

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

**В. И. Зацепина, С. С. Астанин**

*Кафедра «Электрооборудование», astanin.1994@yandex.ru;  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»,  
г. Липецк, Россия*

**Ключевые слова:** надежность; резервирование; релейная защита; частота отказов; электрооборудование.

**Аннотация:** Рассмотрена проблема надежности систем релейной защиты и автоматики. По результатам анализа для построения систем автоматики предложен ряд математических выражений, позволяющих на стадии проектирования провести оценку отказоустойчивости системы электроснабжения при выбранных устройствах защиты, тем самым упростить процесс выбора наиболее предпочтительной системы, основываясь на полученных показателях.

---

### Введение

Устройства защиты и автоматики должны выполнять определенные функции: срабатывать в случае повреждений защищаемого элемента, не срабатывать при коротких замыканиях контролируемого элемента, проводить оценку нормального режима работы элемента. Каждая единица силового оборудования системы электроснабжения оснащается основной и резервной защитами. В процессе эксплуатации защиты могут не в полной мере выполнять поставленные перед ними задачи: не срабатывать при повреждениях в пределах действия защиты; срабатывать при контролируемых коротких замыканиях; осуществлять ложные срабатывания при отсутствии повреждения электрооборудования в системе электроснабжения. Все перечисленные неправильные действия относятся к отказам защит в процессе их действия.

### Показатель надежности элементов защиты

Для элементов систем электроснабжения релейная защита должна отвечать требованиям правил устройств электроустановок. Правила распространяются на все устройства релейной защиты, а именно: быстродействие, селективность, надежность и чувствительность.

Быстродействие срабатывания релейной защиты состоит в обеспечении наименьшего возможного времени отключения коротких замыканий в системе электроснабжения [1]. Быстрое отключение короткого замыкания ограничивает степень и область поврежденных элементов оборудования, а также сохраняет безотказную работу той части электроснабжения, которая не повреждена. Наличие быстрых отключений коротких замыканий исключает возможные нарушения параллельной работы, как синхронных генераторов, так и синхронных двигателей. В результате также обеспечивается устойчивый самозапуск электрических двигателей. Кроме всего прочего, вероятность безотказного действия средств автоматического повторного включения и резервного питания увеличивается [2, 3].

Одной из основных задач средств автоматики и релейной защиты является обеспечение селективности защиты, то есть отключение только поврежденной части системы. Абсолютной селективностью обладают защиты трансформаторов, линий электропередач и других элементов систем электроснабжения, которые мгновенно отключают поврежденные элементы и не срабатывают при повреждениях от коротких замыканий на смежных элементах системы. Такие защиты нельзя использовать в качестве резервных средств в случае коротких замыканий на смежных элементах. В системах электроснабжения применяются защиты и с относительной селективностью, которые действуют с выдержкой времени. В основном время срабатывания устанавливается на основании селективной работы при коротких замыканиях. Однако возможны и ситуации, когда необходимо уменьшать время отключения короткого замыкания по сравнению со временем при селективной защите. Во всех случаях по необходимости следует обеспечивать минимальное время отключений. В настоящее время данные условия имеют место, если использовать цифровые реле и современные выключатели.

Безотказная работа релейной защиты и средств автоматики осуществляется только тогда, когда выполняется надежное ее срабатывание при наличии условий на срабатывание и не срабатывание – в случае их отсутствия. Требуемая надежность защит должна обеспечиваться соответствующими условиями. Они определяются по параметрам и исполнению, необходимому для того, чтобы устройство могло отвечать назначению и условиям применения. Обеспечение данных условий естественно определяется своевременным, а также квалифицированным обслуживанием таких устройств.

Результаты выполненных исследований по обслуживанию средств релейной защиты и автоматики свидетельствуют о том, что, даже несмотря на своевременное проведение ремонтно-профилактических работ, нет гарантии их исправного состояния. Поэтому, кроме мероприятий, направленных на повышение надежности релейной защиты и средств автоматики, необходимо предусматривать их резервирование, а также использовать резервные выключатели. Правилами техники безотказности предусматривается потребность в резервировании защит. Они должны осуществлять дальнейшее резервирование, то есть срабатывать при коротких замыканиях на смежных линиях в случае несрабатывания собственных защит или выключателя рассматриваемого отказавшего электрического соединения. Когда дальнейшее резервирование не обеспечивается, то следует использовать ближнее, при этом необходимо применять два и более независимых устройства защиты, которые должны резервировать друг друга. Насколько это серьезная задача подтверждается тем, что в сетях 110 кВ и выше применяют специальные резервные устройства в случае отказов выключателей. Если обеспечение дальнего резервирования требует значительных усложнений защиты или это технически невозможно, то правилами техники безопасности допускается не резервировать отключения за трансформатором. Это можно осуществлять на реактивных линиях и в конце длинного смежного участка линии напряжением 6...35 кВ, а также на линиях напряжением 110 кВ и выше, при наличии ближнего резервирования. В то же время следует применять дальнее резервирование при наиболее частых видах повреждения, например, при коротком замыкании на землю в сетях 110 кВ и выше, когда они составляют примерно 85 % всех видов коротких замыканий.

### **Оценка надежности систем защиты и автоматики**

Чтобы оценить с позиции надежности систему электроснабжения и связанной с ней автоматики аналитически, поступим следующим образом. Сначала расчет выполним для отдельного уровня системы электроснабжения промышленного предприятия. Затем рассмотрим цепочку питания рабочей машины, в которую

входит электрооборудование от первого до последнего шестого уровня. Анализ должен осуществляться относительно отказов электрооборудования, так как релейная защита и средства автоматики должны срабатывать на отключение в процессе его отказа. В данном случае вероятность не воздействия релейной защиты и средств автоматики на отказ оборудования при структурном резервировании рассматриваемого уровня равна

$$\Delta \bar{P}_{\text{об. п. з. у}} = \bar{P}_{\text{об. п. з. у}} \bar{P}_y, \quad (1)$$

где  $\bar{P}_{\text{об. п. з. у}}$  – вероятность не срабатывания релейной защиты и средств автоматики рассматриваемого уровня;  $\bar{P}_y$  – вероятность отказа электрооборудования, подлежащего анализу уровня.

Средняя длительность таких событий определится как

$$\Delta \bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}} = \frac{\bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}} \bar{\theta}_y}{\bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}} + \bar{\theta}_y}, \quad (2)$$

где  $\Delta \bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}}$  – средняя длительность не воздействия релейной защиты и средств автоматики на отказы электрооборудования рассматриваемого уровня;  $\bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}}$  – средняя длительность не срабатывания релейной защиты и средств автоматики рассматриваемого уровня;  $\bar{\theta}_y$  – средняя длительность отказа электрооборудования подлежащего анализу уровня.

Используя  $\Delta \bar{P}_{\text{об. п. з. у}}$  и  $\Delta \bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}}$ , частоту отказов релейной защиты и средств автоматики рассматриваемого уровня установим из равенства

$$\Delta \bar{\mu}_{\text{об. п. з. у}} = \frac{\bar{P}_{\text{об. п. з. у}}}{\bar{\theta}_{\text{об. п. з. у}}}. \quad (3)$$

Чтобы оценить эти события в полной мере, необходимо знать функцию распределения длительностей этих событий  $\Delta f_{\text{об. п. з. у}}$ , которая выражается зависимостью

$$\Delta f_{\text{об. п. з. у}} = f_{\text{об. п. з. у}} f_y, \quad (4)$$

где  $f_{\text{об. п. з. у}}$  – функция распределения длительностей отказов оборудования, подлежащего воздействию релейной защиты и средств автоматики;  $f_y$  – функция распределения длительностей отказов защиты и средств автоматики.

Уровень системы электроснабжения может состоять как из параллельного соединения электрооборудования, так и смешанного. Поэтому необходимо знать параметры и функции распределения таких соединений [4 – 6]. Сначала определим искомые параметры для параллельного соединения электрооборудования, а затем для смешанного. Для параллельного соединения искомые параметры выразятся зависимостями

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{\text{от. п. с}} &= \bar{P}_{\text{от. 1}} \bar{P}_{\text{от. 2}}; \\ \bar{\theta}_{\text{от. п. с}} &= \frac{\bar{\theta}_{\text{от. 1}} \cdot \bar{\theta}_{\text{от. 2}}}{\bar{\theta}_{\text{от. 1}} + \bar{\theta}_{\text{от. 2}}}; \\ \bar{\mu}_{\text{от. п. с}} &= \frac{\bar{P}_{\text{от. п. с}}}{\bar{\theta}_{\text{от. п. с}}}; \\ f_{\text{от. п. с}} &= f_{\text{от. 1}} f_{\text{от. 2}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\bar{P}_{от. п. с}$  – вероятность отказов параллельного соединения электрооборудования;  $\bar{P}_{от1}$ ,  $\bar{P}_{от2}$  – вероятности отказов соответственно первой и второй единиц электрооборудования;  $\bar{\theta}_{от. п. с}$  – средняя длительность отказов параллельного соединения электрооборудования;  $\bar{\theta}_{от1}$ ,  $\bar{\theta}_{от2}$  – средние длительности отказов соответственно первой и второй единиц электрооборудования;  $\bar{\mu}_{от. п. с}$  – частота отказов параллельного соединения электрооборудования;  $f_{от. п. с}$  – функция распределения длительностей отказов параллельного соединения;  $f_{от1}$ ,  $f_{от2}$  – функции распределения длительностей отказов соответственно первой и второй единиц электрооборудования.

Если отказывает первая или вторая единица электрооборудования из параллельного соединения, то для оценки воздействия релейной защиты и средств автоматики на них можно воспользоваться выражениями, аналогичными (1) – (4). Более сложной задачей служит оценка, когда отказывает параллельное соединение или отдельная единица оборудования, включенная последовательно с параллельным соединением. Чтобы решить данную задачу, необходимо от смешанного соединения оборудования перейти к эквивалентному. Зная параметры надежности параллельного соединения и электрооборудования, включенного последовательно с параллельным, определим показатели для смешанного:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{с. с} &= \bar{P}_{от. п. с} \bar{P}_{1э}; \\ \bar{\mu}_{с. с} &= \bar{\mu}_{от. п. с} + \bar{\mu}_{1э}; \\ \bar{\theta}_{с. с} &= \frac{\bar{P}_{с. с}}{\bar{\mu}_{с. с}}; \\ f_{с. с} &= \frac{(\bar{\mu}_{от. п. с} f_{от. п. с} + \bar{\mu}_{1э} f_{1э})}{\bar{\mu}_{с. с}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\bar{P}_{с. с}$ ,  $\bar{\mu}_{с. с}$  – соответственно вероятность и частота отказа смешанного соединения электрооборудования;  $\bar{\theta}_{с. с}$  – средняя длительность отказа последовательного соединения;  $f_{с. с}$  – функция распределения длительностей отказов последовательного соединения электрооборудования;  $\bar{P}_{1э}$ ,  $\bar{\mu}_{1э}$ ,  $f_{1э}$  – соответственно вероятность, частота и функция распределения длительностей отказа отдельной единицы электрооборудования (элемента), включенного последовательно с параллельным соединением.

Заменив электрооборудование уровня одним эквивалентным элементом, оценка воздействия релейной защиты и средств автоматики на отказы оборудования уровня может быть определена согласно выражениям (1) – (4). В общем случае для оценки влияния действий релейной защиты и средств автоматики на обеспечение электроэнергией приемников необходимо поступить следующим образом. Полагаем, что электрооборудование уровней, обеспечивающих приемники энергией, соединено последовательно. Тогда вероятность, характеризующая несрабатывание защиты при обеспечении энергией технологических машин, определится выражением

$$\bar{P}_{об.т.м} = \bar{P}_{1у} + \bar{P}_{2у} + \bar{P}_{3у} + \bar{P}_{4у} + \bar{P}_{5у} + \bar{P}_{6у} = \sum_{j=1}^n \bar{P}_{j, у}, \quad (7)$$

где  $j$  – число уровней системы электроснабжения.

Аналогичным выражением характеризуется и частота невыполнения защитой возложенных на нее функций, то есть

$$\bar{\mu}_{\text{об.т.м}} = \bar{\mu}_{1y} + \bar{\mu}_{2y} + \bar{\mu}_{3y} + \bar{\mu}_{4y} + \bar{\mu}_{5y} + \bar{\mu}_{6y} = \sum_{j=1}^n \bar{\mu}_{j,y}. \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) справедливы только в том случае, когда отказы электрооборудования уровней не пересекаются во времени. Для электрооборудования данное условие справедливо, потому что наработка на отказ по длительности в тысячи, десятки тысяч и сотни раз превышает длительности его отказов. По вероятности  $\bar{P}_{\text{об.т.м}}$  и частоте  $\bar{\mu}_{\text{об.т.м}}$  определяется средняя длительность отказов, на которые не воздействовала защита:

$$\bar{\theta}_{\text{об.т.м}} = \frac{\bar{P}_{\text{об.т.м}}}{\bar{\mu}_{\text{об.т.м}}}. \quad (9)$$

Функция распределения длительностей отказов при этом определится выражением

$$\begin{aligned} f_{\text{об.т.м}} &= \frac{(\bar{\mu}_{1y} f_{1y} + \bar{\mu}_{2y} f_{2y} + \bar{\mu}_{3y} f_{3y} + \bar{\mu}_{4y} f_{4y} + \bar{\mu}_{5y} f_{5y} + \bar{\mu}_{6y} f_{6y})}{\bar{\mu}_{\text{об.т.м}}} = \\ &= \frac{1}{\bar{\mu}_{\text{об.т.м}}} \sum_{j=1}^n \bar{\mu}_{j,y} f_{j,y}. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя функцию распределения длительностей отказов для систем релейной защиты, можно качественно оценить ее надежность и определить потребность в дальнейших модификациях.

### Заключение

Полученные выражения позволяют оценить показатели надежности систем автоматики и релейной защиты, а также могут быть использованы при построении новых. Следует отметить, что приведенные зависимости касаются структурного резервирования электрооборудования. Несколько другими зависимостями будет характеризоваться влияние релейной защиты и средств автоматики при временном резервировании. Если при структурном резервировании оборудования нельзя исключить отказы полностью, то временное резервирование позволяет выполнить данную операцию в полной мере. Необходимо также отметить, что в будущем возможно обеспечение отказоустойчивости системы электроснабжения при использовании релейной защиты и средств автоматики оборудованием с временным резервированием.

### Список литературы

1. Прокопчик, В. В. Повышение качества электроснабжения и эффективность работы электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами / В. В. Прокопчик. – Гомель : Гомельский гос техн ун-т им. П. О. Сухого, 2002. – 283 с.
2. Грачева, Е. И. Оптимизация проектирования систем электроснабжения с учетом возможных ситуаций и вероятностных параметров надежности / Е. И. Грачева, Р. Р. Садыков // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 2 (48). – С. 22 – 26.

3. Маяков, Д. М. Расчет надежности сложных систем / Д. М. Маяков // Математика и ее приложения в современной науке и практике : сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., 21–22 апреля 2017 г., Курск. – Курск, 2017. – С. 116 – 121.

4. Шпиганович, А. Н. Релейная защита как средство управления отказоустойчивости систем электроснабжения / А. Н. Шпиганович, С. С. Астанин / Энергетика. Проблемы и перспективы развития : материалы IV Всерос. молодежной науч. конф., 19–20 декабря 2018 г., Тамбов. – Тамбов, 2019. – С. 149–150.

5. Зацепина, В. И. Повышение безотказности работы оборудования металлургических производств на примере системы СТАТКОМ / В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев / Вести высш. учеб. заведений Черноземья. – 2016. – № 1 (43). – С. 36 – 41.

6. Кудрин, Б. И. Организация, построение и управление электрическим хозяйством на основе теории больших систем / Б. И. Кудрин. – М. : Центр системных исследований, 2002. – 366 с.

---

## The Analysis of the Power Supply System Reliability with Relay Protection Fail-Safe Features

V. I. Zatsepina, S. S. Astanin

*Department of Electrical Equipment, astanin.1994@yandex.ru;  
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*

**Keywords:** reliability; reservation; relay protection; failure rate; electrical equipment.

**Abstract:** The problem of reliability of relay protection systems and automation is considered. Based on the analysis results, for the construction of automation systems, a number of mathematical expressions have been proposed that allow at the design stage to assess the fault tolerance of the power supply system with the selected protection devices, thereby simplifying the process of choosing the most preferred system based on the obtained indicators.

### *References*

1. Prokopchik V.V. *Povysheniye kachestva elektrosnabzheniya i effektivnost' raboty elektrooborudovaniya predpriyatiy s nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami* [Improving the quality of power supply and the efficiency of electrical equipment of enterprises with continuous technological processes], Gomel: Gomel'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. P. O. Sukhogo, 2002, 283 p. (In Russ.)

2. Gracheva Ye.I., Sadykov R.R. [Optimization of the design of power supply systems taking into account possible situations and probabilistic parameters of reliability], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [News of higher educational institutions of the Chernozem region], 2017, no. 2 (48), pp. 22-26. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Mayakov D.M. *Matematika i yeye prilozheniya v sovremennoy nauke i praktike* [Mathematics and its applications in modern science and practice], Proceedings of the VII International scientific and practical conference, 21-22 April, 2017, Kursk, 2017, pp. 116-121. (In Russ.)

4. Shpiganovich A.N., Astanin S.S. *Energetika. Problemy i perspektivy razvitiya* [Energy. Problems and development prospects], Proceedings of the IV All-Russian

youth scientific conference, 19-20 December, 2018, Tambov, 2019, pp. 149-150. (In Russ.)

5. Zatsepina V.I., Zatsepin Ye.P., Shachnev O.Ya. [Improving the reliability of the equipment of metallurgical production on the example of the STATCOM system], *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya* [News of higher educational institutions of the Chernozem region], 2016, no. 1 (43), pp. 36-41. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Kudrin B.I. *Organizatsiya, postroyeniye i upravleniye elektricheskim khozyaystvom na osnove teorii bol'shikh sistem* [Organization, construction and management of electrical facilities based on the theory of large systems], Moscow: Tsentr sistemnykh issledovaniy, 2002, 366 p. (In Russ.)

---

### **Analyse der Zuverlässigkeit des Stromversorgungssystems unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz des Relaischutzes**

**Zusammenfassung:** Es ist das Problem der Zuverlässigkeit von Relaischutzsystemen und Automatik betrachtet. Basierend auf den Analyseergebnissen ist für den Aufbau von Automatisierungssystemen eine Reihe von mathematischen Ausdrücken vorgeschlagen, die es ermöglichen, in der Entwurfsphase die Fehlertoleranz des Stromversorgungssystems mit den ausgewählten Schutzvorrichtungen zu bewerten, wodurch die Auswahl des am meisten bevorzugten Systems auf der Grundlage der erhaltenen Indikatoren vereinfacht wird.

---

### **Analyse de la fiabilité du système d'alimentation électrique compte tenu de la tolérance de panne de la protection par relais**

**Résumé:** Est examiné le problème de la fiabilité des systèmes de la protection par relais et d'automatisation. Selon les résultats de l'analyse, sont proposées des expressions mathématiques pour la construction des systèmes d'automatisation ce qui permet, au stade de la conception, d'évaluer la résilience du système d'alimentation électrique avec les dispositifs de protection sélectionnés, simplifiant ainsi le processus de la sélection du système préféré à la base des indicateurs obtenus.

---

**Авторы:** *Зацепина Виолетта Иосифовна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрооборудование»; *Астанин Сергей Сергеевич* – аспирант кафедры «Электрооборудование», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

**Рецензент:** *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.