УДК 621.316.06.019.34.001.24

Метод расчета надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов

КОВАЛЕВ А. П., СЕРДЮК Л. И.

Предлагаемый метод расчета показателей надежности восстанавливаемых систем электроснабжения отличается от существующих [1, 2, 3] тем, что не требует составления логической схемы замещения минимальных сечений. В качестве расчетной используется принципиальная схема электроснабжения. Каждый элемент в ней характеризуется своими параметрами λ_i и μ_i — интенсивностями отказов и восстановлений ($i=\overline{1, n}$). Для простых схем систем электроснабжения, состоящих из последовательного, параллельного либо смешанного (параллельно-последовательного) соединения элементов, эквивалентные интенсивности отказа λ и восстановления μ определяются по формулам [4]:

при последовательном соединении элементов —

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i; \quad \mu = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \lambda_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i}}; \tag{1}$$

при параллельном соединении элементов —

$$\lambda = \frac{\prod\limits_{i=1}^{n} \lambda_i \sum\limits_{j=1}^{n} \mu_j}{\prod\limits_{j=1}^{n} \mu_j}; \quad \mu = \sum_{j=1}^{n} \mu_j. \tag{2}$$

Формулы (1), (2) справедливы, когда функционирование системы можно описать в виде чередующихся последовательностей интервалов работоспособности $\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_i$ и простоя $\eta_1, \eta_2, \ldots, \eta_j$. Интервалы ξ_i имеют распределение $F_{\xi i}(t) = 1-\exp[-(\lambda_i t)]$, а интервалы $\eta_i - F_{\eta_i}(t) = 1-\exp[-(\mu_i t)]$. Все величины ξ_i и η_i взаимно независимы и выполняется условие $\mu_i/\lambda_i \geqslant 100$.

Системы электроснабжения не всегда состоят из последовательного, параллельного или смешанного соединения элементов. Существуют и более сложные схемы — мостиковые [1], в которых элементы соединены таким образом, что непосредственно определить эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений, используя формулы (1) и (2), невозможно. Под системой электроснабжения со сложной схемой будем понимать такую систему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, имеющих мостиковую схему.

Для таких схем предлагается использовать новый способ преобразования «треугольник-звезда». Этот способ отличается от известного [5] тем, что позволяет производить преобразование сложных схем с учетом восстановления элементов.

Сущность предлагаемого преобразования «треугольник-звезда» состоит в том, что соединение элементов в виде треугольника заменяется эквивалентным по надежности соединением в виде звезды, т. е. задача сводится к определению эквивалентных интенсивностей отказов и восстановлений «звезды» через аналогичные параметры надежности «треугольника».

На рис. 1, *а*, *б* изображены две схемы соединения элементов — треугольник и звезда. Пусть каждый элемент треугольника имеет интенсивности отказов λ_1, λ_2, λ_3 и восстановлений μ_1, μ_2, μ_3. Аналогичные параметры надежности имеет и звезда λ_i, λ_j, λ_k, μ_i, μ_j, μ_k.

Приведенные структуры будут эквивалентными по надежности, если интенсивности отказов и восстановлений между узлами *1—3*, *1—2*, *2—3* треугольника будут равны интенсивностям отказов и восстановлений между соответствующими узлами звезды. Между узлами *1—3* треугольника один путь проходит через элемент *1*, а второй — через элементы *2* и *3*. Для узлов *1—3* звезды имеется только один путь через элементы *i* и *k*. Схемы замещения приведены на рис. 1, *в*. Аналогичным образом составляются схемы замещения и для путей *1—2* и *2—3* треугольника и звезды (рис. 1, *г*, *д*).

Используя полученные схемы замещения, с помощью формул (1), (2) определяются эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений для всех путей успешного функционирования элементов треугольника и звезды. Приравняв соответствующие интенсивности отказов и восстановлений путей успешного функционирования элементов треугольника и звезды, получим систему из шести линейных алгебраических уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{\lambda_1}{\mu_1}\left[\mu_1\left(\frac{\lambda_2}{\mu_2}+\frac{\lambda_3}{\mu_3}\right)+\lambda_2+\lambda_3\right]=\lambda_i+\lambda_k;\\
&\frac{\lambda_2}{\mu_2}\left[\mu_2\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}+\frac{\lambda_3}{\mu_3}\right)+\lambda_1+\lambda_3\right]=\lambda_i+\lambda_j;\\
&\frac{\lambda_3}{\mu_3}\left[\mu_3\left(\frac{\lambda_2}{\mu_2}+\frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)+\lambda_2+\lambda_1\right]=\lambda_j+\lambda_k;\\
&\frac{\lambda_2+\lambda_3}{\frac{\lambda_2}{\mu_2}+\frac{\lambda_3}{\mu_3}}+\mu_1=\frac{\lambda_i+\lambda_k}{\frac{\lambda_i}{\mu_i}+\frac{\lambda_k}{\mu_k}};\\
&\frac{\lambda_1+\lambda_3}{\frac{\lambda_1}{\mu_1}+\frac{\lambda_3}{\mu_3}}+\mu_2=\frac{\lambda_i+\lambda_j}{\frac{\lambda_i}{\mu_i}+\frac{\lambda_j}{\mu_j}};\\
&\frac{\lambda_2+\lambda_1}{\frac{\lambda_3}{\mu_2}+\frac{\lambda_1}{\mu_1}}+\mu_3=\frac{\lambda_j+\lambda_k}{\frac{\lambda_j}{\mu_j}+\frac{\lambda_k}{\mu_k}}.
\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Выразив интенсивности отказов λ_i, λ_j, λ_k и восстановлений μ_i, μ_j, μ_k элементов звезды через интенсивности отказов и восстановлений элементов треугольника, получим

$$\left.\begin{aligned}
&\lambda_i=\frac{\lambda_1\lambda_2(\mu_1+\mu_2)}{\mu_1\mu_2}; \quad \mu_i=\mu_1+\mu_2;\\
&\lambda_j=\frac{\lambda_2\lambda_3(\mu_2+\mu_3)}{\mu_2\mu_3}; \quad \mu_j=\mu_2+\mu_3;\\
&\lambda_k=\frac{\lambda_1\lambda_3(\mu_1+\mu_3)}{\mu_1\mu_3}; \quad \mu_k=\mu_1+\mu_3.
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Если требуется обратный переход от звезды к треугольнику, то, используя эту же систему уравнений (3), получим

$$\left.\begin{aligned}
&\lambda_1=0{,}5\sqrt{\frac{\lambda_i\lambda_k\mu_j}{\mu_i\mu_k\lambda_j}}\,|\mu_i-\mu_j+\mu_k|;\\
&\lambda_2=0{,}5\sqrt{\frac{\lambda_i\lambda_j\mu_k}{\mu_i\mu_j\lambda_k}}\,|\mu_i+\mu_j-\mu_k|;\\
&\lambda_3=0{,}5\sqrt{\frac{\lambda_j\lambda_k\mu_i}{\mu_j\mu_k\lambda_i}}\,|\mu_j-\mu_i+\mu_k|;\\
&\mu_1=0{,}5\,|\mu_i-\mu_j+\mu_k|;\\
&\mu_2=0{,}5\,|\mu_i+\mu_j-\mu_k|;\\
&\mu_3=0{,}5\,|\mu_j-\mu_i+\mu_k|.
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

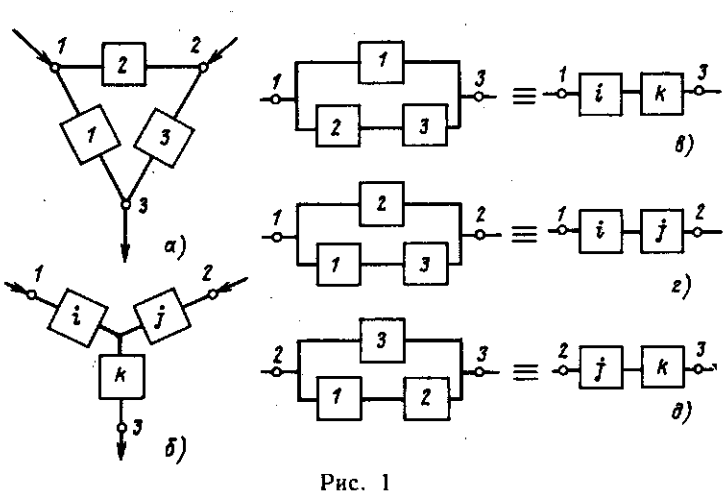

Рис. 1

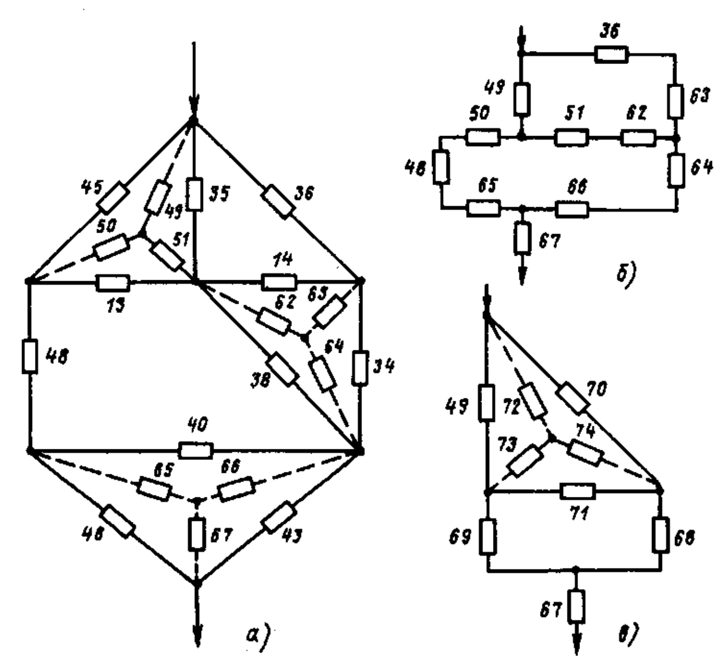

Рис. 2

Расчет надежности сложных схем систем электроснабжения с учетом восстановления элементов и с применением преобразования «треугольник — звезда» менее трудоемок по сравнению с применяемыми в настоящее время методами, требующими составления специальных схем замещения минимальных сечений, что подтверждается ниже приведенным примером.

Пример. Определить показатели надежности схемы [6] (рис. 2), показатели надежности элементов которой приведены ниже.

№ элемента	λ_i, ч$^{-1}$	μ_i, ч$^{-1}$	№ элемента	λ_i, ч$^{-1}$	μ_i, ч$^{-1}$
13	$2\cdot10^{-4}$	0,0667	40	$4,45\cdot10^{-4}$	0,108
14	$2,34\cdot10^{-4}$	0,0667	43	$3,42\cdot10^{-5}$	0,147
35	$1,26\cdot10^{-4}$	0,135	45	$5,18\cdot10^{-6}$	0,168
36	$2,85\cdot10^{-4}$	0,102	46	$6,51\cdot10^{-6}$	0,0829
38	$3,42\cdot10^{-4}$	0,0934	48	$4,65\cdot10^{-7}$	0,154
39	$2,62\cdot10^{-4}$	0,0926			

Применяя преобразование «треугольник-звезда» три раза, как это показано на схеме рис. 2, *а*, используя вышеприведенные данные и формулы (4), получим

$$\lambda_{49}=\frac{\lambda_{45}\lambda_{35}(\mu_{45}+\mu_{35})}{\mu_{45}\mu_{35}}=8,72\cdot10^{-9}\ 1/ч;$$

$$\lambda_{50}=\frac{\lambda_{45}\lambda_{13}(\mu_{45}+\mu_{13})}{\mu_{45}\mu_{13}}=2,17\cdot10^{-8}\ 1/ч;$$

$$\lambda_{51}=\frac{\lambda_{35}\lambda_{13}(\mu_{35}+\mu_{13})}{\mu_{35}\mu_{13}}=5,64\cdot10^{-7}\ 1/ч;$$

$$\mu_{49}=\mu_{45}+\mu_{35}=0,303\ 1/ч;$$

$$\mu_{50}=\mu_{45}+\mu_{13}=0,2347\ 1/ч;$$

$$\mu_{51}=\mu_{35}+\mu_{13}=0,2017\ 1/ч.$$

Аналогичным образом определим интенсивности отказов и восстановлений для следующих элементов

$\lambda_{62}=2,07\cdot10^{-6}$ 1/ч; $\mu_{62}=0,1601$ 1/ч;

$\lambda_{63}=1,58\cdot10^{-6}$ 1/ч; $\mu_{63}=0,1593$ 1/ч;

$\lambda_{64}=1,93\cdot10^{-6}$ 1/ч; $\mu_{64}=0,186$ 1/ч;

$\lambda_{65}=6,18\cdot10^{-8}$ 1/ч; $\mu_{65}=0,191$ 1/ч.

$\lambda_{66}=2,44\cdot10^{-7}$ 1/ч; $\mu_{66}=0,255$ 1/ч;

$\lambda_{67}=4,2\cdot10^{-9}$ 1/ч; $\mu_{67}=0,23$ 1/ч.

Используя формулы (1) и (2) и схему замещения рис. 2, *б*, определим эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений для последовательного соединения элементов.

$$\lambda_{68}=\lambda_{64}+\lambda_{66}=2,174\cdot10^{-6}\ 1/ч;$$

$$\mu_{68}=\frac{\lambda_{64}+\lambda_{66}}{\frac{\lambda_{64}}{\mu_{64}}+\frac{\lambda_{66}}{\mu_{66}}}=0,192\ 1/ч.$$

Аналогичным образом определим эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений для элементов 69, 70, 71:

$\lambda_{69}=5,48\cdot10^{-7}$ 1/ч; $\mu_{69}=0,159$ 1/ч;

$\lambda_{70}=2,865\cdot10^{-4}$ 1/ч; $\mu_{70}=0,102$ 1/ч;

$\lambda_{71}=2,634\cdot10^{-6}$ 1/ч; $\mu_{71}=0,1675$ 1/ч.

Применяя к структурной схеме рис. 2, *в* преобразование «треугольника-звезда» получим смешанную схему, состоящую из последовательного и параллельного соединений элементов, в которой

$\lambda_{72}=3,27\cdot10^{-11}$ 1/ч; $\mu_{72}=0,405$ 1/ч;

$\lambda_{73}=2,13\cdot10^{-13}$ 1/ч; $\mu_{73}=0,4706$ 1/ч;

$\lambda_{74}=1,19\cdot10^{-8}$ 1/ч; $\mu_{74}=0,2695$ 1/ч.

Определим эквивалентные интенсивности отказов и восстановлений для последовательно соединенных элементов 69,73;

$$\lambda_{75}=\lambda_{74}+\lambda_{68}=2,186\cdot10^{-6}\ 1/ч;$$

$$\mu_{75}'=\frac{\lambda_{74}+\lambda_{68}}{\frac{\lambda_{74}}{\mu_{74}}+\frac{\lambda_{68}}{\mu_{68}}}=0,1923\ 1/ч.$$

Для элементов 68,74 эквивалентные интенсивности определяются аналогичным образом

$\lambda_{76}=5,48\cdot10^{-7}$ 1/ч; $\mu_{76}=0,159$ 1/ч.

Интенсивности отказов и восстановлений для группы параллельно соединенных элементов 75 и 76 определим следующим образом:

$$\lambda_{77}=\frac{\lambda_{76}\lambda_{75}(\mu_{76}+\mu_{75})}{\mu_{76}\mu_{75}}=1,376\cdot10^{-11}\ 1/ч.$$

$$\mu_{77}=\mu_{76}+\mu_{75}=0,3513\ 1/ч.$$

После описанных преобразований получим эквивалентную схему системы, состоящую из последовательного соединения элементов 72, 77, 67.

Эквивалентная интенсивность отказов и восстановлений системы

$$\lambda=\lambda_{72}+\lambda_{77}+\lambda_{76}=4,2463\cdot10^{-9}\ 1/ч=37,197\cdot10^{-6}\ 1/год;$$

$$\mu=\frac{\lambda_{72}+\lambda_{77}+\lambda_{67}}{\frac{\lambda_{72}}{\mu_{72}}+\frac{\lambda_{77}}{\mu_{72}}+\frac{\lambda_{67}}{\mu_{67}}}=0,231\ 1/ч.$$

Полученный результат отличается от приведенного в [6] на 0,3 %.

Выводы. 1. Предложен новый вариант преобразования соединения элементов в виде треугольника в эквивалентное по надежности соединение элементов в виде звезды с учетом восстановления элементов, позволяющий приводить сложные мостиковые схемы к простым последовательно-параллельным.

2. На основе предложенного преобразования разработана методика расчета надежности сложных схем восстанавливаемых систем электроснабжения, отличающаяся от существующих тем, что не требует составления логической схемы замещения минимальных сечений. В качестве расчетной используется принципиальная схема электроснабжения.

3. Точность предлагаемой методики не уступает существующим апробированным [1, 2, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рябинин И. А.** Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем.— 2-е изд. Л.: Судостроение, 1971.

2. **Константинов Б. А., Лосев Э. А.** Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения.— Электричество, 1971, № 12.

3. **Фокин Ю. А., Чан Динь Лонг.** Структурный анализ и методы оценки надежности сложных систем электроснабжения.— Электричество, 1973, № 5.

4. **Козлов Ю. А., Ушаков И. А.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики.— М.: Советское радио, 1975.

5. **Голинкевич Т. А.** Прикладная теория надежности.— М.: Высшая школа, 1977.

6. **Надежность систем электроснабжения**/Зорин В. В., Тисленко В. В., Клеппель Ф. и др. Киев: Высшая школа, 1984.

[22.03.85]