

увеличением момента сопротивления напряжения снижаются. Наибольший эффект обеспечивается, если сечение балки увеличивается за счет ее ширины, т.е. расстояние  $r$  и длина  $L$  остаются прежними, равными  $r_1, L_1$ . При этом

$$\sigma_u = \sigma_{u1} \frac{(Q + Q_{yupl}) \sqrt{J/J_1}) J_1}{(Q + Q_{yupl}) J}. \quad (14)$$

Снижение жесткости балки за счет увеличения длины в данном случае привело бы к росту момента нагрузки и действующих напряжений.

В циклическом режиме работы напряжения без учета масштабного фактора, полагая  $J/J_1 = n$ , будут равны

$$\sigma_{ekb.u1} = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^r \left( \sigma_{ui} \frac{1 + (Q_{yupl}/Q) \sqrt{n}}{1 + Q_{yupl}/Q} (1/n) \right)^m v_i} \quad (15)$$

Учитывая, что  $v_i = v_1 \sqrt{n}$ , найдем

$$\sigma_{ekb.u1} = \sigma_{u1} \frac{1 + (Q_{yupl}/Q) \sqrt{n}}{1 + Q_{yupl}/Q} / (n)^{\frac{2m-1}{2m}} \quad (16)$$

Значения напряжений зависят от постоянной  $Q$  и упругой  $Q_{yupl}$  составляющих нагрузок. Постоянная нагрузка уменьшает влияние упругих сил. В случае только динамической нагруженности соотношение напряжений составит

$$\sigma_{ekb.u1} = \sigma_{u1} / (n)^{\frac{m-1}{2m}}. \quad (17)$$

### Выходы

При наличии колебательных процессов влияние жесткости связей на нагрузки следует оценивать по напряжениям в упругих элементах.

С увеличением поперечных размеров упругих звеньев величина расчетных напряжений снижается при увеличении их жесткости.

Если колебания вызваны изменением статических нагрузок, то амплитуда волн не зависит от динамических процессов. Снижение момента инерции в этом случае сопровождается увеличением частоты колебаний и приведенных нагрузок.

#### □ Авторы статьи:

Егоров

Владимир Федорович  
- канд.техн.наук, доц. каф. механического оборудования металлургических заводов Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк.  
Тел. 8(3843) 46-48-01.  
E-mail: evf@zaoproxy.ru

Егоров

Сергей Владимирович  
- начальник участка автоматизированных систем управления сталеплавильного производства  
ОАО «ЗСМК».  
Tel 8(3843) 59-01-85.  
E-mail: ecv@zaoproxy.ru

**УДК 622.817: 621.311**

**В.Н. Матвеев, А.М. Микрюков, В.Е. Беков**

## АНАЛИЗ СТРУКТУР СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМ С ПОЗИЦИЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Эффективность исследования сложных распределенных систем электроснабжения во многом зависит от принятой математической модели, разработка которой является весьма трудоемкой задачей. Авторами предлагается один из возможных подходов ее решения, основанный на использовании структурных, стоимостных и информационных показателей.

В настоящее время существует большое разнообразие структур электрических сетей (городских, сельских, шахтных, промышленных и др.): незамкнутые (радиальные, магистральные, смешанные, одиночные и двойные, встречная магистраль); замкнутые (кольцевые, ячеичные). Причинами этого являются: особенности изменения (расширение, изменение местоположения и др.) объекта электроснабжения, параметры используе-

мого электротехнического оборудования, субъективные факторы.

В связи с непрерывным развитием (расширением) электрических сетей и связанным с этим изменением их топологии, а также неснижающейся опасностью эксплуатации электрооборудования возникает задача оценки различных вариантов структур с помощью безопасностных и стоимостных показателей.

Разветвленность структур, большое разнообразие внутренних связей, их изменение позволяют отнести данные электрические сети к сложным системам, для которых в работе [1] предложены следующие структурные показатели:

- коэффициент структуры  $k_{cm} = p_M / s_M$ , учитывающий разветвленность связей, где  $s_M$  - общее число элементов системы;  $p_M$  - общее ко-

личество связей (энергетического, вещественного или информационного характера) между элементами системы, прямых и обратных;

- количество циклов структуры  $k_u$ ;
- показатель смежности  $A = \text{rank}(M_G)/s$ , учитывающий наблюдаемость структуры, где  $\hat{E}_G = [m_{ij}]$  - матрица смежности вершин графа структуры;

- энтропия связей структуры

$$H(p) = -\sum_{i=1}^{s_u} \lambda_i \log_2 \lambda_i,$$

учитывающая равномерность распределения связей между элементами структуры,  $\lambda_i = \frac{p_i}{p_\Sigma}$ , где

Таблица 1. Данные анализа структур при  $S_M = 7$

№	Наименование структуры	Схема структуры		Значения параметров: среднеарифметические (значения параметров при $A=1$ )				
		Исходная	Конечная	$k_{cm}$	$k_u$	$A$	$H$	$C_{cm}$
1	Иерархическая			1,714 (2,57)	7,6 (15)	0,561 (1)	2,596 (2,73)	31,95 (41,22)
2	Колесо			2,57 (1,71)	34,7 (1)	1 (1)	2,7 (2,75)	33,83 (25,37)
3	Звездная			1,84 (3,14)	11,1 (41)	0,37 (1)	2,41 (2,71)	33,72 (38,5)
4	Кольцо			1,54 (1)	5,2 (1)	1 (1)	2,78 (2,81)	18,86 (12,57)
5	Сотовая			2,14 (1,43)	15,3 (2)	1 (1)	2,72 (2,77)	30,75 (21,0)
6	Многосвязная			2 (1,86)	11,2 (6)	0,9 (1)	2,74 (2,73)	26,76 (24,04)
7	Двухсвязная иерархическая			1,71 (2)	7,2 (9)	0,63 (1)	2,61 (2,67)	28,3 (28,1)
8	Сотовая – колесо			2,31 (1,86)	26,3 (12)	0,86 (1)	2,71 (2,72)	30,2 (23,8)
9	Сотовая – кольцо			2,14 (1,71)	18 (7)	0,95 (1)	2,73 (2,74)	29,4 (23,8)

Таблица 2. Данные анализа структур при  $S_M = 15$ 

№	Наименование структуры	Средние арифметические из значения параметров при $A=1$				
		$k_{cm}$	$k_u$	$A$	$H$	$C_{cm}$
1	Иерархическая	2,21 (1,87)	128,9 (14)	0,87 (1)	3,72 (3,771)	37,55 (28,71)
2	Колесо	2,9 (1,87)	354,1 (1)	1 (1)	3,59 (3,67)	66,2 (53,6)
3	Звездная	2,15 (3,47)	30,6 (110)	0,36 (1)	3,15 (3,59)	80,9 (72,0)
4	Кольцо	1,67 (1,0)	14,1 (1)	1 (1)	3,87 (3,907)	23,04 (14,2)
5	Сотовая	2,53 (2,93)	303,3 (320)	0,92 (1)	3,86 (3,84)	34,9 (41,5)
6	Иерархическая - сотовая	2,34 (2,07)	180,3 (59)	0,96 (1)	3,84 (3,81)	33,6 (29,9)
7	Двухсвязная - иерархическая	2,04 (3,33)	29,3 (97)	0,38 (1)	3,33 (3,72)	51,7 (49,1)
8	Иерархическая - кольцевая	2 (1,2)	40,6 (2)	1 (1)	3,83 (3,88)	29,7 (17,5)
9	Двойная – кольцевая	1,87 (1,07)	25,7 (2)	1 (1)	3,85 (3,89)	27,5 (14,8)

$\lambda_i$  – частота использования связей  $i$ -го элемента,  $p_i$  - число связей  $i$ -го элемента – ранг  $i$ -го элемента;  $P_S$  - сумма рангов элементов структуры;

- упорядоченность структуры системы

$$G = A \cdot H(p)$$

Чем выше упорядоченность структуры сложной системы, тем выше устойчивость, а, следовательно, безопасность и эффективность использования системы [2]. При этом каждый цикл, предназначенный для перемещения энергии, требует несколько информационных циклов.

Структурные показатели были вычислены для ряда типовых и комбинированных структур, состоящих из 7 (табл. 1 с примерами структур) и 15 (табл. 2) элементов. На рис. 1 приведен пример иерархической - кольцевой структуры из 15 элементов. Каждая структура, начиная с базового (исходного) варианта, постепенно насыщалась прямыми и обратными связями. В таблицах указаны средние значения параметров при насыщении структур связями, а также значения параметров при полной наблюдаемости структур, при которой  $A=1$  [1].

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

С точки зрения безопасности эксплуатации наиболее предпочтительной является структура - «кольцо» как наиболее упорядоченная. Кроме того, она обладает сравнительно небольшим количеством связей при равномерном их распределении между элементами. Для полной наблюдаемости кольцевой структуры достаточно лишь одного (энергетического) цикла, поэтому данная структура свободна для организации в ней большого количества информационных циклов.

Таким образом, многоэлементные структуры целесообразно формировать из кольцевых фрагментов.

В реальных условиях базовую структуру предлагается описать с помощью укрупненной масштабированной геодезической матрицы, построенной на основе топографической карты в среде *MapInfo 7.8* и схемы расположения объектов системы электроснабжения. Каждая клетка матрицы (геодезическая зона) нумеруется и заполняется следующей информацией:

«0» - при отсутствии в зоне электрооборудования;

«И» - при наличии в зоне источников питания (трансформаторов, генераторов);

«Г» - при наличии групповых коммутационных аппаратов;

«К» - при наличии индивидуальных коммутационных аппаратов;

«Т» - при наличии токоприемников;

«С» - при наличии связей с другими зонами с указанием номеров этих зон.

По геодезической матрице составляется матрица смежности вершин размерности  $[N, N]$ , где  $N$  – количество геодезических зон. На главной диагонали матрицы смежности вершин в клетках матрицы, соответствующих геодезическим зонам, содержащим знаки «И» и (или) «Г», проставляются единицы.

Это означает, что для данных геодезических зон существуют вложенные геодезические матрицы второго уровня, подобные базовой, но имеющие другой масштаб. Остальные клетки главной диагонали заполняются нулями. В клетках матрицы смежности вершин, имеющих разные индексы, единица ставится при наличии прямой связи меж-

ду  $i$ -й и  $j$ -й геодезическими зонами, в противном случае в клетку  $[i, j]$  заносится нуль.

Для учета стоимостных показателей матрице смежности вершин можно поставить в соответствие матрицы оценочных показателей размерности  $[N, N]$ :

- коэффициентов загрузки линии

$$\alpha_{ij} = \frac{P_{nij}}{P_{mij}},$$

где  $P_{nij}$  и  $P_{mij}$  - номинальное и максимальное значения активной мощности в линии связи между  $i$ -м и  $j$ -м элементами, соответственно;

- тангенсов угла сдвига фаз в линии

$$\beta_{ij} = \frac{Q_{nij}}{P_{nij}},$$

где  $Q_{nij}$  - номинальное значения реактивной мощности между  $i$ -м и  $j$ -м элементами;

- средних длин линий связи

$$l_{cp_{ij}} = \frac{l_{ij}}{p_{ij}},$$

где  $p_{ij}$  - количество связей между  $i$ -м и  $j$ -м элементами,  $l_{ij}$  - суммарная длина линий связи между элементами;

- стоимостей капитальных затрат;
- стоимостей эксплуатационных затрат.

На основе матриц оценочных показателей и матрицы смежности вершин можно оценить средневзвешенную стоимость системы электроснабжения по выражениям:

$$C_\alpha = \sum_{i=1}^{s_m} \left( C_{\alpha i} + \lambda_i \sum_{j=1}^{p_{np i}} \alpha_{ij} \right),$$

$$C_\beta = \sum_{i=1}^{s_m} \left( C_{\beta i} + \lambda_i \sum_{j=1}^{p_{np i}} \beta_{ij} \right),$$

$$C_{cm} = \sum_{i=1}^{s_m} \left( C_{cm i} + \lambda_i \sum_{j=1}^{p_{np i}} c_{ij} \right),$$

где  $C_i$  - средневзвешенная стоимость вложенной структуры второго уровня;  $p_{i\delta i}$  - количество прямых связей  $i$ -го элемента;  $C_{ij}$  - стоимость прямой связи  $i$ -го элемента с  $j$ -м.

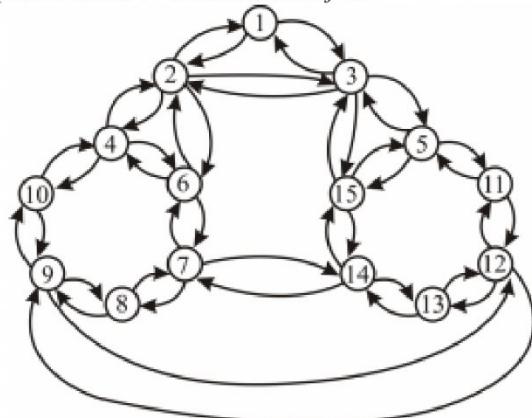


Рис. 1. Иерархическая -кольцевая структура

Под стоимостью связи подразумевается стоимость элементов, к которым направлена соответствующая связь: стоимость кабелей, стоимость передаваемой информации, стоимость циркулирующей электроэнергии и др.

Результаты проведенного вычислительного эксперимента с произвольно составленной матрицей стоимости, приведены в табл. 1 и табл. 2; анализ результатов показал, что минимальные затраты приходятся на кольцевую структуру.

В качестве оценочных показателей могут использоваться также показатели качества электроэнергии по ГОСТ 13109-97.

Таким образом, разработанная методика оценки сложной системы электроснабжения по критериям безопасности и эффективности эксплуатации позволила обосновать рекомендации по оптимизации структуры электрических сетей, в т.ч. постепенному преобразованию структуры, снижению доли реактивной энергии и др.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.Н. Структурный и параметрический синтез компонентов шахтной системы электроснабжения нового уровня безопасности // Изв. ВУЗов. Горный журнал, 2003. № 3 . С.117-120.
2. Матвеев В.Н. Повышение безопасности эксплуатации шахтных участковых систем электроснабжения и их компонентов: автореферат докторской диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук: (05.09.03, 05.26.03) / ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». - Кемерово, 2003. - 40 с.

□ Авторы статьи:

Матвеев

Виктор Николаевич

- докт. техн. наук, проф., зав.  
каф. общей электротехники Куз-  
ГТУ, тел. 8-3842-39-63-63

Микрюков

Александр Михайлович

- канд. техн. наук, доц. каф. тех-  
нологии металлов и ремонта ма-  
шин Кемеровского государст-  
венного сельскохозяйственного  
института  
Тел.89617012848

Беков

Виктор Евстафьевич

- ст. преп. каф. общей электо-  
техники КузГТУ,  
тел. 8-3842-39-63-63