

УДК 621.311

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ**  
**DETERMINATION OF POWER SUPPLY RELIABILITY INDICATORS BASED ON THE FAILURE TREE**

В.С. Вадейко, В.Н. Коршун

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
astarginsky@bntu.by

V. Vadeyko, V. Korshun

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Аннотация:** бесперебойное электроснабжение электроэнергией требуемого нормативного качества – основная функция надёжности энергосистемы. В данной работе будет рассмотрен один из методов расчёта показателей надёжности, а именно, дерево отказов. Ручной расчёт дополняется полученными результатами в программе “REISS”. Практическая значимость работы заключается в наглядном примере анализа взаимосвязи отказов событий, составлении алгоритма, который позволяет определить вероятность отказа, под которым в данном случае понимается прекращения электроснабжения от ветровой электрической станции.

**Abstract:** uninterrupted power supply with electricity of the required regulatory quality is the main function of the reliability of the power system. In this paper, we will consider one of the methods for calculating reliability indicators, namely, the failure tree. The manual calculation is supplemented by the results obtained in the REIS program. The practical significance of the work lies in a clear example of the analysis of the relationship of failures of events, the compilation of an algorithm that allows you to determine the probability of failure, which in this case is understood as the termination of power supply from a wind power station.

**Ключевые слова:** надёжность, дерево отказов, ветрогенератор, система, электроснабжение.

**Keywords:** reliability, failure tree, wind generator, system, power supply

### **Введение**

Ветровая электрическая станция представляет собой несколько ветровых генераторов, соединённых в единую цепь. Целью создание ветровых электрических станций является преобразование энергии ветра в электрическую. Надёжность системы электроснабжения определяется надёжностью электроустановок, из которых и состоит сама система. В данной работе составляющими системы являются: трансформатор, выключатель, сборные шины, разъединители, кабельные и воздушные линии, ветрогенераторы.

### **Основная часть**

Расчет показателей надежности осуществим для следующей схемы ветровой электрической станции:

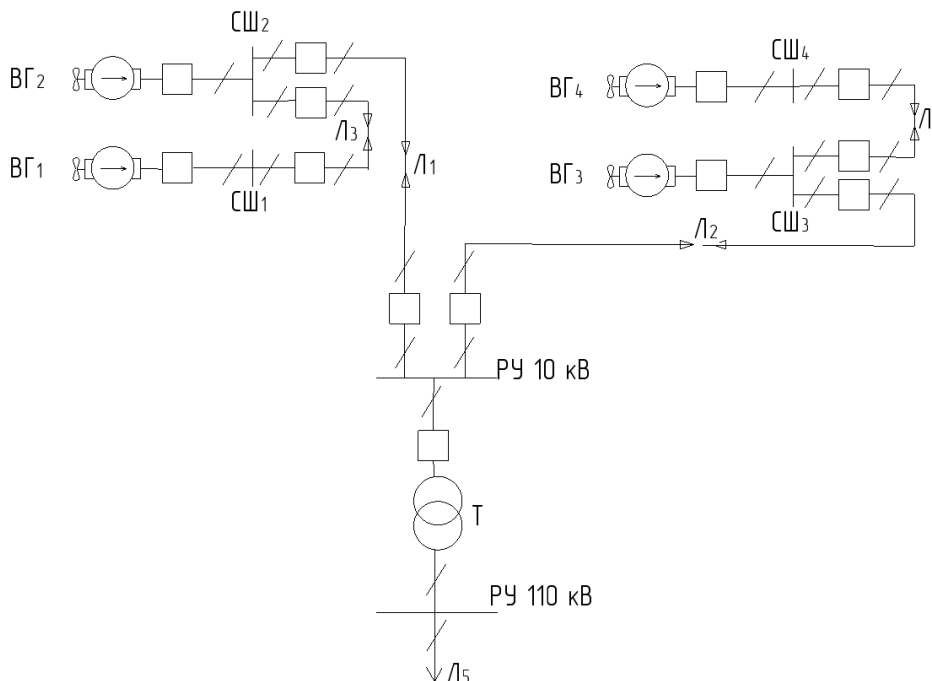


Рисунок 1 - Схема ветровой электрической станции.

Метод расчёта показателей надёжности на основе построения дерева отказов строится на анализе событий, которые могут привести к отказу системы, позволяет легко воспроизводить алгоритмы.

При исследовании метода расчёта показателей надёжности воспользуемся следующими параметрами элементов, входящих в ветровую электрическую станцию (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры надёжности элементов схемы

| Элемент                  | Частота отказа, 1/год | Время восстановления, ч | Частота планового ремонта, 1/год | Длительность планового ремонта, ч |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Трансформатор            | 0,03                  | 30                      | 0,4                              | 22                                |
| Выключатель              | 0,005                 | 5                       | 0,2                              | 6                                 |
| Сборная шина (1,4) 10 кВ | 0,002                 | 12                      | 0,32                             | 10                                |
| Сборная шина (2,3) 10 кВ | 0,003                 | 5                       | 0,48                             | 15                                |
| Сборная шина 110 кВ      | 0,002                 | 5                       | 0,30                             | 12                                |
| Разъединитель 10 кВ      | 0,01                  | 7                       | 0,166                            | 4                                 |
| Разъединитель 110 кВ     | 0,01                  | 6                       | 0,166                            | 8                                 |
| Кабельные линии          | 0,1                   | 25                      | 0,5                              | 3                                 |
| Ветрогенератор           | 0,370                 | 53                      | 0,25                             | 50                                |
| Воздушная линия          | 0,24                  | 8                       | 0,45                             | 8                                 |

Процесс построения дерева отказов осуществляется от единственного события в корне дерева (конечного события) к исходному событию и составляется до тех пор, пока на всех уровнях дерева не останутся одни элементарные события, обозначенные окружностью. На рисунке 2 изображено дерево отказов для рассматриваемой системы.

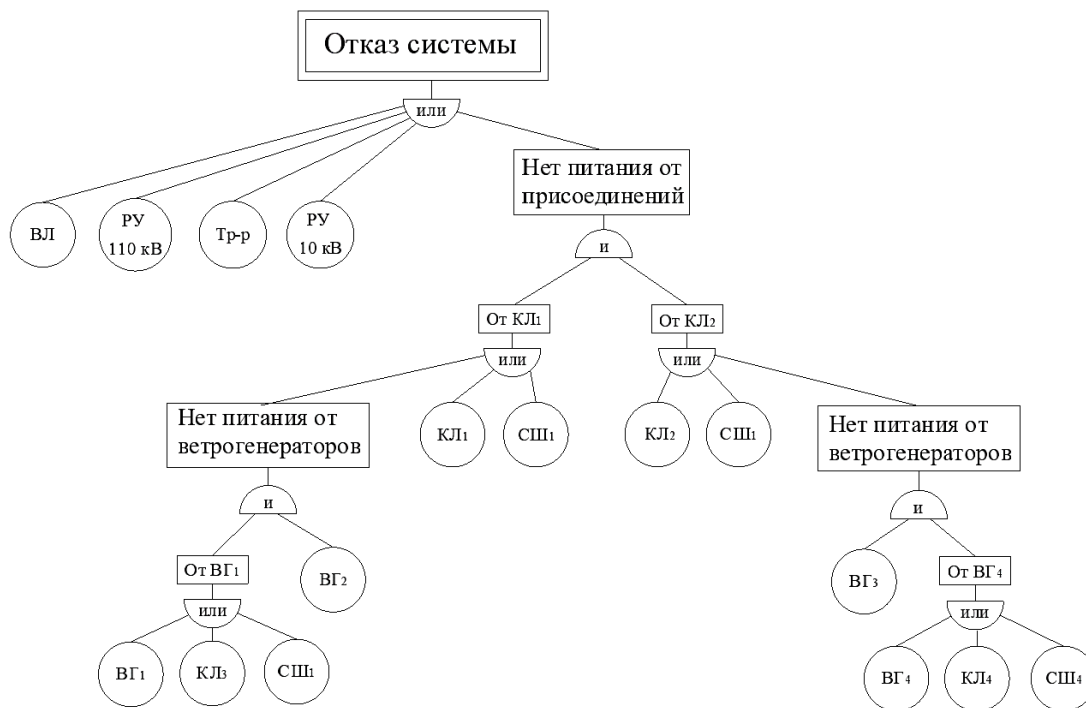


Рисунок 2 - Дерево отказов

Обозначим события отказа воздушной линии 110 кВ, РУ 110 кВ, трансформатора Т и РУ 10 кВ латинскими буквами  $O, P, R, S$  соответственно. Событие отсутствия питания от присоединений РУ 10 кВ обозначим  $T$ , события отсутствия питания от кабельных линий  $КЛ_1$  и  $КЛ_2$ , ветрогенераторов  $ВГ_1$  и  $ВГ_4$  – соответственно  $U, V, Y, Z$ . События отсутствия питания от ветрогенераторов, приводящие к потере электроснабжения по линиям  $КЛ_1$  и  $КЛ_2$ , обозначим  $W$  и  $X$ .

Элементарные события отказов элементов также обозначим следующим образом:  $ВГ_1 - a, КЛ_3 - g, СШ_1 - k, ВГ_2 - b, КЛ_1 - e, СШ_2 - l, КЛ_2 - f, СШ_3 - m, ВГ_3 - c, ВГ_4 - d, КЛ_4 - h, СШ_4 - n$ .

Логическая функция отказа системы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_c &= O + P + R + S + T = O + P + R + S + U \cdot V = O + P + R + S + (W + e + l) \cdot (X + f + m) = \\ &= O + P + R + S + (Y \cdot b + e \cdot l) \cdot (Z \cdot c + f + m) = O + P + R + S + ((a + g + k) \cdot b + e + l) \cdot ((d + \\ &+ h + n) \cdot c + f + m) = O + P + R + S + ((a \cdot b + g \cdot b + k \cdot b + e + l) \cdot ((d \cdot c + h \cdot c + n \cdot c + f + m) = \\ &= O + P + R + S + a \cdot b \cdot d \cdot c + a \cdot b \cdot h \cdot c + a \cdot b \cdot n \cdot c + a \cdot b \cdot f + a \cdot b \cdot m + g \cdot b \cdot d \cdot c + g \cdot b \cdot h \cdot c + \\ &+ g \cdot b \cdot n \cdot c + g \cdot b \cdot f + g \cdot b \cdot m + k \cdot b \cdot d \cdot c + k \cdot b \cdot h \cdot c + k \cdot b \cdot n \cdot c + k \cdot b \cdot f + k \cdot b \cdot m + e \cdot d \cdot c + \\ &+ e \cdot h \cdot c + e \cdot n \cdot c + e \cdot f + e \cdot m + l \cdot d \cdot c + l \cdot h \cdot c + l \cdot n \cdot c + l \cdot f + l \cdot m. \end{aligned}$$

Логическая функция при минимальных сечениях:

$$\bar{Y}_{c.min} = O + P + R + S + a \cdot b \cdot d \cdot c + a \cdot b \cdot h \cdot c + a \cdot b \cdot n \cdot c + a \cdot b \cdot f + a \cdot b \cdot m + g \cdot b \cdot d \cdot c + g \cdot b \cdot h \cdot c + g \cdot b \cdot n \cdot c + g \cdot b \cdot f + g \cdot b \cdot m + k \cdot b \cdot d \cdot c + k \cdot b \cdot h \cdot c + k \cdot b \cdot n \cdot c + k \cdot b \cdot f + k \cdot b \cdot m + e \cdot d \cdot c + e \cdot h \cdot c + e \cdot n \cdot c + e \cdot f + e \cdot m + l \cdot d \cdot c + l \cdot h \cdot c + l \cdot n \cdot c + l \cdot f + l \cdot m.$$

Поскольку конкретные повреждения, приводящие к отказу элементов системы, при построении дерева отказов не учитывались, а были учтены лишь сами отказы элементов и их логическая взаимосвязь, то с помощью логической функции можно определить лишь вероятность неработоспособности системы. Для этого вместо событий отказа подставим в логическую функцию вероятности наступления этих событий.

Пусть закон распределения случайных величин вероятностей экспоненциальный. Тогда вероятности отказа для каждого элемента определим по формуле:

$$Q = 1 - e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Подставив значения вероятности наступления событий отказа в логическую функцию, получим вероятность отказа системы:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{c.min} = & 0,213 + 0,003 + 0,03 + 0,002 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + \\ & + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,003 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \times \\ & \times 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + 0,095 \times \\ & \times 0,309 \cdot 0,003 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,095 + \\ & + 0,002 \cdot 0,309 \cdot 0,003 + 0,095 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,095 \cdot 0,002 \cdot 0,309 + 0,095 \times \\ & \times 0,095 + 0,095 \cdot 0,003 + 0,003 \cdot 0,309 \cdot 0,309 + 0,003 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + 0,003 \cdot 0,095 \cdot 0,309 + \\ & + 0,003 \cdot 0,095 + 0,003 \cdot 0,003 = 0,298 \end{aligned}$$

Найдём вероятность безотказной работы через вероятность отказа системы:

$$P_c = 1 - Q_c = 1 - 0,298 = 0,702.$$

Вероятность безотказной работы системы, как показатель надежности, характеризует изменение надёжности во времени, даёт возможность наглядно судить о надёжности системы до первого отказа.

Для того, чтобы случайные явления выступали как необходимые, система должна быть избыточной, т.е. должна учитывать дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. В рассмотренном примере, система не является избыточной, поскольку при ручном расчёте надежности системы с помощью дерева отказов достаточно трудно учесть все элементы схемы и возможные события.

Для расчета суммарной частоты события отказа, средней продолжительности отключения и коэффициента неготовности одной или нескольких сборных шин можно воспользоваться программой “REISS”, алгоритм расчета которой

основан на построении дерева отказов. Данная программа позволяет проводить анализ структурной надежности схем электроснабжения, включающих в себя источники рабочего, резервного и аварийного электроснабжения, передающие элементы, коммутационные аппараты и отдельных потребителей.

Работа с использованием программы REISS начинается с ввода исходных данных рассчитываемой системы. Далее все элементы схемы обозначаются буквенно-цифровыми кодами, содержащими в себе информацию о типе элемента и его порядковом номере, присвоенном при нумерации узлов и ветвей. После этого составляется матрица связей узлов и ветвей схемы. Последним этапом подготовки исходных данных является ввод значений показателей надежности оборудования, из которого состоит рассматриваемая схема.

Расчет частоты и длительности погашений потребителя осуществляется по формулам:

$$\Lambda = \sum_k \lambda(k); \tag{2}$$

$$T = \frac{1}{\Lambda} \cdot \sum_k T(k) \cdot \lambda(k), \tag{3}$$

где  $\lambda(k)$  и  $T(k)$  – частоты и длительности аварий  $k$ -го вида, приводящих к расчетному погашению. Они определяются следующим образом:

$$\lambda(k) = q(k, j) \cdot \lambda(k, m) \cdot \prod_s Q(k, s); \tag{4}$$

$$T(k) = q(k, j) \cdot \lambda(k, m) \cdot \min \left( \frac{t(k, j)}{2}; t(k, m); t_{o.n.} \right) \cdot \prod_s Q(k, s), \tag{5}$$

где  $q(k, j)$  – относительная длительность ремонтного простоя  $j$ -го элемента,  $\lambda(k, m)$  – частота повреждения  $m$ -го элемента,  $t(k, j)$  – длительности послеаварийного восстановления  $j$ -го и  $m$ -го элемента,  $t(k, m)$  – время оперативных переключений,  $Q(k, s)$  – вероятность отказа в срабатывании  $s$ -го устройства релейной защиты (РЗ), коммутационного аппарата или автоматического ввода резерва.

Коэффициент неготовности:

$$K_n = \frac{T \cdot \Lambda}{8760} \tag{6}$$

Результаты расчета показателей надежности с использованием программы “REISS” для РУ 10 кВ представлены в таблице 2.

$$\Lambda = 0,1318 \frac{1}{год}, T = 20,22 \text{ ч}, K = 0.0003042 \text{ о.е.}$$

Таблица 2 - Результаты расчета программы

| Событие (состояние)     | Элемент схемы                 | Частота события, 1/год | Длительность перерыва, ч |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Повреждение             | КЛ <sub>1</sub>               | 0,1                    | 25                       |
| Повреждение             | Выключатель в КЛ <sub>2</sub> | 0,005                  | 5                        |
| Повреждение             | Выключатель в цепи Т          | 0,005                  | 5                        |
| Повреждение             | Выключатель в КЛ <sub>1</sub> | 0,005                  | 5                        |
| Повреждение             | Выключатель в КЛ <sub>1</sub> | 0,005                  | 5                        |
| Повреждение             | Выключатель в КЛ <sub>3</sub> | 0,005                  | 5                        |
| Повреждение             | РУ 10 кВ                      | 0,003                  | 5                        |
| Повреждение             | СШ <sub>2</sub>               | 0,003                  | 5                        |
| Ремонтный простой       | ВГ <sub>2</sub>               | 0,000366               | 25                       |
| Повреждение             | КЛ <sub>3</sub>               |                        |                          |
| Ремонтный простой       | КЛ <sub>3</sub>               | 0,0001689              | 3,333                    |
| Повреждение             | ВГ <sub>2</sub>               |                        |                          |
| Повреждение             | КЛ <sub>2</sub>               | 0,0001                 | 0                        |
| Отказ в срабатывании РЗ | В цепи КЛ <sub>2</sub>        |                        |                          |
| Повреждение             | КЛ <sub>3</sub>               | 0,0001                 | 0                        |
| Отказ в срабатывании РЗ | В цепи КЛ <sub>3</sub>        |                        |                          |

### Заключение

Таким образом, для определения показателей надежности системы можно использовать метод с использованием дерева отказов. Данный метод позволяет наглядно изобразить взаимосвязи событий отказов элементов, приводящих к отказам подсистем и системы в целом. При более подробном рассмотрении событий повреждений и учете отказов в срабатывании коммутационной аппаратуры, как это сделано в программе, можно с помощью ручного расчета определить все необходимые показатели надежности системы.

### Литература

1. Цыганков В.М. Надежность электрических систем и сетей. Конспект лекций. – Минск : БГПА, 2001. – 152 с.
2. Анищенко В.И., Колосова И.В. Основы надежности систем электропитания: учебное пособие/ В.А. Анищенко, И.В. Колосова. – Минск : БНТУ, 2007. – 151 с.
3. Гук Ю.Б., Кобжув В.М., Черновец А.К. Устройство, проектирование и эксплуатация схем электропитания собственных нужд АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 296 с.