

Оценка влияния эмиссии высших гармонических составляющих напряжения и тока от бытовых электроприемников на питающую сеть // Промышленная энергетика. – №9. – 2012. – С. 36-42

4. Koch A.S., Myrzik J. M A; Wiesner T.; Jendernalik L. Harmonics and resonances in the low voltage grid caused by compact fluorescent lamps // Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2010 14th International Conference on , vol., no., pp.1,6, 26-29 Sept. 2010

5. Петухов В., Красилов И. Резонансные явления в электроустановках зданий как фактор снижения качества электроэнергии // <http://www.tesla.ru/publications/files/020.pdf>.

УДК 629.423.1

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

*А.И. Юлдашева, А.В. Малафеев*

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск  
letoalina@mail.ru*

### ***Аннотация***

В статье рассмотрена методика определения эквивалентных показателей надежности систем электроснабжения: интенсивности отказов, времени восстановления, вероятности безотказной работы. Предлагаемый алгоритм расчета предполагает использование сочетания метода последовательного эквивалентирования и метода Ньютона. Произведен анализ сходимости и оценка вычислительной сложности разработанного алгоритма.

***Ключевые слова:*** надежность электроснабжения, показатели надежности, структурная надежность, время восстановления, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы, ущерб от перерыва электроснабжения.

# THE COMPUTATIONAL EFFICIENCY OF ALGORITHM FOR CALCULATING OF POWER SUPPLY SYSTEMS STRUCTURAL RELIABILITY MEASURES

*A.I. Yuldasheva, A.V. Malafeev*

*Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Russia, Magnitogorsk  
letoalina@mail.ru*

## **Abstract**

The paper studies method of power supply equivalent reliability measures calculation: failure intensity, restoration time, probability of no-failure. The proposed algorithm of calculation supposes the use of a combination of 2 methods: sequential reduction method and Newton's method. The convergence analysis and computational complexity assessment of the algorithm were carried out.

**Key words:** power supply reliability, reliability measure, structural reliability, restoration time, failure intensity, probability of no-failure, supply interruption costs.

Бесперебойное электроснабжение крупных промышленных предприятий, представляющих собой сложный комплекс электроэнергетических устройств, – первоочередная задача. При проектировании и эксплуатации крупного промышленного предприятия наряду с режимными параметрами и экономическими показателями необходимо учитывать показатели надежности электроснабжения, в частности, это необходимо при разработке проектных предложений по реконструкции распределительных сетей, при планировании нормальных эксплуатационных схем, при проработке заявок на вывод в ремонт оборудования.

Обзор печатных изданий и основных программных продуктов, используемых в электроэнергетике, показал, что наименьшее внимание уделяется вопросам развития теории режимной надежности и разработке способов расчета структурной надежности сложных систем электроснабжения. На стадии сравнения вариантов удобнее всего использовать показатели структурной надежности, не требующие, в отличие от надежности режимной, просчета последствий аварийных ситуаций. Таким образом, задача разработки алгоритма оценки структурной надежности является на сегодняшний день весьма актуальной.

К разрабатываемому алгоритму предъявлялись следующие требования: простота формализации, высокая точность, минимальное время исполнения, быстрая сходимость результата.

Для определения показателей надежности сложно-замкнутых сетей предлагается использование алгоритма, основанного на сочетании метода последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов систем электроснабжения [2] и метода Ньютона [3].

В общем случае любой элемент сети заменяется структурной схемой в виде многолучевой звезды (рис. 1). Количество лучей соответствует числу связей элемента на схеме. Далее схема  $n$ -лучевой звезды заменяется  $n$ -угольником (рис. 2). Образовавшиеся связи объединяются с уже существующими.

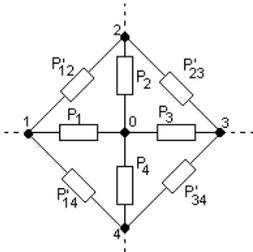


Рис. 1. Участок схемы до исключения узла 0

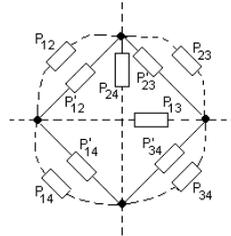


Рис. 2. Участок схемы после исключения узла 0

На промежуточных этапах преобразования используются формулы последовательно-параллельного эквивалентирования [4]:

– при параллельном соединении 2-х элементов: для интенсивности отказов:  $\lambda_{ij} = \lambda_i \lambda_j (T_{Vi} + T_{Vj})$ , для времени восстановления:

$$T_{Vij} = \frac{T_{Vi} \cdot T_{Vj}}{T_{Vi} + T_{Vj}}, \text{ для вероятности безотказной работы: } p_{ij} = p_i p_j$$

(вероятность отказа, соответственно,  $q_{ij} = 1 - p_{i,j}$ );

– при последовательном соединении 2-х элементов: для интенсивности отказов:  $\lambda_{ij} = \lambda_i + \lambda_j$ , для времени восстановления:

$$T_{Vij} = \frac{T_{Vi} \cdot \lambda_i + T_{Vj} \cdot \lambda_j}{T_{Vi} + T_{Vj}}, \text{ для вероятности безотказной работы:}$$

$$p_{ij} = p_i + p_j - p_i p_j.$$

Метод Ньютона используется для определения эквивалентной вероятности безотказной работы оборудования. Процедура решения выглядит следующим образом:

1. Для полученной схемы (рис. 2) составляем систему уравнений:



Время восстановления определяется следующим образом:

$$T_{в,э\text{кв}} = (1 - p_{э\text{кв}}) / \lambda_{э\text{кв}}$$

На основе полученных показателей надежности можно оценить ущерб от нарушения электроснабжения:

$$У = У_0 \Delta P T_{в,э\text{кв}} ;$$

где  $У_0$  – удельный ущерб, зависящий от вида производства, руб./кВт·ч;  $\Delta P$  – снижение нагрузки потребителя или выдаваемой мощности местной электростанции, кВт;  $T_{в,э\text{кв}}$  – среднее время восстановления системы, ч.

### ***Оценка вычислительной сложности алгоритма***

Вычислительная сложность алгоритма – это функция, определяющая зависимость объёма работы, выполняемой некоторым алгоритмом, от размера входных данных.

Наиболее трудоемким этапом расчета является составление матрицы Якоби, следовательно, вычислительная сложность алгоритма определяется размерностью данной матрицы:

$$M = N \cdot (N - 1) / 2 ;$$

где  $N$  – количество связей элемента.

Так, например, матрица Якоби для рассматриваемой схемы (рис. 2) имеет размерность:  $M = \frac{4 \cdot (4 - 1)}{2} = 6$ .

$$W = \begin{bmatrix} -1 & -p_{13} & 0 & -p_{24} & -p_{23} & -p_{13} \\ -p_{13} & -1 & -p_{24} & 0 & -p_{12} & -p_{34} \\ 0 & -p_{24} & -1 & -p_{13} & -p_{14} & -p_{23} \\ -p_{24} & 0 & -p_{13} & -1 & -p_{34} & -p_{12} \\ -p_{23} & -p_{12} & -p_{14} & -p_{34} & -1 & 0 \\ -p_{14} & -p_{34} & -p_{23} & -p_{12} & 0 & -1 \end{bmatrix} .$$

При составлении матрицы Якоби для произвольного числа связей учитываются следующие ее свойства: 1) на главной диагонали располагаются элементы, равные  $-1$ . 2) на пересечении строк, соответ-

вующем произведений вида  $p_a p_b$ , и столбцов, соответствующих переменным  $p_{cd}$ , где  $a \neq b \neq c \neq d$ , располагаются нули. 3) в случае, если строка соответствует  $p_a p_b$ , столбец  $-p_{bc}$ , где  $a \neq b \neq c$ , элементом матрицы будет  $-p_{ac} + p_{ac} p_{ab}$ .

В таблице 1 и на диаграмме ниже (рис. 3) представлены зависимость размерности матрицы Якоби ( $M$ ) от количества связей элемента ( $N$ ).

Таблица 1

Зависимость размерности матрицы Якоби ( $M$ ) от количества связей элемента ( $N$ )

$N$	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$M$	6	10	15	21	28	36	45	55	66

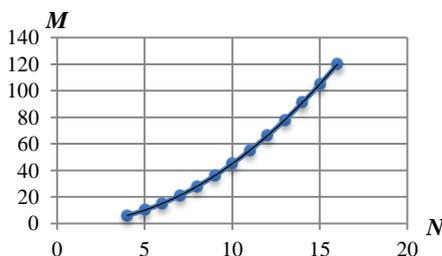


Рис. 3. Зависимость размерности матрицы Якоби ( $M$ ) от количества связей элемента ( $N$ )

Эта зависимость представляет собой полиномиальное сочетание (рис. 3). Таким образом, предлагаемый алгоритм расчета относится к классу  $P$  – алгоритмов. В теории алгоритмов классом  $P$  называют множество задач, для которых существуют «быстрые» алгоритмы решения (время работы которых полиномиально зависит от размера входных данных).

### **Практическое применение алгоритма**

С помощью разработанного алгоритма применительно к системе электроснабжения ОАО «ММК» выполнен расчет эквивалентных показателей надежности относительно узла подстанции №30 (рис. 4). Результаты расчета приведены в табл. 2.

Используя предлагаемый алгоритм, последовательно исключаем узлы  $C$  и  $M$ .

На основании полученных значений показателей надежности можно сделать вывод, что схема электроснабжения подстанции №30

имеет высокую надежность; это объясняется большим количеством параллельно соединенных элементов и относительно небольшой протяженностью ЛЭП.

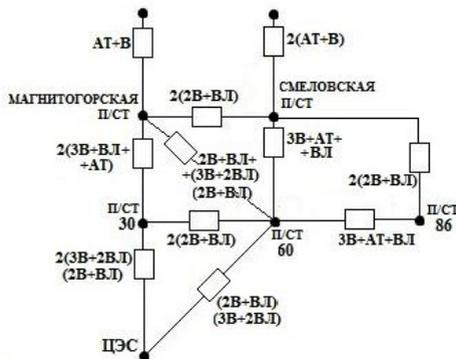


Рис. 4. Структурная схема системы электроснабжения ОАО «ММК»

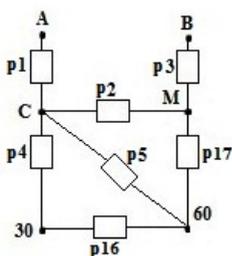


Рис. 5. Схема после преобразования

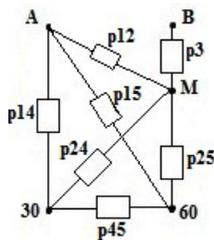


Рис. 6. Схема после исключения узла С

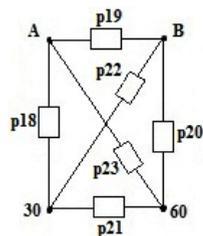


Рис. 7. Схема после исключения узла М

Таблица 2

Результаты расчетов

$P_{\text{ЭКВ}}$	$\lambda_{\text{ЭКВ}}, 1/\text{ГОД}$	$T_{\text{ВЭКВ}}, \text{ГОД}$
0,9976	0,052	0,046

Анализ сходимости

Также на примере структурной схемы подстанции 30 (рис. 4) был произведен анализ сходимости. При исключении узла М (рис. 6), было выбрано 3 варианта начальных приближений. При начальном приближении для вероятности безотказной работы 0,997 (см. рис. 8), наблюдается наиболее быстрая сходимость. В табл. 3 приведены 3 варианта начальных приближений и количество итераций, достаточное для получения результата.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет выполнять

расчет основных показателей надежности – интенсивности отказов, времени восстановления, а также экономического ущерба от недоотпуска электроэнергии – для системы электроснабжения в целом или отдельных ее участков.

Таблица 3

*Сходимость результатов расчета*

№ итерации ( $n$ )	Значение вероятности отказа при принятом начальном приближении ( $p$ )		
	$p_1=0,999$	$p_2=0,998$	$p_3=0,997$
1	0,999	0,998	0,997
2	0,974	0,948	0,912
3	0,928	0,894	0,826
4	0,855	0,813	0,765
5	0,766	0,765	0,764
6	0,764	0,764	0,764

Данный алгоритм позволяет преобразовывать схемы любой сложности независимо от того, какое соединение элементов преобладает – последовательное или параллельное, так как во всех случаях используется одинаковая процедура исключения узла. На основе созданного алгоритма в рамках программного комплекса (ПК) «КАТ-РАН» создан блок расчета структурной надежности; при помощи которого проведены расчеты применительно к системе электроснабжения ОАО «ММК» и предложены пути повышения надежности электроснабжения предприятия. Данный ПК позволяет проводить сопоставление различных вариантов нормальных и ремонтных эксплуатационных схем на основе показателей надежности при планировании режима или реконструкции сети.

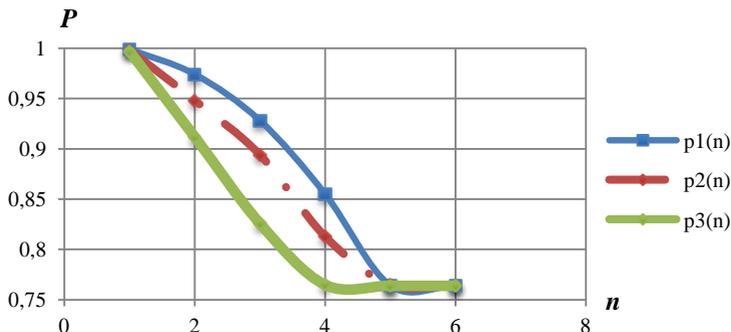


Рис. 8. Зависимость результата от количества итераций

### **Список литературы**

1. Игуменцев В.А., Заславец Б.И., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2008. – №6. – С. 16-22.

2. Замышляев В.Ю., Котов О.М., Обоскалов В.П. Определение показателей структурной надежности систем с отказами типа «КЗ» // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. тр. III Междунар. науч.-техн. конф.: Сб. статей. – В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 1. – С. 534-539.

3. А.с. 2012612069 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 6.0» / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова, А.В. Хламова, В.М. Тарасов, Е.Б. Ягольникова, Н.А. Николаев, В.В. Зиновьев. – Оpubл. в бюл. «Программы для ЭВМ, БД, ТИМС», 2012, №2. – С. 500-501.

4. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем.– М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.

УДК 621.311.001.57

## **ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В СЛОЖНОНЕСИММЕТРИЧНЫХ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ**

***Е.А. Панова, А.В. Малафеев, В.А. Болтачѳв, И.В. Иркиенко***

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск  
vavabolt@gmail.com*

### **Аннотация**

Возникновение режимов аварийной сложной несимметрии в системах промышленного электроснабжения из-за нечувствительности к ним релейной защиты может привести к длительному существованию таких режимов. В статье рассматриваются способы повышения чувствительности защиты введением дополнительного вида защит, реагирующего на напряжение обратной последовательности.

**Ключевые слова:** аварийная несимметрия, релейная защита, КАТРАН 6.0, чувствительность защиты.