

ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ

УДК 681.3: 621.311.68

ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Л.Г. Роголина, доцент СибГУТИ, к.т.н.; epus206@sibsutis.ru

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, установка электропитания, показатели надежности, дерево неисправностей.

Введение. Надежность работы предприятия связи в значительной степени определяется надежностью установок электропитания (УЭП). Минимальная величина надежности ограничивается государственными, отраслевыми и международными стандартами [1, 2], где средняя наработка на отказ T_0 должна быть не менее 10^6 ч для УЭП с аккумуляторной батареей (АБ) и среднее время восстановления T_B не более 0,5 ч. Обеспечение надежного функционирования УЭП достигается различными схемными решениями и применением специального оборудования (систем заземления, защиты, вентиляции, кондиционирования и т.д.).

Развитие и усложнение аппаратуры, в том числе и УЭП, многообразии архитектур последних, затрудняет анализ и оценку показателей надежности. Одна из причин – использование «горячего резервирования», когда сложно оценить разумное число избыточных элементов, а также неисправность значимых недублируемых компонентов, при которой требуется замена всей системы.

Под *отказоустойчивостью* УЭП понимается подача бесперебойного (гарантированного) питания с определенными параметрами качества питающих напряжений. Отказоустойчивость системы напрямую определяется ее эксплуатационной готовностью, зависящей от проведения плановых (регламентных, сервисных) и ремонтных (восстановительных) работ. На практике решающим фактором является длительность перерыва в подаче электроэнергии к потребителям, поэтому при электроснабжении оборудования предприятия связи эксплуатационная готовность УЭП должна быть выше эксплуатационной готовности оборудования.

Согласно [1–3], количественной характеристикой надежности служит среднее время между отказами – МТВФ (T_0); интенсивность отказов $\lambda=1/T_0$; интенсивность восстановления $\mu=1/T_B$; среднее время нерабочего состояния (проведения профилактических и регламентных работ по техническому обслуживанию) – МДТ; среднее время рабочего состояния – МУТ [4]. Степень готовности аппаратуры A , безотказность P и среднее время нерабочего состояния УЭП определяются выражениями:

$$A = T_0 / (T_0 + T_B); \quad P = e^{-\lambda t}; \quad \text{МДТ} = \text{МУТ} \left[(1 - A) / A \right],$$

где t – интервал времени, на котором определяется безотказность. Для повышения точности прогнозирования при оценке показателей надежности УЭП с учетом субъективных ошибок, предлагается использовать графическое изображение комбинаций определенных типов нарушений.

Постановка задачи. Для автоматизации проектирования установок электропитания использовался метод анализа дерева отказов при оценке показателей надежности УЭП. Данный метод впервые был использован в 1962 г. компанией Bell

Labs для ВВС США. Сегодня он получил широкое распространение, являясь частью стандартов [5, 6]. Для построения дерева отказов исследуемой УЭП (рис. 1) выделяют наиболее слабые точки, в которых малейшая неисправность может привести к недопустимым последствиям в системе.

Процесс установления возможных неисправностей системы и последствий этих неисправностей частично описаны в стандарте IEC 812 [7]. Все неисправности оцениваются вероятностью их возникновения и серьезностью последствий для УЭП. Отображение событий, которые могут вызвать определенные типы нарушений в виде дерева неисправностей позволит найти вероятность появления неисправности системы и определить возможные причины данного сбоя. При этом учитываются нарушения и причины их появления, связанные с главным событием через логические переходы И/ИЛИ. Причем, рассматриваются все возможные варианты предшествующих событий до возникновения главного нарушения (рис. 2).

При гарантированном электроснабжении к главным событиям можно отнести нарушение электропитания на выходе шкафа автоматического ввода резерва (АВР), а предшествующие ему – сбой на трансформаторной подстанции (ТП), пробой трансформатора, выход из строя собственной электростанции (СЭ) и т.д. Неисправности, находящиеся в нижнем уровне дерева, являются ошибками персонала во время

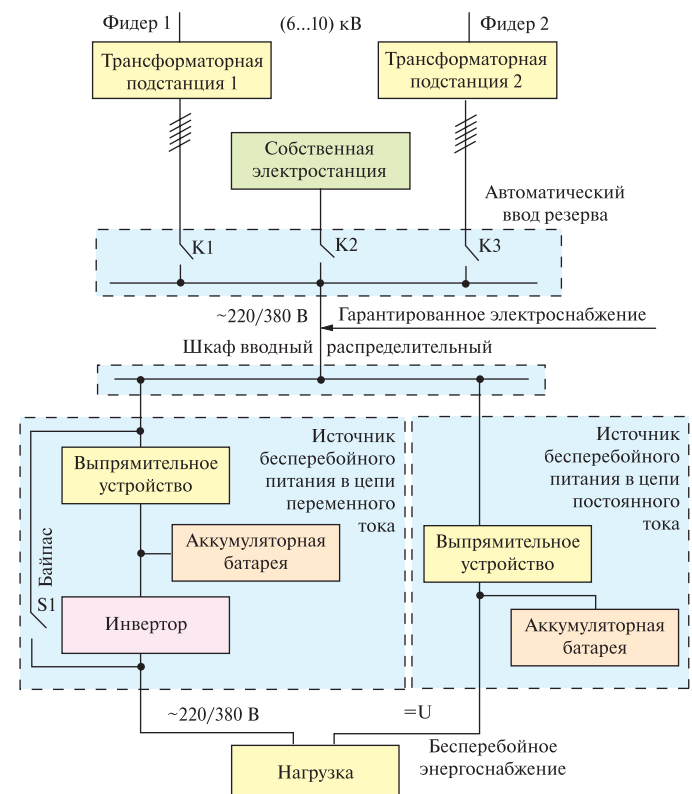


Рис. 1. Структурная схема УЭП

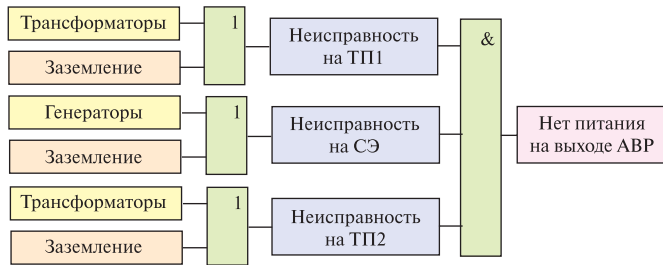


Рис. 2. Дерево неисправностей

проведения монтажных работ, неисправностью узлов или деталей источников бесперебойного питания (ИБП). В этом случае следует воспользоваться статистической информацией о возможных повреждениях и способах их устранения.

При анализе дерева неисправностей формируется минимальный набор комбинаций, начиная с основных событий, которые ведут к сбою в системе.

Каждый такой набор имеет бальную шкалу значимости в процентном отношении к общей неготовности на выходе АВР. Схемы неисправностей в виде деревьев очень удобны для анализа сложных систем. Они позволяют легко определять показатели надежности систем и особенно тех, у которых время ремонта не так важно как сама неисправность.

Структура дерева неисправностей определяет логическую взаимосвязь блоков и компонентов, следовательно, и неисправностей в системе. Элементы структур УЭП могут располагаться последовательно (рис. 3,а), параллельно (рис. 3,б), с переходами (рис. 3,з) или в виде равноправных блоков (рис. 3,в) в режиме «горячего резервирования», когда постоянно работают K блоков из N . Для расчета показателей надежности структур с переходами (рис. 3,з) проводятся преобразования в схемах последовательного и параллельного соединения по одной из гипотез: отказ или сохранение рабочего состояния элементов контуров (3,..., $N-2$) в течение времени t . При этом учитываются показатели надежности этих элементов.

При резервировании замещением (ненагруженное, динамическое, «холодное») резервные элементы находятся в отключенном состоянии и не подвергаются опасности отказа до момента включения, наступающего при отказе основного (предшествующего, резервного) элемента. Для такой системы, состоящей из основного и одного резервного элементов, отказы считаются внезапными, наработка на отказ элементов распределена по экспоненциальному закону.

Расчет безотказности системы при резервировании замещением осуществляется при последовательном и параллельном соединении блоков УЭП по выражениям [8]:

$$P_{\text{пос}} = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)t]; \tag{1}$$

$$P_{\text{пар}} = [\lambda_2 \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_1 \exp(-\lambda_2 t)] / (\lambda_2 - \lambda_1), \tag{2}$$

где интенсивности отказов основного и резервного блоков различны $\lambda_1 \neq \lambda_2$. В случае, если $\lambda_1 = \lambda_2$, безотказность системы при резервировании определяется выражением:

$$P_{\text{пар}} = (1 + \lambda t) \exp(-\lambda t). \tag{3}$$

Степень готовности аппаратуры определяется для последовательного соединения блоков как

$$A_{\text{пос}} = \prod_{i=1,n} \mu_i / (\lambda_i + \mu_i); \tag{4}$$

для параллельного

$$A_{\text{пар}} = 1 - \prod_{i=1,n} \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i), \tag{5}$$

где i – неработоспособное состояние.

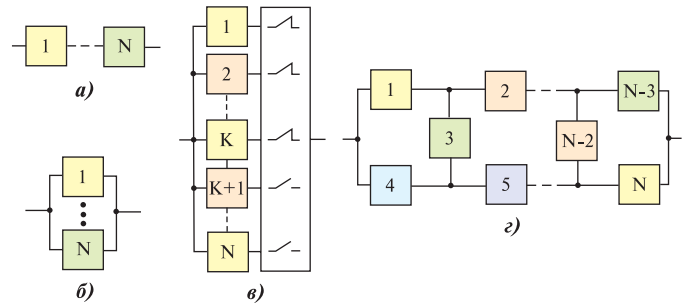


Рис. 3. Способы соединения элементов УЭП

Выражения для расчета показателей надежности других способов соединения (рис. 3, в,з) путем несложных математических преобразований сводятся к параллельному и последовательному типам соединений [8].

Алгоритм автоматизированного проектирования установки электропитания. Для решения задачи синтеза УЭП используется метод динамического программирования, включающий два взаимосвязанных этапа [9, 10].

I этап – параметрическая оптимизация количества вершин дерева УЭП, т.е. поиск локальных экстремумов при заданных ограничениях на показатель надежности в соответствии с нормативными документами [1, 2]:

$$x_i = \min_{1 \leq i \leq n} \lambda_i, \tag{6}$$

где λ_i – интенсивности отказов блоков УЭП, отобранных по условиям эксплуатации из базы промышленных электропитающих установок; n – число блоков.

II этап – структурно-параметрическая оптимизация УЭП, в котором проводится минимизация целевой функции, представленной в виде:

$$\min Y_{\text{УЭП}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Y_{ij}(x_j),$$

где n – число отобранных блоков УЭП (вершин дерева отказов); m – количество вариантов структур УЭП; $Y_{ij}(x_j) = \{\lambda, \mu, T_0^{-1}, MDT, P^{-1}, A^{-1}\}$ – целевая функция для j -го варианта i -го блока. Слагаемые функции цели нормированы.

В разработанной САПР использована интегрированная среда MatLab, в которой решение задач многокритериальной минимизации проводится целочисленным методом (метод достижения цели Марка Гембики) с помощью пакета прикладных программ Optimization Toolbox [9, 10].

Пример практической реализации УЭП. Для подтверждения эффективности предложенного метода структурно-параметрической оптимизации выполнен расчет показателей надежности УЭП для гарантированного электроснабжения переменным током предприятия связи с потреблением 70 кВА. Расчет проводился для вариантов подключений к одному или двум независимым источникам энергии схемы электроснабжения (рис. 1: ТП1, ТП2 или СЭ) [11].

В результате проведенных вычислений получено оптимальное решение для двух независимых вводов со следующими показателями надежности: интенсивность отказов $\lambda = 6,13 \times 10^{-5}$, среднее время между отказами МТБФ (T_0) = 16 313 ч, среднее время нерабочего состояния МДТ = 0,59 ч.

Для подтверждения корректности разработанной САПР УЭП проведен расчет установки бесперебойного электропитания на стороне постоянного тока с напряжением 48 В. Посредством САПР УЭП проанализированы структуры, представленные на рис. 4.

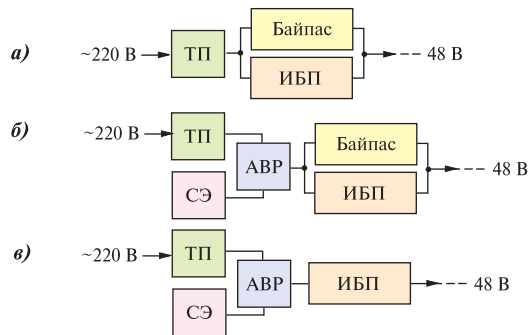


Рис. 4. Структуры источников бесперебойного питания в цепи постоянного тока:

а – с байпасом; б – с СЭ и байпасом; в – СЭ.

При проведении параметрической оптимизации и рассмотрении электропитающих установок различных российских и зарубежных изготовителей были отобраны устройства, удовлетворяющие нормативным требованиям [1, 2] с наименьшими интенсивностями отказов. Основные показатели надежности наилучших элементов структуры показаны в таблице [11, 12].

По результатам проведения структурно-параметрической оптимизации получена оптимальная структура (рис. 4,б), безотказность работы которой (за 5 лет $P=0,9979$) больше на 28,5 % структуры рис. 4,а и на 7,8% – структуры рис. 4,в. По степени готовности варианты не имеют существенного различия (доли процента). Степень готовности аппаратуры для оптимального варианта составляет $A=0,9999999$. Преимущество структуры обусловлено использованием резервного источника энергии (СЭ) и обводного пути для проведения регламентных и профилактических работ (байпас).

Заключение. На основании проведенных расчетов показателей надежности систем гарантированного электропитания можно сделать вывод, что наличие дополнительного ввода увеличивает среднее время рабочего состояния в 1,37 раза. Кроме того, любой дополнительный ввод позволяет проводить профилактический ремонт при гарантированном электропитании.

Система бесперебойного питания в цепи постоянного тока с байпасом и СЭ обеспечивает наиболее высокий уровень надежности. Однако системы питания постоянно развиваются, появляются новые архитектуры УЭП, повышается надежность отдельных функциональных узлов, позволяя повысить показатели надежности еще на этапе проектирования. Графическое отображение комбинаций событий, которые могут вызвать определенные типы нарушений, обеспечивает наглядность и дает возможность не только определить

Показатели надежности элементов и структуры

Элементы	MTBF, в часах	λ	μ	P (за 1 год)	P (за 5 лет)
ТП	$2,733 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$5,38 \cdot 10^{-2}$	0,98	0,868
СЭ	$4,545 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,232	0,137	$1,38 \cdot 10^{-6}$
АВР	$1,333 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	0,5	0,993	0,955
Байпас	$2,703 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0,5	0,968	0,797
ИБП	$1,4 \cdot 10^6$	$7,13 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	0,994	0,957

причины конкретного сбоя, но и выработать мероприятия для эффективного их устранения в УЭП.

Таким образом, автоматизация процесса проектирования УЭП путем структурно-параметрической оптимизации позволяет достичь наилучших показателей надежности, а также снизить временные затраты на проведение трудоемких расчетов по их оценке.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 52555—2006 (МЭК 62059-11:2002). Аппаратура для измерения электрической энергии. Надежность. Часть II. Общие положения.
- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
- Электропитание устройств и систем телекоммуникаций: Учебное пособие для вузов / В.М. Бушуев, В.А. Деминский, Л.Ф. Захаров и др. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 384 с.
- Ермаков С. Автоматы выбора линии // Журнал сетевых решений / LAN. 2004. – № 11. – С. 80–85.
- MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. – 1991. Notice 1 (1992) and Notice 2 (1995).
- РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
- IEC 812:198S. Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA).
- Patrick D., Newton D., Bromley R. Practical reliability engineering. – John Wiley and Sons, 2002. – 512 с.
- Рогулина Л.Г. Многовариантная оптимизация установок электропитания для телекоммуникаций // Научный вестник НГТУ. – 2011. – №3(44). – С. 53–60.
- Рогулина Л.Г. Морфологический метод синтеза установок электропитания для телекоммуникаций // Омский научный вестник. – –2011. – № 2. – С. 209–214.
- IEEE Standard 493—1997. IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems.
- Bonnefoi P. Introduction to dependability design // Cahiers techniques Merlin Gerin. – 1990. – № 144. – P. 2–20.

Получено 28. 11.11