

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения**

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

**для выполнения расчетно-графической работы
по дисциплине “Электрические системы и сети”**

**2024
Санкт-Петербург**

УДК 621.311

Учебно-методическое пособие для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Системы электроснабжения» / Сост.: О.Я. Солёная – СПб: ГУАП, 2024.

Учебно-методическое пособие содержит методику расчета режимов работы системы электроснабжения, в которой раскрыты основные практические вопросы, необходимые для изучения дисциплины, а также задание к выполнению расчетно-графической работы.

ЗАДАНИЕ НА РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКУЮ РАБОТУ

На тему: «Исследование режимов работы участка электрической сети»

Цель работы – исследование режимов работы участка электрической сети и определение ее режимных параметров.

Исходные данные

Исходная схема замещения приведена на рис. 1.

В соответствии с вариантом, в табл. 1 приведен тип оборудования и мощность нагрузки потребителя, питающегося от трансформаторной подстанции.

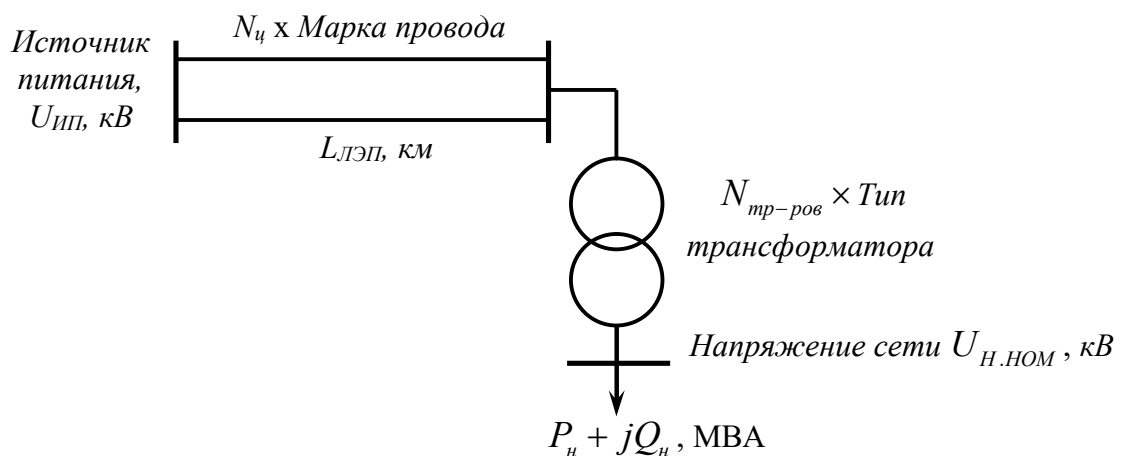


Рисунок 1 – Участок электрической сети

Задание

1. Расшифровать тип трансформатора, с помощью справочной литературы определить его паспортные данные.
2. Расшифровать марку провода, с помощью справочной литературы определить его удельные сопротивления и проводимости.
3. Составить схему замещения исходной схемы электроснабжения и определить ее параметры в среде Matchad.
4. Определить мощность на входе в обмотку трансформатора, приведенную и расчетную нагрузки узла, к которому подключен трансформатор.
5. Выполнить расчет режима работы электрической сети «по данным начала».
6. Построить эпюры напряжения и определить, в каком из элементов схемы электроснабжения происходит наибольшая потеря напряжения.

В выводе по работе необходимо по результатам расчетов режима выполнить анализ допустимости отклонения напряжения на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции.

Индивидуальные задания к работе

Выбор варианта. Номер в списке группы соответствует порядковому номеру в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

№ вар	Напряжение источника питания $U_{шт}$, кВ	Тип трансформатора	Линия электропередач			Режим нагрузки	Нагрузка ПС, МВА	Напряжение сети, $U_{н.ном}$, кВ
			Марка провода	$L_{лэп}$, км	n_c			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	121	ТДН-10000/110	АС-70/11	30	2	max	$8+j3$	10
2	117	ТДН-10000/110	АС-70/11	40	2	min	$4+j2$	10
3	121	ТДН-16000/110	АС-150/24	20	1	max	$12+j5$	6
4	116	ТДН-16000/110	АС-150/24	30	1	min	$6+j4$	6
5	121	2×ТДН-10000/110	АС-185/29	20	2	max	$10+j6$	6
6	115	2×ТДН-10000/110	АС-185/29	25	2	min	$8+j5$	6
7	119	ТРДН-25000/110	АС-240/32	35	1	max	$17+j8$	6
8	114	ТРДН-25000/110	АС-240/32	40	1	min	$11+j7$	6
9	118	ТРДН-40000/110	АС-240/32	40	1	min	$20+j9$	10
10	121	2×ТРДН-40000/110	АС-240/32	50	2	max	$38+j16$	10
11	152	2×ТМН-4000/150	АС-70/11	40	2	max	$6+j4$	6
12	150	2×ТМН-4000/150	АС-70/11	35	2	min	$3+j2$	6
13	158	ТРДН-32000/150	АС-240/32	25	1	max	$20+j15$	10
14	152	ТРДН-32000/150	АС-240/32	32	1	min	$15+j7$	10
15	120	ТРДН-40000/110	АС-240/32	25	1	max	$32+j12$	6
16	118	ТРДН-40000/110	АС-240/32	20	1	min	$16+j8$	6
17	120	2×ТМН-6300/110	АС-70/11	17	2	max	$10+j6$	6
18	115	2×ТМН-6300/110	АС-70/11	20	2	min	$6+j2$	10
19	116	ТМН-6300/110	АС-70/11	17	1	max	$5+j2$	10
20	115	ТМН-6300/110	АС-70/11	17	1	min	$2+j1,5$	10
21	121	ТРДН-25000/110	АС-95/16	28	2	max	$17+j7$	6

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22	117	2×ТМН-6300/110	АС-70/11	35	2	max	10+j 7	10
23	115	ТМН-6300/110	АС-70/11	40	1	min	5+j 2	10
24	112	ТРДН-40000/110	АС-185/29	30	1	max	25+j 7	6
25	119	ТРДН-63000/110	АС-150/24	50	1	min	35+j 15	10
26	120	2×ТРДН-63000/110	АС-240/32	40	2	max	75+j 35	10
27	117	ТРДН-80000/110	АС-120/19	70	2	min	30+j 12	6
28	121	2×ТРДН-80000/110	АС-240/32	40	2	max	85+j 40	6
29	109	ТРДН-40000/110	АС-185/29	30	1	min	12+j 5	6
30	119	ТРДН-63000/110	АС-150/24	50	1	max	50+j 20	6
31	121	ТДН-10000/110	АС-70/11	30	2	max	8+j 3	10
32	117	ТДН-10000/110	АС-70/11	40	2	min	4+j 2	10
33	121	ТДН-16000/110	АС-150/24	20	1	max	12+j 5	6
34	116	ТДН-16000/110	АС-150/24	30	1	min	6+j 4	6
35	121	2×ТДН-16000/110	АС-185/29	20	2	max	10+j 6	6
36	115	ТДН-10000/110	АС-185/29	25	2	min	9+j 5	10
37	119	ТДН-25000/110	АС-240/32	35	1	max	17+j 8	10
38	114	ТДН-25000/110	АС-240/32	40	1	min	15+j 7	6
39	118	ТРДН-32000/110	АС-240/32	40	1	min	22+j 9	10
40	121	ТРДН-40000/110	АС-240/32	50	2	max	34+j 16	10
41	152	2×ТМН-6300/150	АС-70/11	40	2	max	7+j 4	6
42	150	2×ТМН-4000/150	АС-70/11	35	2	min	3+j 2	6
43	158	ТРДН-40000/150	АС-240/32	25	1	max	20+j 15	6
44	152	ТРДН-32000/150	АС-240/32	32	1	min	15+j 7	6
45	120	ТДН-16000/110	АС-120/19	25	1	max	32+j 10	10
46	118	ТРДН-40000/110	АС-240/32	20	1	min	16+j 7	10
47	121	2×ТМН-6300/110	АС-120/27	17	2	max	8+j 6	6

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
48	115	ТМН-6300/110	АС-95/16	20	2	min	$6+j4$	10
49	117	ТМН-6300/110	АС-70/11	17	1	max	$5+j2$	6
50	119	ТМН-10000/110	АС-120/19	17	1	min	$8+j3,5$	6

Требования к отчету по работе

Отчет по работе должен содержать наименование работы, цель, задание согласно варианту, схемы замещения, математические формулы и соотношения для расчета, результаты расчетов, результаты анализа в виде графических зависимостей и таблиц, выводы.

Вопросы, выносимые на защиту работы, относятся к теме работы и касаются проделанного анализа, выводов с целью уточнения или расширения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроэнергетические системы и сети: учеб. пособие / В. Ф. Шишлаков, О. Я. Солёная, С. В. Солёный. – СПб.: ГУАП, 2017. – 127 с.

2. Электрические системы и сети: учеб. пособие / О. Я. Солёная, С. В. Солёный. – СПб.: ГУАП, 2022. – 79 с.

Пример выполнения работы в среде MathCad

Расчёт параметров режима работы электрической сети

Цель работы: исследование режимов работы участка электрической сети и определение ее режимных параметров.

Выполнение работы

ORIGIN = 0

1. Справочные данные трансформатора

Тип трансформатора ТДН-10000/110/10

Количество параллельно работающих трансформаторов	$N_T := 1$
Номинальная мощность	$S_{НОМ} := 10 \text{ МВА}$
Номинальное напряжение	
со стороны ВН	$U_{В.НОМ} := 115 \text{ кВ}$
со стороны НН	$U_{Н.НОМ} := 11 \text{ кВ}$
Потери активной мощности из опыта КЗ	
	$dP_{КЗ} := 58 \text{ кВт}$
Потери активной мощности из опыта XX	
	$dP_{XX} := 14 \text{ кВт}$
Напряжение короткого замыкания	
	$U_{КЗ} := 10.5 \%$
Ток холостого хода	
	$I_{XX} := 0.9 \%$
Напряжение сети (табл. 1)	$U_{Н.СЕТИ} := 10 \text{ кВ}$

2. Справочные данные линии электропередач

Марка провода АС-70/11

Номинальное напряжение	$U_{НОМ} := 110 \text{ кВ}$
Удельное активное сопротивление	$R_0 := 0.428 \text{ Ом/км}$
Удельное реактивное сопротивление	$X_0 := 0.444 \text{ Ом/км}$
Удельная емкостная проводимость	$B_0 := 2.55 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$
Длина ЛЭП	$L_{ЛЭП} := 30 \text{ км}$
Количество цепей ЛЭП	$N_{ЛЭП} := 2$

Нагрузка подстанции

$$P_{МАХ} := 8 \text{ МВт} \quad Q_{МАХ} := 3 \text{ МВАр}$$

$$S_{МАХ} := P_{МАХ} + i \cdot Q_{МАХ} = 8 + 3i \text{ МВА}$$

Напряжение источника питания

$$U_{ИП} := 121 \text{ кВ}$$

3. Определение параметров схемы замещения

Расчет трансформатора

Активное сопротивление

$$R_T := \frac{dP_{KZ} \cdot U_{В.НОМ}^2}{S_{НОМ}^2 \cdot 10^3} = 7.67 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление

$$X_T := \frac{U_{KZ} \cdot U_{В.НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} = 138.863 \text{ Ом}$$

Потери реактивной мощности из опыта XX

$$dQ_{XX} := \frac{I_{XX}}{100} \cdot S_{НОМ} = 0.09 \text{ МВАр}$$

С учетом двух параллельно работающих трансформаторов

$$R_{T.EKV} := \frac{R_T}{N_T} = 7.67 \text{ Ом}$$

$$X_{T.EKV} := \frac{X_T}{N_T} = 138.863 \text{ Ом}$$

Эквивалентное сопротивление трансформаторов

$$Z_{T.EKV} := R_{T.EKV} + i \cdot X_{T.EKV} = 7.67 + 138.863i \text{ Ом}$$

Потери мощности в стали

$$dS_{СТ} := N_T \left(\frac{dP_{XX}}{10^3} + i \cdot dQ_{XX} \right) = 0.014 + 0.09i \text{ МВА}$$

Расчет ЛЭП

Эквивалентное сопротивление ЛЭП

$$Z_{LEP} := \frac{(R_0 + i \cdot X_0) \cdot L}{N_{LEP}} = 6.42 + 6.66i \text{ Ом}$$

Зарядная мощность ЛЭП

$$\Delta Q_{CLEP} := N_{LEP} \cdot B_0 \cdot L \cdot U_{НОМ}^2 = 1.851 \text{ Мвар}$$

4. Определение расчетных нагрузок

4.1 Потери мощности в меди трансформатора

- по схеме замещения

$$\Delta S_{\text{МД}} := \frac{P_{\text{MAX}}^2 + Q_{\text{MAX}}^2}{U_{\text{В.НОМ}}^2} \cdot (R_{\text{Т.ЕКВ}} + i \cdot X_{\text{Т.ЕКВ}}) = 0.042 + 0.767i \text{ Мвар}$$

- по справочным данным

$$\Delta P_{\text{МД}} := \frac{dP_{\text{КЗ}}}{N_{\text{T}} \cdot 10^3} \cdot \frac{P_{\text{MAX}}^2 + Q_{\text{MAX}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = 0.042 \text{ МВт}$$

$$\Delta Q_{\text{МД}} := \frac{U_{\text{КЗ}}}{N_{\text{T}} \cdot 100} \cdot \frac{P_{\text{MAX}}^2 + Q_{\text{MAX}}^2}{S_{\text{НОМ}}} = 0.766 \text{ Мвар}$$

$$\Delta S_{\text{МД}} := \Delta P_{\text{МД}} + i \cdot \Delta Q_{\text{МД}} = 0.042 + 0.766i \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{\text{МД}} = 0.042 + 0.767i \quad \Delta S_{\text{МД}} = 0.042 + 0.766i \text{ МВА}$$

Сравнить результаты расчета потерь мощности!

4.2 Мощность, входящая в обмотку трансформатора

$$S_{\text{ТР}} := S_{\text{MAX}} + \Delta S_{\text{МД}} = 8.042 + 3.767i \text{ МВА}$$

4.3 Приведенная мощность узла В (высшая обмотка трансформатора)

$$S_{\text{ПР}} := S_{\text{ТР}} + dS_{\text{СТ}} = 8.056 + 3.857i \text{ МВА}$$

4.4 Расчетная мощность узла В (высшая обмотка трансформатора)

$$S_{\text{Р}} := S_{\text{ПР}} - i \cdot \frac{\Delta Q_{\text{СЛЕП}}}{2} = 8.056 + 2.931i \text{ МВА}$$

5. Расчет режима работы схемы электроснабжения "по данным начала"

Номинальное напряжение сети $U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$

Принимаем напряжение в узле В равным номинальному напряжению сети

$$U_{\text{В.ТР}} := U_{\text{НОМ}} = 110 \text{ кВ}$$

5.1 Расчет потокораспределения ("по данным конца участка")

Участок ИП-В

Мощность в конце участка

$$S_{\text{КИП}_\text{В}} := S_{\text{Р}} = 8.056 + 2.931i \text{ МВА}$$

Потери мощности в ЛЭП

$$\Delta S_{\text{ИП_В}} := \frac{\text{Re}(S_{\text{К.ИП_В}})^2 + \text{Im}(S_{\text{К.ИП_В}})^2}{U_{\text{В.ТР}}^2} \cdot Z_{\text{ЛЭП}} = 0.039 + 0.04i \text{ МВА}$$

Мощность в начале участка

$$S_{\text{Н.ИП_В}} := S_{\text{К.ИП_В}} + \Delta S_{\text{ИП_В}} = 8.095 + 2.971i \text{ МВА}$$

5.2 Расчет напряжения в узлах ("по данным начала участка")

Участок ИП-В

Напряжение источника питания

$$U_{\text{ИП}} = 121 \text{ кВ}$$

$$\text{В случае изменения напряжения на ИП: } U_{\text{ИП}} := 120.7 \text{ кВ}$$

Потери напряжения в ЛЭП

$$\Delta U_{\text{ИП_В}} := \frac{\text{Re}(S_{\text{Н.ИП_В}}) \cdot \text{Re}(Z_{\text{ЛЭП}}) + \text{Im}(S_{\text{Н.ИП_В}}) \cdot \text{Im}(Z_{\text{ЛЭП}})}{U_{\text{ИП}}} = 0.593 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{В}} := U_{\text{ИП}} - \Delta U_{\text{ИП_В}} \quad U_{\text{В}} = 120.4 \text{ кВ}$$

Участок В-Н (потеря напряжения в трансформаторе)

$$U_{\text{В}} = 120.4 \text{ кВ}$$

$$\Delta U_{\text{ТР}} := \frac{\text{Re}(S_{\text{ТР}}) \cdot R_{\text{Т.ЕКВ}} + \text{Im}(S_{\text{ТР}}) \cdot X_{\text{Т.ЕКВ}}}{U_{\text{В}}} = 4.856 \text{ кВ}$$

Приведенное к обмотке ВН напряжение на стороне НН трансформатора

$$U_{\text{Н.ПР}} := U_{\text{В}} - \Delta U_{\text{ТР}} \quad U_{\text{Н.ПР}} = 115.6 \text{ кВ}$$

Номинальный коэффициент трансформации трансформатора

$$K_{\text{ТТ}} := \frac{U_{\text{В.НОМ}}}{U_{\text{Н.НОМ}}} = 10.455$$

Фактическое напряжение на стороне НН трансформатора

$$U_{\text{Н}} := \frac{U_{\text{Н.ПР}}}{K_{\text{ТТ}}} = 11.053 \text{ кВ}$$

Отклонение напряжения на стороне НН трансформатора от желаемого в режиме максимальной нагрузки

$$U_{Н.Ж} := 1.05 \cdot U_{Н.СЕТИ} = 10.5 \text{ кВ}$$

$$\delta U_{\%} := \frac{U_{Н} - U_{Н.Ж}}{U_{Н.Ж}} \cdot 100 = 5.264 \% > 5 \%$$

Отклонение напряжения превышает допустимый уровень, следовательно, фактическое напряжение на стороне НН трансформаторной подстанции не соответствует требованию ГОСТ.

Необходимо расчётным путём методом подбора определить такую величину напряжения на шинах НН подстанции, при котором отклонение напряжения не будет превышать допустимой величины.

Для этого задаём различные значения $U_{ИП}$ (в п. 5.2 работы подсвечено синим цветом) и заново рассчитываем напряжение в узлах "по данным начала участка".

Для снижения фактического напряжения до допустимого уровня необходимо снизить напряжение источника питания до величины

$$U_{ИП} := 120.7 \text{ кВ}$$

Тогда фактическое напряжение на шинах НН равно $U_{Н} := 11.023 \text{ кВ}$

А отклонение напряжения равно $\delta U_{\%} := 4.978 \%$



6. Построение эпюры напряжений

$$k := 0..2$$

$$U_k := U_{NEW_k} :=$$

121
120.4
115.6

120.7
120.1
115.2

U_k
 U_k
 U_{NEW_k}

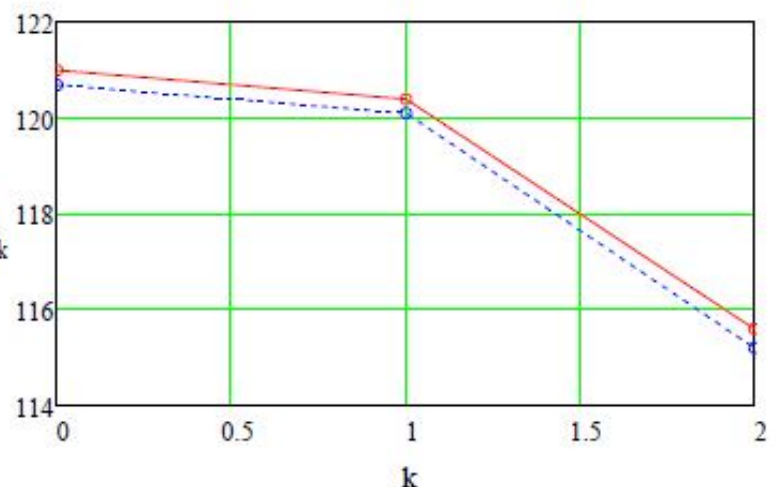


Рисунок 2 - Эпюра напряжения до и после изменения напряжения источника питания

Вывод: при данной конфигурации схемы электроснабжения и напряжении источника питания 121 кВ фактическое напряжение на шинах низкого напряжения подстанции (11.053 кВ) отклоняется от величины желаемого напряжения (10.5 кВ) на 5.264%, что недопустимо.

Если снизить напряжение источника питания до 120.7 кВ, то фактическое напряжение на шинах НН ПС снизится до 11.023 кВ и отклонение напряжения 4.978% станет допустимым.

На графике приведены эпюры напряжения, по которым видно, что наибольшая потеря напряжения происходит в трансформаторе.