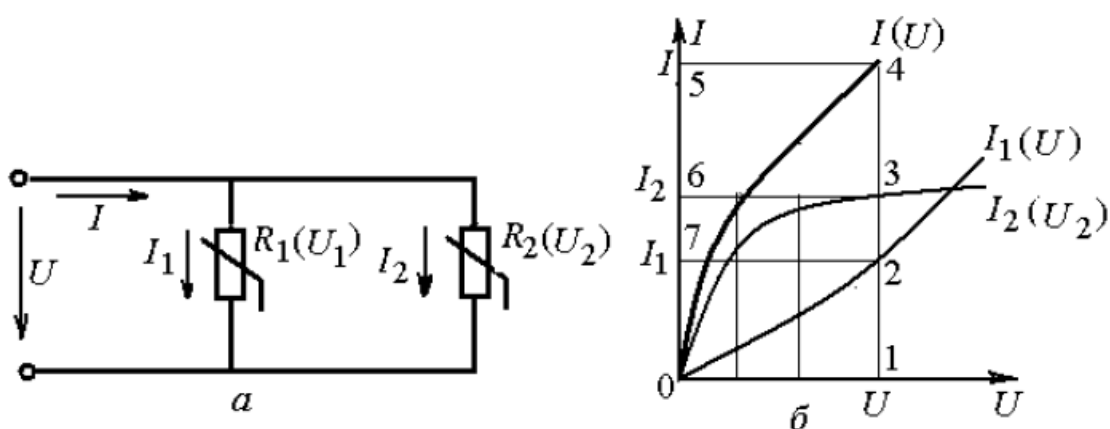


Рисунок 3.3 - Параллельное соединение нелинейных элементов:

а – схема соединения; б – вольтамперные характеристики

При параллельном соединении нелинейных сопротивлений  $R_1(I)$  и  $R_2(I)$  к ним приложено одно и то же напряжение  $U$  (рисунок 3.3, а). Ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в ветвях:  $I = I_1 + I_2$ .

Нелинейность сопротивлений задана вольтамперными характеристиками  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$  на рисунке 3.3, б.

Для построения ВАХ общей цепи  $I(U)$  необходимо сложить ординаты вольтамперных характеристик сопротивлений. При напряжении  $U$  (отрезок 0 – 1) сумма отрезков 1 – 2 (ток  $I_1$ ) и 1 – 3 (ток  $I_2$ ) равна отрезку 1 – 4 (ток  $I$ ). Также строятся другие точки нелинейной ВАХ общей цепи.

Если в одну из ветвей разветвленной цепи включено линейное сопротивление  $R$ , то для определения общей вольтамперной характеристики строится линейная ВАХ этого сопротивления и производится суммирование токов (ординат) для каждого сопротивления.

**Смешанное соединение нелинейных элементов.** При смешанном соединении нелинейных сопротивлений графический расчет производится методом свертывания схемы. В соответствии со схемой складываются ВАХ параллельных и последовательных ветвей. На рисунок 3.4, а показана схема смешанного соединения нелинейных сопротивлений [5]. К схеме приложено напряжение  $U$  (зажимы  $a - b$ ). На сопротивлении  $R(I)$ , которое включено последовательно с двумя параллельными сопротивлениями  $R_1(U_1)$  и  $R_2(U_2)$ , имеется падение напряжения  $U_1$  (зажимы  $a - c$ ). На параллельных ветвях (зажимы  $c - d$ ) напряжение  $U - U_1 = U_2$ . Ток в неразветвленной части цепи  $I$ .

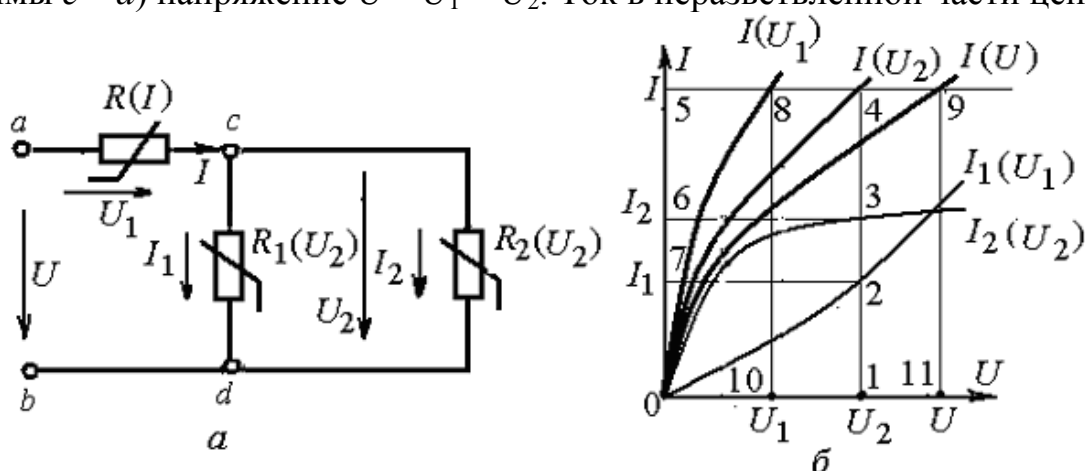


Рисунок 3.4 - Смешанное соединение нелинейных элементов:  
а – схема соединения; б – вольтамперные характеристики

Нелинейные сопротивления заданы нелинейными ВАХ  $I(U)$ ,  $I_1(U_1)$  и  $I_2(U_2)$ , которые приведены на рисунок 3.4, б. Сложив токи в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$  (складываются ординаты 1 – 2 и 1 – 3), получаем ток  $I$  в неразветвленной части. Складывая напряжения  $U_1$  и  $U_2$  (абсциссы 5 – 8 и 5 – 4), получаем напряжение  $U$  (абсцисса 5 – 9 или 0 – 11). Таким образом, строится ВАХ  $I(U)$ .

При большем количестве нелинейных элементов выполняется больший объем графических построений.

#### 4 Рекомендации к выполнению заданий

##### Расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока

Индивидуальное задание задано в виде таблицы 4.1, а расчетная схема представлена на рисунке 4.1, а; ВАХ нелинейного элемента представлена графиком на рисунке 4.1, б.

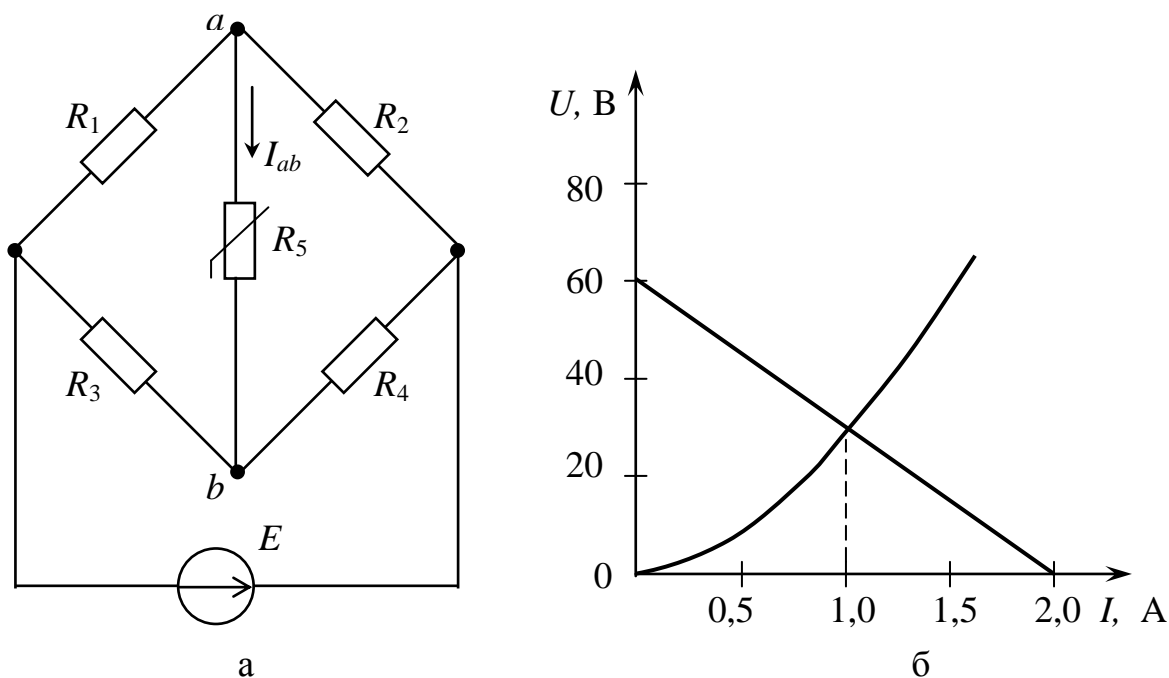


Рисунок 4.1 - Расчетная схема (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

Таблица 4.1 - Вариант индивидуального задания

$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$E_1$ , В
30	60	20	20	ВАХ	360

Решение:

- 1) Напряжение холостого хода  $U_{abxx}$  можно найти по схеме, показанной на рисунке 2.5, а, в которой ветвь с нелинейным элементом разомкнута.

$$I_{1x} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{360}{30 + 60} = 4 \text{ A};$$

$$I_{2x} = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{360}{20 + 20} = 9 \text{ A};$$

$$U_{abxx} = I_{2x} R_3 - I_{1x} R_1 = 9 \cdot 20 - 4 \cdot 30 = 60 \text{ В}.$$

- 2) Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора можно найти по схеме, показанной на рисунке 4.2, б, в которой источник  $E$  замкнут.

$$R_{\text{э}} = R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 30 \text{ Ом}.$$

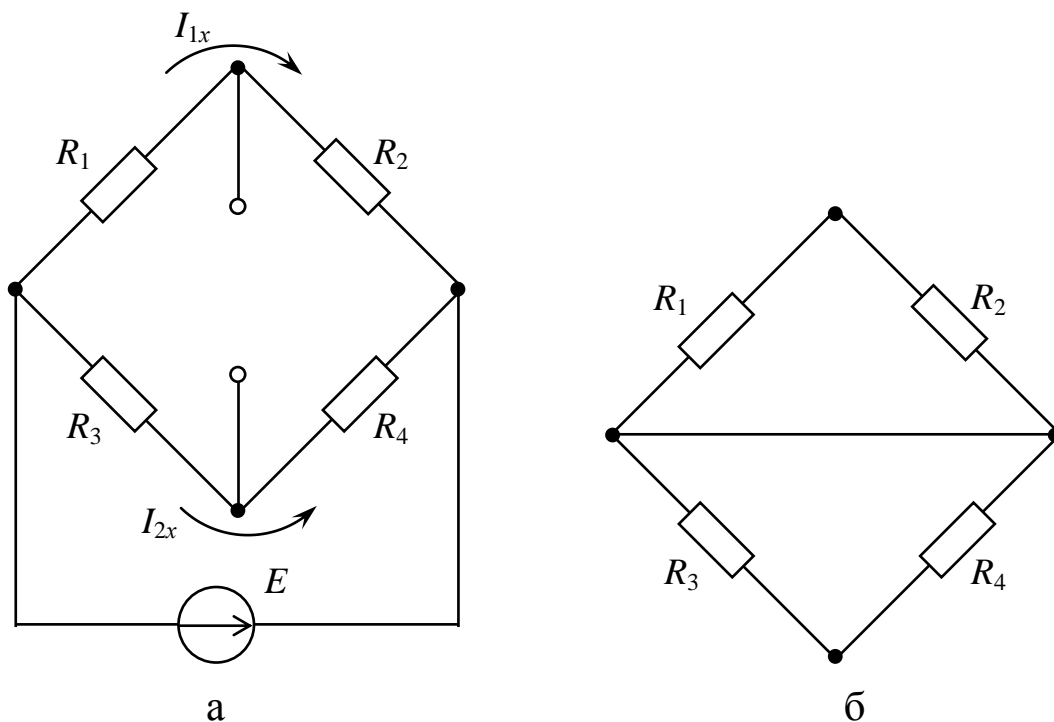


Рисунок 4.2 - Определение параметров эквивалентного генератора: а - напряжения холостого хода; б - внутреннего сопротивления

3) Для построения внешней характеристики эквивалентного генератора определим ток короткого замыкания

$$I_{кз} = \frac{E_{\mathcal{O}}}{R_{\mathcal{O}}} = \frac{U_{abxx}}{R_{ex}} = \frac{60}{30} = 2 \text{ A.}$$

4) На рисунке 4.2, б построена внешняя характеристика эквивалентного генератора по двум точкам:

- $E_{\mathcal{O}} = 60 \text{ В}; I = 0 \text{ А};$
- $U = 0 \text{ В}; I = 2 \text{ А}.$

5) Точка пересечения внешней характеристики с ВАХ нелинейного элемента позволяет определить ток и напряжение на нелинейном элементе

$$I_{ab} = 1 \text{ А}.$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учеб. пособие / Г. И. Атабеков. - 7-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2009. - 592 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. - 10-е изд. - Москва: Гардарики, 2002. - 640 с. : ил.
3. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника: учеб. пособие / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. - Москва : Академия, 2005, 2008, 2010. – 395 с.
4. Кононенко, В.В. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / В. В. Кононенко и др. ; под ред. В. В. Кононенко. - 5-е изд. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. - 778 с.
5. Теоретические основы электротехники: учебник / А.Н.Горбунов [и др.]. – Москва: УМЦ «ТРИАДА», 2003. – 304 с.: ил.
6. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и промэлектроники в примерах и задачах с решениями: учебн. пособие для студентов вузов / Г.Г. Рекус. – Москва: Высшая школа, 2008. – 343 с.: ил.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Образец оформления титульного листа**

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФГБОУ ВО БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Факультет: Энергетический  
Кафедра: Электрические машины и электрооборудование  
Направление: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Профиль: Энергообеспечение предприятий  
Форма обучения: очная  
Курс, группа, шифр: 2, ТТ201, 15891

**Сабиров Линар Надирович**  
*(Фамилия, имя, отчество студента)*

**РАСЧЕТНО – ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА**  
*(название работы)*

по дисциплине «Электротехника и электроника»  
по теме «Расчет усилительного каскада»

«К защите допускаю»

Руководитель:

к.т.н., доцент Кафиев И.Р

*(ученая степень, звание, Ф.И.О)*

\_\_\_\_\_  
*(подпись)*

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Оценка при защите:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
*(подпись)*

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

Уфа 20 \_\_\_\_

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Образец оформления задания на выполнение расчетно-графической работы**

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**ФГБОУ ВО «БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет: Энергетический  
Кафедра: Электрические машины и электрооборудование  
Направление: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Профиль: Энергообеспечение предприятий  
Форма обучения: очная  
Курс, группа, шифр: 2, ТТ201, 12345

**ЗАДАНИЕ**  
на расчетно-графическую работу  
**Иванову Иван Ивановичу**  
(Фамилия, имя, отчество обучающегося)

1 Тема расчетно-графической работы: «Расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока»

2 Исходные данные (записываются в соответствии с вариантом задания):

- вариант № \_\_, электрическая схема на рисунке \_\_\_\_;  
- номиналы резисторов:  $R_1 = \_\_\text{Ом}$ ;  $R_2 = \_\_\text{Ом}$ ;  $R_3 = \_\_\text{Ом}$ ;  $R_4 = \_\_\text{Ом}$ ;  $R_5 = \_\_\text{Ом}$ ;  $R_6 = \_\_\text{Ом}$ , ЭДС источника питания  $E_1 = \_\_\text{В}$ .

3 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов):

- построение графика ВАХ нелинейного элемента;  
- определение тока через нелинейный элемент и напряжения на нем методом эквивалентного генератора;

4 Срок сдачи обучающимся законченной работы «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

5 Дата выдачи задания: “\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Руководитель: к.т.н, доцент Кафиев И.Р.  
(ученая степень, звание, Ф.И.О., подпись)

Задание принял к исполнению: \_\_\_\_\_  
(подпись обучающегося)

**Приложение В**  
**Варианты индивидуального задания и параметры электрической цепи**

№ варианта	№ рисунка	Параметры электрической цепи						
		R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом	R <sub>5</sub> , Ом	R <sub>6</sub> , Ом	E <sub>1</sub> , В
1	1.1a	20	40	BAX	30	25	45	100
2	1.1б	22	BAX	32	42	52	44	110
3	1.1в	12	18	BAX	20	26	30	120
4	1.1г	26	22	32	BAX	28	36	130
5	1.1a	32	50	32	62	BAX	22	140
6	1.1б	35	45	32	52	39	BAX	150
7	1.1в	40	BAX	18	25	20	15	160
8	1.1г	15	25	BAX	30	22	46	170
9	1.1a	18	28	38	BAX	48	58	180
10	1.1б	12	22	32	42	BAX	52	115
11	1.1в	63	43	33	23	13	BAX	125
12	1.1г	34	BAX	38	46	56	62	150
13	1.1a	32	52	34	BAX	32	40	140
14	1.1б	60	20	BAX	30	40	50	155
15	1.1в	16	26	46	BAX	36	56	165
16	1.1г	27	BAX	17	37	47	57	175
17	1.1a	24	28	BAX	36	35	62	180
18	1.1б	19	29	39	BAX	59	49	190
19	1.1в	12	21	31	13	BAX	41	195
20	1.1г	20	35	40	32	55	BAX	200
21	1.1a	25	15	42	BAX	32	52	210
22	1.1б	55	60	30	48	BAX	38	215
23	1.1в	20	21	35	15	45	48	145
24	1.1г	15	BAX	17	21	32	42	112
25	1.1a	33	46	BAX	55	66	70	127
26	1.1б	16	18	20	30	32	BAX	132
27	1.1в	56	BAX	36	48	33	25	142
28	1.1г	33	44	50	14	BAX	22	152
29	1.1a	40	BAX	42	28	36	66	164
30	1.1б	30	25	BAX	44	34	54	172

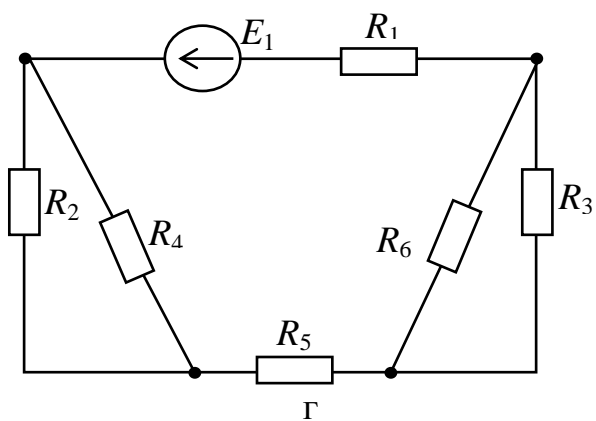
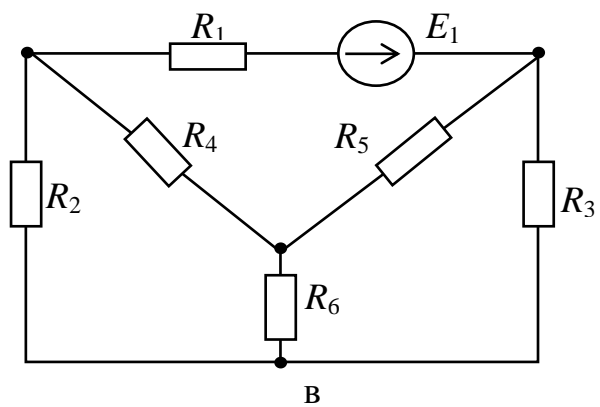
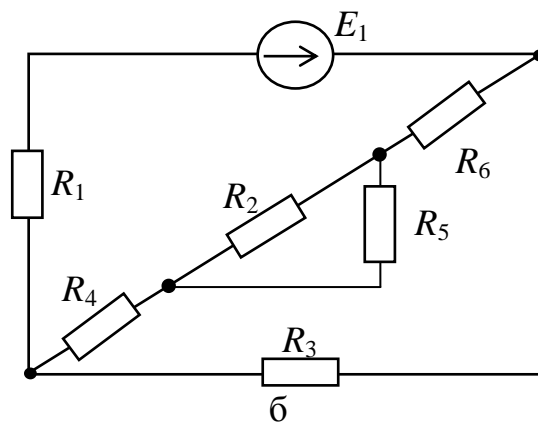
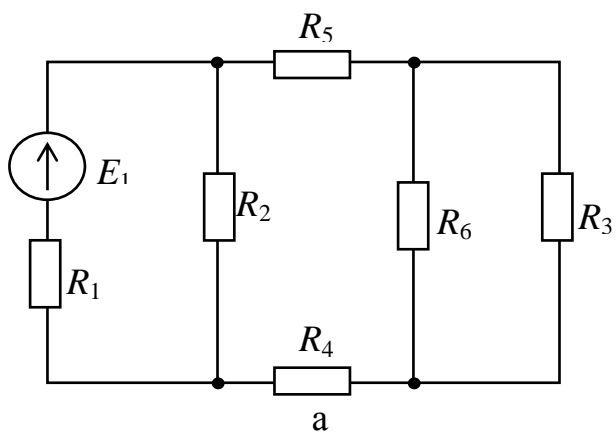


Рисунок В.1 - Варианты расчетных схем