

ГАРМОНИКИ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ 12-ПУЛЬСОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

проф. В.Е. Пустоваров, В.В. Оробинский, к.т.н. В.В. Шевченко

Предложен приближенный метод расчета гармоник выпрямленного напряжения многопульсовых выпрямителей.

Постановка проблемы. В настоящее время на промышленных предприятиях в общей структуре электрических нагрузок значительное место занимают нелинейные нагрузки. Их источниками являются в первую очередь различного рода вентильные преобразователи (ВП), главным образом тиристорные, установки дуговой и контактной электросварки, дуговые сталеплавильные печи и рудно-термические печи, газоразрядные лампы, силовые магнитные усилители и трансформаторы. Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной, а в некоторых случаях и непериодической; в результате возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, несинусоидальные режимы.

Несинусоидальные режимы неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Возникающие в результате высшие гармоники (ВГ) негативно сказываются на показателях качества электроэнергии. Экономические ущербы обусловлены главным образом ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования. Иногда имеет место ухудшение качества и уменьшение количества выпускаемой продукции.

Основной круг вопросов, составляющих содержание этой проблемы, сводится к следующим: оценке электромагнитной совместимости источников ВГ и других нагрузок, т.е. влияния ВГ на электроустановки и возникающего при этом экономического ущерба; количественной оценке ВГ тока, генерируемых различными нелинейными нагрузками, и прогнозированию значений ВГ тока и напряжения в системах электроснабжения; снижению уровней ВГ.

Анализ литературы. Одним из источников ВГ являются различного рода выпрямительные устройства. Анализ значений ВГ выпрямленного напряжения (табл. 1) показывает, что чем выше число пульсаций выпрямленного напряжения q за период, тем меньше содержание высших гармо-

нических, а следовательно, качество выпрямленного напряжения повышается [1]. Это оправдывает целесообразность применения многопульсовых выпрямителей, в частности 12-пульсовых.

Таблица 1

Эффективные значения высших гармонических составляющих выпрямленного напряжения в процентном выражении

Номер и частота высшей гармонической составляющей		Число пульсаций, q							
		2		3		6		12	
n	f, Гц	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}}$, %	$\frac{I_{1(n)}}{I_{1(1)}}$, %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}}$, %	$\frac{I_{1(n)}}{I_{1(1)}}$, %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}}$, %	$\frac{I_{1(n)}}{I_{1(1)}}$, %	$\frac{U_{d(n)}}{U_{d0}}$, %	$\frac{I_{1(n)}}{I_{1(1)}}$, %
2	100	41,14			50,00				
3	150		33,33	17,68					
4	200	9,43			25,00				
5	250		20,00		20,00		20,00		
6	300	4,04		4,04		4,04			
7	350		14,29		14,29		14,29		
8	400	2,24			12,50				
9	450		11,11	1,77					
10	500	1,43			10,00				
11	550		9,09		9,09		9,90		0,99
12	600	0,99		0,99		0,99		0,99	
13	650		7,69		7,69		7,69		7,69
14	700	0,73			7,14				
15	750		6,67	0,63					
16	800	0,55			6,25				
17	850		5,88		5,88		5,88		
18	900	0,44		0,44		0,44			
19	950		5,26		5,26		5,26		
20	1000	0,35			5,00				
21	1050		4,76	0,32					
22	1100	0,29			4,55				
23	1150		4,35		4,35		4,35		4,35
24	1200	0,25		0,25		0,25		0,25	
25	1250		4,00		4,00		4,00		4,00

Примечание: В табл. 1 $U_{d(n)}/U_{d0}$ – значение ВГ выпрямленного напряжения в процентном выражении среднего значения выпрямленного напряжения; $I_{1(n)}/I_{1(1)}$ – значение первичного тока в процентном выражении основной гармонической составляющей тока.

В реальных условиях несинусоидальность напряжений сети переменного тока характеризуется присутствием не одной, а многих ВГ. При этом каждая из них оказывает соответствующее влияние на спектральный состав, амплитуды, и начальные фазы ЭДС гармоник выпрямителя. Основными влияющими параметрами являются порядок, амплитуды и

начальные фазы гармоник сети переменного тока, а также нагрузочное состояние выпрямителя [2].

Однако, при симметричных питающих напряжениях наличие в сети переменного тока неканонических гармоник ($v = 5, 7, 17, 19, \dots$) не оказывает существенного влияния на значения ЭДС гармоник порядка $n = 12k$ ($f = 600, 1200, 1800$ Гц, ...) и приводит к появлению гармоник порядка $n = 6k$ при нечетных k ($f_n = 300, 900, 1500$ Гц, ...). Значения ЭДС этих гармоник зависят от начальных фаз ψ_A и амплитуд v -х гармоник. Наличие в сети переменного тока канонических гармоник ($v = 11, 13, 23, 25, \dots$) не приводит к появлению в составе ЭДС 12-пульсового выпрямителя гармоник порядка $n = 6k$ при нечетных k ($f_n = 300, 900, 1500$ Гц, ...) и оказывает значительное влияние на значения ЭДС гармоник порядка $n = 12k$.

Наличие мощных однофазных нагрузок, например электрической тяги переменного тока, приводит к появлению несимметрии напряжений в электрических системах. В этом случае по мере увеличения несимметрии питающих напряжений (при $a_U \ll 10\%$) при прочих неизменных условиях ЭДС гармоник 600, 1200, 1800 Гц, ... снижаются, а всех остальных возрастают. Наибольшее значение ЭДС канонических гармоник (600, 1200, 1800 Гц, ...) наблюдается при симметричных питающих напряжениях [3].

Сравнение ЭДС гармоник 6- и 12-пульсовых выпрямителей при несимметричных синусоидальных питающих напряжениях показывает, что гармоники 100, 600, 1200, 1800 Гц, ..., у таких преобразователей при холостом ходе практически одинаковы, а гармоники 500, 700, 1100, 1300 Гц, ... близки по значению. При одинаковой нагрузке и прочих равных условиях углы коммутации у 12-пульсовых выпрямителей меньше, чем у 6-пульсовых. При номинальной нагрузке коэффициент коммутации δ у 6-пульсового выпрямителя может достигать значений 0,3 ... 0,35, а у 12-пульсового чаще всего не превышает 0,2. Поэтому при нагрузке у 12-пульсового выпрямителя, как при симметричных, так и при несимметричных питающих напряжениях, ЭДС названных выше гармоник меньше, чем у 6-пульсового. ЭДС гармоник 200, 300, 400, 800, 900, 1000 Гц, ... у 12-пульсового выпрямителя значительно меньше, чем у 6-пульсового.

Во многих электрических системах, от которых получают питание подстанции постоянного тока, напряжения являются в большей или меньшей степени и несимметричными, и несинусоидальными [3]. При наличии одновременно и несимметрии, и несинусоидальности количество факторов, оказывающих влияние на спектральный состав ВГ, возрастает. Это значительно усложняет не только расчетные формулы, но и прогнозирование исходной информации на стадии проектирования. Кроме того, это вызывает необходимость включать в состав сглаживаю-

ших фильтров дополнительные резонансные контуры или устраивать специальные двухзвенные или аperiodические фильтры [4].

Цель статьи – рассмотреть приближенный метод расчета гармоник выпрямленного напряжения многопульсовых выпрямителей. Кривая выпрямленного напряжения многопульсовых преобразователей, особенно с учетом несимметричных режимов работы, имеет сложную форму и аналитически записывается совокупностью дифференциальных уравнений по отдельным интервалам периода кривой питающего напряжения. В общем виде формулы для определения высших гармонических в кривой выпрямленного напряжения, записанные в виде коэффициентов Эйлера ряда Фурье, имеют довольно громоздкий вид и требуют использования современной вычислительной техники. С целью снижения трудоемкости этих расчетов разработана упрощенная инженерная методика по вычислению высших гармонических выпрямленного напряжения многофазных преобразователей по значениям гармоник 6-пульсового преобразователя.

Зная амплитуды и начальные углы гармонических составляющих выпрямленного напряжения 6-пульсового выпрямителя, можно с достаточной степенью точности определить амплитуды и начальные фазы гармоник выпрямленного напряжения многофазного преобразователя по формуле:

$$U_k^m = \frac{U_k^6}{n} e^{j\varphi_{k6}} \sum_{i=1}^n e^{j\frac{360}{m}(i-1)k} = U_k^6 K_m e^{j(\varphi_{k6} + \varphi_{km})}, \quad (1)$$

где U_k^6 – амплитуда гармоники выпрямленного напряжения 6-пульсового преобразователя, В; φ_k^6 – начальная фаза k -й гармоники 6-пульсового преобразователя; m – количество пульсаций выпрямленного напряжения за период питающего напряжения; n – количество трехфазных мостов, или $n = m/6$; i – текущая координата трехфазного моста, $i = 1, 2, 3, 4 \dots$; K_m – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды многопульсового преобразователя по сравнению с 6-пульсовым;

$$K_m = \frac{1}{n} \sqrt{\left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \left[\cos \frac{2\pi}{m} (i-1)k \right] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sin \frac{2\pi}{m} (i-1)k \right] \right\}^2}; \quad (2)$$

φ_{km} – угол, учитывающий изменение угла начальной фазы k -й гармоники многопульсового преобразователя по сравнению с 6-пульсовым:

$$\varphi_{km} = \arctg \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin \frac{2\pi}{m} (i-1)k}{1 + \sum_{i=1}^n \cos \frac{2\pi}{m} (i-1)k} \right). \quad (3)$$

При расчете гармонических составляющих выпрямленного напряжения для сложных мостовых схем на основании известных значений гармоник 6-пульсового выпрямителя необходимо учитывать, что увеличение числа пульсаций m выпрямленного напряжения приводит к уменьшению угла коммутации при одинаковой нагрузке выпрямителей. Кроме этого, преобразователь при переходе от 6-пульсового к 12-пульсовому изменяет угол начальной фазы.

Пример. Определим амплитуду и начальную фазу 8-й и 16-й гармоник 12-пульсового выпрямителя, основываясь на амплитудах и начальных фазах этих гармоник 6-пульсового выпрямителя.

По графикам (рис. 1, 2) [3] определим амплитуды U_k^6 и начальные фазы ϕ_k^6 8-й и 16-й гармоник 6-пульсового выпрямителя при угле коммутации $\gamma = 15^\circ$: $U_8^6 = 14,5$ В; $\phi_8^6 = 225^\circ$ и $U_{16}^6 = 7,5$ В; $\phi_{16}^6 = 110^\circ$ соответственно.

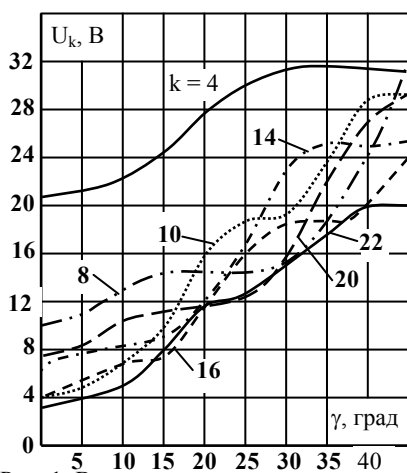


Рис. 1. Величины гармонических составляющих выпрямленного напряжения на выходе 6-пульсового выпрямителя

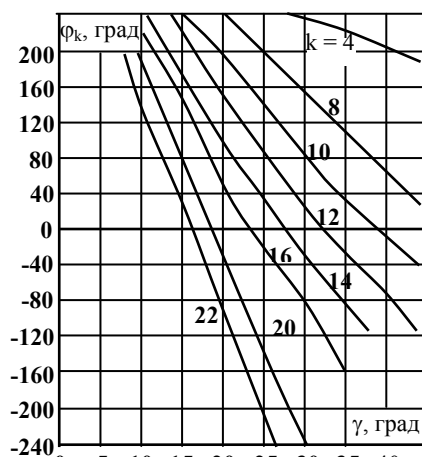


Рис. 2. Зависимости начальных фаз гармоник ϕ_k от угла коммутации

По формулам (1) и (3) определяем амплитуды напряжений и начальные фазы 8-й и 16-й гармоник, которые равны $U_8 = 12,56$ В; $\phi_8 = 195^\circ$ и $U_{16} = 6,89$ В; $\phi_{16} = 140^\circ$ соответственно. Полученные расчетным путем результаты не противоречат теоретическим [2].

Выводы: 1. Можно отметить, что чем больше количество пульсаций выпрямленного напряжения, т.е. выше порядок пульсового напряжения, тем меньше содержание высших гармонических составляющих.

2. Расчет спектра ВГ можно вести упрощенным способом, основываясь на расчетах спектра ВГ выпрямителей с меньшим количеством пульсаций, т.е. методику расчета спектра ВГ 12-пульсовых выпрямителей можно ис-

пользовать для расчета спектра ВГ 24-пульсовых выпрямителей, а также, в перспективе, и для выпрямителей с большим числом пульсаций выпрямленного напряжения за период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков А.Т. *Электронная техника и преобразователи.* – М., Транспорт, 1999. – 657 с.
2. Жежеленко И.В. *Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 265 с.
3. Бадер Д. М. *Электромагнитная совместимость.* – М., Транспорт, 2002. – 464 с.
4. *Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б.С. Барковский, Г.С. Магай, В.П. Маценко и др.; Под ред. М. Г. Шалимова.* – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

Поступила 21.07.2003

ПУСТОВАРОВ Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, профессор, профессор УИПА. В 1961 году окончил Харьковское высшее военное авиационно-инженерное училище. Область научных интересов – радиоэлектроника и электроэнергетика. E-mail: vladimir@ic.kharkov.ua.

ОРОБИНСКИЙ Виталий Вячеславович, магистр УИПА. В 2002 году окончил Украинскую инженерно-педагогическую академию. Область научных интересов – электроэнергетика.

ШЕВЧЕНКО Валентина Владимировна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры “Электроэнергетики” УИПА. В 1977 году окончила ХПИ им. В.И. Ленина. Область научных интересов – электрические машины, нетрадиционные источники энергии.

УДК 621.382

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

к.т.н. А.П. Батуков, к.т.н. В.В. Скляр, В.В. Дегтяренко
(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

Задача обеспечения живучести решена путем нового метода выбора критериальной функции, параметрами которой являются вероятность поражения элементов системы и структура системы.

Постановка проблемы. Увеличение сложности современных распределенных автоматизированных систем управления технологическими процессами, глобализация сетей связи и сети Internet, развития электро-

сетей привело к актуализации задачи обеспечения их живучести. Под обеспечением живучести подразумевается обеспечение полной или частичной работоспособности при поражении элементов системы внешними экстремальными (поражающими) воздействиями как естественной, так и искусственной природы. Достижение живучести таких систем при экстремальных воздействиях, как правило, предлагается обеспечивать за счет использования дополнительных резервирующих средств (узлов и связей). Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению расходов на разработку, производство и на эксплуатацию систем. Кроме того, увеличение числа элементов и связей между ними влечет за собой изменение вероятности поражения при экстремальных воздействиях, а, значит, не всегда приводит к повышению живучести системы.

В формализованном виде задача обеспечения максимальной эффективности использования дополнительных средств для обеспечения требуемой живучести может быть сформулирована следующим образом.

1. На основании функциональных требований к системе выбрана структурная схема минимального состава. Модель системы может быть представлена графом, вершины которого отображают узлы сети (пункты управления и объекты управления), а ребра – связи между узлами.

2. Математической моделью являются уравнения работоспособности системы, записанные в дизъюнктивно-конъюнктивной форме:

$$y_i(\tilde{x}) = y_i(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m) = \bigvee_{j=1}^d \left(\bigwedge_{k \in K_{R_j}} x_k \right), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $y_i(\tilde{x})$ – функция работоспособности; m – общее количество элементов системы (узлов и связей); d – число кратчайших путей успешного функционирования; в данном случае – это число путей передачи управления от пункта управления к объектам управления; K_{R_j} – множество индексов переменной x , соответствующих пути R_j ; N – число объектов управления.

3. В качестве критерия оптимальности структуры системы принимается требуемое значение показателя ее живучести, представляющего собой некоторое значение функции вида

$$\Pi = F(Z, V, Q), \quad (2)$$

где Z – параметр, характеризующий структуру; V – параметр, характеризующий поражающее воздействие; Q – обобщенный параметр, определяющий вероятность поражения элементов при экстремальном воздействии V .

С использованием показателя (2) задача на исследование может быть сформулирована следующим образом. Путем введения дополнительных элементов необходимо синтезировать такую структуру системы, для которой будет обеспечено значение показателя живучести не меньше

требуемого при минимальной стоимости дополнительных затрат:

$$\Pi = F(Z_{\text{доп}}, V, Q) \geq \Pi_{\text{ТРЕБ}}. \quad (3)$$

при условии $W \rightarrow W_{\min}$.

Анализ литературы. Анализ методов обеспечения и моделирования живучести дан в монографиях [1 – 3]. В [4 – 6] предложены новые подходы к математическому моделированию свойства живучести при экстремальных воздействиях. Однако, в данных работах предлагается обеспечивать живучесть системы за счет использования дополнительных резервирующих средств (узлов и связей). Имеется ряд публикаций в зарубежных специализированных изданиях, связанных, в первую очередь с распределенными вычислениями в компьютерных сетях [7 – 8]. В [9] авторами был предложен алгоритм моделирования системы управления распределенными объектами при внешних воздействиях и исследованы показатели живучести таких систем с биномиальным распределением вероятности поражения элементов. В [10] решена задача оценки эффективности экстремального воздействия. Настоящая статья развивает подход, изложенный в [9, 10].

Целью статьи является разработка методики обеспечения живучести распределенных систем управления при помощи выбора критериальной функции, учитывающей вероятности поражения элементов системы и структуру системы.

Разработка методики обеспечения живучести. Силу экстремального воздействия V будем характеризовать кратностью l одновременного поражения элементов системы, а степень защищенности системы вероятностью поражения ее элемента q_i , $i = 1, \dots, m$. При этом необходимо учесть, что в системах рассматриваемого класса принимаются специальные меры для обеспечения живучести. Примем допущение, что для всех элементов вероятность поражения одинакова, т.е. $q_i = q$. В этих условиях вероятность поражения l из m элементов системы $Q_m^{(l)}$ может быть определена по одному из известных законов распределения: биномиальному, Пуассона или нормальному. Целесообразно в качестве показателя живучести (степени защищенности) системы при экстремальном воздействии V принять вероятность непоражения l из m элементов системы. Эта вероятность определяется следующим образом.

Для биномиального закона:

$$P_m^{(l)} = 1 - Q_m^{(l)} = 1 - C_m^l q^l (1-q)^{m-l}; \quad (4)$$

для экспоненциального закона:

$$P_m^{(l)} = 1 - Q_m^{(l)} = 1 - \frac{(mq)^l}{l!} \exp(-mq); \quad (5)$$

для нормального закона:

$$P_m^{(l)} = 1 - Q_m^{(l)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (a = mq; \sigma = \sqrt{mq(1-q)}). \quad (6)$$

Чтобы сравнивать структуры системы в одинаковых условиях, будем считать, что число поражаемых элементов системы равно их математическому ожиданию, т.е. $l = a = mq$. Отсюда, величина q , при которой в системе будет поражено ровно l элементов, равна $q^{(l)} = q = l/m$.

Поражение l элементов системы с вероятностью $Q_m^{(l)}$ приведет к изменению ее структуры и повлияет на работоспособность, а, значит, и живучесть. Пусть Z – количество непораженных объектов управления после l -кратного воздействия, $M[Z] = \bar{Z}$ ее математическое ожидание.

В качестве оценки математического ожидания случайной величины Z примем ее среднее, вычисленное на всем множестве значений, полученных от реализации $r = C_m^l$ вариантов l -кратного поражения элементов исходной структуры системы:

$$\hat{M}[Z] = \tilde{Z} = \frac{\sum_{i=1}^r Z_i}{r}, \quad (7)$$

где Z_i – значение случайной величины Z при i -м варианте реализации l -кратного поражения элементов системы; r – количество вариантов реализации l -кратного поражения.

Считаем, что элементы системы могут находиться только в двух несовместных состояниях: либо в работоспособном состоянии ($x_k = 1$), либо в неработоспособном (пораженном) состоянии ($x_k = 0$). Тогда, предполагая, что действие системы детерминировано зависит от действия ее элементов, т.е., что u является функцией переменных $x_1 \dots x_m$, можно утверждать, согласно уравнениям (1), что для работоспособных, т.е. непораженных элементов системы $u = 1$, а для неработоспособных, т.е. пораженных элементов $u = 0$.

Моделируя r раз вектор состояния элементов системы, $H_m^{(l)} = \{x_1, x_m\}$ и, используя значения его координат в уравнениях (1), определяем

$$Z_i = \sum_{j=1}^N y_j, \quad i = \overline{1, r}. \quad (8)$$

Для относительных величин выражение (8) принимает вид

$$Z_i = \sum_{j=1}^N \frac{y_j}{N}, \quad i = \overline{1, r}. \quad (9)$$

С учетом выражения (8) оценка $M[Z]$ определяется как

$$\hat{M}[Z] = \tilde{Z} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^N \frac{y_j}{N}. \quad (10)$$

В этом случае оценка дисперсии $D[Z]$ вычисляется по формуле

$$\hat{D}[Z] = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (Z_i - \tilde{Z})^2.$$

Точность оценки $\hat{M}[Z]$ определяется на основе метода доверительных интервалов: наибольшая по абсолютной величине ошибка ε_δ , гарантирующая с вероятностью δ покрытие неизвестного параметра \bar{Z} интервалом $[\bar{Z}_H, \bar{Z}_B]$, определяется как

$$\varepsilon_\delta = v * \sqrt{\frac{1}{r(r-1)} \sum_{i=1}^r (Z_i - \tilde{Z})^2},$$

где $v = \Phi_0^{-1}(0,5\delta)$ – обратная функция Лапласа; $\bar{Z}_H = \tilde{Z} - \varepsilon_\delta$, $\bar{Z}_B = \tilde{Z} + \varepsilon_\delta$ – соответственно верхняя и нижняя границы доверительного интервала.

Примем во внимание, что живучая система должна обладать определенной защищенностью от l -кратного воздействия и вместе с тем сохранять работоспособность при возможном поражении ее l элементов. Поэтому, критериальная функция может быть записана в виде

$$\Pi = P_m^{(l)} \cdot \bar{Z}. \quad (11)$$

Согласно полученным выше формулам (4) – (6) и (10) значение критериальной функции определяется следующими выражениями.

Для биномиального закона:

$$\Pi = \left[1 - rq^l (1-q)^{m-1} \right] \cdot \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^N \frac{y_j(\tilde{x})}{N}; \quad (12)$$

для экспоненциального закона:

$$\Pi = \left[1 - \frac{(mq)^l}{l!} \exp(-mq) \right] \cdot \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^N \frac{y_j(\tilde{x})}{N}; \quad (13)$$

для нормального закона:

$$\Pi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right) dx \cdot \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^N \frac{y_j(\tilde{x})}{N}, \quad (14)$$

где $a = mq$; $\sigma = \sqrt{mq(1-q)}$, $r = C_m^l$.

Для определения оптимальной резервированной структуры системы, у которой при параметре $\bar{Z} = \bar{Z}^*$ выполняется условие (3), используем метод скорейшего спуска. Согласно этому методу, эффективность вводимого дополнительного резервирующего элемента системы на каждом шаге поиска определяется приращением критериальной функции $\Pi(\bar{Z})$ на единицу стоимости вводимого дополнительного элемента

$$\gamma_{i+1} = \frac{\Pi_{i+1}(\bar{Z}) - \Pi_i(\bar{Z})}{w_{i+1} * \Pi_1(\bar{Z})}, \quad (15)$$

где i – номер варианта структуры системы; w_{i+1} – стоимость введения дополнительного элемента.

Если принимать в качестве резервирующего тот элемент, который имеет максимальный показатель эффективности (15), то всегда можно получить максимальное приращение показателя живучести на единицу стоимости затрат при каждом шаге поиска структуры. Выполнив, таким образом, необходимое число шагов процедуры оптимального резервирования, получим систему с требуемым уровнем живучести.

Количество объектов управления определено назначением системы и не может изменяться в процессе поиска оптимальной структуры. Кроме того, введение дополнительного узла сети требует дополнительного использования, как минимум, одной связи. Согласно (15) введение дополнительного одного узла и одной связи может оказаться менее эффективным, чем введение просто одной дополнительной связи при исходном количестве узлов. Поэтому на первом этапе поиска целесообразно вводить только дополнительные связи.

Исходная система имеет структуру S_0 . Известно, что максимальное число связей в системе равно числу сочетаний $C = C_b^2$, где b – количество вершин графа, отображающего систему. Если исходная структура системы имеет всего m элементов, то число возможных дополнительных связей в ней равно $C_{доп.} = C - (m - b) = C_b^2 - m + b$. Следовательно, число рассматриваемых дополнительных структур системы равно $\beta = C_b^2 - m + b$. Каждая из этих структур отличается от исходной только одной связью.

После вычисления показателей живучести $\Pi_0(\bar{Z})$ для исходной и всех β дополнительных структур, рассчитываются β показателей эффективности

$$\gamma_1 = \gamma_{0+1} = \frac{\Pi_{0+1}(\bar{Z}) - \Pi_0(\bar{Z})}{w_{0+1} * \Pi_0(\bar{Z})}. \text{ Та структура } S_1, \text{ для которой показатель эффек-}$$

тивности будет максимальным, принимается в качестве искомой на первом шаге поиска. Искомой будет такая структура S_n (n – число шагов поиска), для которой будут выполнены заданные требования (3) по живучести, и при этом, стоимость дополнительных затрат $W = \sum_{i=1}^n w_i$ будет минимальной.

Таким образом, задача выбора структуры системы с заданными требованиями к живучести при ограничениях по стоимости решена.

Пример использования методики. Пусть в качестве исходной рассматривается структура системы S_0 , граф которой изображен на рис. 1. Вершины графа $A_1 \dots A_3$ отображают основной и дополнительный пункты управления, вершины $A_4 \dots A_9$ отображают объекты управления, ребра графа $x_1 \dots x_9$ отображают связи между пунктами управления и объектами управления. Все ребра графа обозначены одной буквой x . Этим подчеркивается возможность поражения любого из них при внешнем экстремальном воздействии.

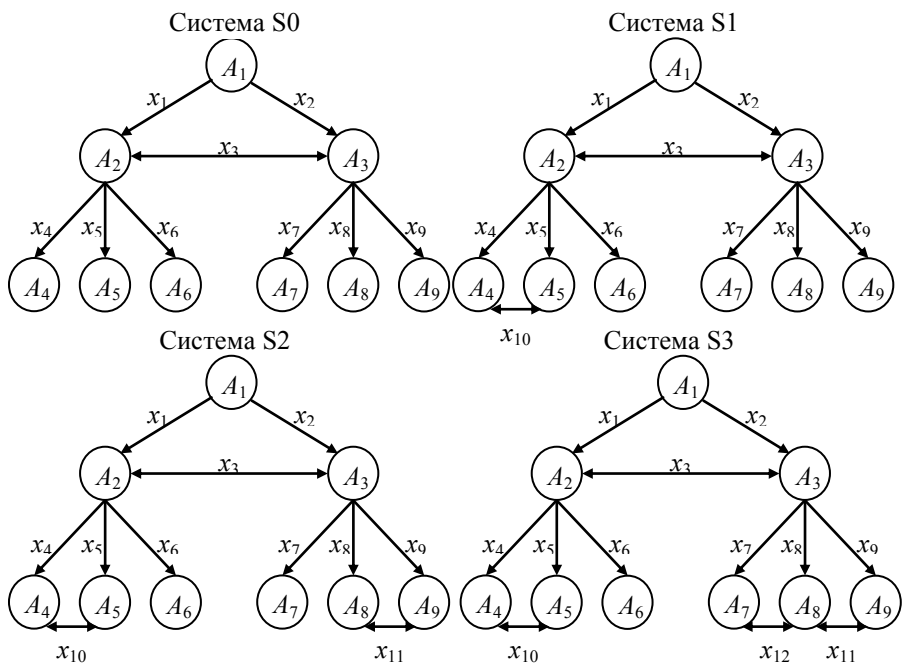


Рис. 1. Структурные схемы системы управления

Требуется синтезировать при минимальных затратах структуру системы, у которой показатель живучести при двукратных электромагнит-

ных поражениях не меньше 0,65, т.е. $\Pi_{\text{треб}}^{(2)} \geq 0,65$, а стоимость затрат на резервирование $\sum_{j=1}^k w_j \rightarrow \min$, где k – число дополнительных элементов системы.

Математическая модель системы (1) примет следующий вид:

$$y_i(\tilde{x}) = y_i(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m) = \bigvee_{j=1}^{d_0} \left(\bigwedge_{k \in K_{R_j}} x_k \right), \quad i = \overline{1, 6}.$$

Предлагается следующая последовательность решения задачи.

Для исходной структуры S_0 определяется число элементов и число вершин графа: $m = 18$; $b = 9$.

При $q = \frac{1}{m-b} = \frac{2}{9} = 0,222$ вычисляются показатели: $\tilde{Z} = 0,722$; $\Pi_0^{(2)} = 0,504$.

Поскольку $\Pi_0^{(2)} = 0,504 < \Pi_{\text{треб}}^{(2)} = 0,65$, осуществляется переход к первому шагу оптимального резервирования исходной структуры.

Вычисляется количество связей полностью связанной структуры $C = C_b^2 = C_9^2 = 36$ и число исследуемых связей: $C_{\text{доп.}} = C_9^2 - m + b = 36 - 18 + 9 = 27$.

Для каждой из 27 дополнительных связей уточняется вид уравнений (1), вычисляется коэффициент эффективности $\gamma_1^{(2)} = \gamma_{0+1}^{(2)}$ и выбирается его максимальное значение: $\max \gamma_1^{(2)} = 0,005897$. Показатель живучести системы в этом случае равен $\Pi_1^{(2)} = 0,563$.

Так как $\Pi_1^{(2)} = 0,563 < \Pi_{\text{треб}}^{(2)} = 0,65$, осуществляется переход ко второму шагу оптимального резервирования.

В качестве исходной принимается система S_1 (рис. 1). Для нее $m = 19$; $b = 9$; $C_{\text{доп.}} = C_9^2 - m + b = 36 - 19 + 9 = 26$; $\tilde{Z} = 0,807$; $\Pi_1^{(2)} = 0,563$.

Математическая модель системы (1) примет вид

$$y_i(\tilde{x}) = y_i(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m) = \bigvee_{j=1}^{d_1} \left(\bigwedge_{k \in K_{R_j}} x_k \right), \quad i = \overline{1, 6}.$$

В результате расчета определено, что $\max \gamma_2^{(2)} = \max \gamma_{1+1}^{(2)} = 0,00442$. Показатель живучести системы в этом случае равен $\Pi_2^{(2)} = 0,619$.

Так как $\Pi_2^{(2)} = 0,619 < \Pi_{\text{треб}}^{(2)} = 0,65$, осуществляется переход к третьему шагу оптимального резервирования.

В качестве исходной принимается система S2 (рис. 1). Для нее: $m = 20$; $b = 9$; $C_{\text{доп}} = C_9^2 - m + b = 36 - 20 + 9 = 25$; $\tilde{Z} = 0,878$; $\Pi_2^{(2)} = 0,619$.

Система уравнений (1) примет вид

$$y_i(\tilde{x}) = y_i(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m) = \bigvee_{j=1}^{d2} \left(\bigwedge_{k \in K_{R_j}} x_k \right), \quad i = \overline{1,6}.$$

В результате расчета определено, что $\max \gamma_3^{(2)} = \max \gamma_{2+1}^{(2)} = 0,0069$.

Показатель живучести системы в этом случае равен $\Pi_3^{(2)} = 0,664$.

Так как $\Pi_3^{(2)} = 0,664 > 0,65$, процесс выбора структуры прекращается. В качестве искомой принимается структура системы S3 (рис. 1). При этом $\tilde{Z} = 0,926$, что в соответствии с формулой (11) в абсолютных значениях составит $\tilde{Z} = 0,926 \cdot 6 = 5,556$ объектов управления. Графики зависимостей показателя живучести $\Pi^{(1)}$ в зависимости от кратности поражающего воздействия l для различных структур системы управления приведены на рис. 2. Графики иллюстрируют повышение живучести системы управления при введении дополнительных связей. Таким образом, разработанная методика позволяет с максимальной эффективностью использовать дополнительные средства повышения живучести системы.

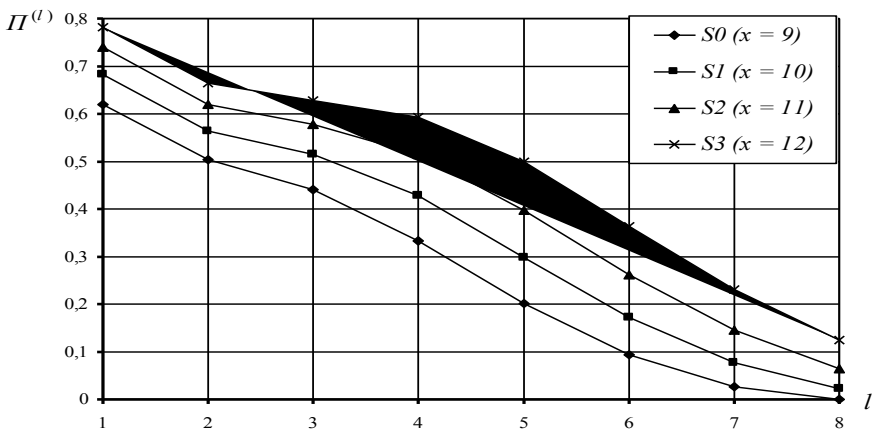


Рис. 2. Зависимость показателя живучести от кратности поражающих воздействий для различных структур системы управления

Выводы. В результате проведенного исследования разработана методика обеспечения живучести распределенных систем управления. Элементами этой методики являются: критерий оценки живучести, графоаналитическая модель, показатель эффективности использования дополнительных элементов, алгоритм поиска оптимальной структуры системы. Предлагаемая методика может стать основой для автоматизации процесса оперативного поиска структуры системы, удовлетворяющей заданным требованиям по живучести в экстремальной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкесов Г.Н. *Методы и модели оценки живучести сложных систем.* – М.: Знание, 1987. – 55 с.
2. Березюк Н.Т., Галунин А.Я., Подлесный Н.И. *Живучесть микропроцессорных систем управления.* – К.: Техника, 1988. – 143 с.
3. Додонов А.Г. и др. *Введение в теорию живучести вычислительных систем.* – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.
4. Литинский Г.Н., Ястребенецкий М.А. *Анализ живучести информационно-управляющих систем при сейсмических воздействиях // Электронное моделирование.* – 1993. – Т. 15, № 5. – С. 53 – 56.
5. Харченко В.С., Лысенко И.В., Мельников В.А. *Оценка и обеспечение живучести информационно-вычислительных и управляющих систем технических комплексов критического использования // Зарубежная радиоэлектроника.* – 1996. – № 1. – С. 64 – 80.
6. Яковлева А.П. *О проблеме живучести на функционально-дифференциальных включениях // Кибернетика и системный анализ.* – 2000. – № 5. – С. 134 – 137.
7. Fitzgerald K., Latifi S., Srimani P. *Reliability Modeling and Assessment of the Star-Graph Networks // IEEE Transaction on Reliability.* – 2002. – Vol. 51, № 1. – P. 49 – 57.
8. Cancela G., Urquart M. *Adapting Recursive Variance Reduction Simulation Techniques for Residual Connectedness Network Reliability Models // IEEE Transaction on Computer.* – 2002. – Vol. 51, № 4. – P. 439 – 443.
9. Батуков А.П., Скляр В.В. *Моделирование и оценка живучести управляющих систем при биномиальном распределении вероятности поражения их элементов // Электронное моделирование.* – 2001. – Т. 23, № 6. – С. 92 – 101.
10. Батуков А.П., Скляр В.В., Дегтяренко В.В. *Оценка эффективности экстремальных воздействий при поражении живучих систем // Системы обработки информации.* – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 4(20). – С. 19 – 24.

Поступила 21.07.2003

БАТУКОВ Анатолий Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент Харьковского военного университета. В 1961 году окончил Харьковское высшее авиационное инженерное военное училище. Область научных интересов – надежность и живучесть управляющих систем летатель-

ных комплексов.

СКЛЯР Владимир Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Государственного научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности. В 1992 году окончил Харьковское ВВКИУ РВ. Область научных интересов – методы оценки и обеспечения отказоустойчивости аппаратных и программных средств компьютерных систем управления.

ДЕГТЯРЕНКО Виталий Викторович, инженер кафедры Харьковского военного университета. В 1993 году окончил Харьковское ВВКИУ РВ. Область научных интересов – методы оценки и обеспечения живучести управляющих систем летательных комплексов.
