

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра электротехники и электромеханики**

**ТОПОЛОГИЯ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов магистратуры направления 13.04.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2021**

УДК 621.31 (073)

**ТОПОЛОГИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ:** Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.В. Бабурин, Б.Н. Абрамович*, СПб, 2021. 26 с.

В методических указаниях приведен теоретический и учебно-методический материал, необходимый для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Топология систем электроснабжения промышленных предприятий». Рассматривается логико-вероятностный метод расчета надежности структурно-сложных систем. Рассматривается методика определения оптимальной структуры системы электроснабжения.

Предназначены для студентов магистратуры направления 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также других специальностей, изучающих дисциплину «Топология систем электроснабжения».

Научный редактор проф. кафедры *А.Е. Козярук*

Рецензент канд. техн. наук *В.А. Соловьев* (ООО «НПК «Энергопрогресс»)

## **Введение**

Методические указания являются обобщением материала лекций, читаемых в Санкт-Петербургском горном университете по дисциплине «Топология систем электроснабжения промышленных предприятий» для студентов направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

В ходе выполнения лабораторных работ студенты изучают программное обеспечение для расчета надежности технических систем, основы логико-вероятностного моделирования, методику определения оптимальной структуры системы электроснабжения.

В процессе изучения очередной темы студенты знакомятся с теоретическим материалом, собирают математическую модель в программном комплексе, производят моделирование, выполняют необходимые расчеты, отвечают на контрольные вопросы, оформляют и защищают отчет по лабораторной работе.

## **1. Логико-вероятностное моделирование**

**Цель работы** – ознакомление с основами логико-вероятностного моделирования и расчета показателей надежности, живучести и безопасности структурно-сложных систем.

### **Программа работы**

1. Ознакомление с основами логико-вероятностного моделирования.
2. Ознакомление с графическими обозначениями, применяемыми при составлении схем функциональной целостности.

### **Основные теоретические сведения**

Теоретической основой автоматизированного структурно-логического моделирования надежности сложных технических систем (СТС) является логико-вероятностный метод. Метод расчета надежности СТС, при котором структурная модель системы описывается средствами математической логики, а количественная оценка ее надежности производится с помощью теории вероятностей, называется логико-вероятностным методом [1].

Структурная модель системы есть некое строгое, формальное описание условий, при которых система реализует или не реализует свои функции. При этом все элементы модели являются простыми бинарными событиями с заранее известными вероятностными параметрами. Для логического описания условий функционирования СТС используется понятие функции алгебры логики.

Функцией алгебры логики  $y(x_1, \dots, x_m)$  от переменных  $x_1, \dots, x_m$  называется функция, принимающая значения 1 и 0, аргументы которой также принимают значения 1 и 0. Логические переменные  $x_i$  и  $\bar{x}_i$  означают работоспособное состояние и состояние отказа  $i$ -го элемента соответственно. Функцию алгебры логики, которая описывает зависимость состояния системы (работоспособности или отказа) от состояний ее элементов, далее будем называть логической функцией (ЛФ).

Вероятностной функцией (ВФ) будем называть вероятность истинности ЛФ, то есть  $Pr\{y(x_1, \dots, x_m)=1\}$ . Символ  $Pr$  образован от английского термина Probability – вероятность.

В задачах моделирования надежности невосстанавливаемых систем ВФ вида  $Pr\{y(x_1, \dots, x_m)=1\}=Rs$  есть вероятность безотказной работы (ВБР) системы, причем  $Pr\{x_i=1\}=Ri$  – ВБР  $i$ -го элемента, а  $Pr\{x_i=0\}=Pr\{\bar{x}_i=1\}=1-Ri=Qi$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента. Символ  $R$  образован от английского термина Reliability – безотказность.

В задачах моделирования надежности восстанавливаемых систем ВФ вида  $Pr\{y(x_1, \dots, x_m)=1\}=Kzs$  также может иметь смысл коэффициента готовности системы, если  $Pr\{x_i=1\}=Kzi$  будет иметь смысл коэффициента готовности  $i$ -го элемента.

Рассмотрим структурные модели простейших систем.

Для последовательной системы из  $n$  элементов ЛФ для описания условий работоспособности

$$y_{sp}(x_1, \dots, x_n) = x_1 x_2 \cdots x_n, \tag{1.1}$$

для описания условий отказа

$$y_{so}(x_1, \dots, x_n) = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \cdots \vee \bar{x}_n. \tag{1.2}$$

Для параллельной системы из  $n$  элементов ЛФ для описания условий работоспособности

$$y_{p_p}(x_1, \dots, x_n) = x_1 \vee x_2 \vee \cdots \vee x_n, \tag{1.3}$$

для описания условий отказа

$$y_{sp0}(x_1, \dots, x_n) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \cdots \bar{x}_n. \tag{1.4}$$

В формулах (1.1-1.4) использован знак логической суммы  $\vee$ , знак логического произведения  $\wedge$  опущен.

Для мостиковой структуры (рис.1) ЛФ для описания условий работоспособности

$$y_{bp}(x_1, \dots, x_5) = x_1 x_3 \vee x_2 x_4 \vee x_1 x_5 x_4 \vee x_2 x_5 x_3, \tag{1.5}$$

условий отказа

$$y_{bo}(x_1, \dots, x_5) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_5 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_5 \bar{x}_3. \tag{1.6}$$

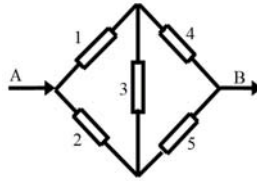


Рис.1 Мостиковая структура

Выражения (1.2), (1.3), (1.5) и (1.6) являются представлением ЛФ в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ).

В предположении о независимости событий отказов и работоспособности элементов для получения количественной (вероятностной) оценки качества функционирования системы следует определить условия применения теоремы сложения вероятностей [2].

Для двух совместных событий А и В вероятность суммы этих событий выражается формулой

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB) \quad (1.7)$$

или с учетом предположения о независимости событий

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) \quad (1.8)$$

Для трех совместных независимых событий А, В и С вероятность суммы этих событий выражается формулой

$$P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A)P(B) - P(A)P(C) - P(B)P(C) + P(A)P(B)P(C) \quad (1.9)$$

Общая формула для вероятности суммы любого числа совместных событий имеет следующий вид

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i,j} P(A_i A_j) + \sum_{i,j,k} P(A_i A_j A_k) - \dots + (-1)^{n-1} P(A_i A_j \dots A_n) \quad (1.10)$$

Формула (1.10) из-за чередования знаков минус и плюс называется формулой «включения-выключения». В зарубежной литературе эта формула также называется формулой Пуанкаре-Сильвестра.

Формула для вероятности суммы несовместных событий имеет более простой вид

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_i P(A_i) . \quad (1.11)$$

*Графический способ представления и методы решения системы логических уравнений*

В технологии автоматизированного структурно-логического моделирования графическим аппаратом моделирования являются так называемые схемы функциональной целостности (СФЦ).

Графический аппарат СФЦ разработан на принципах максимально возможного сохранения положительных сторон таких графических методов, как структурные блок-схемы, деревья неисправностей и деревья событий. Существенным преимуществом СФЦ является возможность одноэкранного режима использования технологии указанных методов.

СФЦ есть графическое представление условий реализации заданных функций исследуемой системы с помощью обозначения логических связей между элементами. При этом условия реализации собственных функций элементов известны. В этом смысле задача анализа исследуемой системы аналогична постановке общей задачи теории вероятностей или индуктивной логики. Примерами функций элементов являются бинарные события:

- сохранение (несохранение) работоспособного состояния на заданной наработке;
- принятие (непринятие) некоторого решения на определенном этапе процесса;
- выполнение (невыполнение) собственных функций элементов.

В СФЦ элементы (или события) системы графически представляются в виде функциональной вершины – кружка с номером внутри. Фиктивные вершины в СФЦ изображаются маленькими кружками с номером, указанным снаружи. Фиктивные вершины используются для удобства представления промежуточных и конечных событий и представляют собой логическую единицу.

Для описания логических связей между элементами и условий реализации заданных функций в СФЦ используются два вида направленных ребер (дуг): дизъюнктивные и конъюнктивные.

Конечным результатом составления СФЦ является формирование системы логических уравнений (СЛУ), описывающей различные свойства рассматриваемой системы. Решение СЛУ относительно заданного критерия является окончанием первого этапа структурно-логического моделирования. СЛУ в упрощенном виде может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} y_i = x_i \{y_i \bullet y_k \bullet \dots\} \\ y_j = x_j \{y_k \bullet \dots\} \\ \dots \\ y_s = x_s \end{cases}, \quad (1.12)$$

где  $y_i$  – логическое условие реализации  $i$ -го сложного события;  
 $x_i$  – логическое условие реализации  $i$ -го простого события;  
 $\{y_j \bullet y_k \bullet \dots\}$  – внешние по отношению к  $i$ -му простому событию логические условия, обеспечивающие реализацию  $i$ -го сложного события;

• – логическая операция.

В системе (1.12) уравнение  $y_s = x_s$  означает, что реализация  $s$ -го сложного события полностью определяется условиями реализации только события  $x_s$ .

На рис.2 представлены графические средства изображения вершин СФЦ и соответствующие им СЛУ.

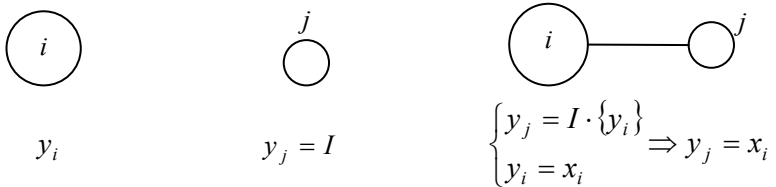


Рис. 2 – Графические средства изображения вершин СФЦ и СЛУ

Слева представлено изображение функциональной вершины –  $i$ -го простого события, логическое уравнение для которого обозначает, что условия его реализации определяются условиями реализации только  $i$ -го события. Графически это изображается отсутствием



входных ребер (дуг) у этой вершины. В центре рис.2 находится изображение  $j$ -й фиктивной вершины, которая рассматривается как логическая константа  $I$ , то есть некоторое условное достоверное событие. Справа показана структура из одного элемента, изображенная функциональной и фиктивной вершинами. Соответствующая СЛУ и ее решение относительно критерия  $y_j$  приведены там же.

Во всех случаях решением СЛУ считается такая запись логического уравнения, в левой части которого находится критерий (неизвестная логическая переменная), а в правой – логические переменные, соответствующие простым бинарным событиям.

На рис.3 представлены графические средства отображения СФЦ систем из двух элементов с дизъюнктивными и конъюнктивными логическими связями и соответствующие им СЛУ.

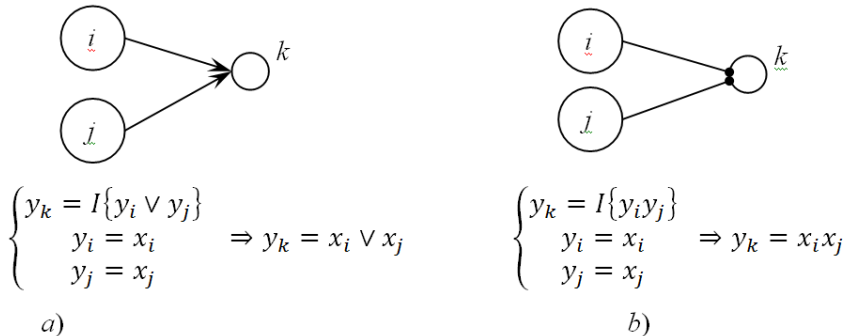


Рис. 3 – Графические средства изображения СФЦ и СЛУ систем из двух элементов:

a – дизъюнктивная связь; b – конъюнктивная связь

Дизъюнктивная связь элементов изображается дугами, на концах которых стрелки, конъюнктивная связь элементов изображается дугами, на концах которых точки. Системный логический критерий  $y_k$ , относительно которого решаются СЛУ, изображен фиктивной вершиной  $k$ .

На рис. 4 представлены графические средства изображения СФЦ систем из трех элементов с дизъюнктивными и конъюнктивными логическими связями, а также схемы с инверсным выходом и соответствующие им СЛУ.

Для иллюстрации процедуры построения СФЦ и решения СЛУ структурно-сложной системы рассмотрим задачу анализа мостиковой структуры (рис.5).

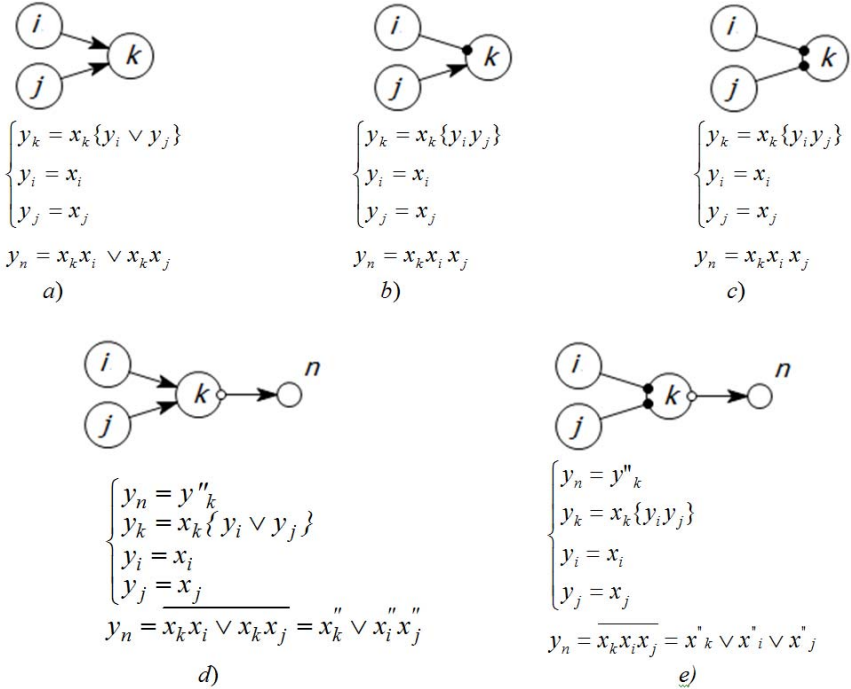


Рис. 4 – СФЦ и СЛУ систем из трех элементов: а – дизъюнктивная связь; б – дизъюнктивно-конъюнктивная связь; с – конъюнктивная связь; д – дизъюнктивная связь с инверсным выходом; е – конъюнктивная связь с инверсным выходом

Описание мостиковой структуры: сигнал со входа *a* подается на два входных устройства №1 и №2 и далее поступает на соответствующие выходные устройства №3 и №4. В случае отказа одного их выходных устройств коммутатор №5, который выполняет функцию переключки, может направить сигнал с одного работающего входного устройства на выходные элементы. Критерием работоспособности схемы обозначим требование наличия сигнала хотя бы на одном выходе структуры.

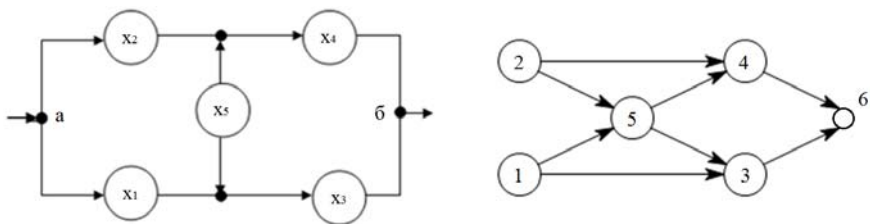


Рис. 5 – Блок-схема и СФЦ мостиковой структуры

Логический критерий  $Y_{mc}$  в обозначениях СФЦ запишем в виде

$$Y_{mc} = y_6 = y_4 \vee y_3. \quad (1.13)$$

Используя форму (1.12), составим систему уравнений:

- 1)  $y_6 = y_4 \vee y_3$ ;
  - 2)  $y_3 = x_3 \{y_1 \vee y_5\}$ ;
  - 3)  $y_1 = x_1$ ;
  - 4)  $y_5 = x_5 \{y_2 \vee y_1\}$ ;
  - 5)  $y_2 = x_2$ ;
  - 6)  $y_4 = x_4 \{y_2 \vee y_5\}$ .
- (1.14)

Система уравнений (1.14) решается относительно критерия  $y_6$  последовательной аналитической подстановкой в него уравнений 2–6 до получения окончательного решения, то есть:

Логическое уравнение	Упрощения и подстановки
$y_6 = y_3 \vee y_4 =$	$y_3 = x_3(y_1 \vee y_5);$ $y_4 = x_4(y_2 \vee y_5);$
$= x_3(y_1 \vee y_5) \vee x_4(y_2 \vee y_5)$ $=$	$y_5 = x_5(y_1 \vee y_2);$ $y_1 = x_1;$ $y_2 = x_2;$
$= x_3x_1 \vee x_3x_5(x_1 \vee x_2) \vee$ $x_4x_2 \vee x_4x_5(x_1 \vee x_2) =$ $= x_3x_1 \vee x_3x_5x_1 \vee x_3x_5x_2 \vee$ $x_4x_2 \vee x_4x_5x_1 \vee x_4x_5x_2 =$	$x_3x_1 \vee x_3x_5x_1 = x_3x_1;$ $x_4x_2 \vee x_4x_5x_2 = x_4x_2.$
$= x_3x_1 \vee x_3x_5x_2 \vee$ $x_4x_2 \vee x_4x_5x_1$	

(1.15)

Последняя строка в решении (1.15) описывает логические условия (пути) функционирования мостиковой структуры согласно заданному критерию  $Y_{mc}$ .

Метод решения СЛУ аналитической подстановкой является основой для разработки алгоритмов и программ автоматизированного структурно-логического моделирования.

*Алгоритм расчета показателей надежности  
восстанавливаемых систем*

Основная особенность автоматизированного структурно-логического анализа показателей надежности и безопасности структур восстанавливаемых элементов заключается в том, что в вероятностной функции  $P_s(t) = P\{p_1(t), \dots, p_i(t), \dots, p_n(t)\}$ , используемой для оценки вероятности безотказной работы системы  $P_s(t)$ , при оценке коэффициента готовности системы  $K_{Gs}$  вместо вероятностей безотказной работы элементов  $p_i(t)$  подставляются коэффициенты готовности элементов  $k_{Gi}$ , то есть  $K_{Gs}(t) = P\{k_{G1}(t), \dots, k_{Gi}(t), \dots, k_{Gn}(t)\}$ .

Блок-схема алгоритма расчета стационарного коэффициента готовности восстанавливаемых систем показана на рис.6.

После вычисления в блоке №1 аналитического выражения для ВФ, в блоке №2 осуществляется вычисление точного значения стационарного коэффициента готовности системы  $K_{GS}$  подстановкой значений стационарных коэффициентов готовности элементов  $K_{Gi}$  в многочлен ВФ, то есть

$$K_{Gs} = P\{K_{G1}, \dots, K_{Gi}, \dots, K_{Gn}\} \quad (1.16)$$

где  $K_{Gi}$  – стационарный коэффициент готовности  $i$ -го элемента.

В блоке №3 рассчитываются значимости элементов по формуле частной производной от выражения для стационарного коэффициента готовности:

$$\begin{aligned} \xi_i = \frac{\partial K_{GS}}{\partial K_{Gi}} = & P\{K_{G1}, \dots, K_{Gi} = 1, \dots, K_{Gn}\} - \\ & - P\{K_{G1}, \dots, K_{Gi} = 0, \dots, K_{Gn}\} \end{aligned} \quad (1.17)$$



Рис. 6 Алгоритм расчета показателей надежности

Расчетный алгоритм оценки показателей надежности для структур с восстанавливаемыми элементами, реализованный в ПК АРБИТР, построен на предположении об экспоненциальном распределении времени наработки на отказ и времени восстановления системы. Предположение об экспоненциальном распределении времени наработки на отказ системы при наличии резервированных элементов в общем случае нарушается. Погрешность оценки показателей надежности восстанавливаемых систем пропорциональна коэффициенту неисправности, то есть отношению среднего времени восстановления к средней наработке на отказ системы. Для высоконадежных систем с небольшим временем восстановления (несколько часов) эта погрешность незначительна.

Рассматриваем далее исследуемую систему как некоторый эквивалентный элемент с экспоненциальным распределением наработки до отказа, для которого средняя наработка на отказ  $T_0$  рассчитывается по формуле:

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda} \quad (1.20)$$

где  $\Lambda$  – интенсивность отказов эквивалентного элемента.

Интенсивность отказов элемента  $\Lambda(t)$  в общем виде определяется как отношение функции плотности к вероятности безотказной работы.

С учетом правил дифференцирования функции многих переменных можно записать

$$\Lambda(t) = \frac{f_s(t)}{P(t)} = \frac{1}{P(t)} \sum_{i=1}^n \frac{\partial P(t)}{\partial p_i(t)} \frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{1}{P(t)} \sum_{i=1}^n \frac{\partial P(t)}{\partial p_i(t)} f_i(t) \quad (1.21)$$

Обозначив частную производную  $\frac{\partial P(t)}{\partial p_i(t)} = \xi_i$  и заменив вероятность безотказной работы на соответствующие коэффициенты готовности, получим формулу для расчета средней наработки на отказ в следующем виде

$$T_0 = \frac{1}{\Lambda} = K_{Gs} \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial K_{Gs}}{\partial K_{Gi}} f_i(t)} \right\} = \frac{K_{Gs}}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{Gi}} \quad (1.22)$$

Выражение для приближенной оценки среднего времени восстановления системы  $T_B$  находится из формулы для стационарного коэффициента готовности системы:

$$T_B = \frac{1 - K_{Gs}}{K_{Gs}} T_0 \quad (1.23)$$

Подставляя в (1.23) выражение для средней наработки на отказ системы (1.22), получим

$$T_{Bs} = (1 - K_{Gs}) \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial K_{Gs}}{\partial K_{Gi}} \lambda_i K_{Gi}} \right\} = \frac{(1 - K_{Gs})}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{Gi}} \quad (1.24)$$

Расчет оценки среднего времени восстановления системы  $T_B$  осуществляется в блоке №5 .

В блоке №6 осуществляется вычисление приближенной оценки вероятности безотказной работы системы по следующей формуле:

$$P_{B,S}(t) \approx \exp[-t/(T_{0s}+T_{B_s})] \quad (1.25)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое логическая функция?
2. Что такое вероятностная функция?
3. Из каких основных частей состоит СФЦ?
4. Для чего используются функциональные вершины в СФЦ?
5. Для чего используются фиктивные вершины в СФЦ?
6. Какие виды ребер (дуг) используются в СФЦ, что они символизируют?
7. Из каких основных этапов состоит алгоритм расчета показателей надежности?

## **2. Знакомство с работой в ПК АРБИТР**

**Цель работы** – ознакомление с основами работы в программном комплексе АРБИТР.

### **Программа работы**

1. Изучение интерфейса программного комплекса АРБИТР.
2. Моделирование простейшей схемы электроснабжения в ПК АРБИТР.

### **Основные теоретические сведения**

Основное окно Комплекса состоит из следующих частей (рис. 7):

1. строки заголовка (1);
2. строки главного меню (2);
3. двух панелей быстрого доступа (3);
4. окна ввода схемы функциональной целостности исследуемой системы (4);
5. четырех дочерних окон, разделенных скользящими полосками (5), позволяющими изменять их размеры:

- окна параметров моделирования и расчетов (6);
  - таблицы критериев функционирования (7);
  - таблицы параметров элементов (8);
  - окна вывода результатов моделирования и расчетов (9).
6. строки статуса (10).

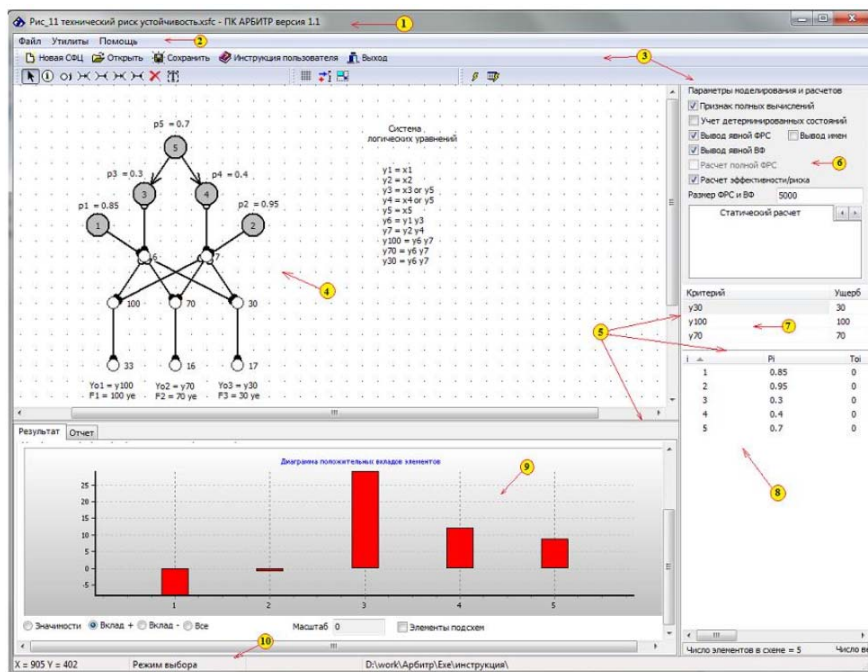


Рис. 7 Основное окно ПК АРБИТР

Под заголовком окна находится панель Главного меню ("Файл", "Утилиты" и "Помощь"). Ниже располагаются две панели инструментов с кнопками быстрого доступа, которые дублируют часть пунктов Главного меню ("Новая СФЦ", "Открыть" существующую СФЦ, "Сохранить" подготовленную СФЦ, открытия "Инструкции пользователя" и "Выход" - закрытие ПК АРБИТР).

Кнопки нижней строки обеспечивают ввод графа СФЦ и пуск автоматического моделирования и выполнения расчетов. На-



значение кнопок выводится в виде всплывающей подсказки при удержании курсора на кнопке.

В окне параметров моделирования и расчетов можно настроить параметры моделирования и параметры вывода результатов моделирования, а также выбрать режим расчета.

В окне критериев расчета необходимо задать один или несколько критериев, по которым будет производиться расчет показателей надежности.

В таблице параметров элементов будут отображаться параметры элементов введенных в СФЦ, а также параметры элементов могут напрямую вводиться в эту таблицу, что значительно ускоряет ввод исходных данных для расчета.

В окне вывода результатов моделирования можно увидеть диаграмму значимостей, положительных и отрицательных вкладов элементов. Также выводится график вероятности безотказной работы и коэффициента готовности. При нажатии на вкладку отчет можно увидеть полностью результаты расчета по выбранному критерию. Эту же информацию можно увидеть в специальном файле *RezAcm.lst*, который создает программа по окончании моделирования.

### План работы

1. Соберите схему функциональной целостности согласно рис. 8.
2. Введите исходные данные в соответствии с таблицей 1.
3. Введите критерий расчета и сохраните модель.
4. Произведите моделирование.
5. Составьте отчет.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Наименование элемента	Номер на СФЦ	Вероятность безотказной работы элемента
Генератор	1,2,3	0,8
ГРЦ	4,6,9	0,9
ВРЦ	10,11,12, 13,14,15	0,85
Перемычка	5,7,8	0,95

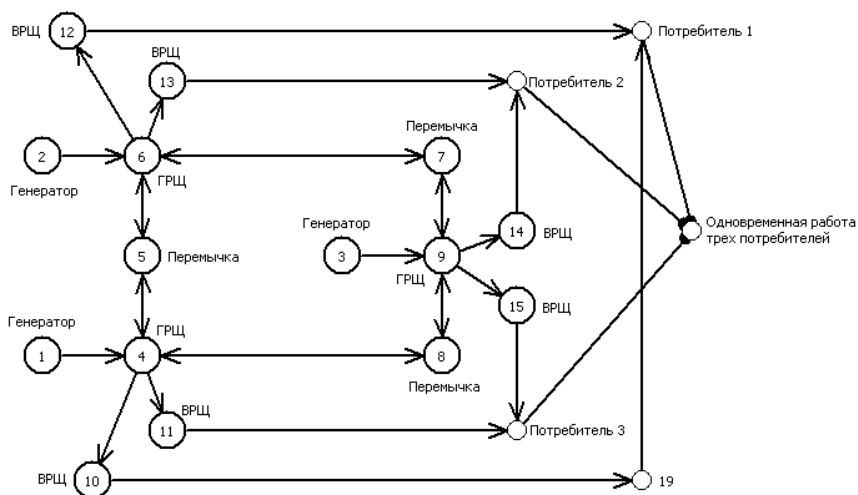


Рис. 8 СФЦ системы электроснабжения кольцевой структуры

### Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Схема функциональной целостности.
3. Таблица с исходными данными.
4. Результаты моделирования:
  - логическая функция;
  - вероятностная функция;
  - диаграммы и численные значения значимостей и вкладов элементов системы;
  - график вероятности безотказной работы системы.

### **3. Определение рациональной структуры системы электроснабжения компрессорной станции**

**Цель работы** – ознакомиться с методикой определения рациональной структуры системы электроснабжения.

#### **Программа работы**

1. Ознакомиться с методикой определения рациональной структуры систем электроснабжения.
2. Произвести моделирование системы электроснабжения компрессорной станции и предложить направления совершенствования системы электроснабжения.

#### **Основные теоретические сведения**

Методика обоснования рациональной структуры системы электроснабжения включает следующие основные этапы:

1. Обоснование показателей для оценки надежности элементов системы электроснабжения.
2. Обоснование способов получения значений расчетных показателей надежности элементов системы электроснабжения.
3. Исходная формализованная постановка задачи в форме структурного описания исследуемых свойств надежности системы электроснабжения.
4. Построение расчетной математической модели для оценки надежности систем электроснабжения, как структурно-сложных технических систем.
5. Моделирование и расчет надежности структурно сложных систем электроснабжения с использованием специальных программных комплексов.

На первом этапе необходимо обосновать показатели для оценки надежности составляющих систему электроснабжения элементов, а также показатели для оценки надежности самой системы электроснабжения, как структурно сложной технической системы.

При обосновании показателей необходимо учитывать основные различия оценки надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых элементов, а также различия анализа надежности

отдельных элементов и систем, состоящих из функционально связанных совокупностей различных элементов.

На втором этапе необходимо иметь в виду, что параметры надежности элементов (неделимых частей системы) могут быть определены только на экспериментальной основе, путем проведения специальных испытаний, или сбора и обработки статистических данных их эксплуатации.

На третьем этапе моделирования создаётся первичная формализованная модель знаний об исследуемых свойствах системного объекта. Первичная модель, как правило, не является вычислительной, т.е. на ее основе не предусматриваются непосредственные расчеты числовых значений показателей каких-либо системных свойств исследуемого объекта в целом.

Четвертый этап определяет насколько точно и достоверно разрабатываемая математическая модель описывает поведение системы в плане надежности. От этого зависит ценность и достоверность результатов по обоснованию рациональной структуры системы электроснабжения.

На данном этапе последовательно выполняются следующие мероприятия: на основе разработанной СФЦ и заданных критериев функционирования строится ЛФ и на ее основе, с использованием законов теории вероятностей, осуществляется строгий переход к ВФ, которая по существу и является математической моделью надежности структурно-сложной системы электроснабжения. Построение ЛФ и ВФ является сложной и трудоемкой задачей, поэтому для ее решения используются специализированные программные комплексы.

Пятый этап, является завершающим этапом анализа структурно сложных систем электроснабжения и основывается на использовании расчетных математических моделей для вычисления различных системных характеристик

Определение рациональных структур систем электроснабжения может производиться на основе существующих систем электроснабжения, находящихся в эксплуатации, или на основе перспективных, разрабатываемых (проектируемых) систем.

Критерием оптимизации структурного исполнения систем электроснабжения должна служить минимизация элементов струк-

туры объекта при обеспечении системного показателя надежности не ниже требований нормативно-технических документов (рис. 9).

Реализация указанного критерия обеспечит высокие значения технико-экономических показателей на создание и эксплуатацию систем электроснабжения, суть которых состоит в минимизации затрат (избежать заведомо неоправданных затрат) при сохранении нормативных значений надежности.

Расчет предполагает последовательную реализацию четырех этапов, подробно изложенных выше (блоки 1 – 4 алгоритма). После чего, если рассматриваемая схема электроснабжения не соответствует требованиям по системному показателю надежности  $P_C < P_C^{don}$ , необходимо определить основные направления совершенствования структурной схемы. И затем заново повторить весь итерационный цикл. Повторение расчетов производится до тех пор, пока Системный показатель надежности не будет соответствовать допустимому значению.

Направленность совершенствования исследуемых структур систем электроснабжения определяют показатели положительных и отрицательных вкладов элементов.

К изменению системного показателя надежности, значимостей и вкладов элементов могут привести изменения исходных вероятностных характеристик элементов  $p_i$  системы (это возможно при замене элементов на более совершенные, с обновленной элементной базой), так и при совершенствовании (оптимизации) структурного построения системы.

В процессе определения направлений совершенствования структур систем электроснабжения (оптимизации структур) следует использовать следующие правила:

- любые структурные изменения системы не должны приводить к снижению системного показателя надежности ниже значений, установленных нормативно-техническими документами  $P_C > P_C^{don}$ ;

- структурное совершенствование схемы, при минимизации элементов, должно осуществляться также в направлении выравнивания относительных значений их положительных вкладов (снижения положительных вкладов у элементов с высокими их значениями и наоборот);

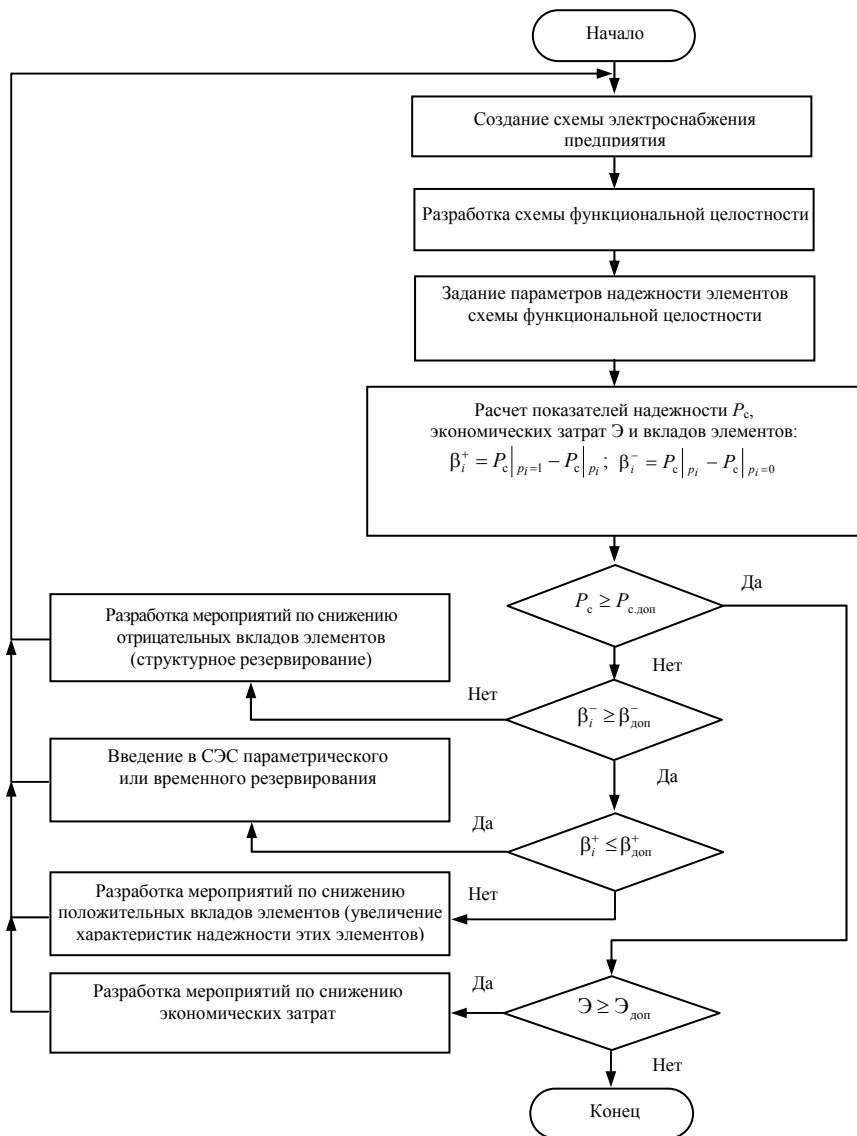


Рис. 9 Алгоритм определения рациональной структуры системы электроснабжения

- при невозможности выровнять положительные вклады отдельных элементов системы, т.е. в схеме остаются элементы с относительно высокими положительными вкладами, необходимо сосредоточить усилия на увеличении характеристик надежности таких элементов, что в совокупности приведет к снижению их положительных вкладов.

После определения направлений структурного совершенствования системы, заново производится разработка функциональной схемы системы и повтор итерационной последовательности выполнения блоков алгоритма.

После очередной итерации производится проверка расчетного значения системного показателя надежности  $P_C$  на предмет удовлетворения требованиям нормативно-технических документов. При удовлетворении указанным требованиям - производится проверка системы электроснабжения по экономическому критерию. В качестве экономического критерия может быть принят уровень приведенных затрат или размер чистого дисконтированного дохода.

При несоответствии допустимому значению при необходимости разрабатываются мероприятия по снижению экономических затрат и все этапы алгоритма повторяются снова.

### **План работы**

1. Соберите схему функциональной целостности, соответствующую функциональной схеме электроснабжения (рис. 10).
2. Введите исходные данные в соответствии с таблицей 2.
3. Произведите моделирование.
4. Предложить направления совершенствования системы электроснабжения, повторить моделирование.
5. Составьте отчет.

### **Содержание отчета:**

1. Цель работы.
2. Схема функциональной целостности заданной системы.
3. Таблица с исходными данными.
4. Результаты моделирования:
  - логическая функция;
  - вероятностная функция;

- диаграммы и численные значения значимостей и вкладов элементов системы;
  - график вероятности безотказной работы системы.
5. Направления совершенствования структуры системы.
  6. Пункты 2-4 для предложенной схемы.

Таблица 2

Состав элементов СЭС и параметры их надежности

Тип элемента СЭС	Источник	$T_{oi}$ , год	$T_{vi}$ , час
ЛЭП ВЛ-110 кВ <i>АС-120/19</i>	Анализ статистических данных	0,24	0,5
Выключатели элегазовые <i>PASS MO - 145</i>	Поставщик элемента	6	5
Трансформаторы <i>ТМН-6300/110/10</i>	Анализ статистических данных	1,33	1,6
Разъединители <i>РГ-2-35/1000</i>	Справочные данные	100	11
Выключатели вакуумные <i>LF-1</i>	Анализ статистических данных	0,14	0,111
Блоки РЗА <i>SEPRAM 2000</i>	Поставщик элемента	15	24
Кабельные линии – 10 кВ, <i>ПвВнг -10</i>	Анализ статистических данных	1,81	512,8
Трансформаторы 10/0,4 кВ <i>ТС-630/10</i>	Анализ статистических данных	15,38	1,1
Трансформаторы 10/0,4 кВ <i>ТСЗ-400/10</i>	Аналог	15,38	1,1
Газогенераторы <i>АСГ-1360</i>	Анализ статистических данных	0,13	284,1
АДЭС <i>Звезда 630НК-02М3</i>	Справочные данные	0,091	16,33
Выключатели <i>3WL</i>	Поставщик элемента	4	1
Блоки РЗА <i>БМРЗ-0,4</i>	Поставщик элемента	16	48
Выключатели Siemens <i>3WN6</i>	Анализ статистических данных	1,27	0,22



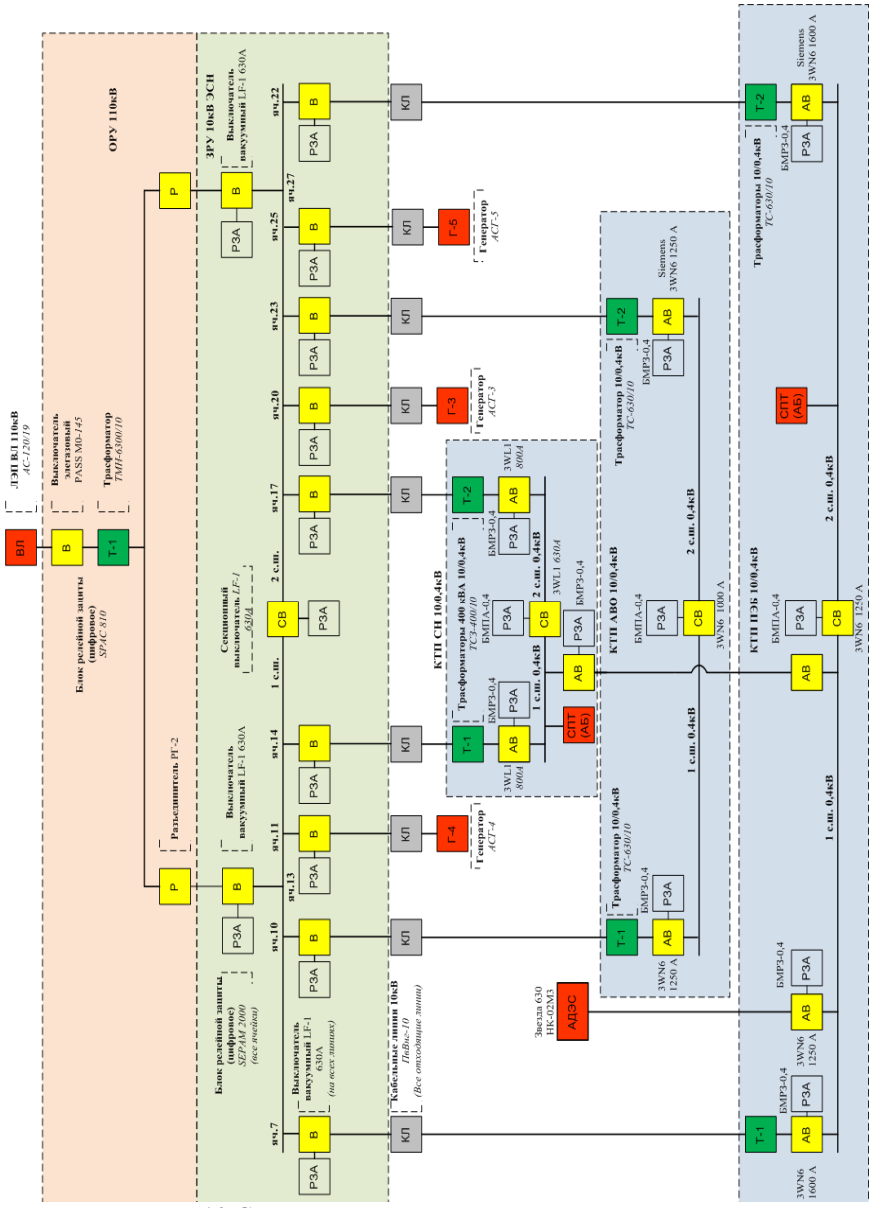


Рис. 10 Структурная схема компрессорной станции

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы основные этапы определения рациональной структуры системы электроснабжения?
2. Какой главный критерий оптимизации структуры систем электроснабжения?
3. Каким правилам нужно следовать при определении направлений совершенствования структуры системы?
4. Что необходимо делать с элементами, обладающими высокими положительными вкладами?
5. Что необходимо делать с элементами, обладающими высокими отрицательными?

### **Рекомендуемый библиографический список**

#### **Основной**

1. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб.: СПбГУ, 2007. 276 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВУЗов / Е.С. Вентцель. – М., 1969. – 576 с.

#### **Дополнительный**

3. Бабурин С.В., Абрамович Б.Н. Надежность систем электроснабжения: Методические указания к самостоятельной работе. – СПб.: Горный университет, 2014. 56 с.

### **СОДЕРЖАНИЕ**

Введение.....	3
1. Логико-вероятностное моделирование.....	4
2. Знакомство с работой в ПК АРБИТР.....	15
3. Определение рациональной структуры системы электроснабжения компрессорной станции.....	19
Рекомендуемый библиографический список.....	26

# **ТОПОЛОГИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов магистратуры направления 13.04.02*

Сост.: *С.В. Бабурин, Б.Н. Абрамович*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
электротехники и электромеханики

Ответственный за выпуск *С.В. Бабурин*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 13.04.2021 . Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,5. Усл.кр.-отт. 1,5. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 75 экз. Заказ 306.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2