

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*C.A. Янченко*

**ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
ETAP ДЛЯ РАСЧЕТА ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*Учебное электронное издание*

для студентов, обучающихся по направлению  
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ISBN 978-5-7046-2783-8**

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

УДК 621.3  
ББК 31.29-5  
Я 662

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ» в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологии»

Рецензенты: профессор, доктор техн. наук Е.Н. Рыжкова;  
доцент, доктор техн. наук Ю.А. Сычев

**Янченко, С.А.**

Я 662 Основы использования программного комплекса ЕТАР для расчета типовых режимов систем электроснабжения [Электронный ресурс]: практикум / С.А. Янченко. – Электрон. дан. – М.: Издательство МЭИ, 2023. – 1 электрон. опт. диск DVD-R.

Содержит описания лабораторных работ, порядок их проведения и обработки результатов испытаний. Включены работы по исследованию различных режимов работы систем электроснабжения. Продолжительность лабораторных занятий – 5 ч.

Для подготовки магистров по направлению 13.04.02  
«Электроэнергетика и электротехника».

**Минимальные системные требования :**

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Веб-браузер: Google Chrome, Internet Explorer.

**ISBN 978-5-7046-2783-8**

©Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

**Учебное электронное издание**

**Янченко Сергей Александрович**

Для выполнения лабораторных работ используются демонстрационные версии следующего программного обеспечения.

Программный комплекс расчета режимов систем электроснабжения ETAP Power systems .

Программное обеспечение скачивается по ссылкам, указанным преподавателем, и устанавливается на ЭВМ слушателя.

*Редактор Т.А. Феоктистова*

---

Дата подписания – 10.04.2023

Объём издания – 42 Мбайт.

Тираж – 10 электронных оптических дисков DVD-R

Издательство МЭИ  
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1

[izdatmpei@gmail.com](mailto:izdatmpei@gmail.com)

# **СОДЕРЖАНИЕ**

Предисловие .....	6
Лабораторная работа №1. Расчет установившегося режима сети в программе ETAP .....	7
1.1. Назначение и краткая характеристика работы .....	7
1.2. Общие принципы расчета установившегося режима электрических сетей .....	7
1.2.1. Краткая методология расчета.....	7
1.2.2. Расчет установившегося режима методом Ньютона–Рафсона...	9
1.2.2. Расчет установившегося режима методом Гаусса–Зейделя .....	9
1.3. Содержание работы.....	10
1.4. Порядок выполнения работы .....	10
1.5. Описание параметров элементов модели .....	13
1.6. Исходные данные для расчета .....	24
Контрольные вопросы.....	26
Лабораторная работа №2. Расчет токов короткого замыкания в программе ETAP .....	27
2.1. Назначение и краткая характеристика работы .....	27
2.2. Описание теоретического аппарата расчета токов КЗ .....	27
2.2.1. Расчет симметричных КЗ .....	27
2.2.2. Особенности расчета несимметричных КЗ .....	29
2.3. Содержание работы.....	30
2.4. Порядок выполнения работы .....	30
Контрольные вопросы.....	33
Лабораторная работа №3. Проверка селективности устройств релейной защиты в программе ETAP .....	35
3.1. Назначение и краткая характеристика работы .....	35
3.2. Алгоритм расчета и выбора защит элементов системы электроснабжения.....	35
3.2.1. Защита цеховых трансформаторов .....	35
3.2.2. Защита асинхронных двигателей.....	37
3.2.3. Защита трансформаторов ГПП .....	39
3.2.4. Построение карты селективности защит .....	40

3.3. Содержание работы.....	41
3.4. Порядок выполнения работы .....	41
3.5. Настройка параметров релейной защиты и карт селективности....	42
Контрольные вопросы.....	50
Лабораторная работа №4. Расчет режима самозапуска электродвигателей в программе ETAP .....	51
4.1. Назначение и краткая характеристика работы .....	51
4.2. Краткое описание процесса самозапуска электродвигателей .....	51
4.2.1. Основные этапы самозапуска .....	51
4.2.2. Расчет параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя .....	52
4.2.3. Расчет механической характеристики электродвигателя .....	54
4.3. Содержание работы.....	55
4.4. Порядок выполнения работы .....	55
4.5. Описание настройки расчета переходного режима СЭС .....	59
4.6. Исходные данные для моделирования .....	63
Контрольные вопросы.....	65
Лабораторная работа №5. Расчет уровней высших гармоник в сетях с нелинейными нагрузками и средств снижения несинусоидальности напряжения в программе ETAP .....	66
5.1. Назначение и краткая характеристика работы .....	66
5.2. Теоретические основы расчета несинусоидальных режимов.....	66
5.2.1. Общее описание проблемы несинусоидальности напряжения	66
5.2.2. Регулирование уровней несинусоидальности с помощью пассивных фильтров высших гармоник и многопульсных схем .....	67
5.3. Порядок выполнения работы .....	70
5.4. Методические указания к работе в лаборатории .....	72
Контрольные вопросы.....	77
Заключение.....	78
Список использованной литературы .....	79

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Объектами изучения дисциплины «Информационные технологии в электроснабжении» являются электрические сети и система электроснабжения в целом. Их специфика обуславливает широкое использование в качестве инструмента анализа программных средств моделирования типовых режимов электрических сетей.

Практикум посвящен использованию программного комплекса ETAP для решения широкого круга задач при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения.

ETAP представляет собой совокупность блоков моделирования, проектирования, анализа, оптимизации, управления и автоматизации электроэнергетических систем. Совместное использование модулей расчёта установившегося и переходного режимов, коротких замыканий, релейной защиты, надежности, несинусоидальности и несимметрии позволяет разрабатывать комплексные модели функционирования электроэнергетических систем, тем самым существенно увеличивая эффективность анализа и повышая достоверность результатов расчета.

[К содержанию](#)

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЕТИ В ПРОГРАММЕ ETAP

## 1.1. Назначение и краткая характеристика работы

Работа состоит из экспериментальной части, нацеленной на ознакомление с возможностями построения схем электрических соединений в программе ETAP, моделирования типовой системы электроснабжения и проведения расчетов установившегося режима сети [1].

[К содержанию](#)

## 1.2. Общие принципы расчета установившегося режима электрических сетей

### 1.2.1. Краткая методология расчета

Типовым подходом к расчету установившегося режима электрической сети является решение численным методом, так называемых, уравнений невязки [2], составленных на основе допущения о равенстве нулю для  $i$ -го узла сети суммы мощностей генерации  $P_{\Gamma,i}$ ,  $Q_{\Gamma,i}$ , нагрузки  $P_{H,i}$ ,  $Q_{H,i}$  и потоков мощностей  $\Sigma P_{\text{расч},i}$ ,  $\Sigma Q_{\text{расч},i}$  между рассматриваемым  $i$ -м узлом и смежными узлами через соответствующие проводимости (рис. 1.1):

$$\Delta P_i = P_{\Gamma,i} - P_{H,i} - \Sigma P_{\text{расч},i} = 0, \quad (1.1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{\Gamma,i} - Q_{H,i} - \Sigma Q_{\text{расч},i} = 0, \quad (1.2)$$

где  $\Delta P_i$  и  $\Delta Q_i$  – невязки активной и реактивной мощности в узле  $i$ .

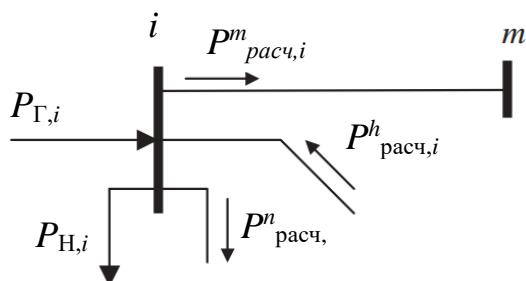


Рис. 1.1. Распределение потоков мощностей в  $i$ -м узле

Мощность, поступающая в  $i$ -й узел из  $j$ -го узла, может быть представлена в виде функции соответствующих узловых напряжений  $U_i$  и  $U_j$  и тока  $I_i$ :

$$S_{\text{расч},i} = P_{\text{расч},i} + jQ_{\text{расч},i} = U_i \cdot I_i^* = U_i \cdot (Y_{ii} \cdot U_i + Y_{ij} \cdot U_j)^*, \quad (1.3)$$

где  $Y_{ii}$  и  $Y_{ij}$  – собственная и взаимная по отношению к  $j$ -му узлу проводимости  $i$ -го узла.

Учитывая, что комплексная проводимость  $Y_{ij}$  может быть представлена как

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \quad (1.4)$$

выражение (1.3) можно переписать отдельно для активной и реактивной мощностей в виде:

$$P_{\text{расч},i} = U_{m,i}^2 \cdot G_{ii} + U_{m,i} \cdot U_{m,j} \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)], \quad (1.5)$$

$$Q_{\text{расч},i} = -U_{m,i}^2 \cdot B_{ii} + U_{m,i} \cdot U_{m,j} \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)]. \quad (1.6)$$

Таким образом, величина мощностей, передаваемых между рассматриваемым и смежными узлами, определяется уровнем узловых напряжений и проводимостей соответствующих ветвей. В случае, если напряжения в узлах рассчитываемой сети неизвестны, уравнения (1.1), (1.2) не равны нулю и расчет установившегося режима сводится к итеративной корректировке узловых напряжений, обеспечивающих минимальные значения невязок мощностей, которые в современных программных симуляторах установившегося режима обычно составляют около  $10^{-12}$ . Полученные в результате расчета значения амплитуд и фазовых углов напряжений в узлах соответствуют переменным состояниям системы и характеризуют ее установившийся режим.

В рамках расчета каждый узел характеризуется 4 параметрами: активной и реактивной мощностями и амплитудой и фазовым углом напряжения. В зависимости от того, какие из этих 4 параметров известны для рассматриваемого узла, выделяют следующие типы узлов [2]:

- нагрузочный ( $PQ$ ) узел: отсутствуют подключенные генераторы ( $P_{\Gamma,i}, Q_{\Gamma,i} = 0$ ), известны величины нагрузки  $P_{\text{H},i}, Q_{\text{H},i}$ , неизвестно комплексное напряжение узла  $U_{m,i} < \delta_i$ ;

- генераторный ( $PV$ ) узел: подключен генератор, выдающий фиксированную величину активную мощность  $P_{\Gamma,i}$  и обеспечивающий поддержание заданного уровня напряжения в узле  $U_{m,i}$ ; величина реактивной мощности, необходимой для регулирования напряжения, а также фазовый угол напряжения  $\delta_i$  неизвестны;

– балансирующий узел с фиксированным значением комплексного напряжения  $U_{m,i} < \delta_i$ , представляющий собой точку подключения рассчитываемой сети к внешней сети бесконечной мощности.

[К содержанию](#)

### 1.2.2. Расчет установившегося режима методом Ньютона–Рафсона

Для решения методом Ньютона–Рафсона система уравнений (1.1), (1.2) преобразуется к следующему виду [2]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c|cc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & U_{m,2} \frac{\partial P_2}{\partial U_{m,2}} \dots U_{m,1+n0} \frac{\partial P_2}{\partial U_{m,1+n0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & U_{m,2} \frac{\partial P_n}{\partial U_{m,2}} \dots U_{m,1+n0} \frac{\partial P_n}{\partial U_{m,1+n0}} \end{array} \right] \\ \mathbf{J}_{11}, (n-1) \times (n-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta U_{m,2} \\ \vdots \\ \Delta U_{m,1+n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left[ \begin{array}{c|cc} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & U_{m,2} \frac{\partial Q_2}{\partial U_{m,2}} \dots U_{m,1+n0} \frac{\partial Q_2}{\partial U_{m,1+n0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} \dots \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & U_{m,2} \frac{\partial Q_n}{\partial U_{m,2}} \dots U_{m,1+n0} \frac{\partial Q_n}{\partial U_{m,1+n0}} \end{array} \right] \\ \mathbf{J}_{21}, np \times (n-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_{m,2} \\ \vdots \\ \Delta U_{m,1+n0} \end{bmatrix}, \quad (1.7)$$

где  $n$  – общее число узлов,  $np$  – число нагрузочных  $PQ$  узлов;  $\mathbf{J}$  – якобиан итеративного расчета по методу Ньютона размерностью  $(n + np - 1) \times (n + np - 1)$ .

Достоинством итеративного расчета системы (1.7) по методу Ньютона–Рафсона является быстрая сходимость, проявляющаяся в квадратичном снижении невязки мощностей с каждой следующей итерацией. В то же время эффективность итеративного расчета существенно зависит от корректного выбора начальных значений вектора переменных состояния [3].

[К содержанию](#)

### 1.2.2. Расчет установившегося режима методом Гаусса–Зейделя

В рамках данного метода уравнение мощности  $i$ -го узла (1.3) записывается для всех узлов рассчитываемой сети в матричном виде [2]:

$$\mathbf{P} + j\mathbf{Q} = \mathbf{U}^T \cdot [\mathbf{Y}^* \cdot \mathbf{U}^*], \quad (1.8)$$

где  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{Q}$  – векторы активных и реактивных мощностей узлов сети;  $\mathbf{U}$  – вектор комплексных узловых напряжений;  $\mathbf{Y}$  – матрица проводимостей сети.

Процесс решения заключается в итеративном определении вектора  $\mathbf{U}$  из системы (1.8) до момента, пока не будет обеспечена требуемая точность расчета. Достоинством расчета по методу Гаусса–Зейделя являются менее строгие требования к выбору начальных значений вектора; недостатком – медленная сходимость в сравнении с методом Ньютона–Рафсона [3].

[К содержанию](#)

### 1.3. Содержание работы

1. Моделирование заданной схемы электроснабжения в программе: размещение элементов однолинейной схемы, задание соответствующих параметров.
2. Расчет установившегося режима работы моделируемой сети по методу Ньютона–Рафсона.
3. Проверка корректности ввода исходных данных с помощью температурного анализатора.
4. Создание отчета, редактирование содержания и возможные способы упрощения выгрузки результатов множества тематических исследований и/или исследования с различными расчетными условиями.

[К содержанию](#)

### 1.4. Порядок выполнения работы

1. Создать новый проект в программе ЕТАР.
2. Используя свой номер по списку  $N_{\text{СП}}$ , определить вариант схемы  $N_{\text{СХ}}$  и соответствующих параметров оборудования  $N_{\text{ПАР}}$  по следующим условиям:
  - если  $N_{\text{СП}} < 12$ ,  $N_{\text{СХ}} = \text{int}(N_{\text{СП}} / 4) + 1$ ,  $N_{\text{ПАР}} = \text{rem}(N_{\text{СП}} / 4) + 1$ ;
  - если  $N_{\text{СП}} > 12$ ,  $N_{\text{СХ}} = \text{int}(N_{\text{СП}} / 4) - 2$ ,  $N_{\text{ПАР}} = \text{rem}(N_{\text{СП}} / 4) + 1$ ,где  $\text{int}$  – целая часть результата деления;  $\text{rem}$  – остаток деления.
3. На основе  $N_{\text{СХ}}$  и  $N_{\text{ПАР}}$  выбрать моделируемую однолинейную схему ([рис. 1.22](#)) и параметры соответствующего оборудования ([табл. 1.1 – 1.4](#)), создать модель схемы в программе, задать параметры элементов. При моделировании воспользоваться описанием параметров блоков на [рис. 1.4 – 1.19](#) и описанием программы ЕТАР [1].
4. Настроить параметры расчета ([рис. 1.20, 1.21](#)) и рассчитать установившийся режим работы схемы методом Ньютона–Рафсона;

5. Создать отчет ([рис. 1.3](#)) и проанализировать результаты расчета, оценить корректность, рассчитанных узловых напряжений, токов в ветвях, потоков мощности; при необходимости скорректировать параметры схемы и пересчитать установившийся режим.

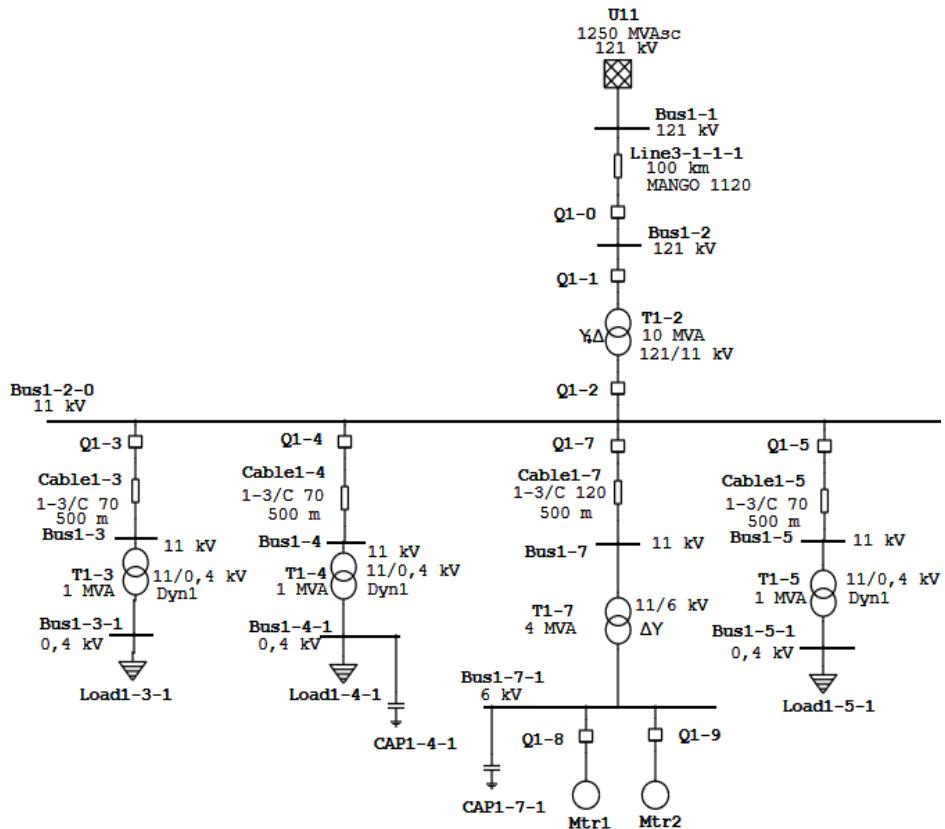


Рис. 1.2. Пример модели электрической сети в программе ETAP

### Bus Loading Summary Report

Bus			Directly Connected Load				Total Bus Load						
ID	kV	Rated Amp	Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic		MVA	% PF	Amp
Bus1-1		121.000									4.499	93.7	21.5
Bus1-2		121.000									4.468	94.1	21.5
Bus1-2-0		11.000									4.422	95.0	236.1
Bus1-3		11.000									0.473	83.8	25.3
Bus1-3-1		0.400				0.244					0.463	85.0	694.6
Bus1-4		11.000									0.706	92.7	37.7
Bus1-4-1		0.400				0.235					0.772	84.0	1161.6
Bus1-5		11.000									0.486	83.8	26.0
Bus1-5-1		0.400				0.251					0.476	85.0	713.7
Bus1-6		11.000									0.157	99.9	8.4
Bus1-6-1		0.400				0.002					0.182	85.0	271.3
Bus1-7		11.000		0.000							2.645	97.5	141.5
Bus1-7-1		6.000	2.559	1.039							2.762	92.7	275.2

Рис. 1.3. Фрагмент отчета с результатами расчета установившегося режима модели сети

[К содержанию](#)

## 1.5. Описание параметров элементов модели

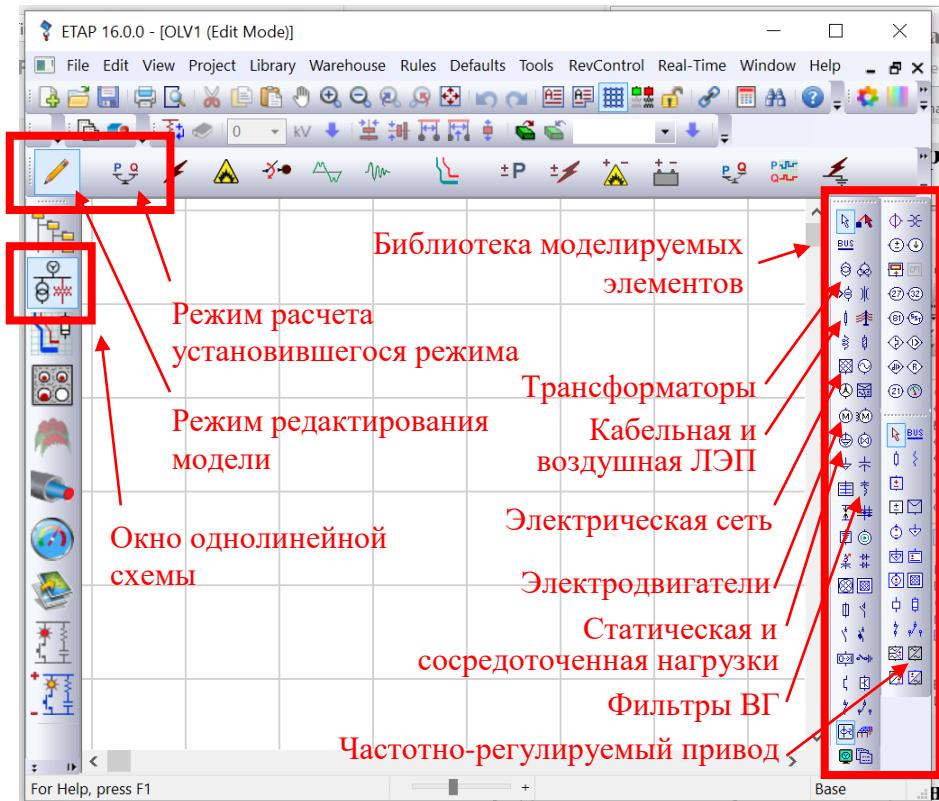


Рис. 1.4. Интерфейс окна программы

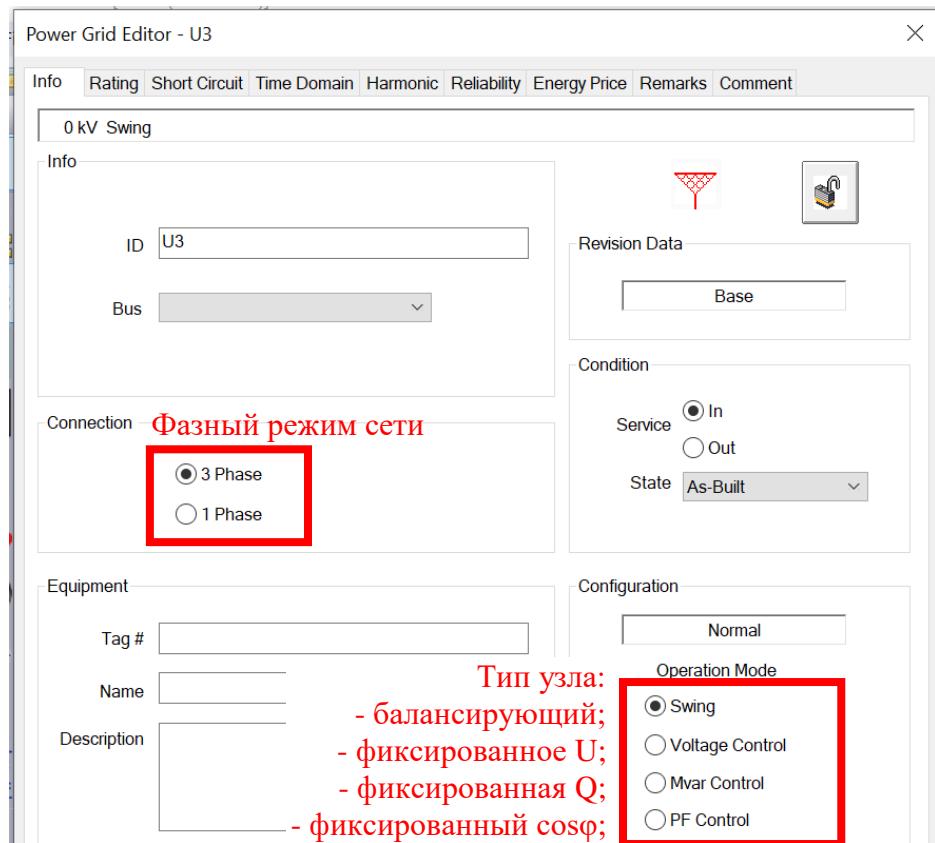


Рис. 1.5. Электрическая сеть, вкладка «Info»

Gen. Cat.	%V	Vangle	MW	Mvar	%PF	Qmax	Qmin
1 Design	100	0					
2 Normal	100	0					
3 Shutdown	100	0					
4 Emergency	100	0					

Рис. 1.6. Электрическая сеть, вкладка «Rating»

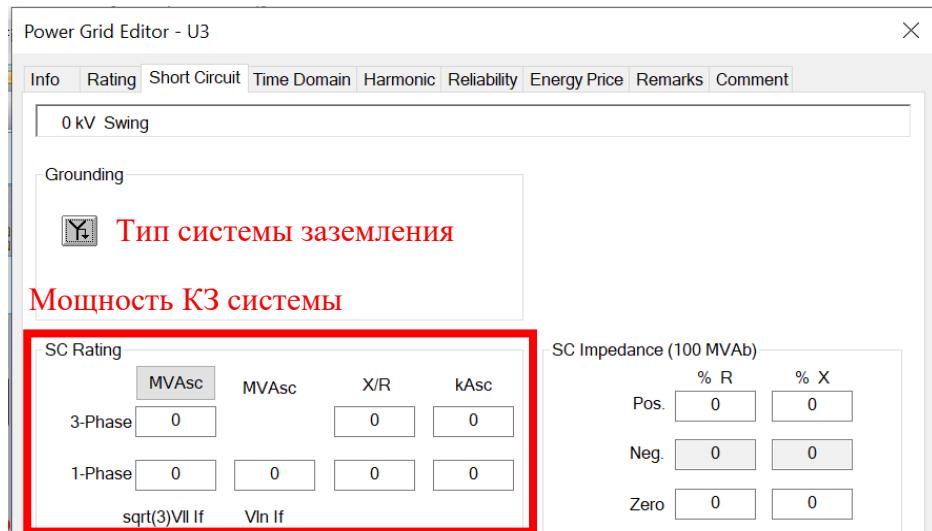


Рис. 1.7. Электрическая сеть, вкладка «Short circuit»

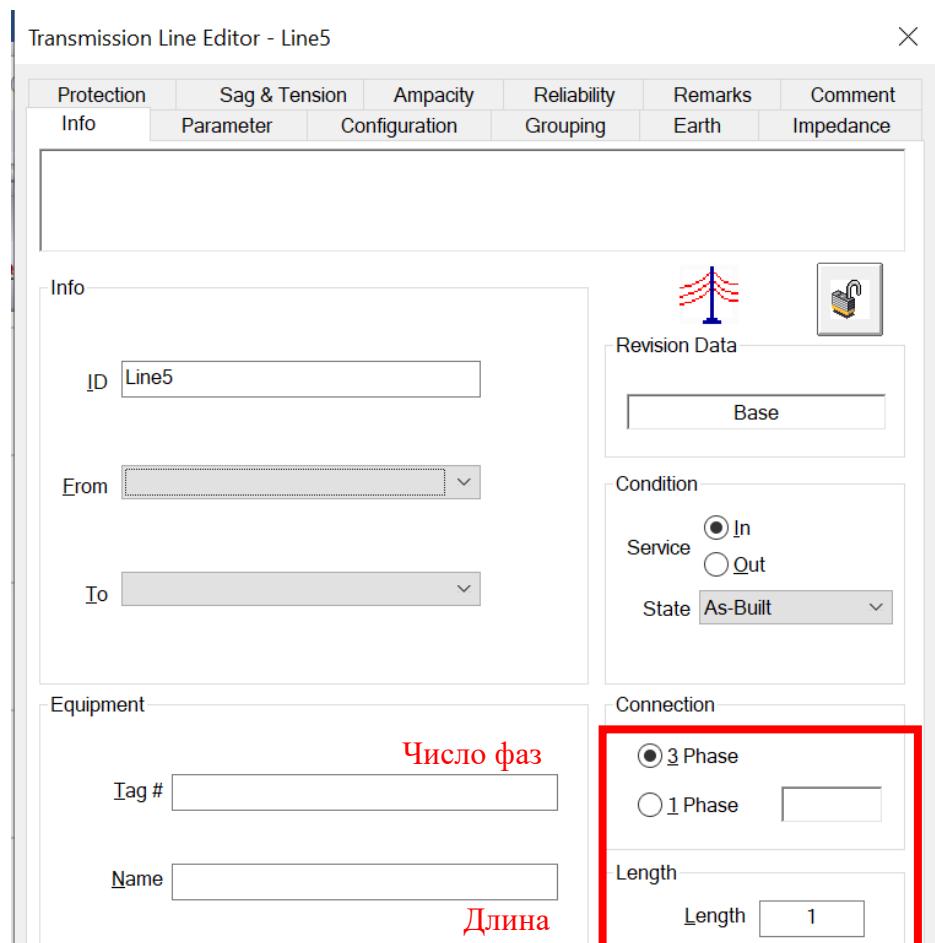


Рис. 1.8. Линия электропередачи, вкладка «Info»

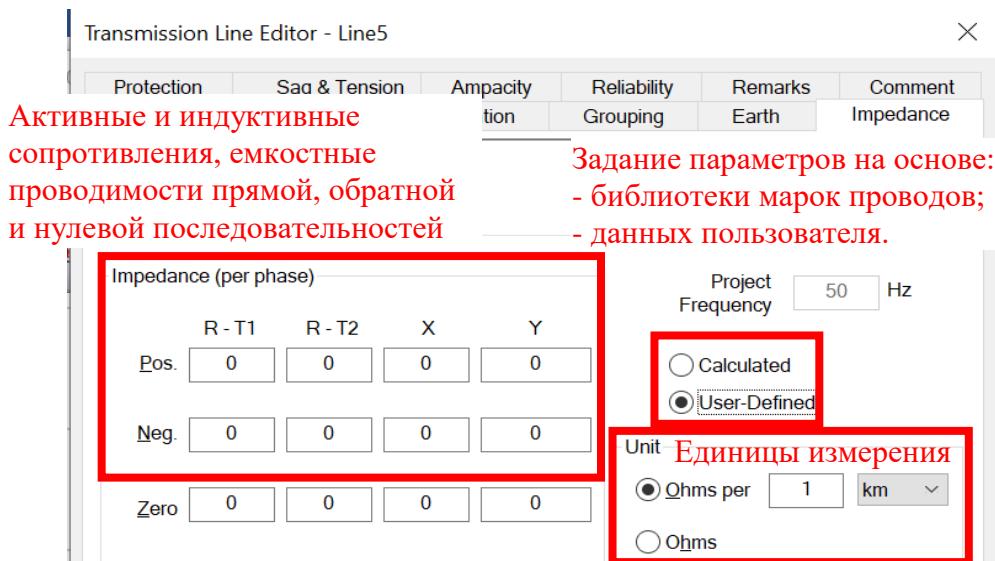


Рис. 1.9. Линия электропередачи, вкладка «Impedance»

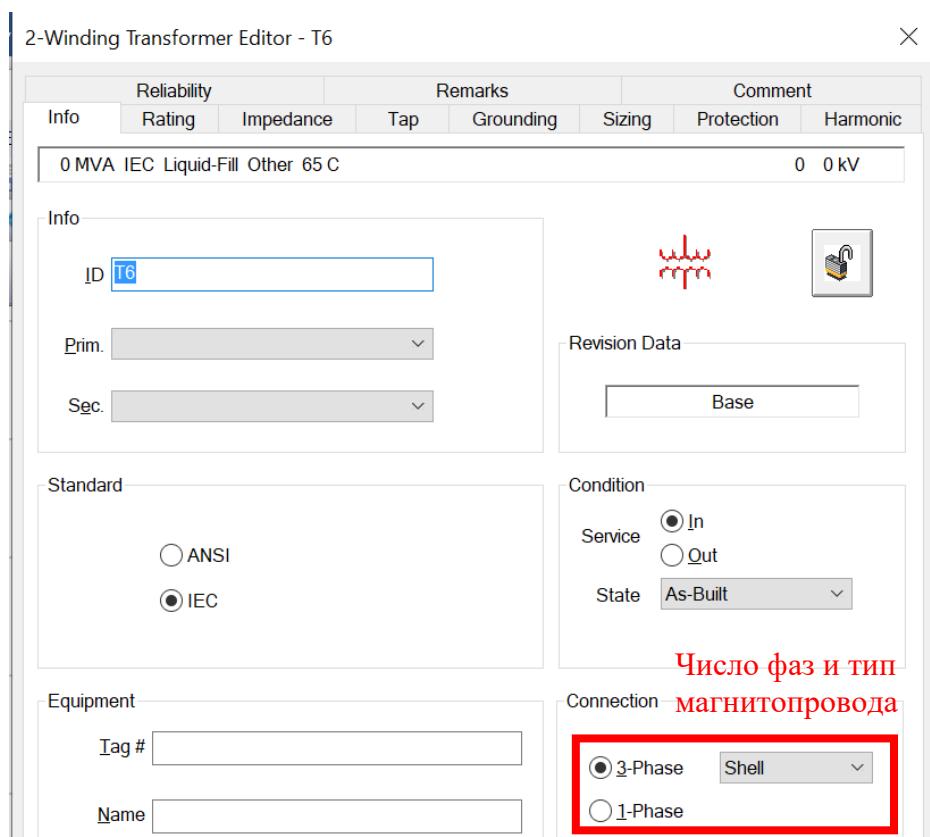


Рис. 1.10. Двухобмоточный трансформатор, вкладка «Info»

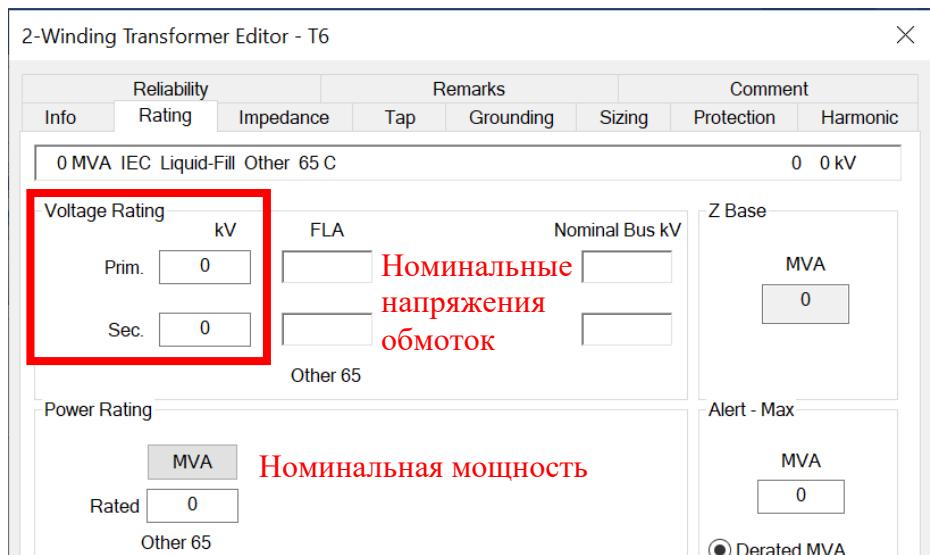


Рис. 1.11. Двухобмоточный трансформатор, вкладка «Rating»

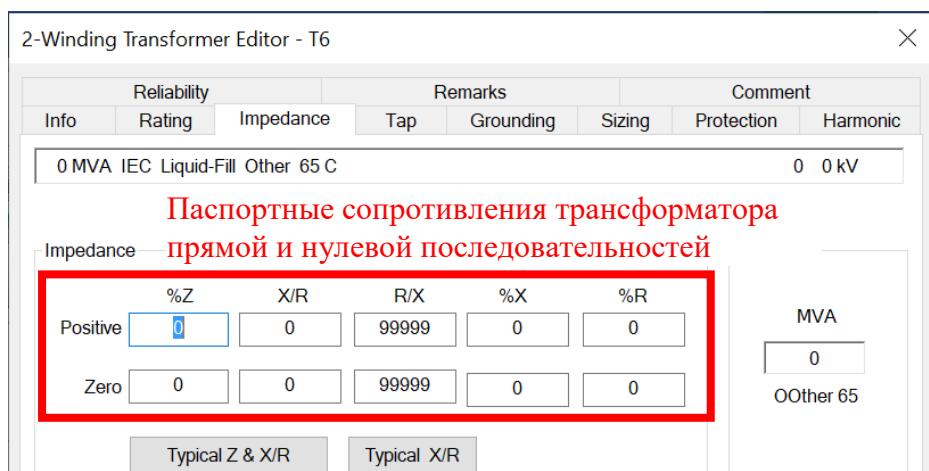


Рис. 1.12. Двухобмоточный трансформатор, вкладка «Impedance»

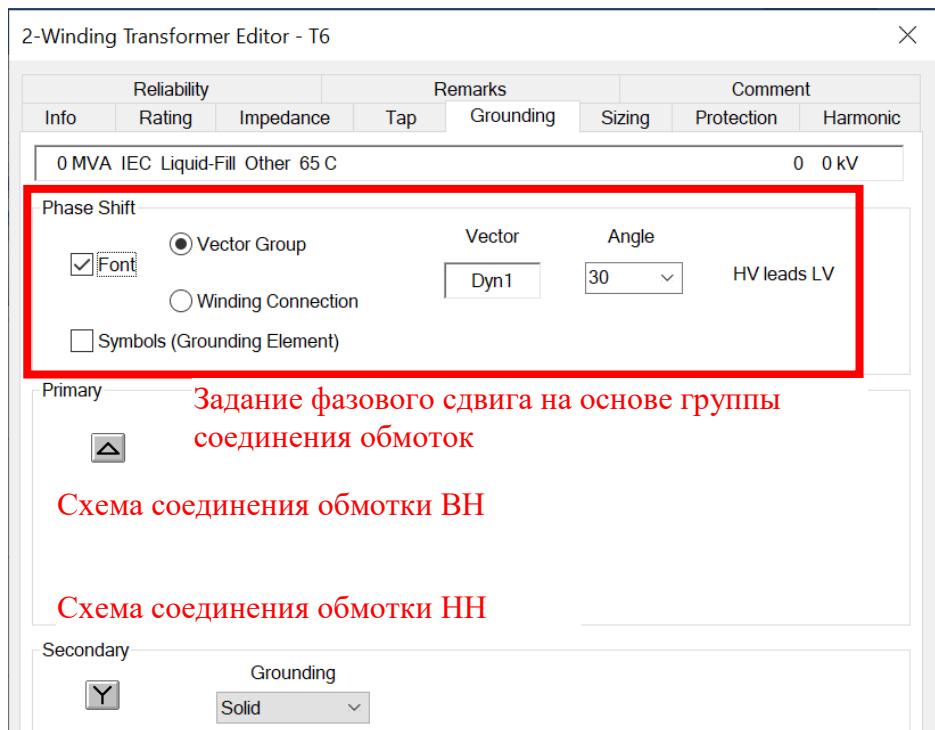


Рис. 1.13. Двухобмоточный трансформатор, вкладка «Grounding»

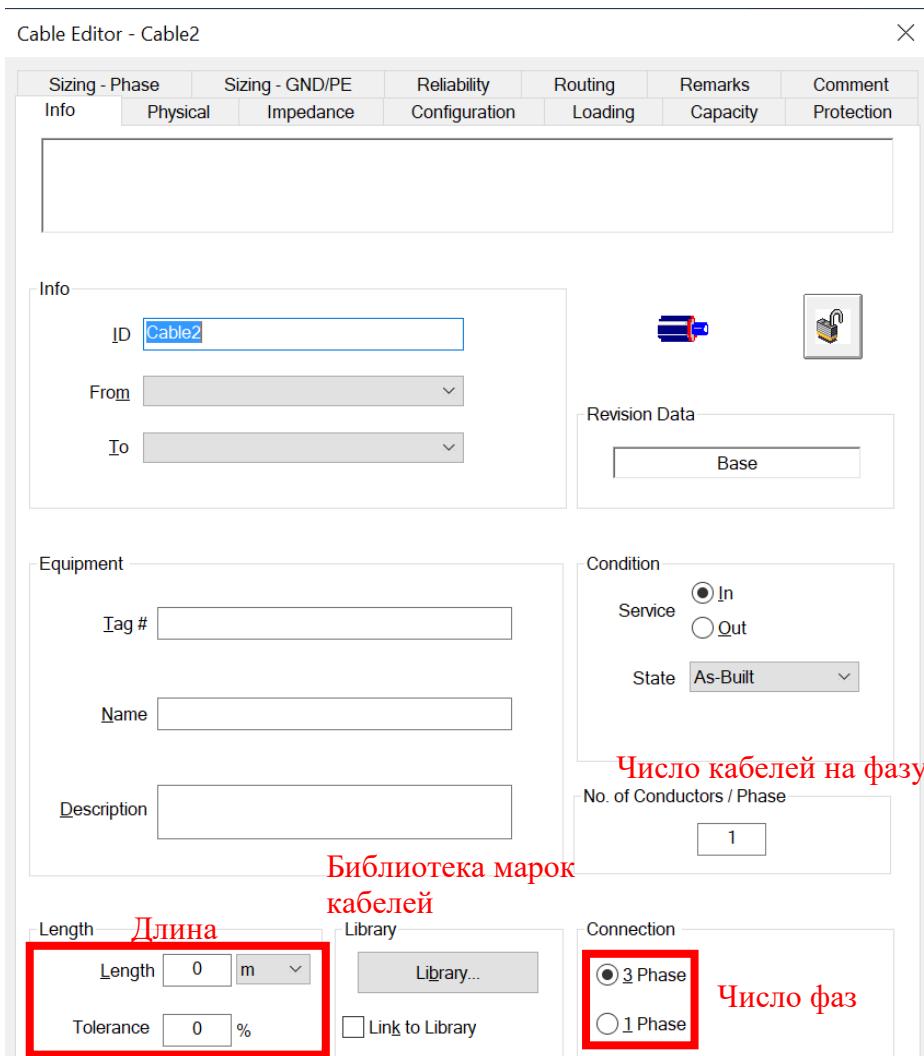


Рис. 1.14. Кабельная линия, вкладка «Info»

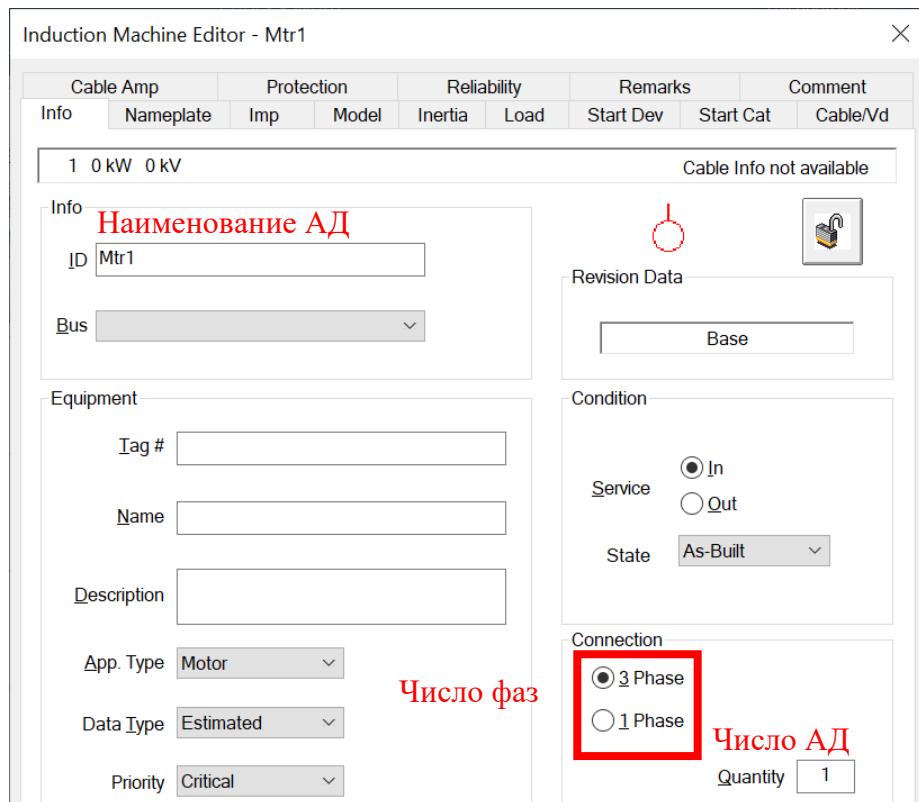


Рис. 1.15. Асинхронный двигатель, вкладка «Info»

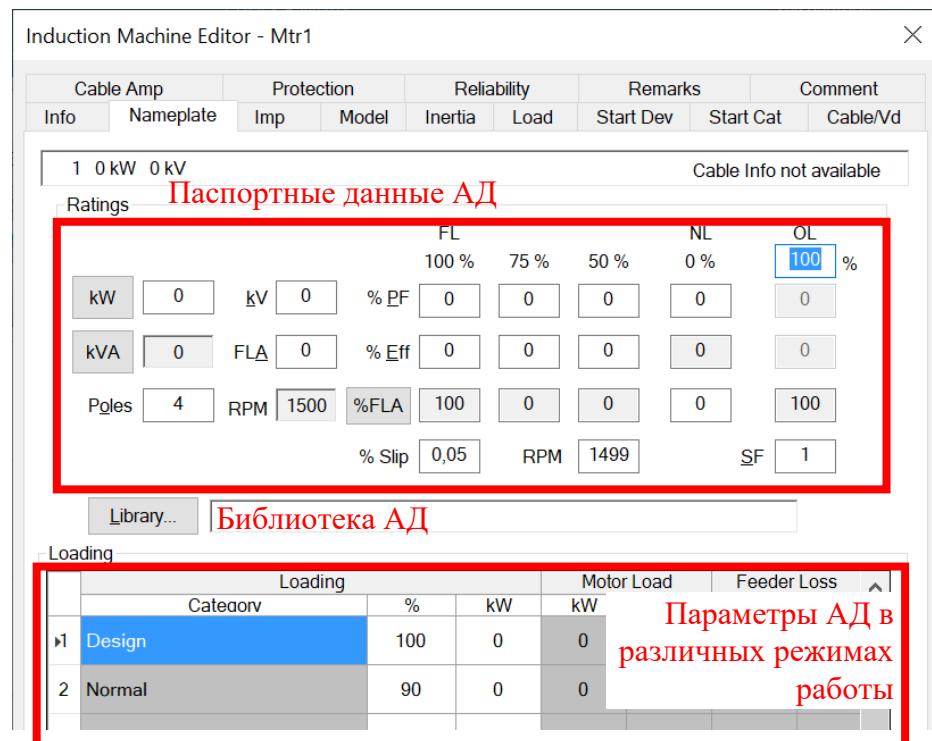


Рис. 1.16. Асинхронный двигатель, вкладка «Nameplate»

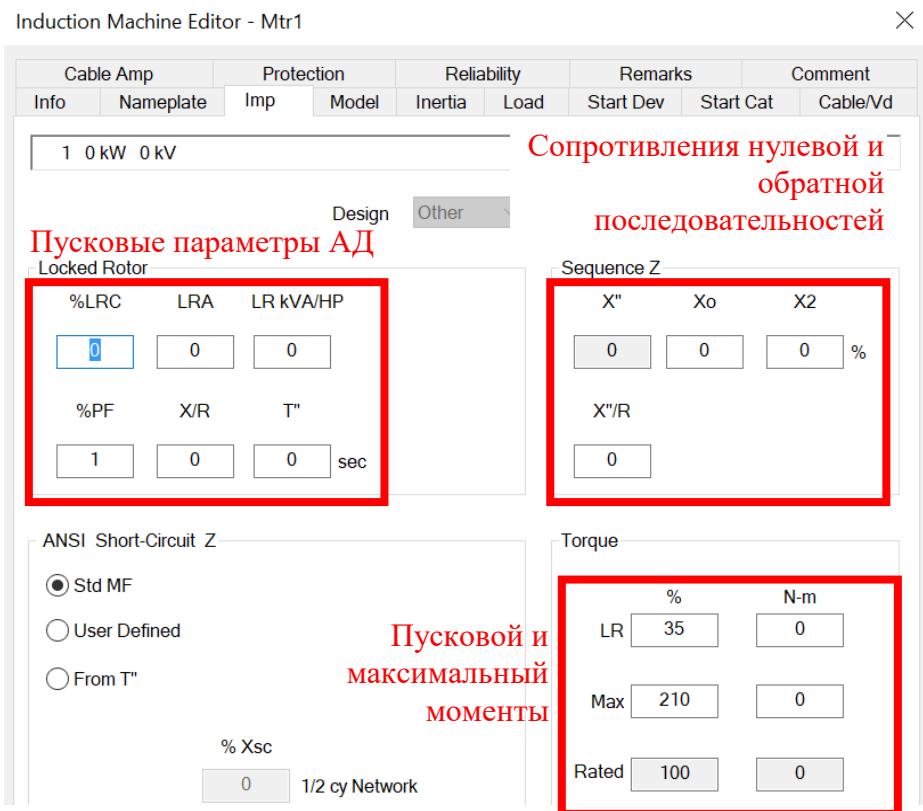


Рис. 1.17. Асинхронный двигатель, вкладка «Imp»

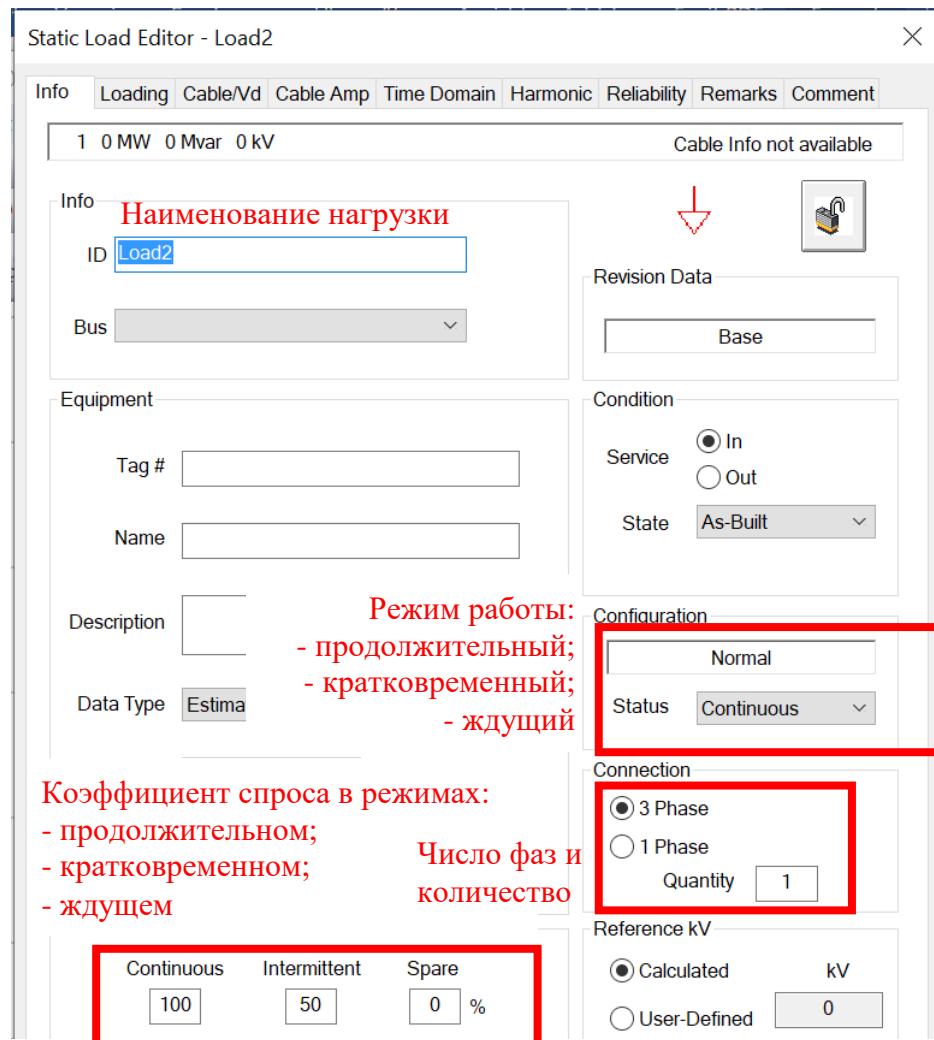


Рис. 1.18. Статическая нагрузка, вкладка «Info»

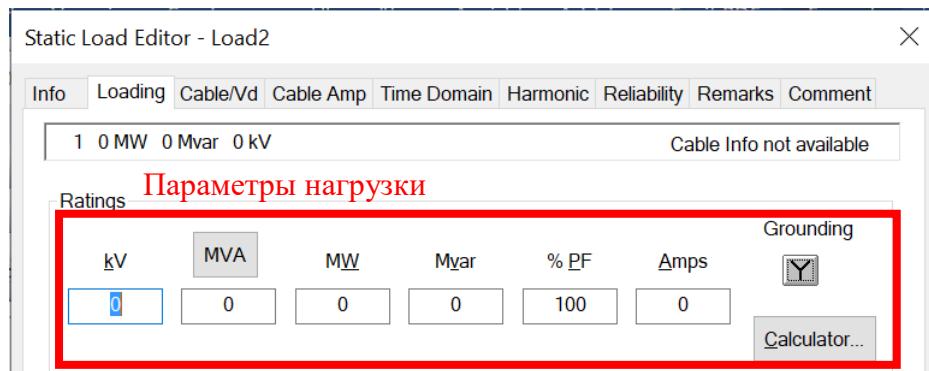


Рис. 1.19. Статическая нагрузка, вкладка «Loading»

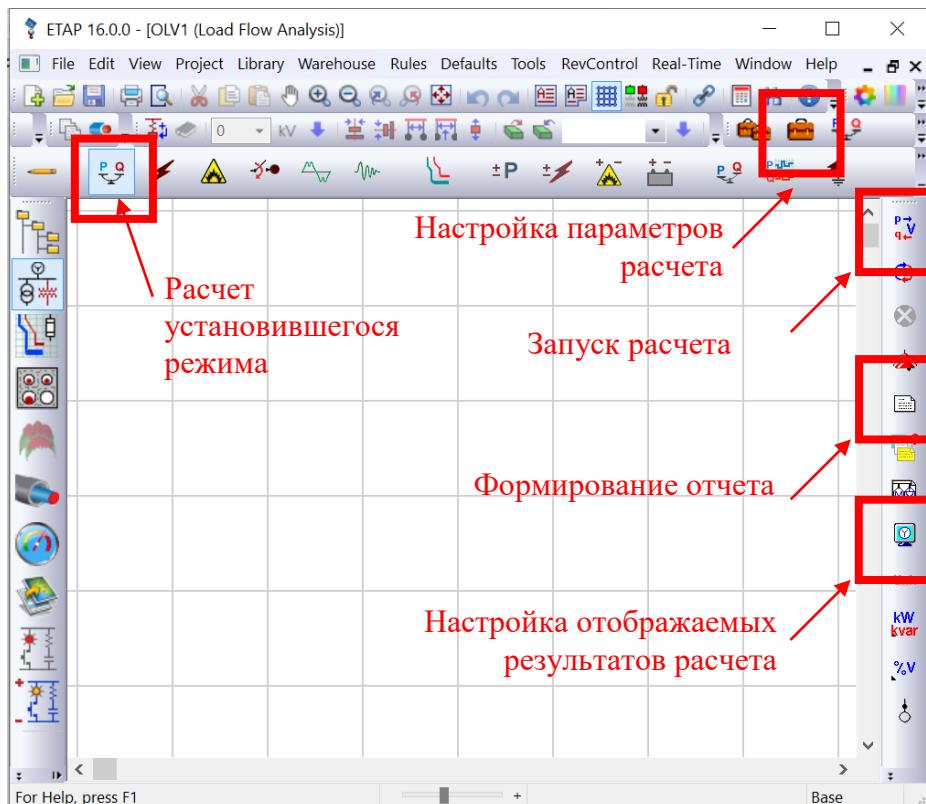


Рис. 1.20. Интерфейс программы в режиме расчета установленного режима

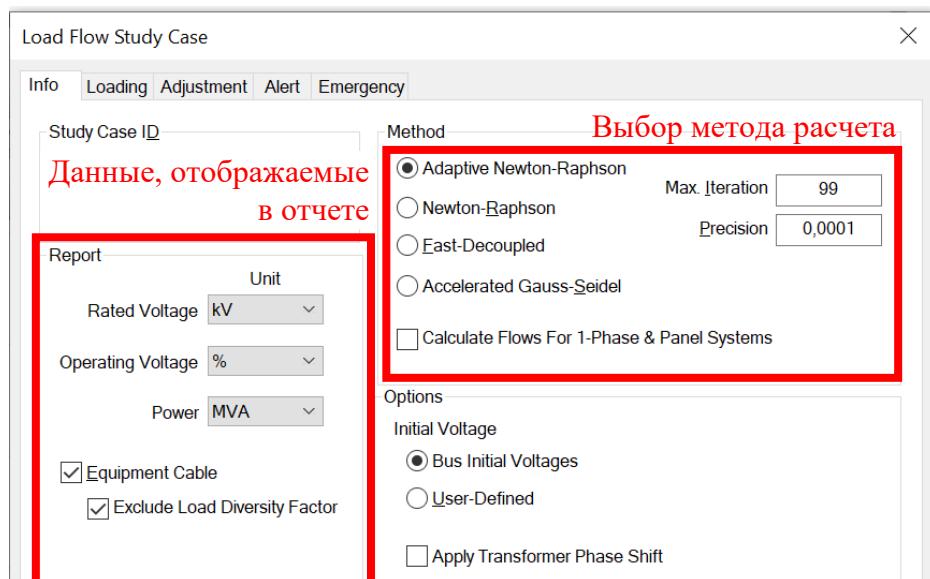


Рис. 1.21. Настройка параметров расчета, вкладка «Info»

[К содержанию](#)

## 1.6. Исходные данные для расчета

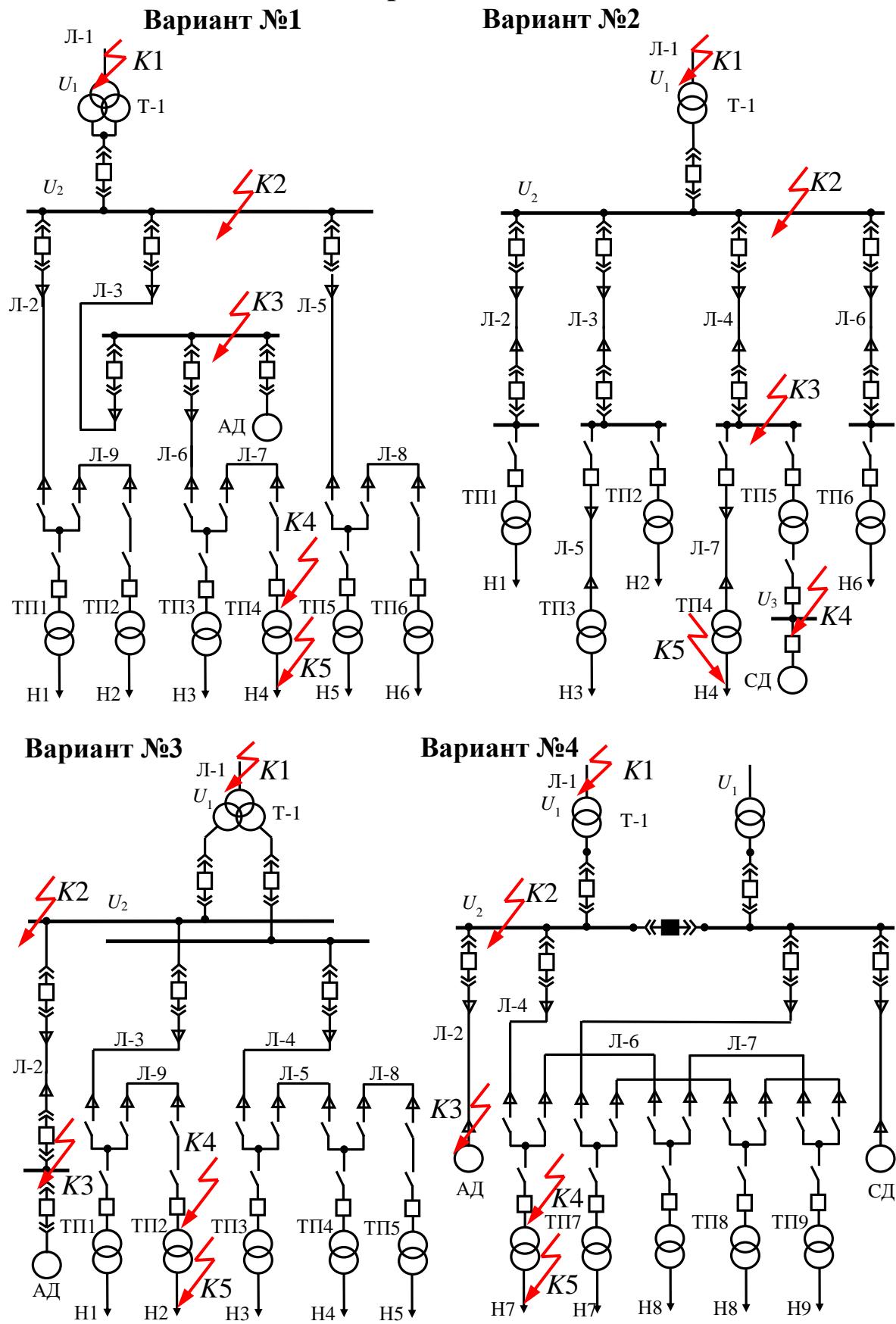


Рис. 1.22. Варианты моделируемых схем электроснабжения

Таблица 1.1 – Параметры элементов схемы №1 на рис. 1.22

№U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub> , АД кВ	МВт	Л-1		Л-2		Л-3		Л-5		Л-6		Л-7,9		Л-8		Т-1, ТП1/ТП2/ТП3/ТП4/ МВА		
		мм <sup>2</sup> /км	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	А	МВА	МВА	МВА	
1 110/10	1	2xAC70/8		50/ 0.7	95/ 0.5	25/ 0.4	50/ 4	0.16/ 2	0.06/ 3	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.2	0.06/ 0.2	25	1.6/ 1.2	1.6/ 1.1	1.6/ 1.5	1.6/ 1.4
2 35/6	0.5	AC150/10		50/ 0.6	95/ 0.4	25/ 0.5	50/ 6	0.16/ 2	0.06/ 3	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.2	0.06/ 0.2	25	1/ 0.8	1/ 0.9	1/ 0.7	1/ 0.8
3 35/6	1.25	2xAC150/6		25/ 0.6	95/ 0.3	120/ 0.3	25/ 5	0.10/ 3	0.06/ 0.2	0.10/ 0.2	0.06/ 0.2	0.10/ 0.2	0.06/ 0.2	32	0.63/ 0.5	0.63/ 0.6	0.63/ 0.5	0.63/ 0.3
4 110/10	1	2xAC70/9		95/ 0.5	70/ 0.4	16/ 0.6	95/ 5	0.35/ 2	0.16/ 0.1	0.35/ 0.1	0.16/ 0.1	0.35/ 0.1	0.16/ 0.1	40	1.6/ 1.4	1.6/ 1.3	1.6/ 1	1.6/ 1.4
5 110/10	1	2xAC70/12		16/ 0.5	70/ 0.6	50/ 0.5	16/ 4	0.16/ 2	0.06/ 0.1	0.16/ 0.1	0.06/ 0.1	0.16/ 0.1	0.06/ 0.1	40	1/ 0.5	1/ 0.85	1/ 0.9	1/ 0.6

Таблица 1.2 – Параметры элементов схемы №2 на рис. 1.22

№U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub> , СД кВ	МВт	Л-1		Л-2		Л-3		Л-4		Л-5		Л-6		Л-7		Т-1, ТП1/ТП2/ТП3/ТП4/ТП5, ТП6/ МВА			
		мм <sup>2</sup> /км	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	А	МВА	МВА	МВА
1 110/100.8	2x	25/ 0.5	50/ 0.4	95/ 0.3	16/ 0.7	50/ 0.6	16/ 0.3	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.2	0.06/ 0.2	0.16/ 0.2	0.06/ 0.2	25	0.63/ 0.5	1/ 0.9	0.63/ 0.5	0.63/ 0.5	4 1.6/ 1.5
2 110/101	2x	16/ 0.3	50/ 0.3	95/ 0.8	16/ 0.5	16/ 0.7	16/ 0.2	0.16/ 0.2	0.06/ 0.1	0.16/ 0.2	0.06/ 0.1	0.16/ 0.2	0.06/ 0.1	40	1.6/ 1	1/ 0.7	1.6/ 1	1.6/ 1	6.3 1/ 0.9
3 35/10 1	2x	70/ 0.2	70/ 0.2	120/ 0.3	70/ 0.3	70/ 0.5	70/ 0.4	0.16/ 0.4	0.06/ 0.3	0.16/ 0.4	0.06/ 0.3	0.16/ 0.4	0.06/ 0.3	40	1/ 0.8	0.63/ 0.4	1/ 0.8	1/ 0.8	6.3 1/ 0.8
4 35/10 0.8	2x	25/ 0.2	35/ 0.2	35/ 0.4	25/ 0.2	25/ 0.3	25/ 0.5	0.16/ 0.5	0.06/ 0.3	0.16/ 0.5	0.06/ 0.3	0.16/ 0.5	0.06/ 0.3	32	0.63/ 0.6	1.6/ 1	0.63/ 0.6	0.63/ 0.6	4 0.63/ 0.4
5 110/101	2x	95/ 0.4	25/ 0.3	95/ 0.4	35/ 0.5	16/ 0.5	16/ 0.3	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	40	1.6/ 1.3	1/ 0.9	1.6/ 1.3	1.6/ 1.3	6.3 0.63/ 0.5

Таблица 1.3 – Параметры элементов схемы №3 на рис. 1.22

№U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub> , АД кВ	МВт	Л-1		Л-2		Л-3		Л-5		Л-4		Л-8		Л-9		Т-1, ТП1/ТП2/ТП3/ТП4/ МВА			
		мм <sup>2</sup> /км	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	мм <sup>2</sup>	км	А	МВА	МВА	МВА
1 110/10 1	2xAC70/11	50/ 0.7	16/ 0.5	16/ 0.2	25/ 0.4	16/ 0.3	16/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	25	0.63/ 0.5	0.63/ 0.5	0.63/ 0.5	0.63/ 0.2	0.63/ 0.4
2 110/6 0.5	2xAC95/10	50/ 0.6	35/ 0.4	35/ 0.1	95/ 0.4	16/ 0.2	16/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.1	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	32	1.6/ 0.9	1.6/ 1.3	1.6/ 1.3	1.6/ 1.5	1.6/ 1.2
3 35/6 0.63	4xAC150/6	50/ 0.5	50/ 0.3	50/ 0.3	95/ 0.5	35/ 0.4	35/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.3	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.3	40	1.6/ 1.2	1.6/ 1.5	1.6/ 1.5	1.6/ 1.3	1.6/ 1.3
4 110/10 0.8	2xAC95/15	95/ 0.5	50/ 0.3	50/ 0.2	70/ 0.3	35/ 0.2	35/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	0.16/ 0.3	0.06/ 0.2	40	1/ 0.8	1/ 0.9	1/ 0.9	1/ 0.6	1/ 0.8
5 35/6 0.5	4xAC150/7	70/ 0.7	50/ 0.2	50/ 0.2	70/ 0.4	10/ 0.2	10/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	0.16/ 0.4	0.06/ 0.2	25	0.63/ 0.4	0.63/ 0.5	0.63/ 0.5	0.63/ 0.3	0.63/ 0.4

Таблица 1.4 – Параметры элементов схемы №4 на рис. 1.22

№	U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub> , кВ	СД МВт	АД МВт	Л-1 мм <sup>2</sup> /км	Л-2 мм <sup>2</sup> / км	Л-4 мм <sup>2</sup> / км	Л-6 мм <sup>2</sup> / км	Л-7 мм <sup>2</sup> / км	Т-1, МВА	Н7, Н8, Н9, МВА	ТП7/ МВА	ТП8/ МВА	ТП9/ МВА
1	110/10	0.5	1	2xAC70/8	50/ 0.7	70/ 0.2	50/ 0.2	25/ 0.4	25	1.6/ 1.5	1.6/ 1.5	1/0.9	
2	35/6	0.63	0.63	2xAC150/650/ 0.6	120/ 0.2	95/ 0.3	95/ 0.3	32	1/0.9	1/0.9	0.63/ 0.5	0.63/	
3	110/10	0.5	1	2xAC70/1050/ 0.5	120/ 0.5	95/ 0.3	50/ 0.3	32	0.63/ 0.5	0.63/ 0.5	1.6/ 1.3	1.6/	
4	110/10	0.63	1	2xAC70/1195/ 0.5	70/ 0.5	70/ 0.5	50/ 0.2	40	1/0.8	1/0.8	0.63/ 0.6	0.63/	
5	35/6	1.25	0.5	2xAC185/570/ 0.7	95/ 0.7	70/ 0.2	70/ 0.2	25	1.6/ 1.4	1.6/ 1.4	1/0.8	1/0.8	

[К содержанию](#)

## Контрольные вопросы

1. Запишите уравнения невязки и опишите входящие в них величины.
2. Перечислите основные типы узлов, учитываемых при расчете установившегося режима.
3. Запишите уравнения расчета установившегося режима по методу Ньютона–Рафсона и опишите входящие в них переменные.
4. Перечислите основные достоинства и недостатки расчета установившегося режима по методу Ньютона–Рафсона.
5. Запишите уравнения расчета установившегося режима по методу Гаусса–Зейделя и опишите входящие в них переменные.
6. Перечислите основные достоинства и недостатки расчета установившегося режима по методу Гаусса–Зейделя.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОГРАММЕ ETAP

## 2.1. Назначение и краткая характеристика работы

Работа включает в себя расчетную и экспериментальную части, нацеленные на закрепление теоретических знаний пользователей по расчетам токов короткого замыкания и их обучение использованию модуля Short–Circuit Analysis программного комплекса ETAP [1].

[К содержанию](#)

## 2.2. Описание теоретического аппарата расчета токов КЗ

### 2.2.1. Расчет симметричных КЗ

В трехфазной сети различают следующие виды КЗ: симметричные трёхфазные и несимметричные двухфазные, однофазные и двойные замыкания на землю [4, 5]. Расчетным видом КЗ для выбора или проверки параметров электрооборудования обычно считают трехфазное КЗ. Однако для выбора или проверки уставок релейной защиты и автоматики требуется определение и несимметричных токов КЗ.

В рамках расчета токов КЗ рассматриваемая однолинейная схема электроснабжения представляется в виде эквивалентной схемы замещения, в которой электрооборудование (трансформаторы, линии электропередачи и т.д.) заменяются активно-индуктивными сопротивлениями. После этого для каждой точки КЗ определяются источники питания и рассчитываются параметры схемы замещения.

Расчет токов КЗ в сетях с несколькими уровнями напряжения проводится в относительных единицах, при этом в качестве базисной мощности  $S_B$  принимают условную величину нагрузки, например, 100 МВА, а в качестве базисных напряжений  $U_B$  – уровни напряжений, относящихся к рассматриваемой сети. Значения базисных токов, соответствующих уровням напряжения сети, рассчитываются по формуле:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B}. \quad (2.1)$$

Сопротивления элементов схемы замещения определяются в соответствии с выражениями в [1]. При этом сверхпереходные сопротивления двигателей, указываемые относительно их номинальной

мощности, приводятся к общесистемным базисным единицам в соответствии с выражением:

$$X_d'' = X_{d,0}'' \frac{U_{\text{дв,ном}}^2}{S_{\text{дв,ном}}} \cdot \frac{S_B}{U_B^2}. \quad (2.2)$$

Наличие в системе электроснабжения высоковольтных электродвигателей приводит к увеличению тока КЗ за счет их дополнительной подпитки. Ток подпитки точки КЗ от электродвигательной нагрузки  $I_{\text{п,дв}}$ :

$$I_{\text{п,дв}} = \frac{E_{\text{дв}}''}{\sqrt{x_{\Sigma, \text{дв}}^2 + r_{\Sigma, \text{дв}}^2}} \cdot I_B, \quad (2.3)$$

где  $E_{\text{дв}}''$  – сверхпереходная ЭДС двигателей;  $x_{\Sigma, \text{дв}}$ ,  $r_{\Sigma, \text{дв}}$  – индуктивные и активные сопротивления цепи КЗ со стороны двигателей.

Значение сверхпереходной ЭДС, при ориентировочных расчетах может быть принято для СД равным 1.1 и для АД – 0,9, либо рассчитано по формуле [4, 5]:

$$E_{\text{дв}}'' = \sqrt{\cos \varphi_{\text{ном}}^2 + (\sin \varphi_{\text{ном}} + x_d'')^2}, \quad (2.4)$$

где  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  – коэффициент мощности электродвигателя.

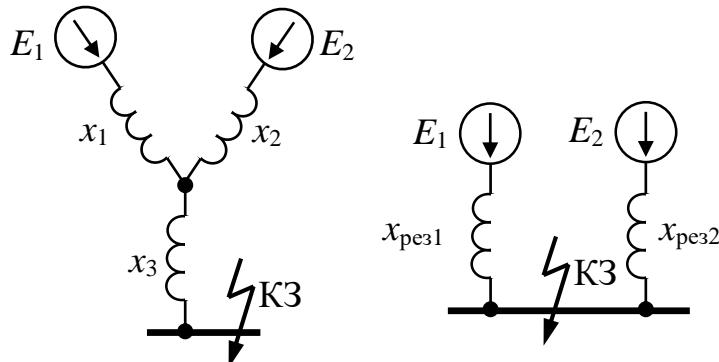


Рис. 2.1. Преобразование схемы замещения связанных цепей

При наличии связанных ветвей, по которым протекают токи подпитки КЗ от нескольких источников (рис. 2.1), для их разделения исходная схема преобразуется к лучевому виду в соответствии с выражениями [4, 5]:

$$x_{\text{рез1}} = (x_1 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_3) / x_2; \quad (2.5)$$

$$x_{pe32} = (x_1 \cdot x_2 + x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_3) / x_1, \quad (2.6)$$

где  $x_1, x_2$  – сопротивления участков цепи КЗ, соответствующих токам подпитки от двух источников питания  $E_1$  и  $E_2$ ;  $x_3$  – сопротивления связанной ветви.

В результате периодическая составляющая тока КЗ в рассматриваемой точке определяется как

$$I_{\text{пер},0}^{\text{КЗ}} = \frac{U_{\text{системы}}}{\sqrt{x_{\Sigma,C}^2 + r_{\Sigma,C}^2}} \cdot I_B, \quad (2.7)$$

где  $I_B$  – базисный ток ступени напряжения, соответствующей точке КЗ;  $U_{\text{системы}}$  – напряжение питания системы;  $x_{\Sigma,C}, r_{\Sigma,C}$ , индуктивные и активные сопротивления цепи КЗ.

[К содержанию](#)

## 2.2.2. Особенности расчета несимметричных КЗ

Абсолютный ток поврежденной фазы  $I_k^{(n)}$  для любого вида КЗ определяют в соответствии с выражением [6]:

$$I_{\text{КЗ}}^{(n)} = K^{(n)} \frac{U_{\text{системы}}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(n)}} \cdot I_B, \quad (2.8)$$

где  $n$  – индекс типа КЗ;  $K^{(n)}$  и  $x_{\Delta}^{(n)}$  – коэффициент пропорциональности и дополнительное сопротивление, значения которых составляют: при трехфазном КЗ  $K^{(3)} = 1$ ,  $x_{\Delta}^{(3)} = 0$ ; при двухфазном КЗ  $K^{(2)} = \sqrt{3}$ ,  $x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma}$ ; при однофазном КЗ  $K^{(1)} = 3$ ,  $x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}$ .

Далее для различных типов оборудования приводятся выражения для определения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей, теоретическое обоснование представленных выражений приводится в [6].

При отсутствии взаимоиндукции между фазами элемента его реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей одинаковы, так как они обусловлены только собственной индуктивностью фазы. Это условие справедливо только для реактора, т.е.  $x_1 = x_2 = x_0$  и  $r_1 = r_2 = r_0$ .

При наличии магнитной связи между фазами для оборудования, цепи которого неподвижны относительно друг друга (трансформаторы,

воздушные и кабельные линии), сопротивления прямой и обратной последовательностей равны, т.е.  $x_1 = x_2$  и  $r_1 = r_2$ .

Сопротивления нулевой последовательности линий электропередачи определяются их конструктивными параметрами и для ориентировочных расчетов могут быть определены по выражениям:

- $x_0 = (3.5 \dots 4.6) \cdot x_1$ ,  $r_0 \approx 10r_1$  – для кабельных линий;
- $x_0 = (2 \dots 5.5) \cdot x_1$ ,  $r_0 = r_{\Pi} + 0.15l_{\text{вл}}$  – для воздушных линий.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от схемы соединения обмоток. При КЗ со стороны обмотки, соединенной по схеме «треугольник» или «звезда без заземления»  $x_0 = \infty$ , поскольку отсутствует контур циркуляции токов нулевой последовательности. При КЗ на стороне обмотки, соединенной по схеме «звезда с нулем», сопротивление нулевой последовательности определяется как

$x_0 = x_1$  – для двухобмоточных трансформаторов;

$x_0$  определяется полной схемой замещения трансформатора – для трехобмоточных трансформаторов с  $Y_0/D/Y_0$ ;

$x_0 = x_{I,1} + x_{II,1}$  – для трехобмоточных трансформаторов с  $Y_0/Y/D$ ;

$x_0 = x_{I,1} + x_{II,1}/x_{III,1}$  – для трехобмоточных трансформаторов с  $Y_0/D/D$ ,

где  $x_{I,1}$ ,  $x_{II,1}$ ,  $x_{III,1}$  – сопротивления обмоток трехобмоточного трансформатора прямой последовательности.

Сопротивления обратной и нулевой последовательностей высоковольтных электродвигателей определяются как

$x_2 \approx x''_d$ ,  $x_0 = (0.15 \dots 0.6) \cdot x''_d$  – для синхронных машин;

$x_2 \approx x''_d$ , – для асинхронных двигателей.

[К содержанию](#)

## 2.3. Содержание работы

1. Предварительный теоретический расчет токов КЗ.
2. Расчет токов короткого замыкания с помощью модуля Short-Circuit Analysis программы ETAP [1].

[К содержанию](#)

## 2.4. Порядок выполнения работы

1. Для моделируемых в лабораторной работе №1 схем электроснабжения рассчитать начальные значения периодических составляющих токов симметричных и несимметричных КЗ в указанных точках.
2. Провести аналогичный расчет с помощью модуля Short-Circuit Analysis. Описание работы с модулем приведено на [рис. 2.3 – 2.6](#) и в [1].
3. Сравнить результаты теоретического и программного расчета токов КЗ.
4. Сформировать комплексный отчет с помощью Report Manager ([рис. 2.2](#)).

#### **Short-Circuit Summary Report**

3-Phase, LG, LL, LLG Fault Currents

Bus ID	kV	3-Phase Fault			Line-to-Ground Fault			Line-to-Line Fault			
		I"k	ip	Ik	I"k	ip	Ib	Ik	I"k	ip	Ib
Bus1-1	110.000	6.621	18.467	6.561	6.676	18.621	6.676	6.676	5.734	15.993	5.734
Bus1-2	110.000	0.926	1.540	0.870	0.938	1.560	0.938	0.938	0.802	1.333	0.802
Bus1-2-0	10.000	4.543	9.701	3.746	0.000	0.000	0.000	0.000	3.932	8.396	3.932
Bus1-4	10.000	4.342	8.831	3.606	0.000	0.000	0.000	0.000	3.758	7.643	3.758
Bus1-4-1	0.380	22.535	48.824	21.669	24.247	52.533	24.247	24.247	19.513	42.278	19.513
Bus1-7	10.000	4.485	9.491	3.687	0.000	0.000	0.000	0.000	3.882	8.214	3.882
Bus1-7-1	6.000	4.658	10.632	2.874	0.178	0.405	0.178	0.178	4.026	9.191	4.026

All fault currents are in rms kA. Current ip is calculated using Method C.

\* LLG fault current is the larger of the two faulted line currents.

Рис. 2.2. Фрагмент отчета с результатами расчета схемы  
[К содержанию](#)

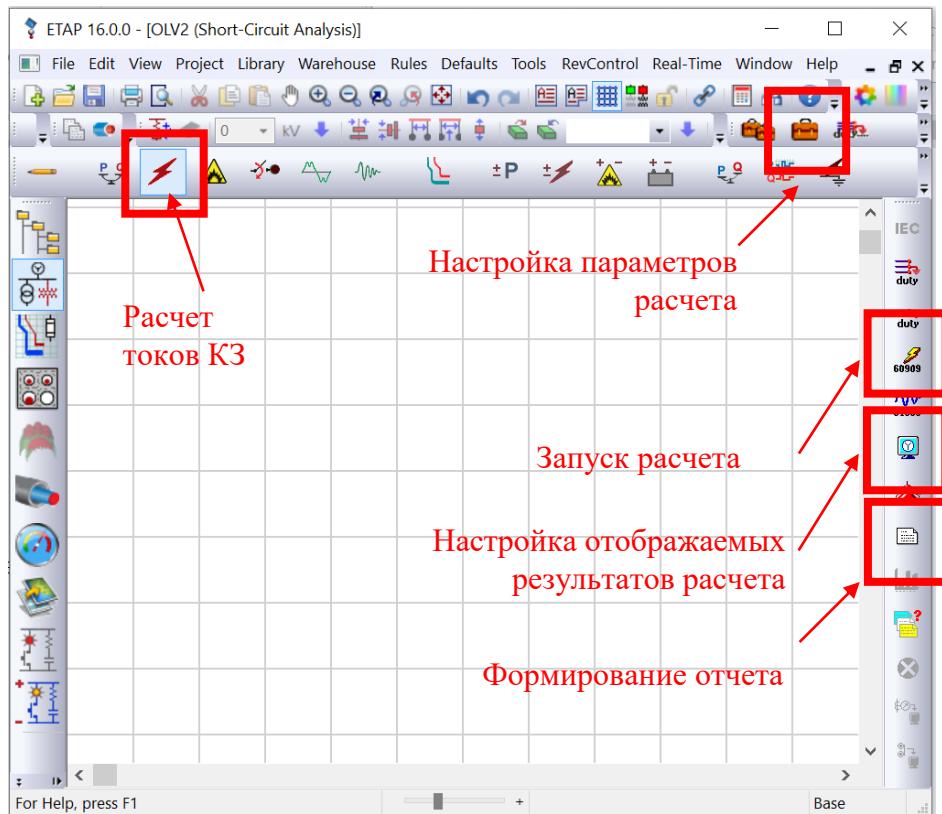


Рис. 2.3. Интерфейс программы в режиме расчета токов КЗ

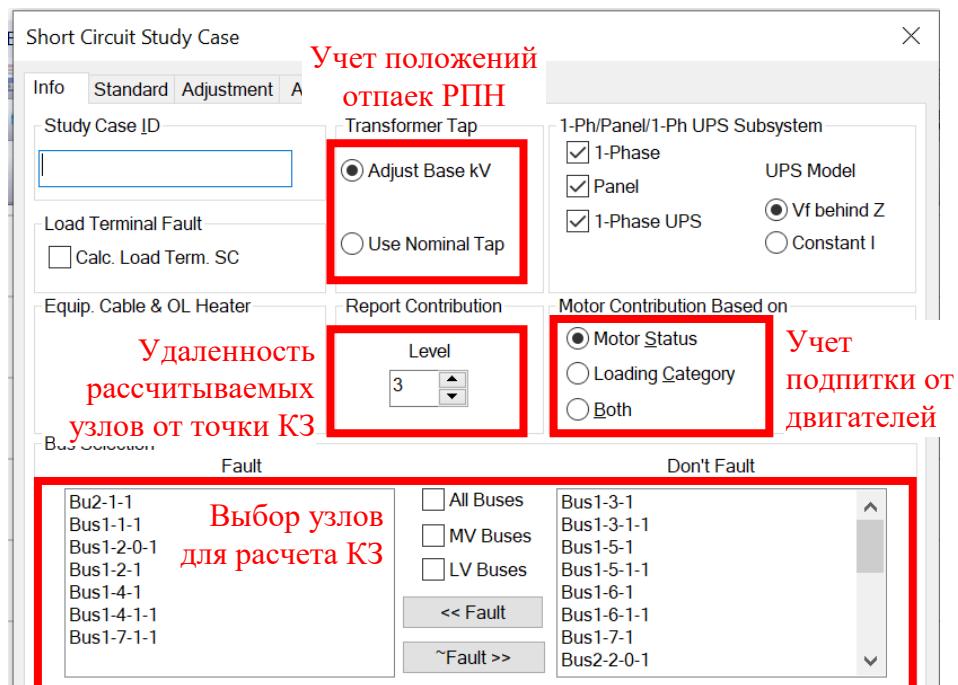


Рис. 2.4. Настройка параметров расчета, вкладка «Info»

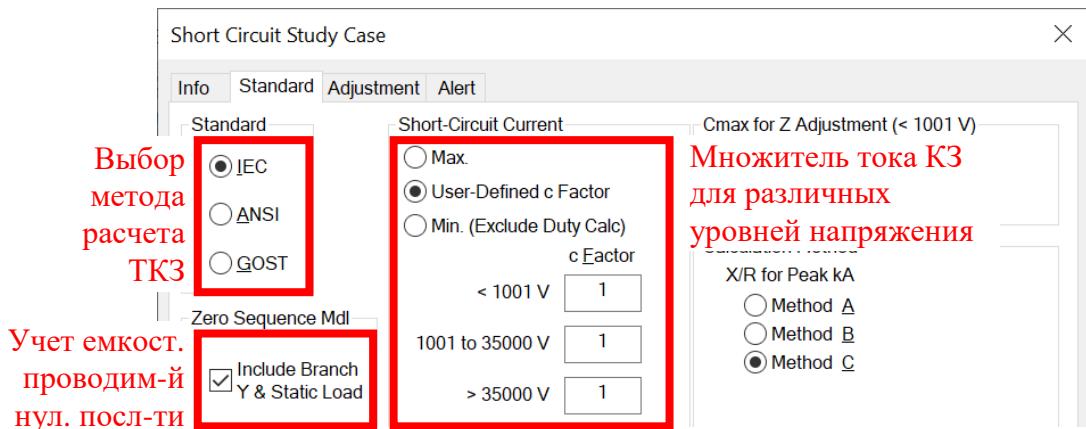


Рис. 2.5. Настройка параметров расчета, вкладка «Standard»

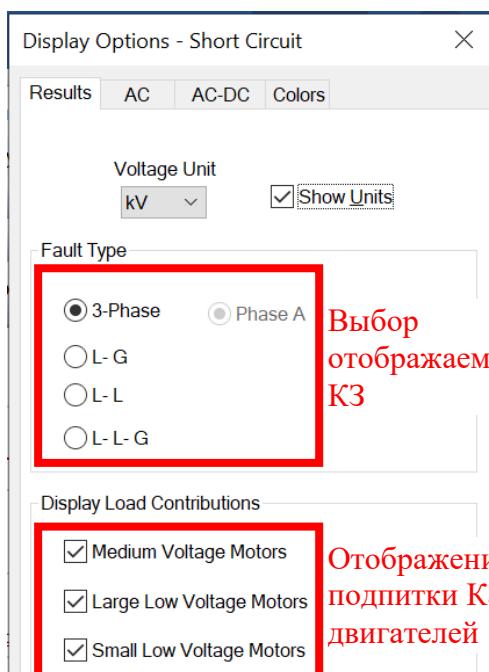


Рис. 2.6 –Настройка отображаемых результатов  
[К содержанию](#)

## Контрольные вопросы

1. Опишите этапы и общую методологию теоретического расчета токов КЗ.
2. В чем заключаются особенности учета электродвигательной нагрузки при расчете токов КЗ?
3. Каким образом проводится расчет токов КЗ в случае наличия нескольких источников ЭДС в сети?
4. Каковы особенности расчета токов несимметричных КЗ?

5. Каким образом определяются сопротивления обратной и нулевой последовательностей трансформаторов?
6. Каким образом определяются сопротивления обратной и нулевой последовательностей линий электропередачи?
7. Каким образом определяются сопротивления обратной и нулевой последовательностей электродвигателей?

[К содержанию](#)

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ПРОВЕРКА СЕЛЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПРОГРАММЕ ЕТАР

## 3.1. Назначение и краткая характеристика работы

Работа содержит расчетную часть, заключающуюся в вычислении уставок срабатывания релейной защиты на основе полученных в предыдущей работе значений токов КЗ; и экспериментальную, выполняемую с помощью модуля релейной защиты программы ЕТАР и состоящую в моделировании и анализе эффективности устройств релейной защиты рассматриваемой сети.

[К содержанию](#)

## 3.2. Алгоритм расчета и выбора защит элементов системы электроснабжения

### 3.2.1. Защита цеховых трансформаторов

Для силовых трансформаторов основными видами повреждений являются [7]:

- многофазные (междуфазные) КЗ в обмотках и на их выводах;
- однофазные замыкания;
- токовая перегрузка.

Ненормальные режимы работы обусловлены внешними короткими замыканиями и перегрузками. В этих случаях в кабеле и обмотках трансформатора протекают большие токи, которые вызывают интенсивный нагрев изоляции и её повреждение. Далее рассматривается выбор уставок срабатывания основных защит цеховых трансформаторов [8].

Для защиты кабельной линии и трансформатора при междуфазных КЗ применяется токовая отсечка без выдержки времени. Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока КЗ при повреждении за трансформатором:

$$I_{c.3} = k_{\text{отс}} \cdot I_{K,\max}, \quad (3.1)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки, равный 1.05 – 1.6;  $I_{K,\max}$  – ток, проходящий через ТТ защиты при трехфазном КЗ на стороне низкого напряжения трансформатора;

Кроме того, токовая отсечка должна отстраиваться от броска намагничивающего тока

$$I_{c.3} = k_{\text{нам}} \cdot I_{\text{тр,ном}}, \quad (3.2)$$

где  $k_{\text{нам}}$  – коэффициент, учитывающий бросок тока намагничивания трансформатора, равный 3 – 5;  $I_{\text{тр,ном}}$  – номинальный ток трансформатора.

На основе выражений (3.1) и (3.2) выбирается наибольший ток срабатывания защиты, который затем используется для расчета тока срабатывания реле:

$$I_{c.p} = k_{\text{сх}} \cdot I_{c.3} / k_l, \quad (3.3)$$

где  $k_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы, принимаемый равным 1 для трехрелейной и двухрелейной схем в сетях с глухозаземленной и изолированной нейтралью; и  $\sqrt{3}$  для однорелейной схемы с включением на разность токов двух фаз;  $k_l$  – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Для защиты кабельной линии и трансформатора при внешних КЗ принимается МТЗ с выдержкой времени, которая отстраивается от максимального рабочего тока нагрузки и кратковременных перегрузок, вызванных пуском и самозапуском электродвигателей, а также нарушением нормальной работы электрической сети:

$$I_{c.3} = k_{\text{отс}} \cdot k_{\text{СЗП}} \cdot I_{\text{раб,max}} / k_B, \quad (3.4)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент надежности отстройки,  $k_{\text{СЗП}}$  – коэффициент самозапуска электродвигателей, равный 3 – 3.5;  $k_B$  – коэффициент возврата реле,  $I_{\text{раб,max}}$  – максимальный рабочий ток, принимаемый равным номинальному току.

Коэффициент чувствительности МТЗ (в двухфазном трёхрелейном исполнении) трансформаторов со схемой соединения обмоток треугольник – звезда с нулем определяется при трехфазном КЗ за трансформатором (т.е. на стороне НН) по формуле:

$$k_q := I_K^{(3)} / I_{c.3}. \quad (3.5)$$

Защита трансформаторов от однофазных КЗ на стороне НН выполняется с помощью МТЗ нулевой последовательности с ТТ, установленным в цепи заземления нейтрали цехового трансформатора; и действует на отключение:

$$I_{c.3} = k_{\text{отс},1} \cdot I_{c.3,1} = k_{\text{отс},1} \cdot k_{\text{отс},2} \cdot I_{AB}, \quad (3.6)$$

где  $I_{c.3,1}$  – ток срабатывания защиты нулевой последовательности на стороне НН цехового трансформатора, который согласуется с током отсечки автоматического выключателя  $I_{AB}$ ,  $k_{otc,1}$ ,  $k_{otc,2}$  – коэффициенты отстройки, равные 1.1 – 1.2.

Для защиты цехового трансформатора при перегрузке используется МТЗ на стороне ВН трансформатора, выполняемая с помощью одного токового реле, включённого на фазный ток, и реле времени. МТЗ отстраивается от номинального тока трансформатора:

$$I_{c.3} = k_{otc} \cdot I_{T1,nom} / k_B, \quad (3.7)$$

где  $k_{otc}$  – коэффициент отстройки,  $I_{T1,nom}$  – номинальный ток трансформатора,  $k_B$  – коэффициент возврата.

[К содержанию](#)

### 3.2.2. Защита асинхронных двигателей

Для электродвигателей основными видами повреждений являются [7]:

- междуфазные КЗ;
- однофазные замыкания на землю в обмотке статора;
- витковые замыкания в обмотке статора;

Далее рассматривается выбор уставок срабатывания основных защит электродвигателей [8].

Защита электродвигателей от междуфазных КЗ является основной РЗ электродвигателей, и установка ее обязательна во всех случаях. Токовую релейную защиту электродвигателей мощностью до 2 МВт выполняют по двухрелейной схеме неполной звезды. Токовая отсечка отстраивается от пускового тока двигателей:

$$I_{c.3} = k_{otc} \cdot I_{пуск} = k_{otc} \cdot k_{\Pi} \cdot I_{ном,дв}, \quad (3.8)$$

где  $k_{otc}$  – коэффициент отстройки;  $k_{\Pi}$  – кратность пускового тока;  $I_{ном,дв}$  – номинальный ток двигателя.

Коэффициент чувствительности защиты определяется по формуле:

$$k_q := I_K^{(2)} / I_{c.3}, \quad (3.9)$$

где  $I_K^{(2)}$  – ток двухфазного короткого замыкания на выводах электродвигателя.

Для защиты электродвигателя при перегрузке принимается МТЗ с использованием токового реле, соединенного по схеме неполной звезды.

Перегрузка электродвигателей возникает при затянувшемся пуске и самозапуске из-за перегрузки приводимых механизмов. Для электродвигателя опасны только устойчивые перегрузки. Сверхтоки, обусловленные пуском или самозапуском электродвигателя, кратковременны и самоликвидируются при достижении нормальной частоты вращения:

$$I_{c,3} = k_{\text{отс}} \cdot I_{\text{ном,дв}} / k_B, \quad (3.10)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки,  $k_B$  – коэффициент возврата,  $I_{\text{ном,дв}}$  – номинальный ток двигателя.

Согласование времени действия защиты при перегрузке с временем самозапуска двигателя производится по выражению:

$$t_{\text{разг.доп}} > t_{\text{пер.МТЗ}} > t_{\text{разг.факт}}, \quad (3.11)$$

где  $t_{\text{разг.доп}}$ ,  $t_{\text{разг.факт}}$  – допустимое и фактическое времена разгона двигателя при самозапуске;  $t_{\text{пер.МТЗ}}$  – допустимое время действия защиты при перегрузке.

Защита электродвигателей от замыкания обмотки статора на землю реагирует на емкостной ток сети и выполняется на одном токовом реле, которое подключается к ТТ нулевой последовательности (ТТНП), установленном на кабеле, питающем электродвигатель. Чтобы решить вопрос о том, ставить защиту на двигатель или нет, проводится расчет:

$$I_{c,3} = k_{\text{отс}} k_B I_C = \sqrt{3} U_{\text{ном}} \omega C_d \cdot 10^{-3}, \quad (3.12)$$

где  $k_{\text{отс}}$  – коэффициент отстройки,  $k_B$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока двигателя при внешних перемежающихся замыканиях на землю;  $I_C$  – собственный емкостный ток двигателя;  $C_d$  – емкость двигателя, определяемая по формуле

$$C_d = \frac{k_{\text{изол}} S_{\text{ном.дв}}^{3/4}}{3(U_{\text{ном}} + 3600) n_d^{1/3}}. \quad (3.13)$$

Согласно ПУЭ, защита двигателей от замыкания на землю не предусматривается при токе срабатывания менее 10 А.

Защита электродвигателей от понижения напряжения обеспечивается установкой реле минимального напряжения. Для питания реле минимального напряжения используется ТН. Защита минимального напряжения устанавливается на электродвигателях, которые необходимо отключать при понижении напряжения для обеспечения самозапуска

ответственных электродвигателей, а также электродвигателей, самозапуск которых при восстановлении напряжения недопустим по условиям техники безопасности или особенностям технологического процесса. Напряжение срабатывания реле принимается равным  $0.7U_{\text{ном}}$ :

$$U_{c,p} = \frac{0.7U_{\text{ном}}}{k_B k_{\text{отс}} k_{\text{TH}}}, \quad (3.14)$$

где  $k_{\text{TH}}$  – коэффициент трансформации ТН.

[К содержанию](#)

### 3.2.3. Защита трансформаторов ГПП

В отличие от цеховых защита трансформаторов ГПП от междуфазных КЗ осуществляется с помощью продольной дифференциальной защиты [7]. При соединении ТТ на стороне ВН по схеме «треугольник», а на стороне НН – по схеме «звезда» вторичные токи измерительных ТТ определяются как [8]:

$$I_{\text{ВН ТТ}} = \sqrt{3}I_{\text{ВН ном}} / k_{\text{ТТ ВН}}, \quad (3.15)$$

$$I_{\text{НН ТТ}} = I_{\text{НН ном}} / k_{\text{ТТ НН}}, \quad (3.16)$$

где  $I_{\text{ВН ном}}$ ,  $I_{\text{НН ном}}$  – номинальные токи силового трансформатора соответственно на сторонах ВН и НН.

Для определения значения тока срабатывания защиты необходимо определить ток небаланса по следующей формуле:

$$I_{\text{нб расч}} = I'_{\text{нб}} + I''_{\text{нб}}, \quad (3.17)$$

где  $I'_{\text{нб}}$  – составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;  $I''_{\text{нб}}$  – составляющая тока небаланса, вызванная регулированием напряжения на трансформаторе.

Составляющие тока небаланса определяются как

$$I'_{\text{нб}} = k_a \cdot k_{\text{одн}} \cdot \xi \cdot I_{\text{k max}}, \quad (3.18)$$

$$I''_{\text{нб}} = \Delta U \cdot I_{\text{k max}}, \quad (3.19)$$

где  $k_a$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока КЗ из-за наличия в нём апериодической составляющей ( $k_a = 1$  для РНТ-565);  $k_{\text{одн}}$  – коэффициент однотипности ТТ ( $k_{\text{одн}} = 0.5$  при одинаковых типах ТТ,  $k_{\text{одн}} = 1$  при разных типах ТТ);  $\xi$  – допустимая погрешность ТТ для защиты,  $\xi$

$= 0.1$ ;  $I_{k\max}$  – максимальный ток трёхфазного КЗ на вторичной стороне трансформатора ГПП;  $\Delta U$  – половина суммарного диапазона регулирования напряжения на трансформаторе (при диапазоне регулирования  $\pm 10\%$   $\Delta U = 0.1$ ).

Ток срабатывания должен быть отстроен от броска намагничивающего тока защищаемого трансформатора и от максимального тока небаланса при внешнем КЗ (выбирается наибольшее значение):

$$I'_{c.3} \geq k_{otc} \cdot I_{hb \text{ расч}}, (k_{otc} = 1.3), \quad (3.20)$$

$$I''_{c.3} \geq k_{otc} \cdot I_{HH \text{ ном}}, (k_{otc} = 1.15). \quad (3.21)$$

Ток срабатывания защиты соответствует максимальному из результатов выражений (20) и (21) и используется для определения тока срабатывания реле на стороне ВН трансформатора ГПП:

$$I_{c.p} = k_{cx} \cdot I_{c.3} \cdot U_{HH} / k_{TT \text{ BH}} / U_{BH}, \quad (3.22)$$

где  $k_{cx}$  – коэффициент схемы,  $I_{c.3}$  – ток срабатывания защиты наибольший,  $k_{TT \text{ BH}}$  – коэффициент трансформации ТТ на стороне ВН,  $U_{BH}$ ,  $U_{HH}$  – значение напряжения на высокой и низкой стороне трансформатора.

Определяется коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на выводах 10кВ трансформатора по выражению:

$$k_q = I_K^{(2)} / I_{c.3} > 2. \quad (3.23)$$

Защита трансформаторов ГПП от внешних КЗ и от перегрузки рассчитывается аналогично защите цеховых трансформаторов по выражениям (3.4) и (3.7) соответственно.

[К содержанию](#)

### 3.2.4. Построение карты селективности защит

Пример карты селективности релейной защиты цехового трансформатора рассматриваемой сети представлен на [рис 3.1](#). Многофункциональное реле тока имеет трехступенчатую время-токовую характеристику, соответствующую защитам от сверхтоков при междуфазных и внешних КЗ с помощью токовой отсечки и МТЗ, а также от токов перегрузки с помощью МТЗ.

Для построения карт селективности во время-токовых осях строятся характеристики последовательно установленных защит, при этом их

уставки считаются селективными, если соответствующие время-токовые характеристики не накладываются друг на друга или не пересекаются, что

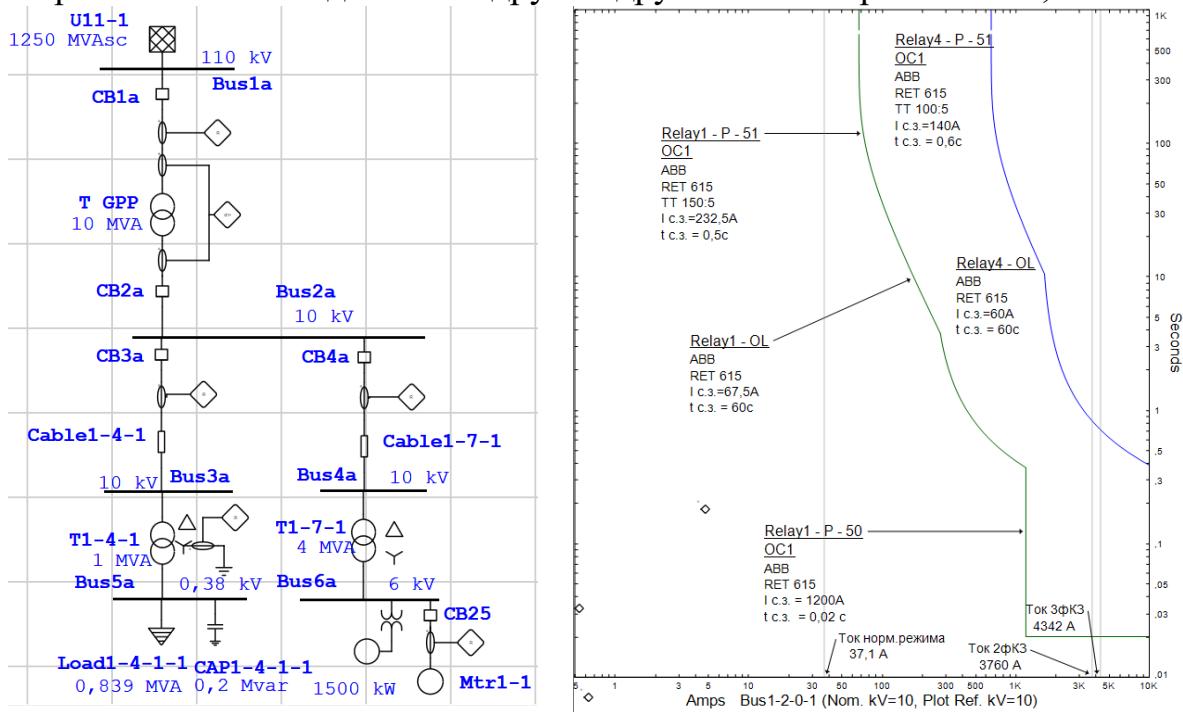


Рис. 3.1. Пример схемы с установленными устройствами релейной защиты и время-токовая характеристика защиты цехового трансформатора

обеспечивается при выполнении условий селективности по току и по времени.

[К содержанию](#)

### 3.3. Содержание работы

1. Выполнение предварительного расчета уставок срабатывания защит рассматриваемой сети.
  2. Моделирование релейной защиты рассматриваемой схемы электроснабжения;
  3. Проверка селективности действия защит;
  4. Построение карт селективности устройств РЗ.
- [К содержанию](#)

### 3.4. Порядок выполнения работы

1. Выполнить предварительный расчет уставок релейной защиты блока трансформатор – линия, асинхронного двигателя, трансформатора ГПП, используя рекомендации в [8].
2. Установить измерительные трансформаторы тока и реле необходимых защит, задать параметры элементов в соответствии с предварительным расчетом и описанием программы ETAP [1].
3. Моделируя возникновение КЗ в различных точках сети с помощью «PD Sequence of operation» [1], убедиться в корректности срабатывания защит.
4. Построить карту селективности защит [1], выделив интересующий участок сети и соответствующие реле.
5. Сформировать комплексный отчет.

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus1-4-1-1					
		Data Rev.: Base	Config: Normal	Date: 27-05-2020	
Time (...)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
20,0	Relay4		20,0		Phase - 87
468	Relay1	0,853	468		Phase - OC1 - 51
528	Q1-4		60,0		Tripped by Relay1 Phase - OC1 - 51
603	Relay1	0,853	< 603		Overload Phase - Thermal
129531	Relay4	0,064	129531		Overload Phase - Thermal

Рис. 3.2. Пример отчета последовательности срабатываний защит, созданного с помощью Sequence Viewer

[К содержанию](#)

### 3.5. Настройка параметров релейной защиты и карт селективности

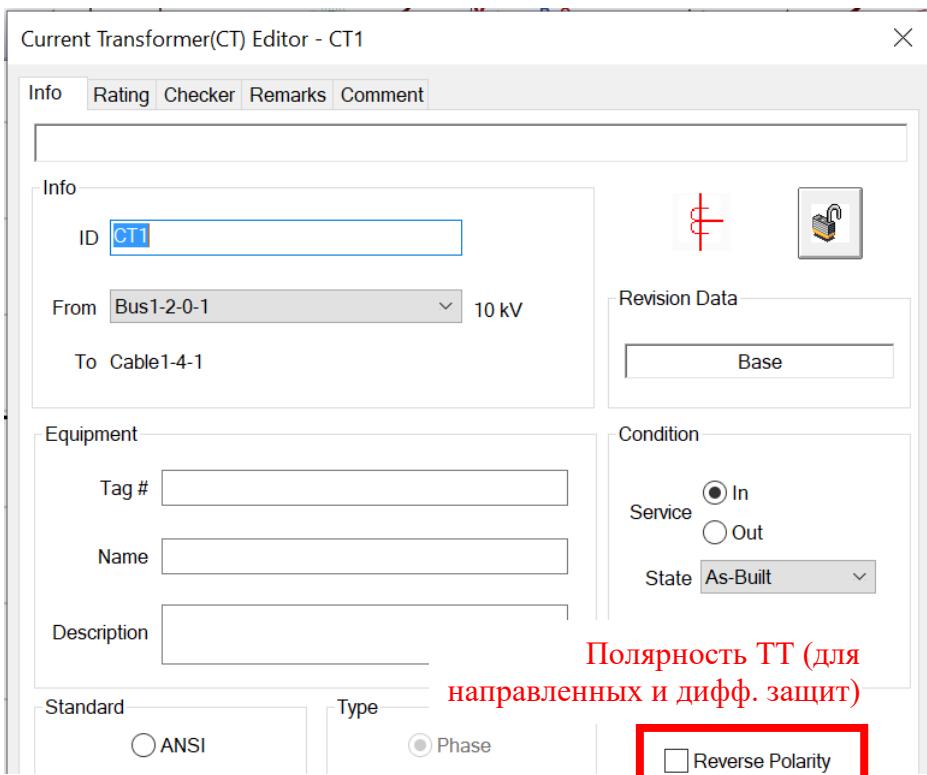


Рис. 3.3. Трансформатор тока, вкладка «Info»

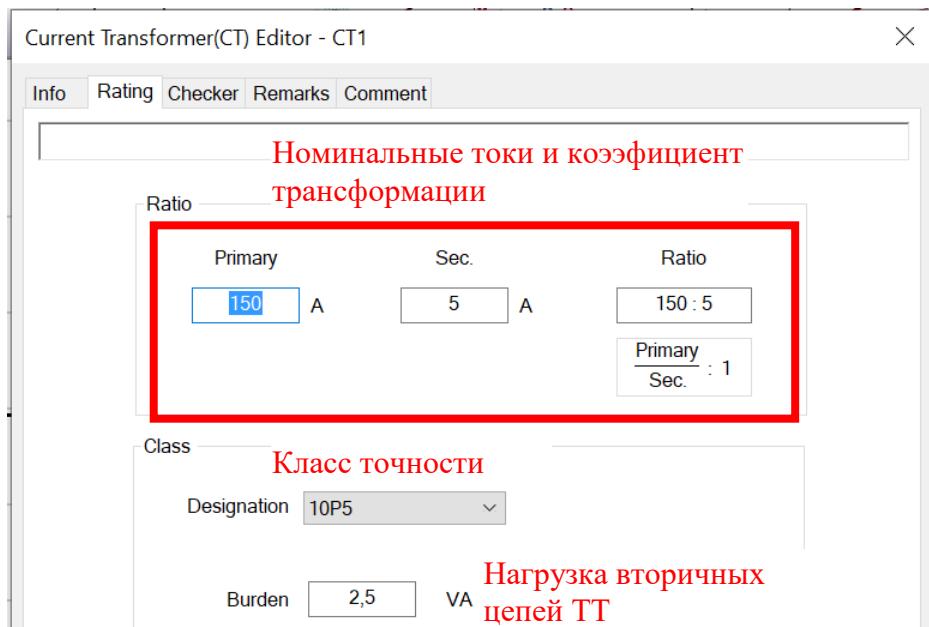


Рис. 3.4. Трансформатор тока, вкладка «Rating»

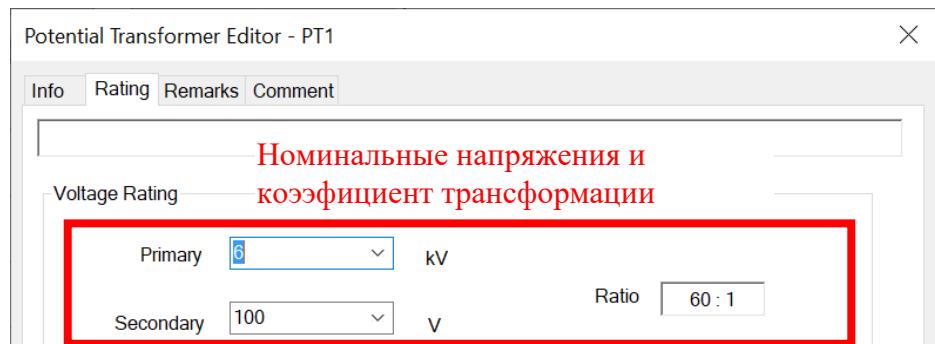


Рис. 3.5. Трансформатор тока, вкладка «Info»

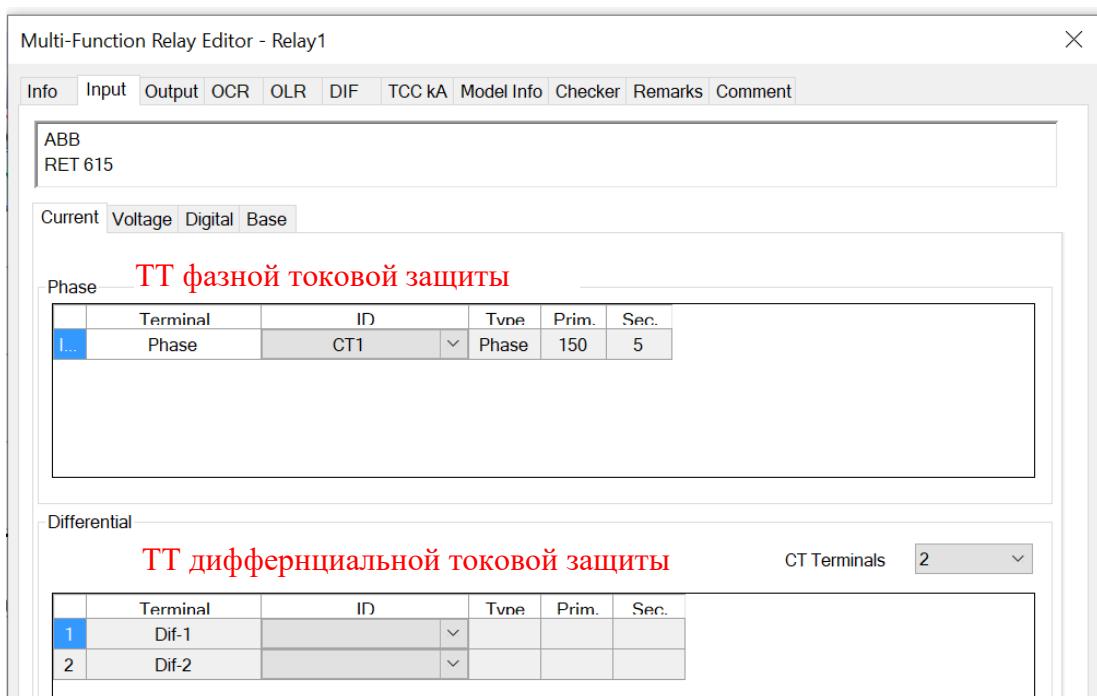


Рис. 3.6. Многофункциональное реле тока, вкладка «Input»

Multi-Function Relay Editor - Relay1

Info Input Output OCR OLR DIF TCC kA Model Info Checker Remarks Comment

ABB  
RET 615

Output

	Output ID	Relay	Level
► 1	DO1	Phase	Any

Наименование реле и тип защиты

Add Delete

Inte Тип и наименование коммутационного аппарата

	Device	Device ID	Action
► 1	HVCB	~~OTI1-4	Open

Результат воздействия

Наименование реле и тип защиты

Результат воздействия

Рис. 3.7. Многофункциональное реле тока, вкладка «Output»

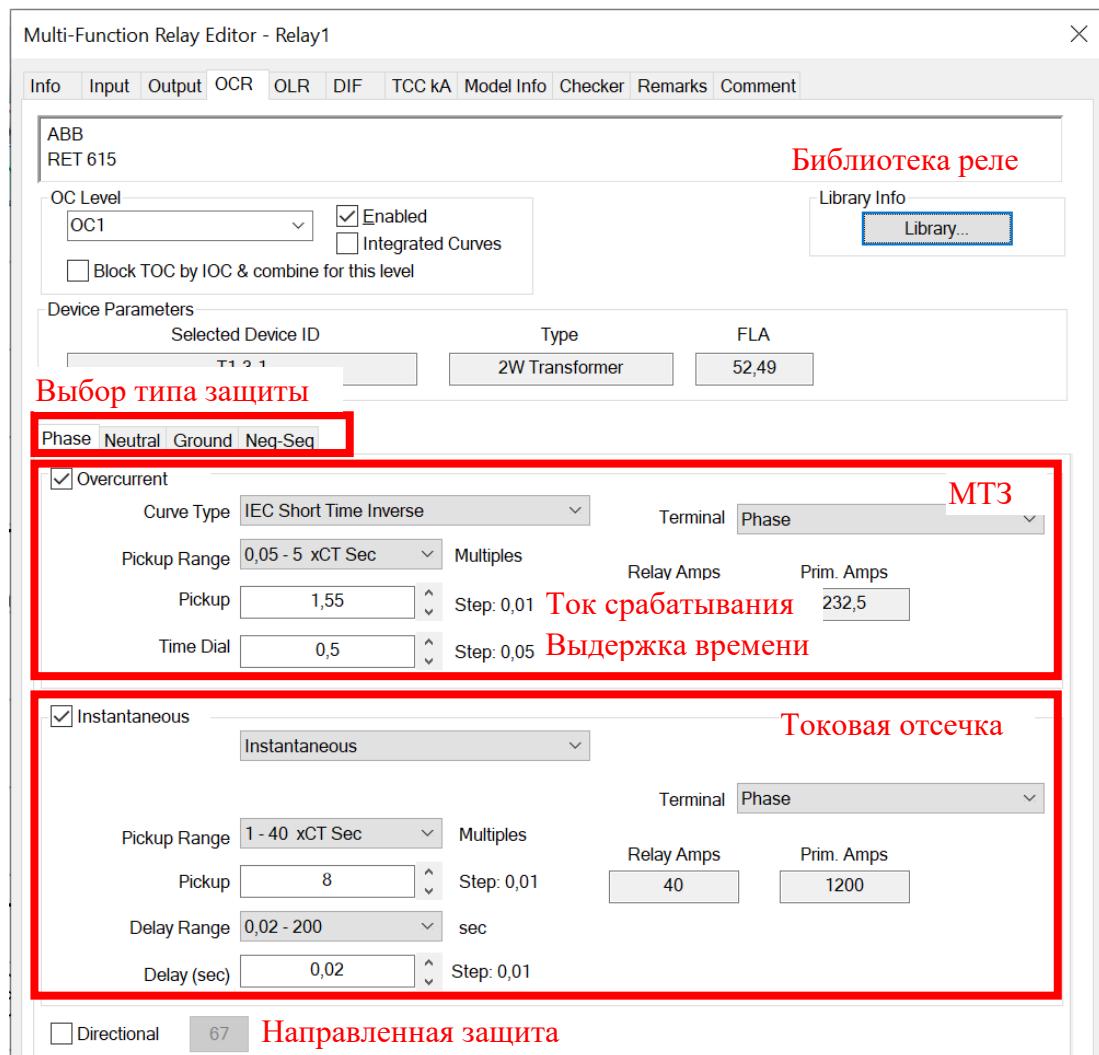


Рис. 3.8. Многофункциональное реле тока, вкладка «OCR»

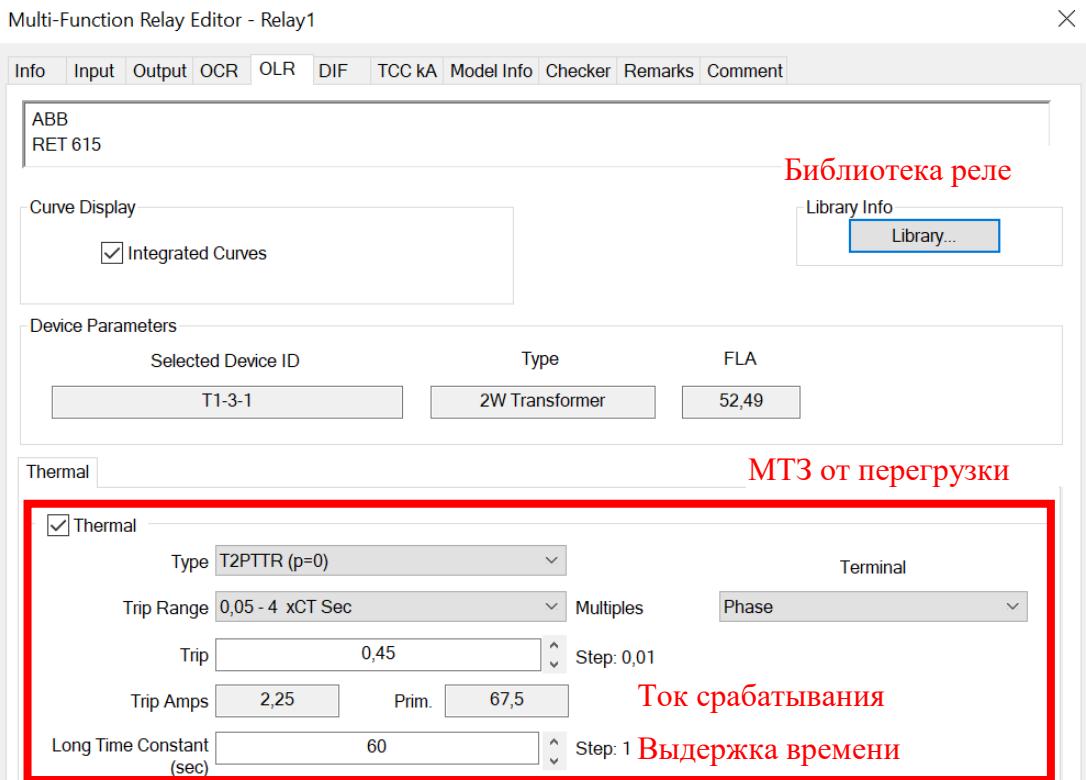


Рис. 3.9. Многофункциональное реле тока, вкладка «OLR»

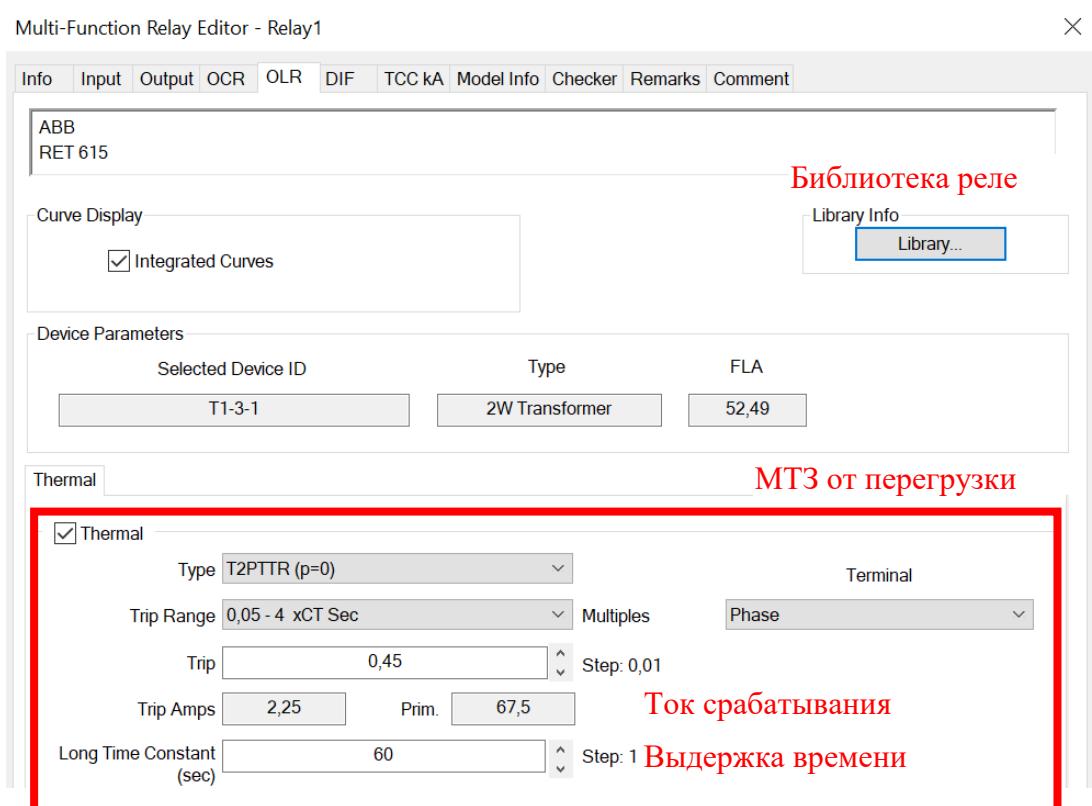


Рис. 3.10. Многофункциональное реле тока, вкладка «OLR»

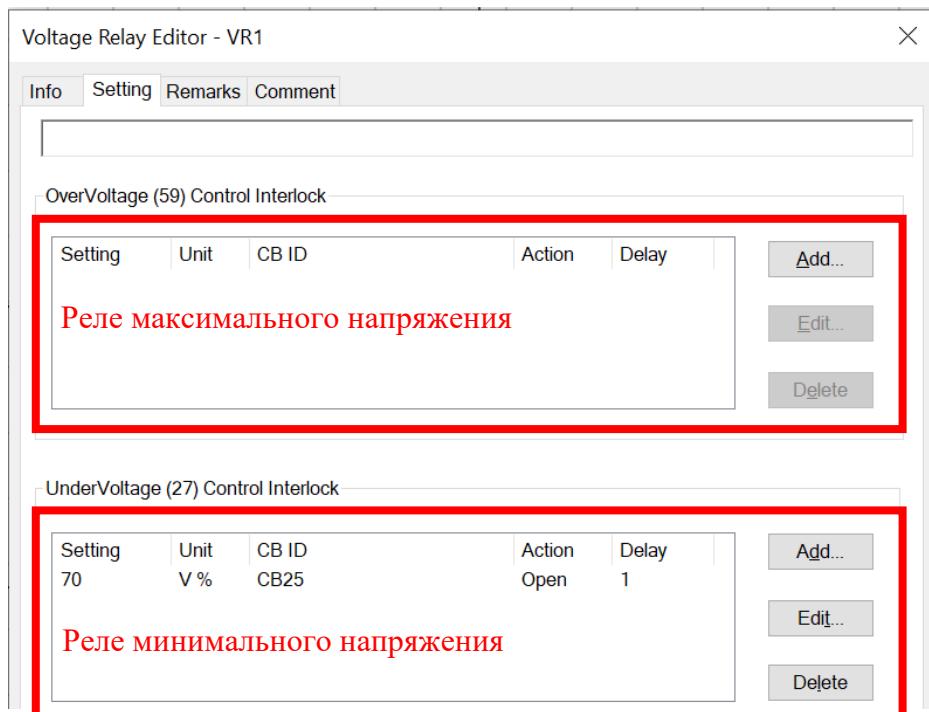


Рис. 3.11. Реле напряжения, вкладка «Setting»

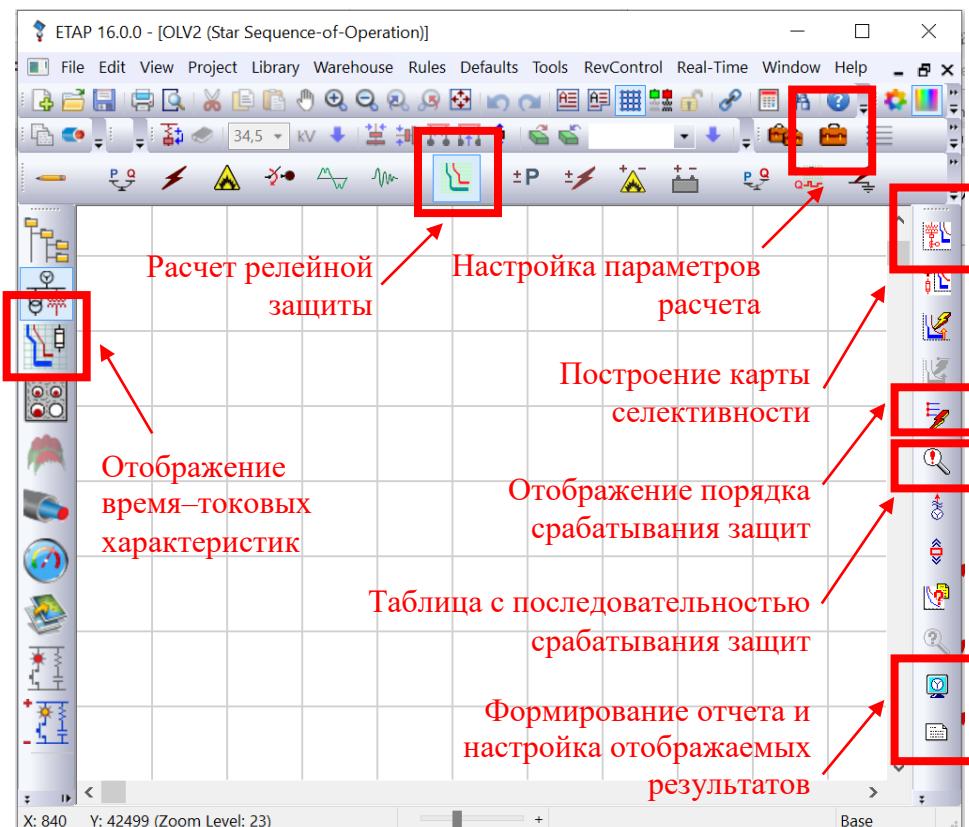


Рис. 3.12. Интерфейс программы в режиме расчета релейной защиты

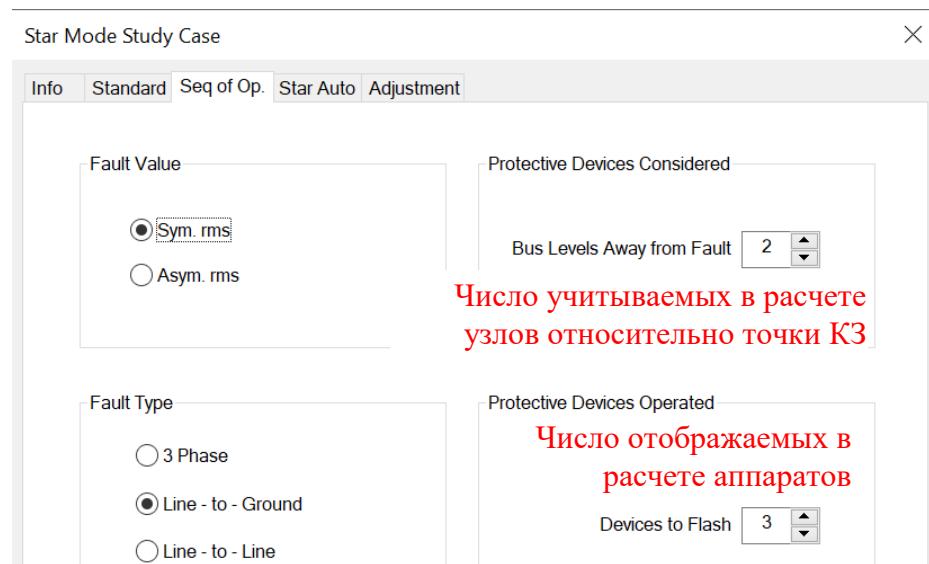


Рис. 3.13. Настройка параметров расчета, вкладка «Info»

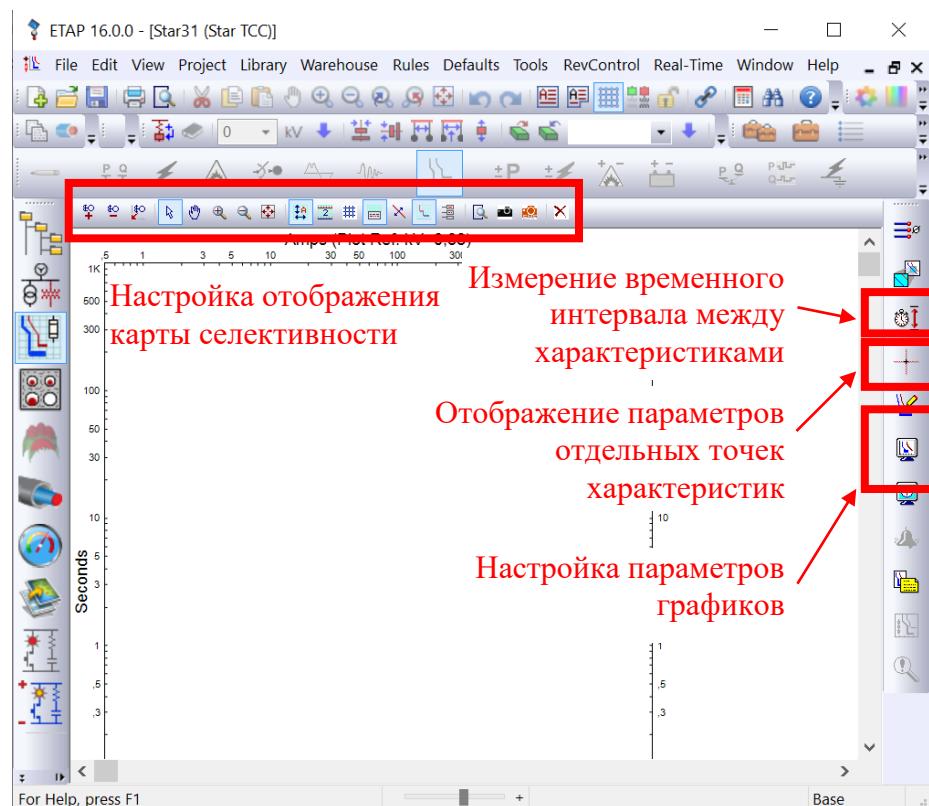


Рис. 3.14. Интерфейс программы в режиме построения карты селективности

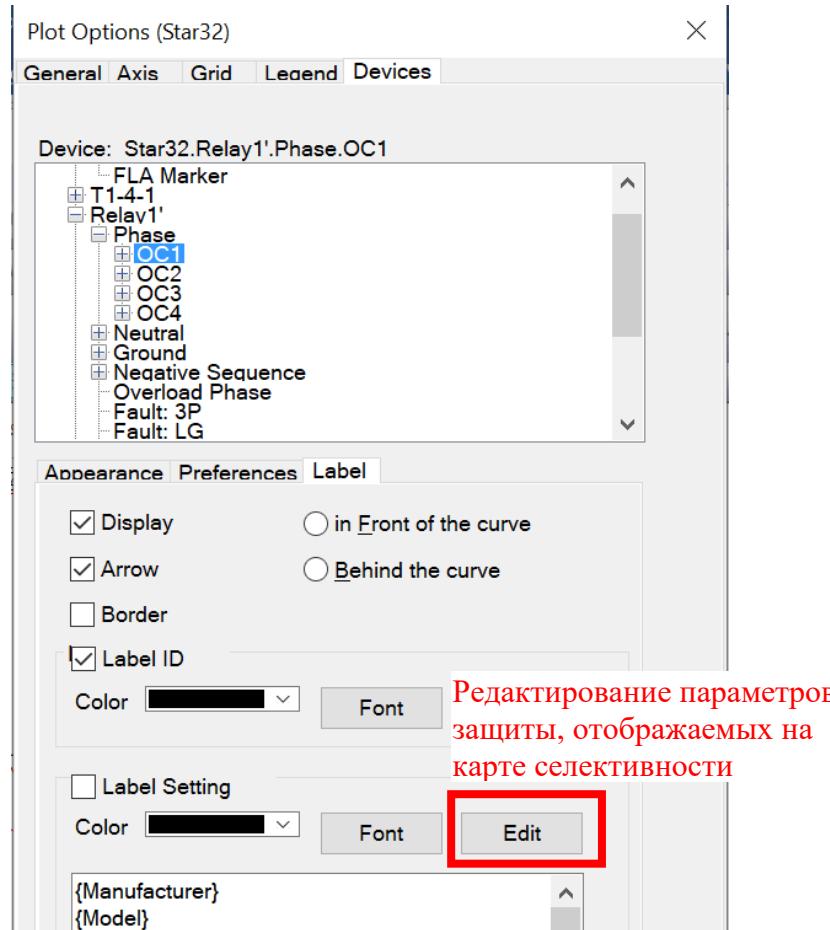


Рис. 3.15. Настройка параметров графиков, вкладка «Devices»  
[К содержанию](#)

## Контрольные вопросы

1. Назначение релейной защиты и автоматики?
  2. Основные факторы, определяющие выбор класса точности ТТ для устройств релейной защиты?
  3. Назовите основные виды повреждений и ненормальных режимов при работе асинхронного двигателя? Какая защита требуется для асинхронных двигателей напряжением выше 1 кВ?
  4. Перечислите основные типы защит цеховых трансформаторов.
  5. Что представляют собой карты селективности и их назначение?
- [К содержанию](#)

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. РАСЧЕТ РЕЖИМА САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОГРАММЕ ETAP**

## **4.1. Назначение и краткая характеристика работы**

Работа состоит из экспериментальной части, нацеленной на ознакомление с возможностями программного комплекса ETAP по моделированию и анализу переходных режимов системы электроснабжения [1], и в частности влияния параметров сети на характеристики режимов пуска, самозапуска и выбега асинхронных двигателей.[К содержанию](#)

## **4.2. Краткое описание процесса самозапуска электродвигателей**

### **4.2.1. Основные этапы самозапуска**

Самозапуск (СЗ) группы электродвигателей (ЭД) возникает после кратковременного перерыва питания секции, вызываемого, как правило, коротким замыканием (КЗ) на одном из присоединений, на шинах секции (СШ) или в цепи источника питания. В результате перерыва питания ЭД затормаживаются, а после его восстановления потребляют повышенный пусковой ток, что вызывает значительное понижение напряжения питания и затрудняет пуск ЭД. Успешность самозапуска может быть определена расчетным путем, при этом рассчитывается длительность процесса, уровни напряжения на шинах секции, токи ЭД и т.д.

Выделяют следующие стадии самозапуска [9]: исходный режим, короткое замыкание, отключение КЗ, восстановление питания. Исходный режим соответствует установившемуся режиму, в котором работа ЭД характеризуется номинальными значениями частоты вращения, токов обмоток и электромагнитного момента, а также заданными величинами напряжения в точке подключения. В режиме короткого замыкания напряжение на выводах ЭД равно нулю, а в обмотках статора протекают затухающие переменные токи подпитки точки КЗ. При этом создается знакопеременный электромагнитный момент, среднее значение которого много меньше момента сопротивления механизмов, что обуславливает интенсивное торможение ЭД. Через 0.5–1 с электромагнитные моменты практически исчезают и вращение ротора обусловлено только его индивидуальным выбегом. Если отключение КЗ происходит до полного затухания токов в контуре ротора ЭД, на его выводах и на шинах секции

появляется затухающее переменное напряжение, которое при длительности КЗ 0.1–0.2 с составляет около (0.2–0.4)  $U_{\text{ном}}$ , и до момента восстановления питания происходит групповой выбег ЭД. При этом ЭД, обладающие большей механической инерционностью, подпитывают менее инерционные. При восстановлении питания подача напряжения на частично или полностью заторможенные ЭД приводит к потреблению ими повышенных токов. Напряжение на СШ составляет в этот момент (0.5–0.7)  $U_{\text{ном}}$ . Если к моменту восстановления питания токи ЭД еще не снизились до нуля, возникает переходный режим, обусловленный несовпадением фаз и частот напряжений ЭД и источника питания и характеризующийся токами и моментами, превышающими номинальные в 10 – 15 раз. После затухания переходных процессов, дляящихся 1 – 2 с, устанавливается режим пуска с изменяющимся в соответствии с пусковой характеристикой током ротора, который при успешном СЗ длится обычно 5 – 10 с. Однако для получения более достоверного результата расчет рекомендуется вести до 10–30 с.

[К содержанию](#)

#### 4.2.2. Расчет параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя

В работе рассматриваются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором, как наиболее распространенный тип общепромышленных электроприемников. АД может быть представлен двухконтурной схемой замещения ([рис. 4.1](#)) [9], которая характеризуется следующими параметрами:  $R_1$  и  $X_{\sigma 1}$  – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки;  $R_{12}$  и  $X_{12}$  – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания, характеризующие потери мощности в стали магнитной системы;  $R_2(s)$  и  $X_{\sigma 2}(s)$  – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенные к обмотке статора, определяемые в соответствии с выражениями:

$$R_2(s)=\sqrt{R_{2c}^2+(R_{2n}^2-R_{2c}^2)s}, \quad (4.1)$$

$$X_{\sigma 2}(s)=\frac{X_{\sigma 2c} X_{\sigma 2n}}{\sqrt{X_{\sigma 2n}^2+(X_{\sigma 2c}^2-X_{\sigma 2n}^2)s}}, \quad (4.2)$$

где  $R_2$  и  $X_{\sigma 2c}$  – сопротивления, соответствующие синхронному режиму ( $s = 0$ );  $R_{2n}$  и  $X_{\sigma 2n}$  – сопротивления, соответствующие режиму пуска ( $s = 1$ ).

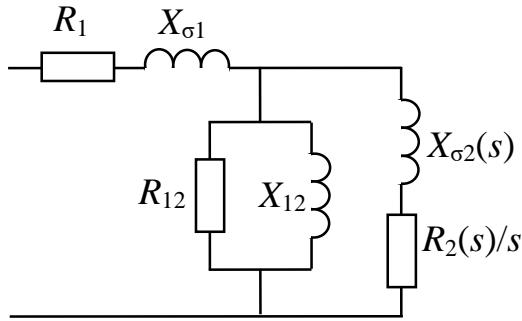


Рис. 4.1. Схема замещения АД

Основные параметры режима АД: активная и реактивная потребляемые мощности, ток статора, электромагнитный момент – могут быть представлены как [9]:

$$P = U^2 \cdot \operatorname{Re} \left( \frac{1}{Z^*(s)} \right), \quad (4.3)$$

$$Q = U^2 \cdot \operatorname{Im} \left( \frac{1}{Z^*(s)} \right), \quad (4.4)$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}, \quad (4.5)$$

$$M = \frac{1-s_N}{\eta_N \cos \varphi_N} (P - I_1^2 R_1 - U_{12}^2 / R_{12}) - \Delta M_{\text{мех}}, \quad (4.6)$$

где  $Z(s)$  – эквивалентное комплексное сопротивление двигателя при скольжении  $s$ ;  $U_{12}$  – напряжение на ветви намагничивания схемы замещения АД;  $\Delta M_{\text{мех}}$  – момент сопротивления, обусловленный механическими потерями мощности  $\Delta P_{\text{мех}}$  в самом АДК; которые определяются в соответствии с выражениями:

$$Z(s) = R_1 + jX_{\sigma 1} + \left( \frac{1}{R_{12}} - j \frac{1}{X_{12}} + \frac{1}{R_2(s)/s + jX_{\sigma 2}(s)} \right)^{-1}, \quad (4.7)$$

$$U_{12} = \sqrt{\left( U - \frac{PR_1 - QX_{\sigma 1}}{U} \right)^2 + \left( \frac{PX_{\sigma 1} - QR_1}{U} \right)^2}, \quad (4.8)$$

$$\Delta M_{\text{мех}} = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\eta_N \cos \varphi_N (1-s)}. \quad (4.9)$$

Напряжение на секции РУ, являющейся узлом промышленной нагрузки, равно

$$U_y = E_c - Z_c \cdot I_y, \quad (4.10)$$

где  $E_c$  и  $Z_c$  – напряжение питания и сопротивление сети;  $I_y$  – суммарный ток электродвигательной и общепромышленной нагрузок, подключенных к секции РУ.

Скорость вращения АДК в переходных процессах при расчетах пуска или группового самозапуска определяется уравнением электромеханических переходных процессов

$$T_j \frac{d\omega_a}{dt} = M_{\mathcal{E}} - M_{\text{мех}}, \quad (4.11)$$

где  $T_j = J_{\text{пр}} \cdot \omega_0 \cdot \omega_n / P_n$  – постоянная инерции агрегата, приведенная к номинальной мощности двигателя;  $\omega_0$ ,  $\omega_n$  – синхронная и номинальная угловые скорости вращения ЭД;  $P_n$  – номинальная активная мощность двигателя;  $J_{\text{пр}}$  – приведенный момент инерции агрегата, в данном случае равный моменту инерции ЭД.

Момент сопротивления механизма АД определяется следующей универсальной зависимостью

$$M_{\text{мех}} = M_0 + (K_3 - M_0) \cdot (\omega_a / \omega_{\text{уст.а}})^Z, \quad (4.12)$$

где  $M_0$  – момент сопротивления механизма при  $\omega_a = 0$ ;  $Z$  – показатель степени, характеризующий зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения АД;  $\omega_{\text{уст.а}}$  – частота вращения АД в установившемся режиме.

[К содержанию](#)

#### 4.2.3. Расчет механической характеристики электродвигателя

Механическая характеристика ЭД (рис. 4.2) имеет следующие характерные точки [9]:

- $s = 0, M = 0$ , скорость вращения ЭД равна синхронной;
- $s = s_{\text{ном}}, M = M_{\text{ном}}$ , что соответствует номинальному режиму;
- $s = s_{\text{кр}}, M = M_{\text{кр}}$ , что соответствует максимальному моменту в двигательном режиме;
- $s = 1, M = M_{\text{пуск}}$ .

Начальный пусковой момент

$$\Delta M_{\text{пуск}} = \frac{2M_{\text{кр}}(1+R_1/R_2(s) \cdot s_{\text{кр}})}{1+s_{\text{кр}}^2(1+2R_1/R_2(s))}. \quad (4.13)$$

Критическое скольжение и соответствующий максимальный момент АД:

$$s_{kp} = \frac{R_2(s)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}(s))^2}}, \quad (4.14)$$

$$M_{kp} = \frac{3U_\Phi^2}{2\omega_0 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}(s))^2}]} \cdot \frac{1}{s}. \quad (4.15)$$

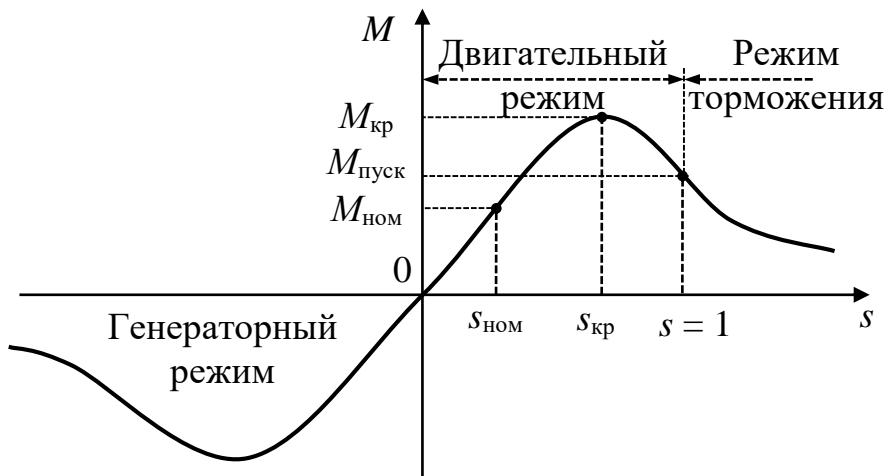


Рис. 4.2. Механическая характеристика асинхронных машин

[К содержанию](#)

### 4.3. Содержание работы

1. Построение модели исследуемой системы электроснабжения.
  2. Измерение зависимостей параметров режима сети и электродвигателей в режиме самозапуска от длительности перерыва питания.
  3. Измерение временных зависимостей частоты вращения электродвигателей при пуске и выбеге электродвигателей.
  4. Измерение механической характеристики электродвигателя.
- [К содержанию](#)

### 4.4. Порядок выполнения работы

1. Построить модель системы электроснабжения двухсекционного РУ, питающего электродвигательную нагрузку в ЕТАР (рис. 4.3) и задать параметры ее элементов в соответствии с методическими указаниями на рис. 4.3 – 4.13 и вариантом исходных данных в табл. 4.7 – 4.10.

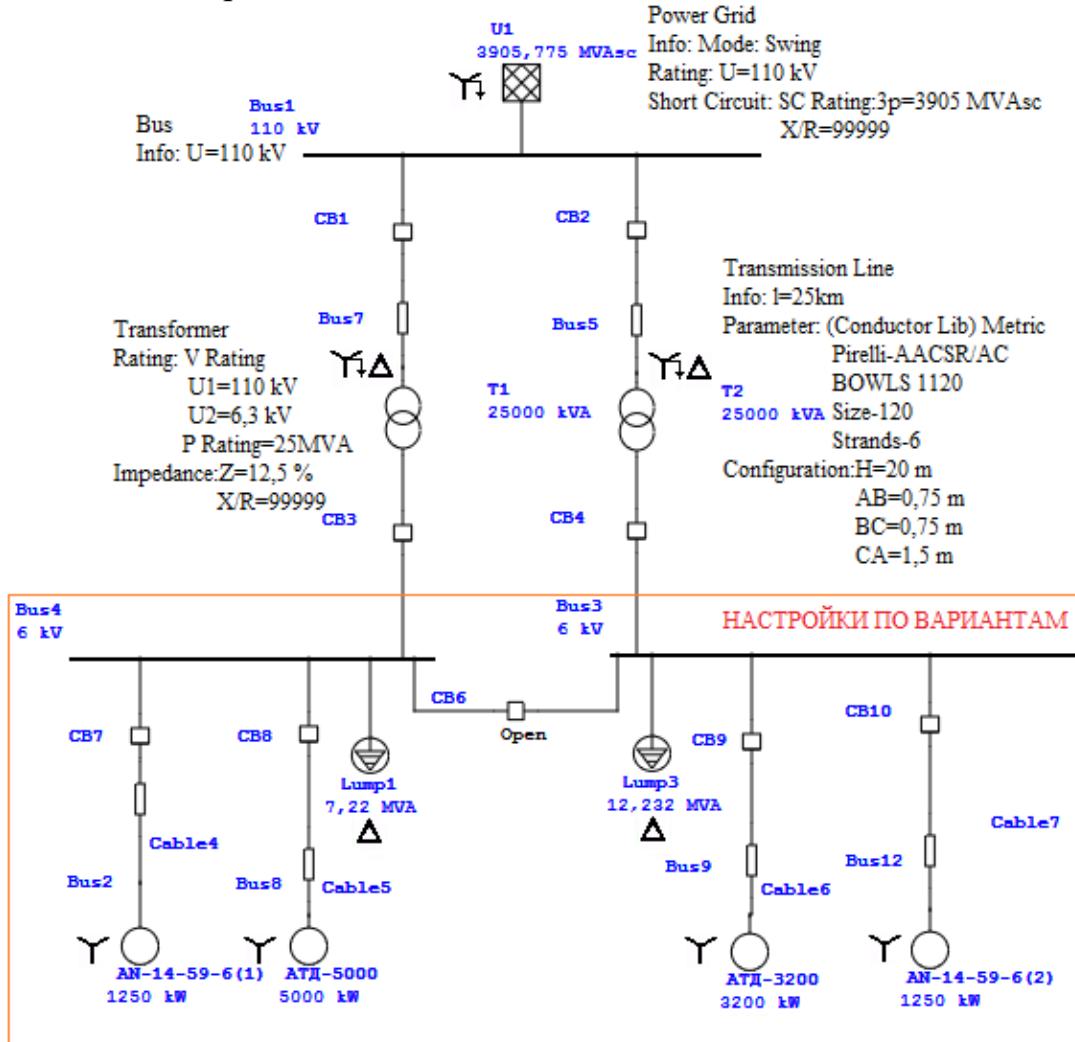


Рис. 4.3. Вид моделируемой системы электроснабжения в программе ЕТАР

2. В режиме расчета переходных процессов «Transient stability» (рис. 4.10 – 4.13) настроить параметры расчета, задав время моделирования 10 – 30 с (для обеспечения установившегося режима), а также последовательность событий в результате возникновения трехфазного КЗ на шинах 1-й секции, срабатывания вводного выключателя секции и перевода питания в соответствии с табл. 4.1. Также выбрать все элементы в списке элементов модели, для которых отображаются результаты расчета (рис. 4.12). Указать тип динамического моделирования с учетом высоковольтных АД (рис. 4.13).

Таблица 4.1 – Последовательность событий при самозапуске АД

№ п/п	Название события	Время, с	Действие
1	KЗ	1	Bus 4 – 3 Phase Fault
2	Стоп КЗ	1.2	Bus 4 - Clear Fault; CB3 - Open
3	$t_{\text{пер}}$	1.3	CB6 - Close

3. Запустить расчет переходного процесса и
- изменения рассматриваемый момент времени, определить установившееся значение напряжения на 1-й секции  $U_{\text{уст}}$ ;
  - определить время восстановления напряжения 1-й секции  $t_{\text{вст}}$  из соответствующей осцилограммы напряжения, а также время восстановления скоростей вращения двигателей  $t_{n1}$  и  $t_{n2}$ . Для этого построить соответствующие графики переходного процесса ([рис. 4.12](#));

Регулируя продолжительность перерыва питания  $t_{\text{пер}}$  ([табл. 4.2](#)), снять зависимости времени восстановления напряжения  $t_{\text{вст}} = f(t_{\text{пер}})$ , установившегося напряжения  $U_{\text{уст}} = f(t_{\text{пер}})$  на 1-й секции шин и времени восстановления установившейся частоты вращения двух электродвигателей  $t_{n1} = f(t_{\text{пер}})$  и  $t_{n2} = f(t_{\text{пер}})$  от длительности перерыва питания  $t_{\text{пер}}$  при переключении с 1-й секции шин на 2-ю с помощью секционного выключателя СВ. Принять время КЗ  $t_{\text{КЗ}} = 0.2$  с. Время моделирования следует варьировать в пределах 10 – 30 с. Результаты измерений занести в [табл. 4.2](#) и построить зависимости.

Таблица 4.2 – Результаты расчетов, полученных в пункте 2

$t_{\text{пер}}, \text{с}$	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.5	2.6	2.9
$t_{\text{вст}}, \text{с}$																
$U_{\text{уст}}, \text{o.e.}$																
$U_{\text{уст}}, \text{kV}$																
$t_{n1}, \text{с}$																
$t_{n2}, \text{с}$																

4. Изменяя уровень напряжения питания на секциях шин в соответствии с данными [табл. 4.3](#), – указывая соответствующие значения вторичного напряжения трансформаторов и секций сборных шин, – рассчитать переходной процесс и по аналогии с предыдущим пунктом снять зависимости времени восстановления напряжения  $t_{\text{вст}} = f(U_{\text{раб}})$ , установившегося напряжения  $U_{\text{уст}} = f(U_{\text{раб}})$  на 1-й секции шин и времени восстановления установившейся частоты вращения двух электродвигателей  $t_{n1} = f(t_{\text{пер}})$  и  $t_{n2} = f(t_{\text{пер}})$  от величины напряжения на шинах 1-й и 2-й секций при длительности перерыва питания  $t_{\text{пер}}$ , которое выбирается из ряда {0.2 с, 0.5 с, 0.7 с, 1 с, 1.2 с, 1.5 с, 1.7 с, 2 с} по указанию преподавателя. Принять время КЗ  $t_{\text{КЗ}} = 0.2$  с. Время моделирования следует варьировать в пределах 10 – 30 с. Результаты измерений занести в [табл. 4.3](#) и построить зависимости.

Таблица 4.3 – Результаты расчетов, полученных в пункте 1

$U_{\text{раб}}$ , кВ		5.75	5.8	5.85	5.9	5.95	6	6.05	6.1	6.15	6.2
$t_{\text{пер}} = 0.2$ с	$t_{\text{вст}}$ , с										
	$U_{\text{уст}}$ , кВ										
	$t_{n1}$ , с										
	$t_{n2}$ , с										

4. Изменяя продолжительность перерыва питания  $t_{\text{пер}}$ , измерить зависимость  $I_{\text{CШ}} = f(t_{\text{пер}})$  для максимального тока, потребляемого 1-й секцией шин, на основе соответствующих графиков переходного тока, полученных с помощью функции построения графиков переходных процессов ([рис. 4.12](#)). Принять время короткого замыкания  $t_{\text{КЗ}} = 0$  с. Результаты измерений занести в [табл. 4.4](#) и построить зависимость.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов, полученных в пункте 4

$t_{\text{пер}}$ , мс	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$I_{\text{CШ}}$ , кА																

5. Для модели с исходными значениями напряжения задать в настройках расчета последовательности событий, соответствующие выбегу ([табл. 4.5](#)) и пуску двигателей ([табл. 4.6](#)). Получить осциллограммы скорости вращения двигателей 1-й секции шин при индивидуальном выбеге и пуске  $n_1 = f(t)$  и  $n_2 = f(t)$ . Расчет пуска АД проводится в соответствующем модуле ([рис. 4.10](#)) по аналогии с расчетом переходных процессов.

Таблица 4.5 – Последовательность событий при выбеге АД

№, п/п	Название события	Время	Действие
1	КЗ	0	Bus 4 - 3Phase Fault
2	Стоп КЗ	0	Bus 4 - Clear Fault; CB3 - Open

Таблица 4.6 – Последовательность событий при пуске АД

№, п/п	Название события	Время	Действие по элементам
1	Пуск двигателей	0	Mtr1 – Start; Mtr2 – Start

6. В режиме расчета пуска ЭД на основе измеренных осциллограмм момента АД и скольжения построить механические характеристики  $M_{\text{АД}} = f(s)$  АД, подключенных к 1-й секции шин. Численные значения графиков можно извлечь, кликнув по кривым и выбрав пункт «Data».

[К содержанию](#)

## 4.5. Описание настройки расчета переходного режима СЭС

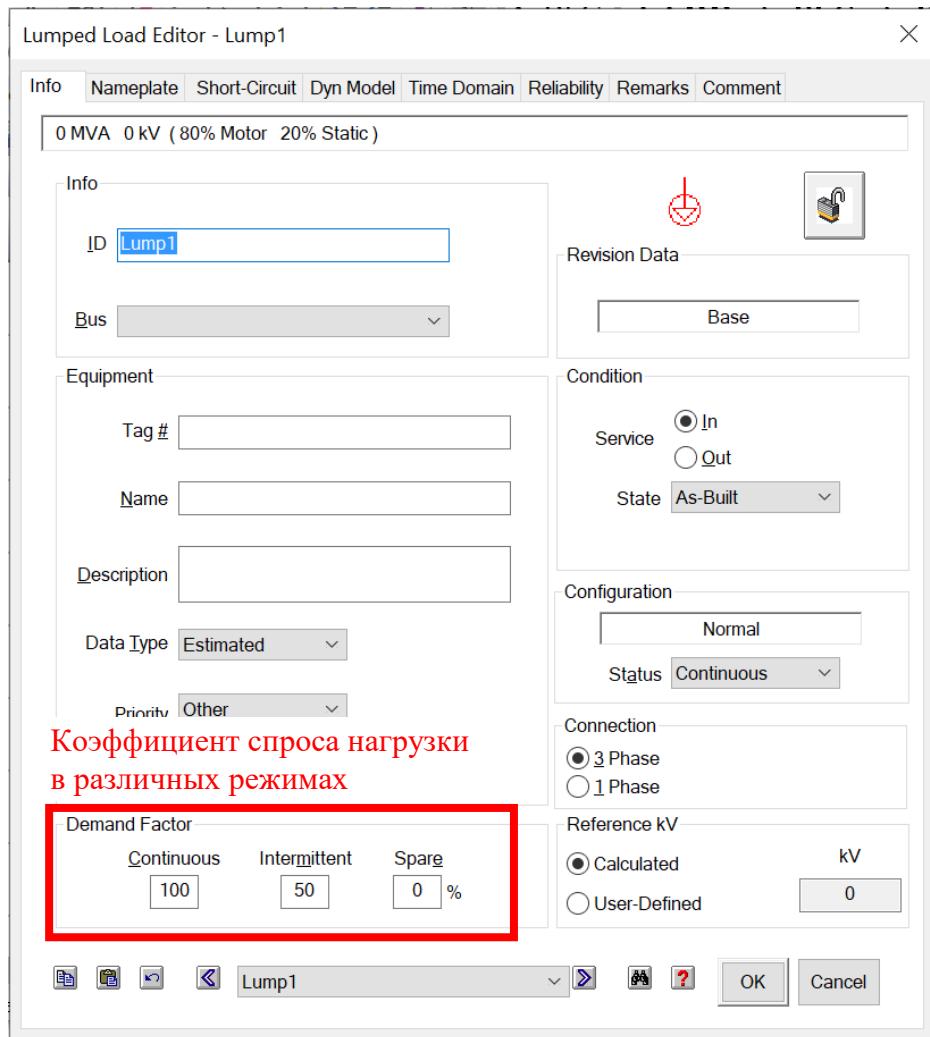


Рис. 4.4. Сосредоточенная нагрузка, вкладка «Info»

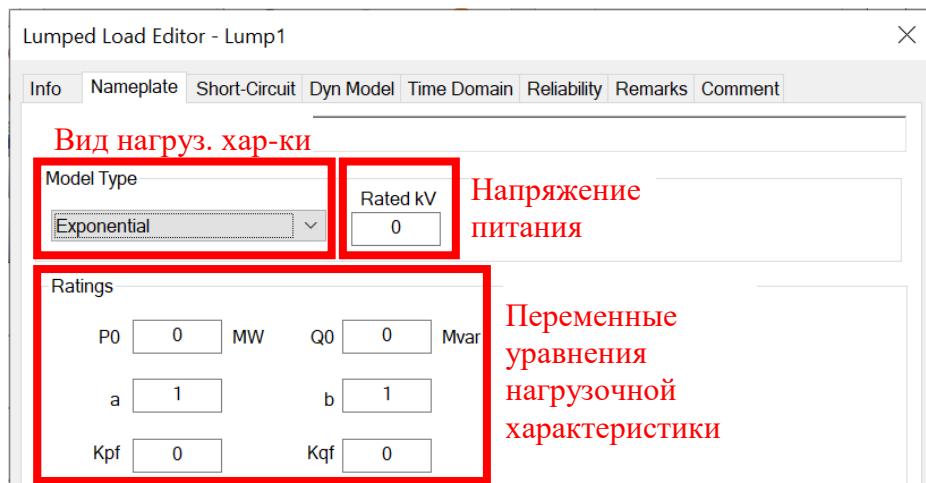


Рис. 4.5. Сосредоточенная нагрузка, вкладка «Nameplate»

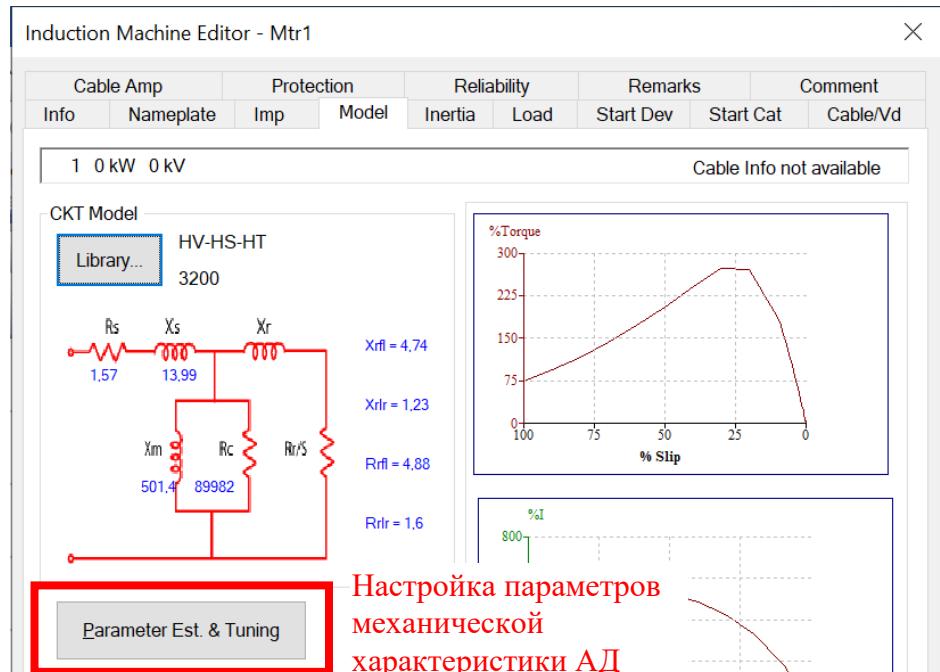


Рис. 4.6. Асинхронный двигатель, вкладка «Model»

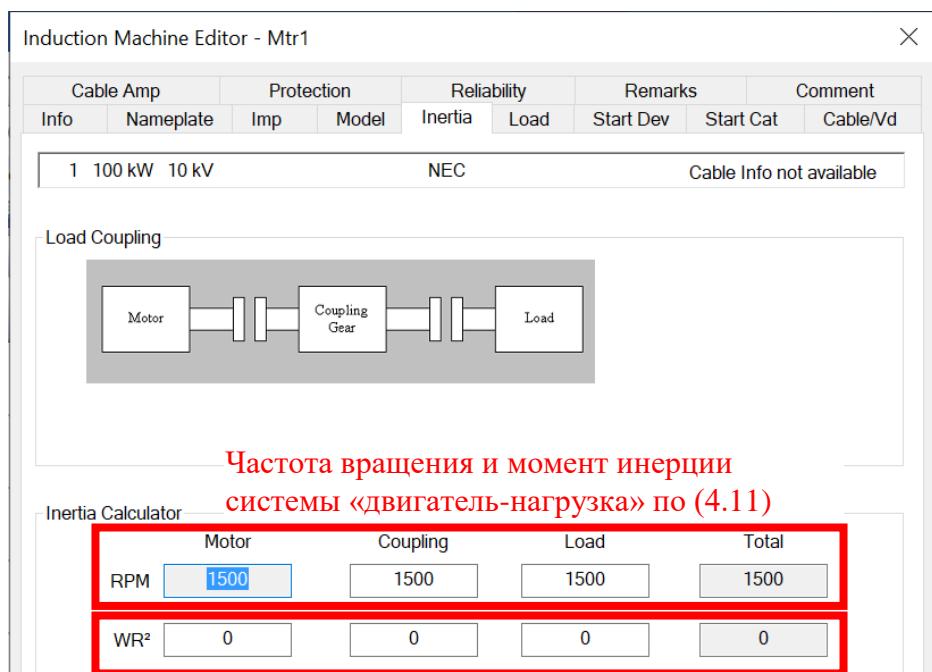


Рис. 4.7. Асинхронный двигатель, вкладка «Inertia»

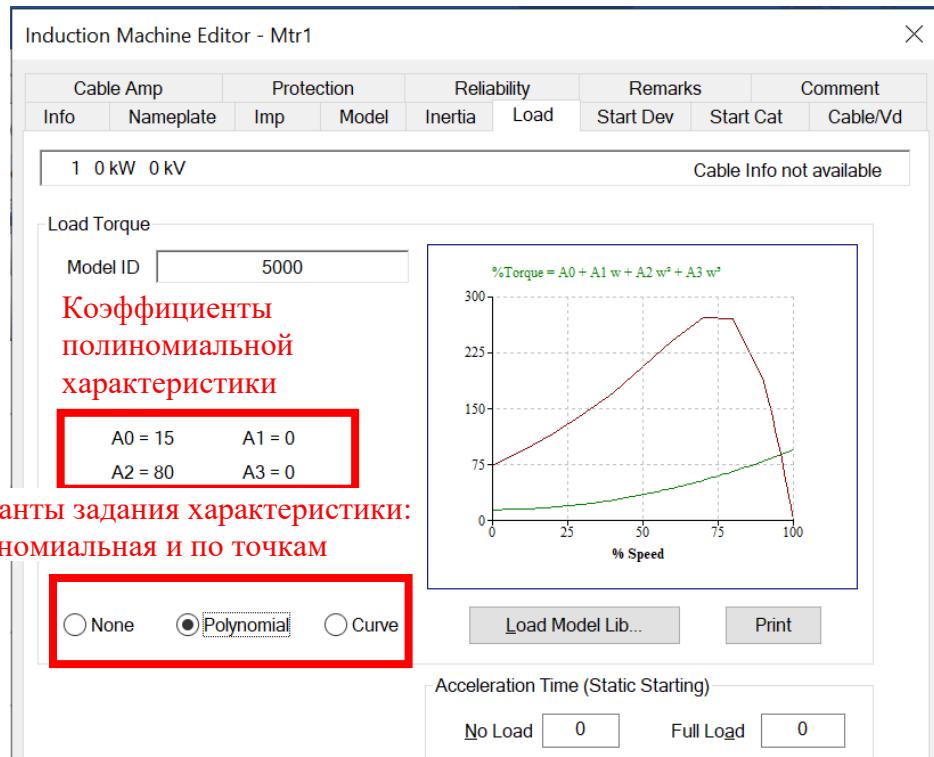


Рис. 4.8. Асинхронный двигатель, вкладка «Load»

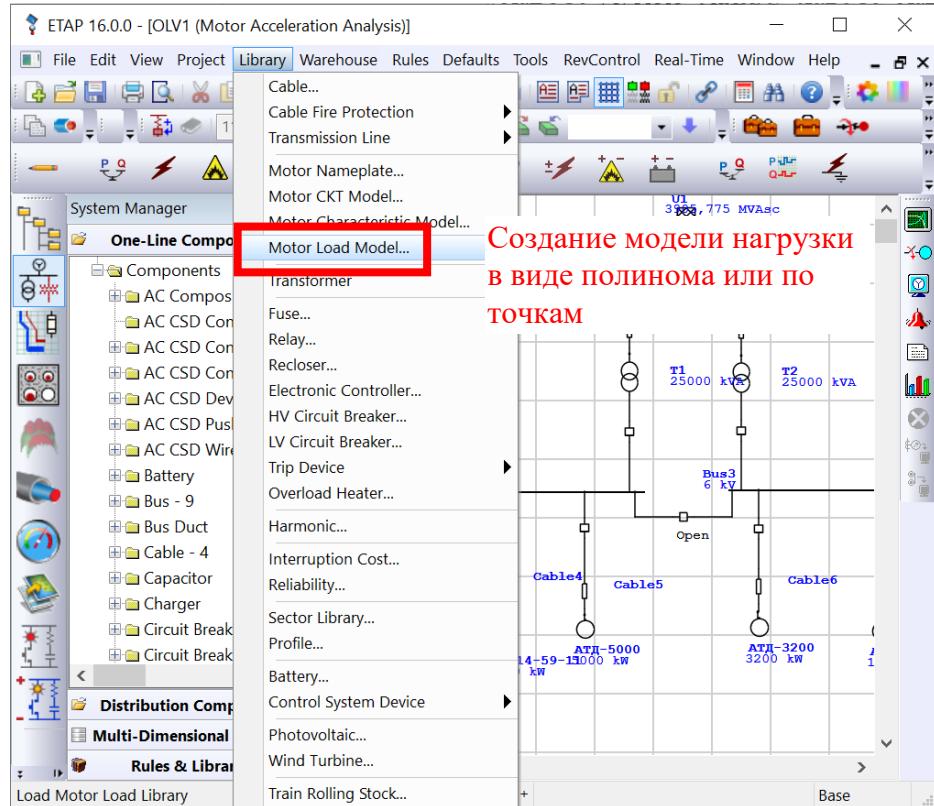


Рис. 4.9. Создание модели нагрузки ЭД

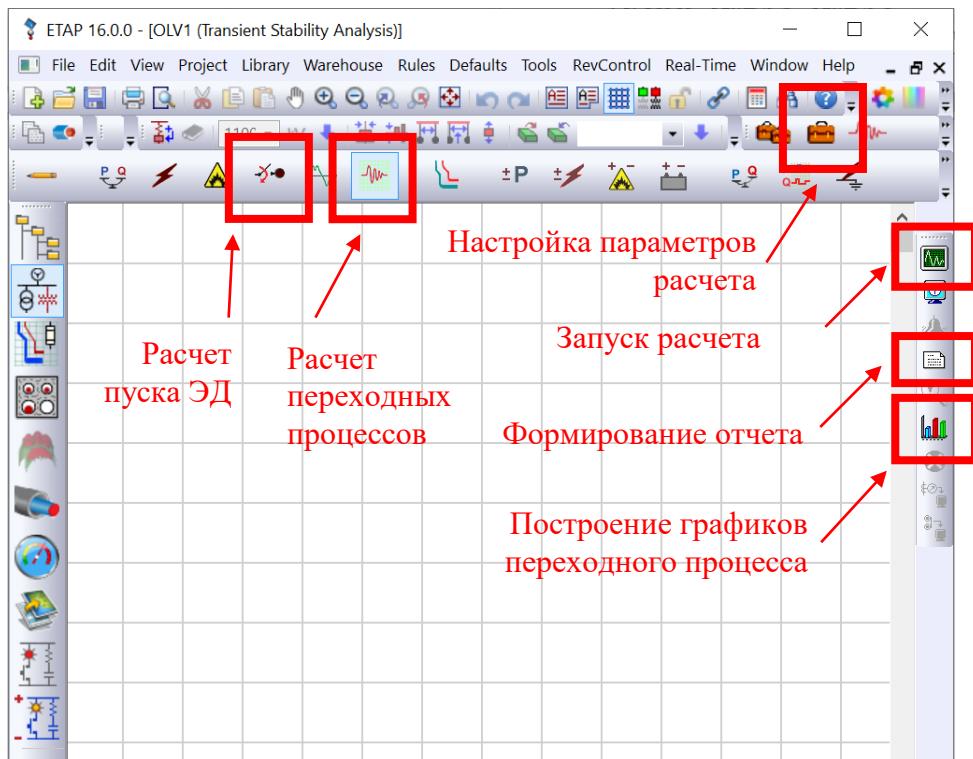


Рис. 4.10. Интерфейс программы в режиме расчета переходных процессов

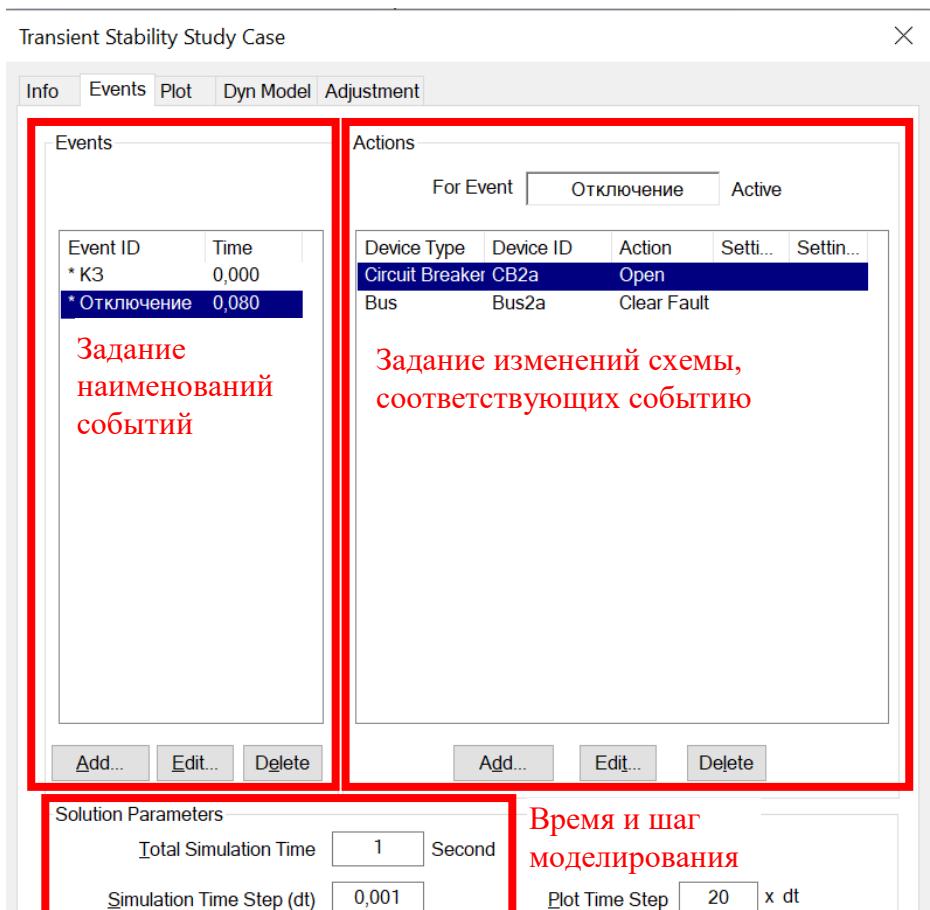


Рис. 4.11. Настройка параметров расчета, вкладка «Events»

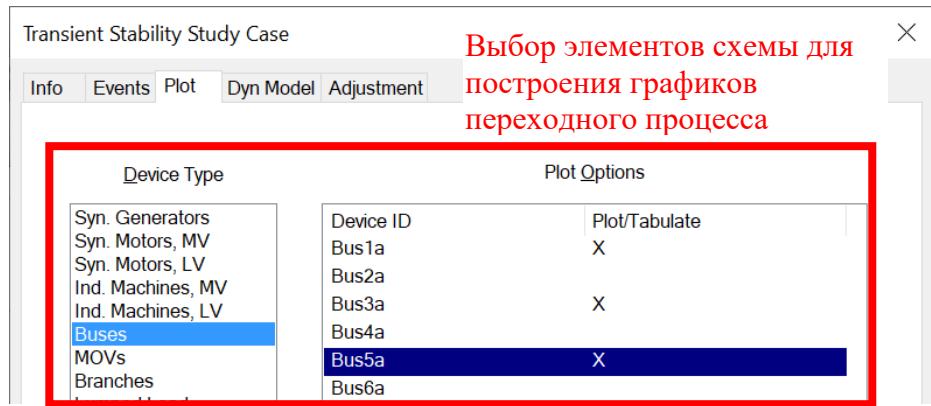


Рис. 4.12. Настройка параметров расчета, вкладка «Plot»

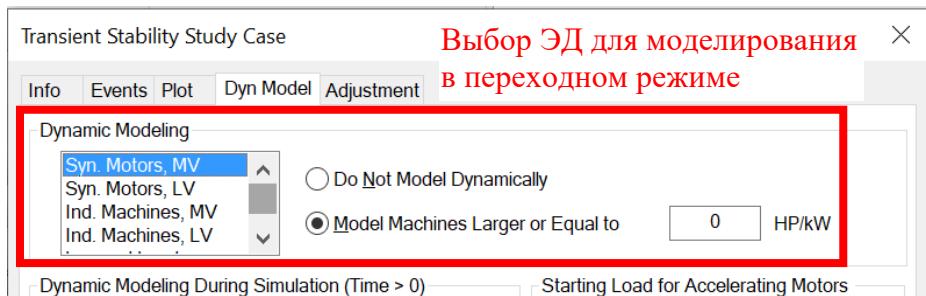


Рис. 4.13. Настройка параметров расчета, вкладка «Dyn Model»

[К содержанию](#)

## 4.6. Исходные данные для моделирования

Таблица 4.7 – Исходные данные по элементам электрической сети

Электрическая система	Линии электропередачи		Трансформаторы	
	Л1, Л2		Т1, Т2	
U <sub>NC</sub> =110кВ, I <sub>k</sub> =20,5кА	ВЛ:АС-95 25км, h=20м 		ТРДН-25000/110	

Таблица 4.8 – Данные по типам и загрузке асинхронных двигателей, кабельным линиям и прочей нагрузке 1-й секции

№ варианта	Двигатели		Нагрузочные механизмы		Кабельные линии		Прочая нагрузка	
	АД <sub>1.1</sub>	АД <sub>1.2</sub>	НМ <sub>1.1</sub>	НМ <sub>1.2</sub>	КЛ <sub>1.1</sub>	КЛ <sub>1.2</sub>	$\frac{P_{пр2}, \text{МВт}}{Q_{пр2}, \text{Мвар}}$	$\frac{\gamma P_{пр2}}{\gamma Q_{пр2}}$
1	АН-14-59-6 K <sub>3</sub> = 0.85	АТД-5000 K <sub>3</sub> = 0.95	M <sub>0</sub> =0.1 z = 1.8 T <sub>j.a</sub> = 4с	M <sub>0</sub> =0.1 z = 2 T <sub>j.a</sub> =3.5с	A-95 0.11км	2×A-150 0.4 км	<u>6.2</u> 3.7	<u>0.8</u> 1.8
2	АН-14-59-8 K <sub>3</sub> = 0.9	АТД-1600 K <sub>3</sub> =0.95	M <sub>0</sub> =0.15 z = 2	M <sub>0</sub> =0.18 z = 1.5	A-70 0.25км	A-120 0.15км	<u>7.5</u> 5.9	<u>0.9</u> 2.0

			$T_{j,a}=3.5c$	$T_{j,a} = 6c$				
3	АТД-1600 $K_3=0.95$	АТД-5000 $K_3=0.75$	$M_0=0.18$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 6c$	$M_0 = 0.1$ $z = 2.2$ $T_{j,a}=5.5c$	A-120 0.2 км	2×A-150 0.3 км	<u>7.1</u> 5.4	<u>1.1</u> 1.8
4	АТД-3200 $K_3=0.85$	АН-14-59-8 $K_3=0.95$	$M_0=0.1$ $z = 2.2$ $T_{j,a} = 5.5c$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a} = 3c$	2×A-95 0.3 км	A-70 0.5 км	<u>6.8</u> 6.3	<u>0.8</u> 2.0
5	АТД-5000 $K_3 = 0.8$	АН-14-59-6 $K_3 = 0.85$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a} = 3c$	$M_0=0.18$ $z = 1.2$ $T_{j,a}=4.5c$	2×A - 150 0.15 км	A-95 0.15км	<u>7.1</u> 4.6	<u>0.85</u> 2.0
6	АН-14-59-6 $K_3 = 0.95$	АТД-3200 $K_3 = 0.85$	$M_0=0.18$ $z = 1.2$ $T_{j,a}=4.5c$	$M_0 = 0.1$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 8c$	A-95 0.5 км	2×A-95 0.4 км	<u>6.7</u> 6.1	<u>0.9</u> 1.8
7	АТД-1600 $K_3=0.85$	АТД-5000 $K_3=0.75$	$M_0=0.1$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 8c$	$M_0=0.19$ $z = 2.5$ $T_{j,a} = 4c$	A-120 0.5 км	2×A-150 0.5 км	<u>4.9</u> 3.0	<u>1.0</u> 1.8
8	АТД-5000 $K_3=0.95$	АН-14-59-8 $K_3=0.85$	$M_0=0.19$ $z = 2.5$ $T_{j,a} = 4c$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4.2c$	2×A-150 0.3 км	A-70 0.4км	<u>8.8</u> 7.9	<u>1.0</u> 2.0
9	АН-14-59-8 $K_3=0.95$	АН-14-59-6 $K_3=0.85$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4.2c$	$M_0 = 0.1$ $z = 1.2$ $T_{j,a} = 3c$	A-70 0.2км	A-95 0.2км	<u>7.7</u> 6.6	<u>0.8</u> 1.9
10	АТД-3200 $K_3=0.95$	АН-14-59-6 $K_3=0.85$	$M_0=0.1$ $z = 1.2$ $T_{j,a} = 3c$	$M_0=0.1$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4c$	2×A-95 0.25 км	A-95 0.15км	<u>10.1</u> 6.9	<u>0.8</u> 1.8

Таблица 4.9 – Данные по типам и загрузке асинхронных двигателей, кабельным линиям и прочей нагрузке 2-й секции

№ варианта	Двигатели		Нагрузочные характеристики		Кабельные линии		Прочая нагрузка	
	АД <sub>1.1</sub>	АД <sub>1.2</sub>	НМ <sub>1.1</sub>	НМ <sub>1.2</sub>	КЛ <sub>1.1</sub>	КЛ <sub>1.2</sub>	$\frac{P_{\text{пр2}, \text{МВт}}}{Q_{\text{пр2}, \text{Мвар}}}$	$\frac{\gamma P_{\text{пр2}}}{\gamma Q_{\text{пр2}}}$
1	АТД-3200 $K_3=0.95$	АН-14-59-6 $K_3=0.85$	$M_0=0.1$ $z = 1.2$ $T_{j,a} = 3c$	$M_0=0.1$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4c$	2×A-95 0.25 км	A-95 0.15км	<u>10.1</u> 6.9	<u>0.8</u> 1.8
2	АН-14-59-6 $K_3 = 0.85$	АТД-5000 $K_3 = 0.95$	$M_0=0.1$ $z = 1.8$ $T_{j,a} = 4c$	$M_0=0.1$ $z = 2$ $T_{j,a}=3.5c$	A-95 0.11км	2×A-150 0.4 км	<u>6.2</u> 3.7	<u>0.8</u> 1.8
3	АН-14-59-8 $K_3 = 0.9$	АТД-1600 $K_3=0.95$	$M_0=0.15$ $z = 2$ $T_{j,a}=3.5c$	$M_0=0.18$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 6c$	A-70 0.25км	A-120 0.15км	<u>7.5</u> 5.9	<u>0.9</u> 2.0
4	АТД-1600 $K_3=0.95$	АТД-5000 $K_3 = 0.75$	$M_0=0.18$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 6c$	$M_0 = 0.1$ $z = 2.2$ $T_{j,a}=5.5c$	A-120 0.2 км	2×A-150 0.3 км	<u>7.1</u> 5.4	<u>1.1</u> 1.8
5	АТД-3200 $K_3=0.85$	АН-14-59-8 $K_3 = 0.95$	$M_0=0.1$ $z = 2.2$ $T_{j,a}=5.5c$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a} = 3c$	2×A-95 0.3 км	A-70 0.5км	<u>6.8</u> 6.3	<u>0.8</u> 2.0
6	АТД-5000 $K_3 = 0.8$	АН-14-59-6 $K_3 = 0.85$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$	$M_0=0.18$ $z = 1.2$	2×A-150	A-95 0.15км	<u>7.1</u> 4.6	<u>0.85</u> 2.0

			$T_{j,a} = 3c$	$T_{j,a}=4.5c$	0.15км			
7	АН-14-59-6 $K_3 = 0.95$	АТД-3200 $K_3 = 0.85$	$M_0=0.18$ $z = 1.2$ $T_{j,a}=4.5c$	$M_0=0.1$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 8c$	A-95 0.5км	2×A-95 0.4 км	<u>6.7</u> 6.1	<u>0.9</u> 1.8
8	АТД-1600 $K_3=0.85$	АТД-5000 $K_3=0.75$	$M_0=0.1$ $z = 1.5$ $T_{j,a} = 8c$	$M_0=0.19$ $z = 2.5$ $T_{j,a} = 4c$	A-120 0.5км	2×A-150 0.5 км	<u>4.9</u> 3.0	<u>1.0</u> 1.8
9	АТД-5000 $K_3=0.95$	АН-14-59-8 $K_3=0.85$	$M_0=0.19$ $z = 2.5$ $T_{j,a} = 4c$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4.2c$	2×A-150 0.3 км	A-70 0.4км	<u>8.8</u> 7.9	<u>1.0</u> 2.0
10	АН-14-59-8 $K_3= 0.95$	АН-14-59-6 $K_3= 0.85$	$M_0=0.15$ $z = 1.8$ $T_{j,a}=4.2c$	$M_0=0.1$ $z = 1.2$ $T_{j,a} = 3c$	A-70 0.2км	A-95 0.2км	<u>7.7</u> 6.6	<u>0.8</u> 1.9

Таблица 4.10 – Технические данные трансформатора

Тип трансформатора	$U_{\text{нн}}$ , кВ	$S_{\text{ном}}$ , кВА	$u_K$ , %	$\Delta P_K$ , кВт
ТРДН-25000/110	6.3-6.3 6.3-10.5 10.5-10.5	25000	10.5	120.0

Таблица 4.11 – Технические данные высоковольтных АД

Тип	$P_N$ , кВт	$U_N$ , В	$s_{aN}$ , %	$\eta_N$ , %	$\cos\varphi_N$	Пусковые характеристики		
						$I_{\text{пуск}}$	$M_{\text{пуск}}$	$M_{\max}$
А-13-55-12	200	6000	1.6	91.0	0.77	4.7	1.0	2.3
АН-14-59-6	1250	6000	1.5	94.8	0.88	6.0	1.1	2.4
АН-14-59-8	1000	6000	2.0	94.3	0.86	5.2	1.0	2.2
АН-14-49-12	500	6000	3.0	93.3	0.8	4.4	1.2	2.2
АТД-1600	1600	6000	0.8	95.6	0.91	5.5	0.7	2.5
АТД-3200	3200	6000	0.5	95.8	0.9	6.4	0.7	2.7
АТД-5000	5000	6000	0.5	96.5	0.91	5.6	0.7	2.4
АО-11-55-5	500	6000	1.0	93.5	0.88	6.5	1.2	2.9
АН-15-29-16	320	6000	2.0	91.5	0.73	4.4	1.1	2.1
ДАЗО-15-49-8	630	6000	0.9	91.0	0.86	5.5	0.8	2.4

[К содержанию](#)

## Контрольные вопросы

- Перечислить стадии процесса самозапуска.
- Записать выражения для определения параметров схемы замещения АД.
- Записать уравнения пуска и самозапуска АД.
- Нарисовать механическую характеристику АД и обозначить ее характерные точки.
- Записать уравнение движения электродвигателя и описать входящие в него переменные.

[К содержанию](#)

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. РАСЧЕТ УРОВНЕЙ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ И СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОГРАММЕ ETAP

## 5.1. Назначение и краткая характеристика работы

Работа состоит из экспериментальной части, нацеленной на ознакомление с возможностями применения программного комплекса ETAP для проведения гармонического анализа электрической системы. В работе рассматриваются способы снижения несинусоидальности схемы, реализация фильтрокомпенсирующих устройств и полезный эффект от их применения в данной электрической схеме.

[К содержанию](#)

## 5.2. Теоретические основы расчета несинусоидальных режимов

### 5.2.1. Общее описание проблемы несинусоидальности напряжения

Несинусоидальность напряжения возникает в результате работы мощных электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, например, различных полупроводниковых преобразователей электропривода, электротермических и электролизных установок; дуговых сталеплавильных печей, газоразрядных ламп, бытовых электронных устройств и энергосберегающего освещения. Например, многопульсные диодные и тиристорные выпрямители при работе потребляют искаженный ток, в спектре которого присутствуют гармоники порядка

$$v = mk \pm 1, \quad (5.1)$$

где  $m$  – пульсность преобразователя (6, 12, 18 и т.д.);  $k = 0, 1, 2, 3\dots$  – последовательный ряд натуральных чисел.

Искажения кривой напряжения в электрических сетях приводят к росту потерь, нагреву обмоток и ускоренному износу трансформаторов и электродвигателей, перегрузке батарей конденсаторов, сбоям в работе релейной защиты и т.д. [10].

В сетях, содержащих батареи конденсаторов (БК) ([рис. 5.1, а](#)), возможно возникновение резонансных условий на определенных частотах

(рис. 5.1, б), что при совпадении с гармоникой тока нелинейной нагрузки, приводит к кратному росту искажений напряжения и тока. При этом частота, соответствующая параллельному резонансу в системе мощностью  $S_{K3}$  при установке БК мощностью  $Q_{BK}$ , определяется как [11]:

$$f_{рез1} = \sqrt{\frac{S_{K3}}{Q_{BK}}} \cdot 50 = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot U_{hom} \cdot I_{K3}}{Q_{BK}}} \cdot 50, \quad (5.2)$$

где  $I_{K3}$  – ток трехфазного КЗ в точке подключения к внешней сети.

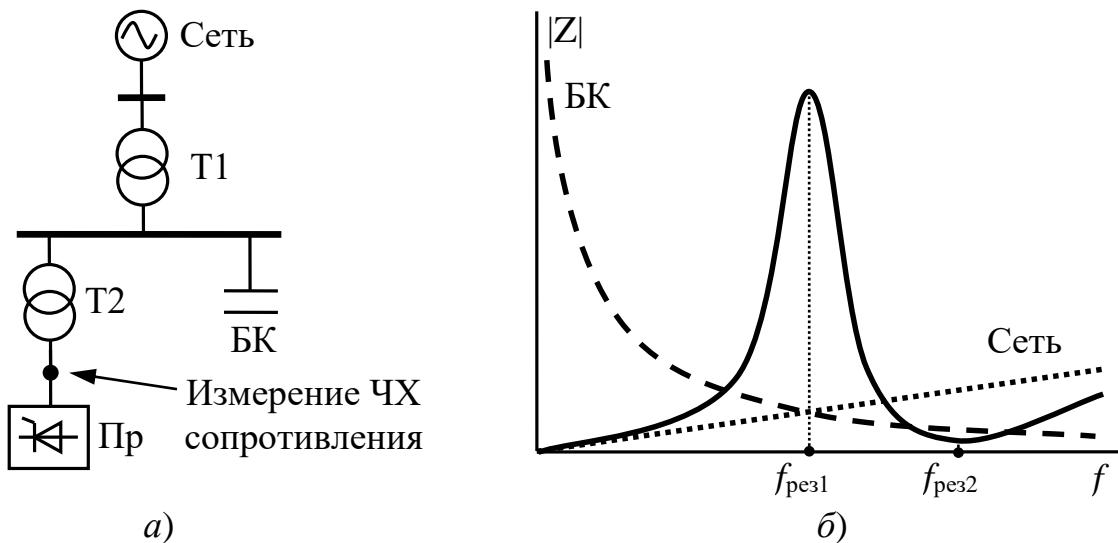


Рис. 5.1. Типовая схема подключения компенсирующего устройства в сети с нелинейной нагрузкой (а) и соответствующая частотная характеристика сопротивления (б)

[К содержанию](#)

### 5.2.2. Регулирование уровней несинусоидальности с помощью пассивных фильтров высших гармоник и многопульсных схем

В связи с указанными негативными эффектами уровни несинусоидальности сетевого напряжения стараются ограничить в рамках предельных значений, устанавливаемых ГОСТ 32144-2013 [12]. Данный стандарт количественно характеризует гармонические искажения с помощью двух показателей: коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{Un}$  и суммарного коэффициента несинусоидальности напряжения  $K_{\Sigma U}$ , – которые определяются следующим образом:

$$K_{U(n)} = \frac{U_i}{U_1} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

$$K_{\Sigma U} = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_i^2} \cdot \frac{100\%}{U_1}, \quad (5.4)$$

где  $U_i$  – величина  $i$ -й гармоники напряжения.

Ограничение уровней несинусоидальности может осуществляться как на этапе предварительных расчетов проектируемых сетей с нелинейными нагрузками с помощью моделирования в программах-симуляторах, так и в уже действующих сетях посредством установки пассивных фильтров ВГ.

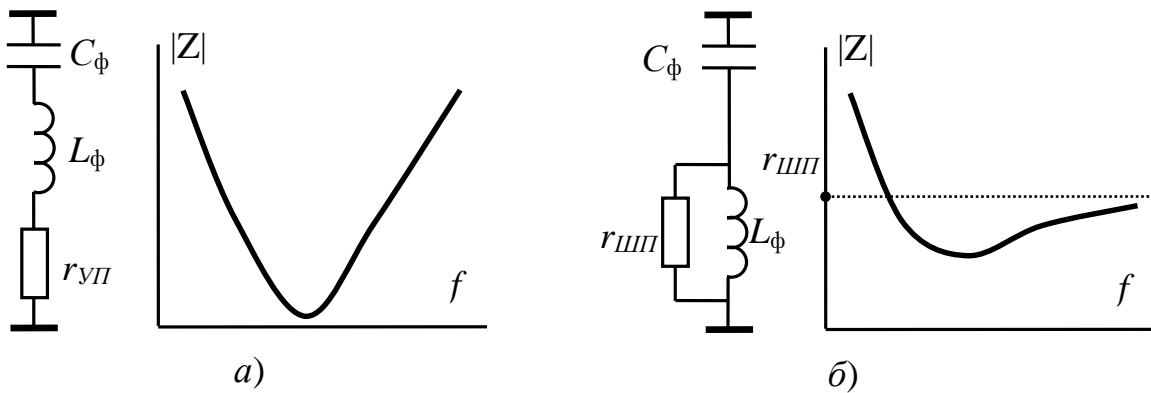


Рис. 5.2. Схемы и частотные характеристики узкополосных (а) и широкополосных (б) фильтров

В зависимости от того, является ли назначением фильтра подавление ВГ на конкретной частоте или множества ВГ на частотном диапазоне, начиная с выбранной, пассивные фильтры подразделяются на узкополосные ([рис. 5.2, а](#)) и широкополосные ([рис. 5.2, б](#)). Параметры пассивных фильтров определяются на основе их резонансных частот:

$$C_\phi = \frac{n^2 - 1}{n^2 \omega U^2} \cdot \frac{Q_{\phi n}}{\omega}, \quad (5.5)$$

$$L_\phi = \frac{1}{n^2 \omega^2 C_\phi}, \quad (5.6)$$

$$r_{УП} = \frac{\sqrt{L_\phi / C_\phi}}{d}, \quad (5.7)$$

$$r_{ШП} = d \sqrt{L_\phi / C_\phi}, \quad (5.8)$$

где  $d$  – добротность фильтра, которая для узкополосных фильтров составляет  $30 \div 60$ , а для широкополосных –  $0.5 \div 2$ ;  $Q_{\phi n}$  – реактивная мощность фильтра  $n$ -й гармоники.

В случае использования каскада пассивных фильтров для компенсации нескольких ВГ тока нагрузки распределение реактивной мощности между отдельными фильтрами осуществляется в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma\phi} &= Q_{\phi 5} + Q_{\phi 7} + Q_{\phi 11} + Q_{\phi 13} = \\ &= 6Q_{\phi 13} + 4Q_{\phi 13} + 2Q_{\phi 13} + Q_{\phi 13}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где  $Q_{\Sigma\phi}$  – реактивная мощность компенсации нелинейной нагрузки.

Также другим эффективным способом снижения уровней гармонической эмиссии при работе мощных нелинейных нагрузок является использование многопульсных схем преобразователей (рис. 5.3), обеспечивающих в соответствии с (5.1) исключение отдельных канонических ВГ стандартной 6-пульсной схемы. Благодаря использованию трансформаторов, создающих фазовый сдвиг (табл. 5.3) между токами нагрузки в разных ветвях схемы, достигается противофазность векторов ВГ тока отдельных плечей, что на первичной стороне трансформатора позволяет снижать гармоническую эмиссию нагрузки.

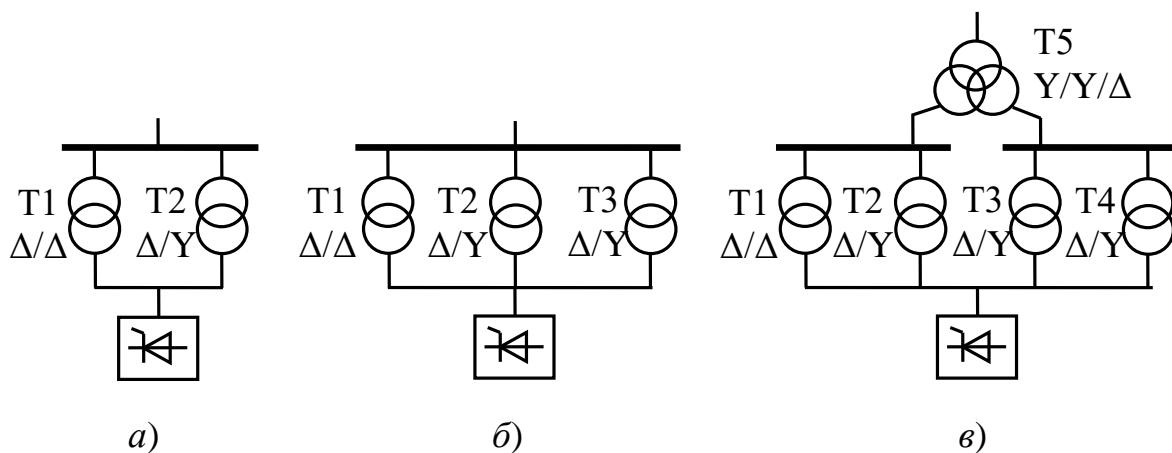


Рис. 5.3. Многопульсные схемы снижения гармонической эмиссии нелинейной нагрузки: 12-пульсная (а), 18-пульсная (б) и 24-пульсная (в)

Таблица 5.1 – Значения фазовых сдвигов вторичных обмоток трансформаторов многопульсных схем

Схема	T1, Δ/Δ	T2, Δ/Y	T3, Δ/Y	T4, Δ/Y
12-пульсная	0	30	-	-
18-пульсная	0	20	-20	-

24-пульсная	0	30	0	-30
-------------	---	----	---	-----

[К содержанию](#)

### 5.3. Порядок выполнения работы

1. В модели схемы [рис. 1.22](#), используемой в предыдущих лабораторных работах, в точке подключения одного из электродвигателей добавить преобразователь частоты, для которого задать спектр высших гармоник тока в соответствии с [табл. 5.1](#) и указаниями на [рис. 5.10 – 5.12](#), создав новую модель через вкладку «Library» – «Harmonic» и в открывшемся окне взяв за основу типовой спектр ВГ 6-пульсного выпрямителя Typical-IEEE 6 Pulse 2.

Таблица 5.2 – Спектр ВГ нелинейной нагрузки

Порядок гармоники	Амплитуда в % от основной гармоники $A = (-1)^{N_0} \cdot (N_0)^2 / 10$ , № - номер по списку
5	$I_5 + A$
7	$I_7 - 0.7 \cdot A$
11	$I_{11} + 0.5 \cdot A$
13	$I_{13} - 0.3 \cdot A$
17	$I_{17} + 0.2 \cdot A$
19	$I_{19} - 0.2 \cdot A$

2. Для полученной модели рассчитать уровни несинусоидальности напряжения узлов схемы и АЧХ сопротивления в точке подключения нелинейной нагрузки с помощью модуля расчета несинусоидальных режимов.

3. В точке подключения нелинейной нагрузки добавить батарею конденсаторов. Посредством расчета в модуле установившегося режима (Лабораторная работа №1), определить значения мощности БК  $Q_{БК}$ , обеспечивающую требуемые уровни коэффициента мощности нелинейной нагрузки ([табл. 5.2](#)). Для этого настроить отображение величины коэффициента мощности в точке подключения нелинейной нагрузки. Используя полученные мощности БК, заполнить [табл. 5.2](#) и построить зависимости:

– резонансной частоты АЧХ сопротивления от уровня компенсации  $f_{рез.мод} = f(\cos \varphi)$ . Сравнить полученные значения с теоретическими  $f_{рез.мод}$ , рассчитанными по ([5.2](#)) с помощью значения тока трехфазного КЗ в точке подключения к внешней сети, полученного в модуле расчета токов КЗ (Лабораторная работа №2);

- суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и тока ( $K_{\Sigma U}$ ,  $K_{\Sigma I}$ ) от уровня компенсации  $K_{\Sigma U} = f(\cos \varphi)$ . Добавить линию, соответствующую допустимому  $K_{\Sigma U}$  из ГОСТ;
- коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения для 5-й, 7-й, 11-й и 13-й ВГ напряжения от уровня компенсации  $K_{U(n)} = f(\cos \varphi)$ . Для каждой ВГ указать нормально допустимый уровень напряжения в соответствии с ГОСТ;
- отношения действующего тока к номинальному току БК от уровня компенсации  $I_{БК}/I_{ном.БК} = f(\cos \varphi)$ .

Таблица 5.3 –Зависимости уровней несинусоидальности от величины компенсации схемы

$\cos \varphi$	0.825	0.85	0.875	0.9	0.925	0.95	0.975	0.989	1
$K_{\Sigma U}$ , %									
$K_{\Sigma I}$ , %									
$I_{БК}$ , А									
$I_{ном.БК}$ , А									
$Q_{БК}$ , квр									
$f_{рез.мод}$ , Гц									
$f_{рез.теор}$ , Гц									

4. Заменить конденсатор каскадом из четырех узкополосных фильтров 5-й, 7-й, 11-й и 13-й ВГ. Распределение суммарной реактивной мощности компенсации нагрузки между отдельными фильтрами выполнить в соответствии с (5.9). Получить график спектра гармоник, и провести анализ влияния (построить графики) сопротивления системы (100%, 125%, 150%, 200%) с фильтрами на:

- форму АЧХ сопротивления в точке подключения нелинейной нагрузки;
- величину суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_{\Sigma U}$ .

5. В модели схемы вместо 6-пульсного преобразователя собрать 12-, 18- и 24-пульсные схемы в соответствии с [рис. 5.3](#) и [табл. 5.3](#). Проанализировав кривую тока питания преобразователя, убедиться в снижении искажений при росте пульсности схемы.

6. Для каждой из многопульсных схем рассчитать широкополосный фильтр ВГ, настроенный на первую гармонику тока спектра преобразователя. Убедиться в эффективной работе фильтра, сравнив спектры напряжения и АЧХ сопротивления в точке подключения нелинейной нагрузки до и после установки фильтра.

[К содержанию](#)

## 5.4. Методические указания к работе в лаборатории

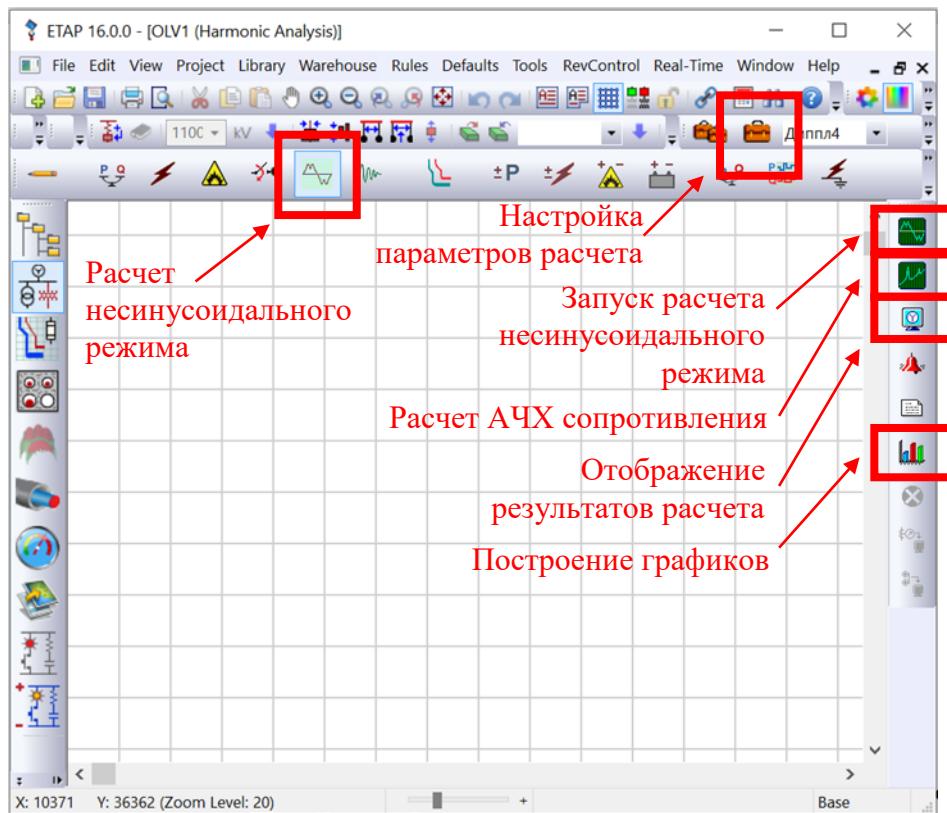


Рис. 5.4. Интерфейс программы в режиме расчета несинусоидального режима

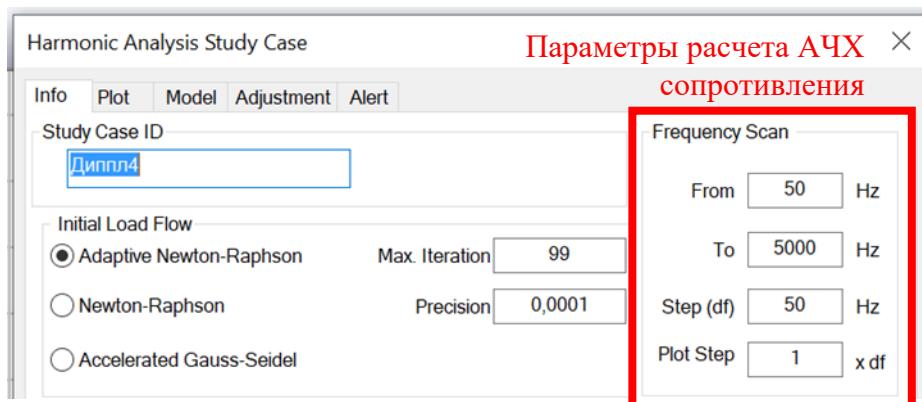


Рис. 5.5. Настройка расчета несинусоидального режима, вкладка «Info»

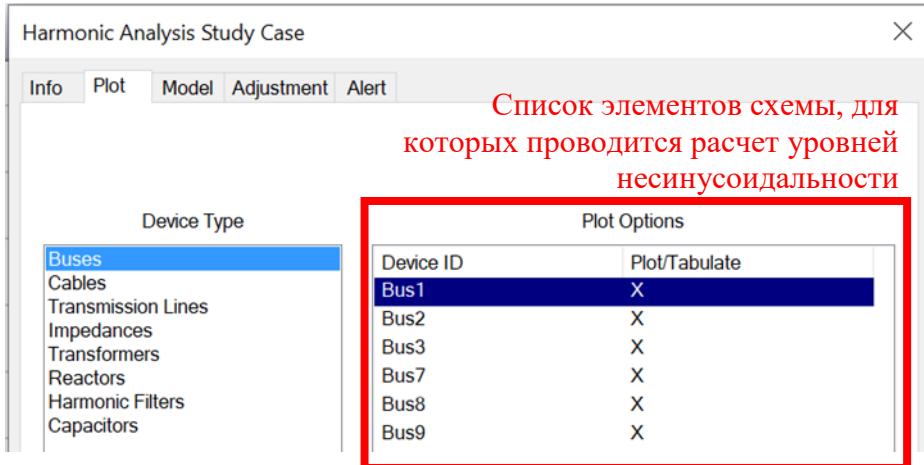


Рис. 5.6. Настройка параметров расчета несинусоидального режима, вкладка «Info»

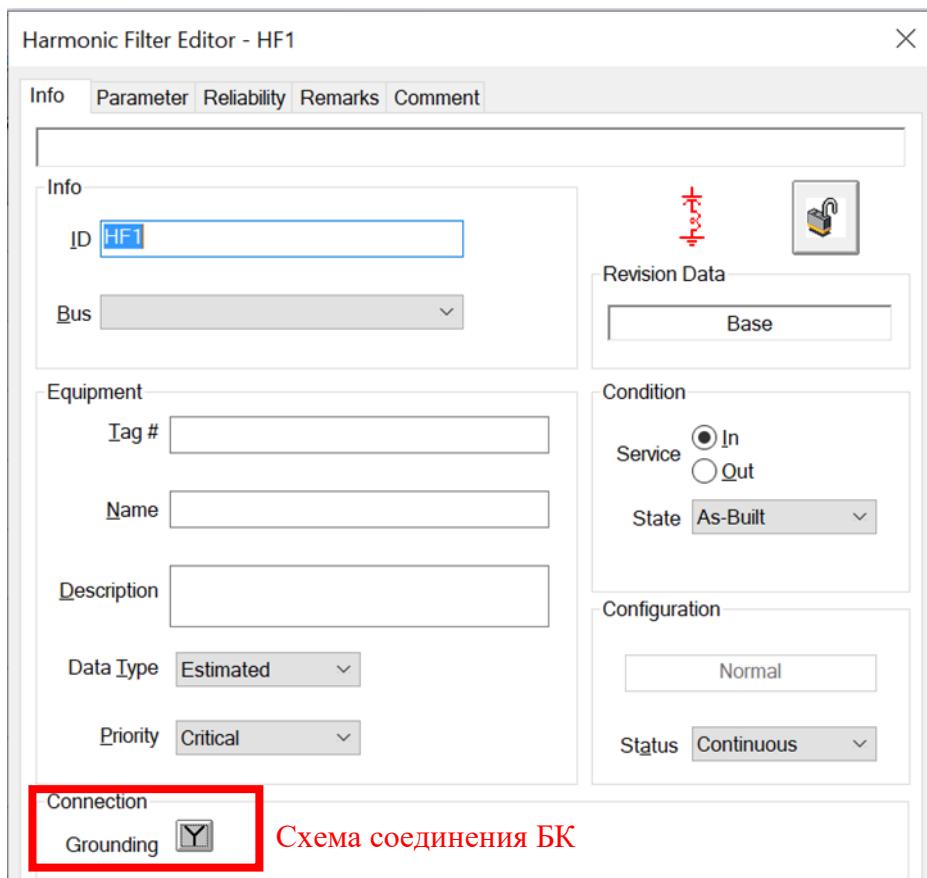


Рис. 5.7. Пассивный фильтр ВГ, вкладка «Info»

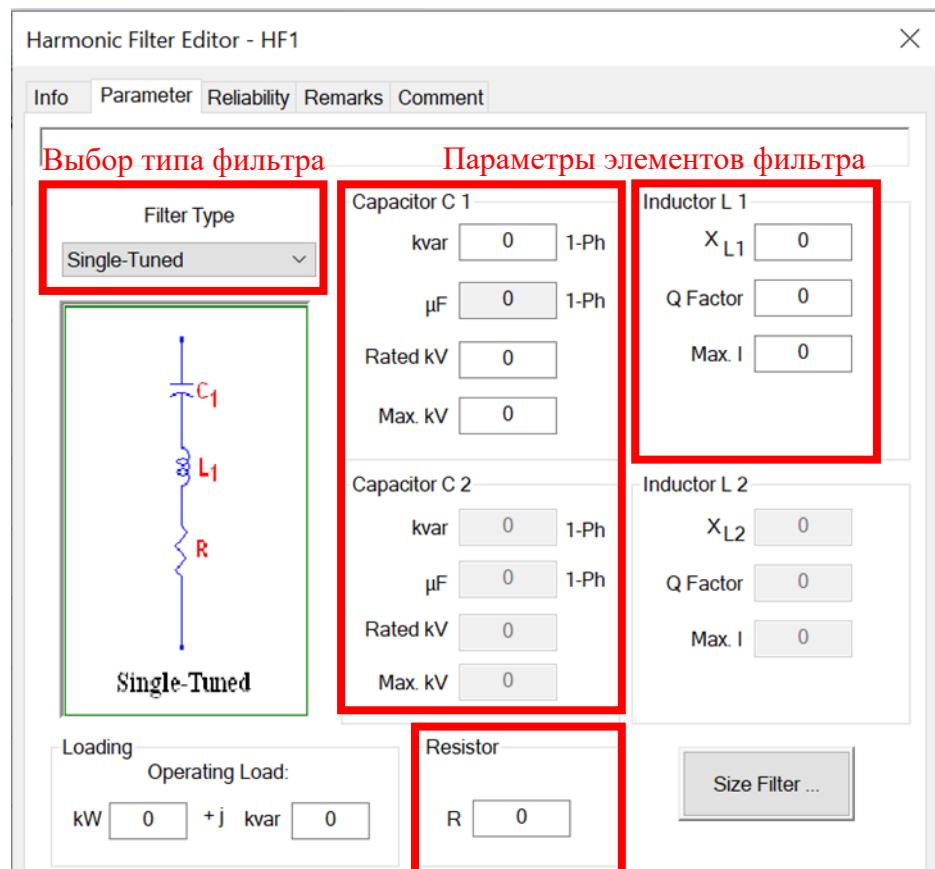


Рис. 5.8. Пассивный фильтр ВГ, вкладка «Info»

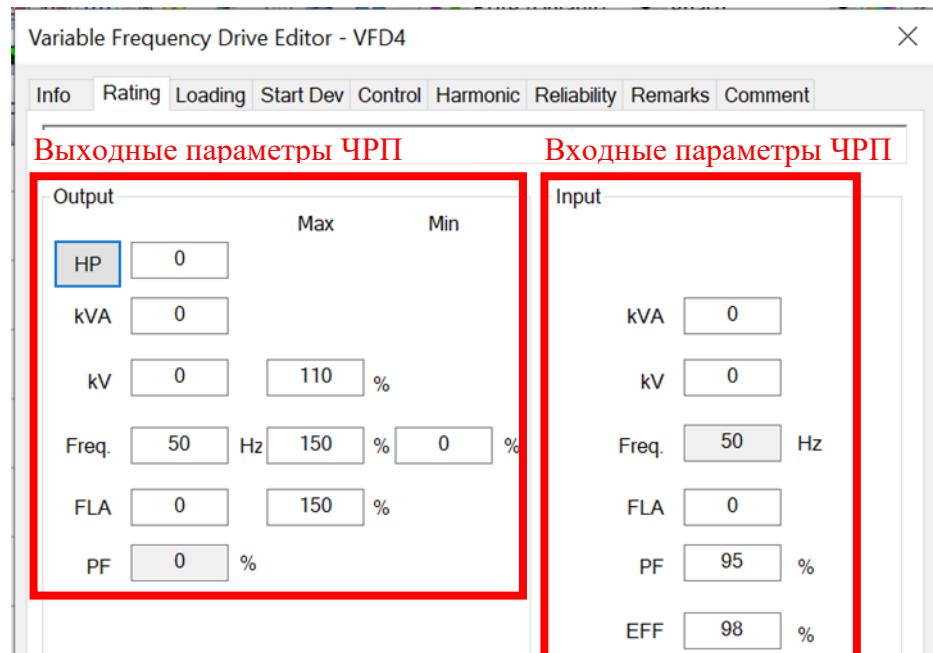


Рис. 5.9. Частотно-регулируемый привод, вкладка «Rating»

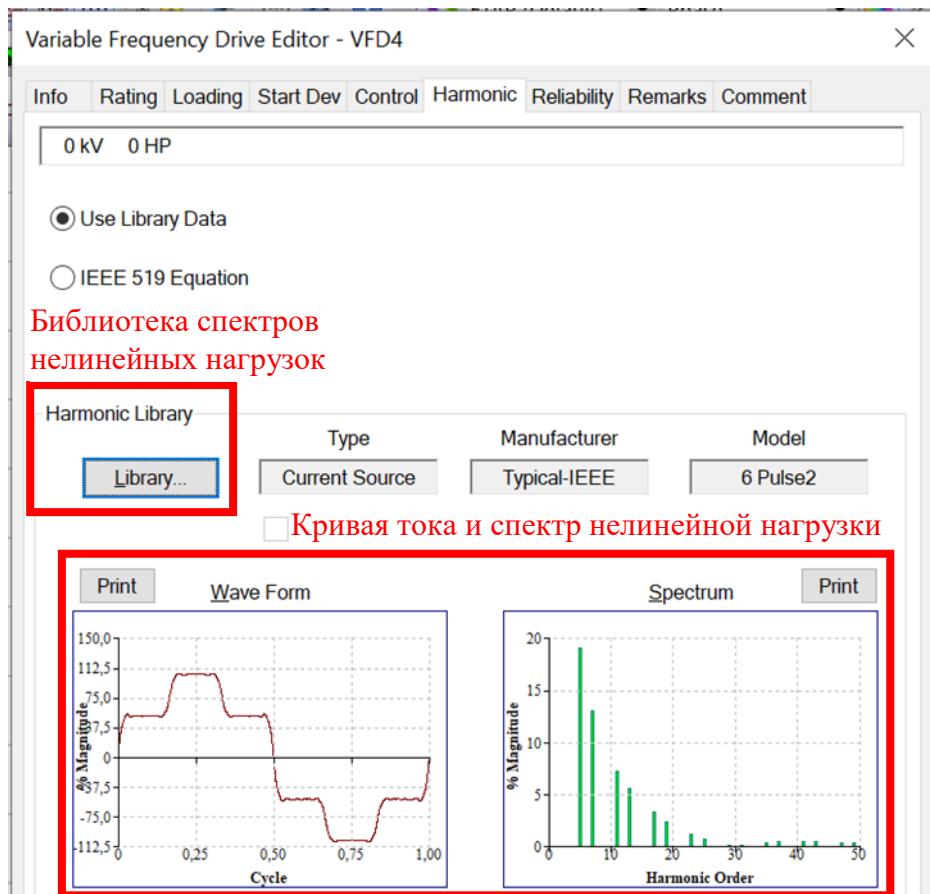


Рис. 5.10. Частотно-регулируемый привод, вкладка «Rating»

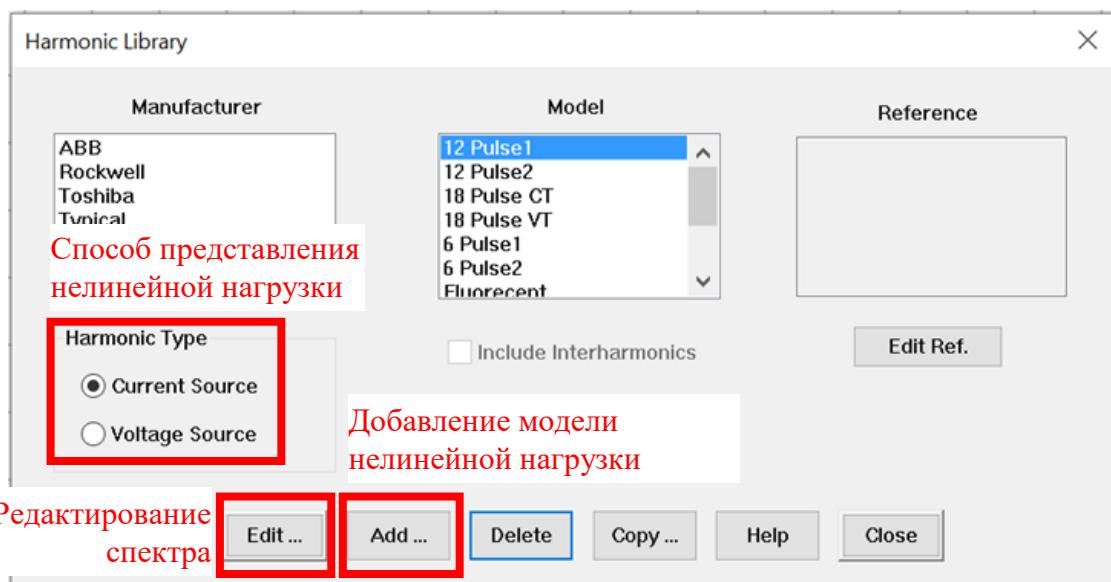


Рис. 5.11. Добавление новой модели нелинейной нагрузки

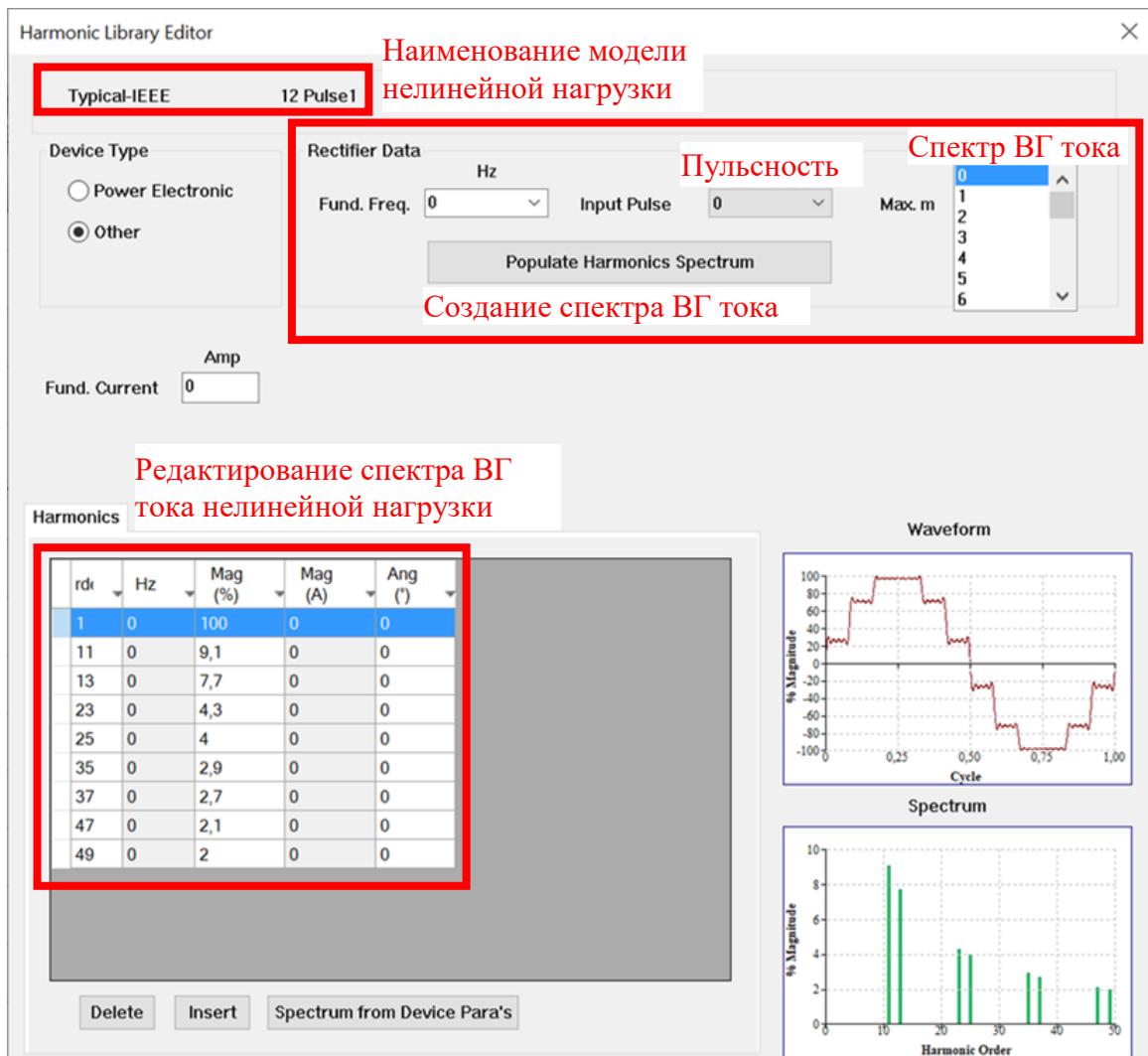


Рис. 5.12. Редактирование спектра ВГ тока нелинейной нагрузки

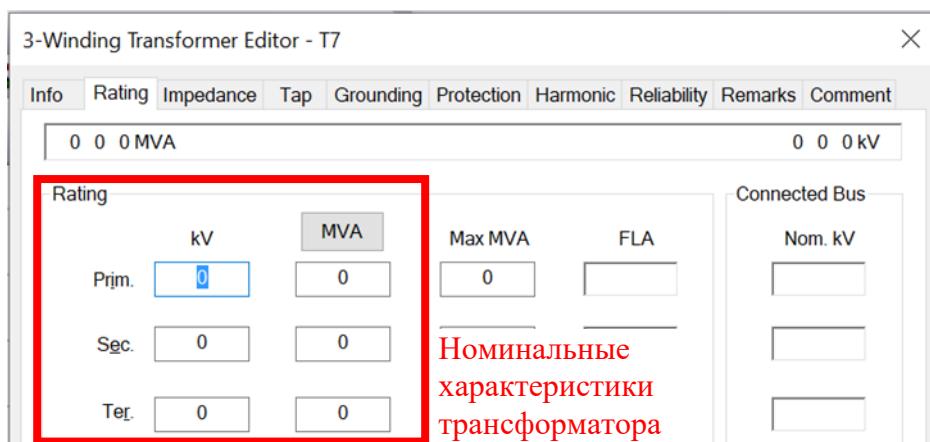


Рис. 5.13. Трехобмоточный трансформатор, вкладка «Rating»

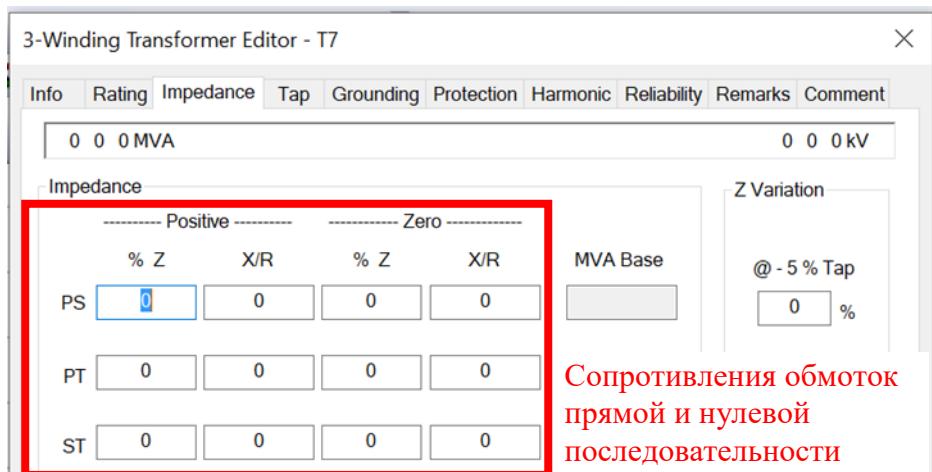


Рис. 5.14. Трехобмоточный трансформатор, вкладка «Impedance»

[К содержанию](#)

## Контрольные вопросы

1. Источники, негативные эффекты и количественные характеристики несинусоидальности напряжения.
2. Негативные последствия компенсации реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов в сетях с нелинейными нагрузками.
3. Способы снижения уровней несинусоидальности напряжения.
4. Принцип работы и расчет параметров узкополосного фильтра высших гармоник.
5. Принцип работы и расчет параметров широкополосного фильтра высших гармоник.
6. Особенности применения многопульсных схем с фазосдвигающими трансформаторами для подавления высших гармоник напряжения.

[К содержанию](#)

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Подготовка специалиста, обладающего актуальными знаниями в области проектирования и эксплуатации систем электроснабжения, в том числе подразумевает обучение современным методам анализа на основе компьютерных средств моделирования. Тем самым обеспечивается существенный рост производительности инженера и его эффективности при решении широкого круга задач, которые ранее требовали значительный объем времени и человеческих ресурсов.

В ходе выполнения лабораторных работ, описанных в настоящем методическом пособии студенты, изучающие дисциплину «Информационные и компьютерные технологии в электротехнике», приобретут практические навыки моделирования типовых режимов электроэнергетических систем, а также разовьют навыки самостоятельного освоения новых для себя инструментов компьютерного анализа электрических сетей.

[К содержанию](#)

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ETAP User Guide – Руководство по использованию. – URL: <http://www.etap.com/resources/> (дата обращения 11.12.22).
2. Acha, E. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks / E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Angeles-Camacho. – Wiley, 2004.
3. Hase, Y. Power System Dynamics with Computer-Based Modeling and Analysis / Y. Hase, T. Khandelwal, K. Kameda – Wiley, 2020.
4. ГОСТ Р 52735-2007 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением выше 1 кВ» Москва, Стандартинформ, 2007.
5. ГОСТ 28249-1993 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ» Москва, Стандартинформ, 2006.
6. Готман, В.И. Короткие замыкания и несимметричные режимы в электроэнергетических системах: учеб. пособие/ В.И. Готман. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
7. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
8. Киреева, Э.А. Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения: Справочные материалы и примеры расчетов / Э.А. Киреева, Т. Юнес, М. Айюби. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
9. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: МЭИ, 1997.
10. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С Иванов, В.И. Соколов – М.: Энергоатомиздат, 1987.
11. Добрусин, Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л.А. Добрусин. – М.: НТФ Энергопрогресс, 2003.
12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.

[К содержанию](#)