ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК
№ 3 ЭНЕРГЕТИКА 199

УДК 621.311:519.1—7

© 1992 г. НЕДОСЕКИН А. О.

АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ КОМБИНАТОРНО-ВЕРОЯТНОСТНЫМИ МЕТОДАМИ

Изложены методологические и методические основы анализа живучести систем энергетики комбинаторно-вероятностными методами. Обосновано само применение вероятностей при анализе живучести, введены понятия НВ-гипотезы и импликативной вероятностной схемы, предлагаются новые показатели живучести СЭ, рассмотрен пример анализа живучести.

Введение. Проблема обеспечения качественного функционирования систем энергетики (СЭ) в условиях неблагоприятных внешних воздействий (НВ) в настоящее время резко обострилась. Потеря ответственных функций глобальных СЭ, вызванная внешними причинами, может привести не только к массовому нарушению энергоснабжения потребителей, но и к возникновению ситуаций, чреватых угрозой человеку и окружающей среде.

Кроме традиционных внешних причин НВ на СЭ (стихийные природные воздействия, ошибки оператора и обслуживающего персонала), следует учитывать еще ряд специфических, присущих состоянию народного хозяйства страны на сегодня. Эти причины следующие: 1) низкое качество проектирования и ввода в эксплуатацию объектов СЭ, аварийное состояние трубопроводного транспорта (например, взрывы на газопроводах в Арзамасе и Башкирии); 2) нерегулируемая забастовочная борьба (забастовки в Кузбассе и Воркуте); 3) обострение межнациональных отношений (блокада Армении); 4) военная угроза; 5) организованная преступность и политический экстремизм; 6) последствия эпидемии СПИДа. Причины 4)—6) гипотетические, однако ими не следует пренебрегать.

Таким образом, существует острая необходимость в проведении общетехнических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение требуемой эффективности функционирования СЭ в экстремальных условиях, т. е. на обеспечение живучести. В силу специфики причин НВ и их ожидаемых последствий обеспечение живучести перестает быть только научно-технической проблемой.

Таким образом, предметом исследования живучести в энергетике становится не только техника, но и враждебное этой технике внешнее окружение (НВ). Изучение таких НВ уже прерогатива не специалистов-энергетиков, а, скорее, сейсмиков, социологов, медиков, психологов, военных (в зависимости от типа НВ). Построение междисциплинарной теории живучести СЭ невозможно без установления единых методологических основ этой теории. Одной из таких основ, по мнению автора, является вероятностный подход к моделированию живучести СЭ. Цель настоящей работы — определение основ анализа живучести СЭ при помощи комбинаторно-вероятностных методов, применение которых здесь обосновывается.

1. Описание объекта исследования. Объектом исследования живучести СЭ является физическая среда, включающая в себя собственно СЭ, ее враждебное внешнее окружение и их взаимосвязь.

2. Определение живучести СЭ. Живучесть СЭ в настоящей работе понимается согласно определению из [1] и [2] с рядом дополнительных оговорок:

2.1. В настоящей работе не рассматривается феномен «каскадности» аварий, внимание исследователей сосредоточено на моделировании их причин.

2.2. В исследовании принимается, что НВ являются внешними по отношению к рассматриваемой СЭ и имеют один фиксированный тип.

2.3. Живучесть СЭ определена в самом общем отношении к НВ (т. е. в периоды времени до, во время и после НВ).

2.4. В работе принимается, что СЭ не сохранила живучесть, если качество ее функционирования в условиях НВ упало ниже требуемого уровня, даже если это произошло в условиях недопущения каскадных вторичных последствий НВ.

3. Обоснование применения вероятностных методов к исследованию живучести СЭ.

3.1. Понятие «вероятность» [3]. «Вопросы применимости и интерпретации вероятности являются скорее философскими, гносеологическими, чем математическими...» [4, с. 84]. Применяя вероятностный подход к исследованию явлений, характеризующихся существенной неопределенностью, исследователь должен задаваться вопросом, что отражает используемые им вероятности: фактическую специфику исследуемой реальности или специфику его собственного рассудка, отражает ли вероятностное знание сущность познаваемого объекта или возможности познающего субъекта?

Так или иначе исследователь в процессе познания сталкивается с четырьмя типами знания: знание, описывающее материальный объект; знание, описывающее состояние субъекта; утверждения «чистой» математики; оценочные высказывания (суждения о ценностях).

Введем следующие обозначения: O — объект, S — субъект, G — знание. Тогда имеем шесть пар объектно-субъектно-гносеологических отношений, каждое из которых характеризуется своим типом вероятностей, отражающих данное отношение. Согласно терминологии работы [3] отношения O—O и S—S характеризуются так называемыми **объектными** вероятностями, отношение O—G — валентными вероятностями, отношение G—G — импликативными вероятностями, а отношения O—S и G—S — **аксиологическими (субъективными)** вероятностями.

В качестве примеров применительно к живучести энергетики можно привести следующие.

1. а) объектная статистическая вероятность отказа элемента СЭ; б) объектная нестатистическая вероятность разрушения объекта СЭ при сейсмовоздействии фиксированного числа баллов.

2. Валентная вероятность истинности высказывания: «При сейсмовоздействии в 8 баллов этот объект будет полностью разрушен».

Можно сразу отметить разницу между фактическим состоянием физической среды «объект СЭ — сейсмовоздействия», которое обладает своей объектной вероятностной мерой, и «валентным» характером нашего знания этой меры.

3. Импликативная вероятность разрушения двух объектов СЭ из N при условии, что априорная валентная вероятность разрушения одного объекта в серии из n сейсмоударов составляет $(1 - \beta_n)$ и все объекты подвергаются воздействию в одинаковой мере.

4. Оценочная вероятность возникновения возмущения в СЭ при условии, что одно из них обязательно произойдет.

Следует сделать замечание, что в отличие от первых трех типов вероятностей аксиологические вероятности (аксиология — наука о ценностях) выражают степень полезности, предпочтения, доверия или рациональной (разумной) веры. В отличие от объектных или логических вероятностей, которые отражают синтаксические и семантические особенности системы знания, аксиологическая вероятность рассматривается как прагматическое отношение, т. е. как основание для выбора [3, с. 38].

Таким образом, мы в своем исследовании располагаем четырьмя типами вероятностей. Это разнообразие вкупе с единой для всех указанных типов

вероятностей аксиоматической вероятностью создает единый инструмент для исследования живучести СЭ с учетом разнотипности и существенной информационной неопределенности в части НВ и их последствий в СЭ.

3.2. Оценка вероятностей и принцип максимума неопределенности. Проблема достоверного оценивания вероятностей — ключевая в применении вероятностных методов. Наилучшим образом эта проблема решается применительно к объектным статистическим вероятностям, которые успешно оцениваются методами математической статистики на основе испытаний. В остальных случаях оценка вероятностей приобретает субъективно-гносеологический подтекст и зачастую обращается в субъективный произвол. Часто в литературе по вероятностному анализу живучести встречаем: «Пусть вероятность поражения объекта равна...». Спрашивается: почему так, а не иначе, и какова цена решениям, принятым на столь зыбком основании?

В то же время в теории принятия решений в условиях неопределенности проблема оценки вероятностей возникновения тех или иных ситуаций поднимается со времен Бернулли. Обобщенный принцип Бернулли — Лапласа — Гиббса — Джейнса [5] гласит в связи с этим: наиболее достоверной оценкой вероятностей является та, что максимизирует наличную неопределенность относительно значений этих вероятностей. В случае полной неопределенности наиболее достоверна равновероятностная оценка.

Итак: а) существенная информационная неопределенность в большинстве случаев не дает возможности для использования вероятностей объектного типа; б) валентные и аксиологические вероятности могут быть достоверно оценены на основе принципа максимума неопределенности; в) ипликативные вероятности могут быть выведены логически. Действительно, неопределенность в части исходной вероятностной информации совсем не означает неопределенности в части используемых вероятностных гипотез. Так, если мы бросаем шестигранный кубик с номерами, то знаем, что априорное распределение числа появившихся за n опытов одинаковых граней имеет шестипараметрическое полиномиальное распределение, и форма этого распределения не зависит от исходных априорных вероятностей выбрасывания той или иной грани.

3.3. Верификация оптимальности решений [6]. Вектор оценок исходных вероятностей, полученный на основе принципа максимума неопределенности, образует в многомерном поле своих значений так называемую контрольную точку. Совокупность альтернатив решений по обеспечению живучести СЭ разбивает это многомерное поле на подобласти оптимальности предлагаемых решений, и та из них, в которую попадает контрольная точка, соответствует оптимальному решению для данной информационной ситуации об исследуемой физической среде. Топология области оптимальности задает чувствительность оптимальности принимаемого решения к колебаниям исходных данных. Таким образом, возникает возможность оценки интегрального риска по принятии решения; в идеальном случае этот риск является нулевым, а решение — безусловно оптимальным.

3.4. Соотношение вероятностных и минимаксных подходов в исследованиях живучести СЭ. Достаточно хорошо разработанные в [2, 5, 7 и др.] минимаксные методы оценки и обеспечения живучести СЭ полагают оптимальным то техническое решение, которое минимизирует максимально возможный возникающий в связи с НВ ущерб в СЭ. В такой постановке задачи нет места вероятностному описанию и в целом использование вероятностей в задачах живучести СЭ представляется авторам работы [2] сомнительным, а И. А. Ушакову [7] — лишенным смысла занятием («...внешние воздействия могут носить не только естественный, но и преднамеренный характер, т. е. на множество воздействий не имеет смысла вводить вероятностную меру»).

Реабилитация вероятностных подходов возможна, если «сыграть» на ряде неясностей в минимаксной постановке задачи, которые могут быть сформулированы примерно так, как приведены ниже.

1. Почему оптимальность решения выводится из минимизации максимума

ущерба? Возможно, потому, что именно ожидается максимальный ущерб. Почему именно такой ущерб ожидается?

2. Известен ли кому-либо характер воздействий на СЭ? Почему мощность воздействий предполагается фиксированной и иногда измеряется в единицах электрической мощности [2]?

3. Почему вполне известны последствия НВ в СЭ (обычно в минимаксных постановках задачи живучести подверженный НВ объект поражается однозначно). И даже если вводится понятие стойкости объекта СЭ к НВ, то почему эта стойкость интерпретируется в моделях живучести некоторой фиксированной величиной затрат (как, например, в ссылках обзора [8])?

Перечисленные неясности имеют одну общую причину: воздействия на СЭ рассматриваются как преднамеренные, причем предполагаются или самой структурой модели, или интуитивно. Соотношение определенности и неопределенности в моделях выбирается в пользу полной определенности (сценарности) модельных факторов. Парадоксально, но последнее как раз маскирует полную неопределенность НВ: поскольку ничего не известно о НВ, пусть его величина составляет 50 МВт на одно воздействие. Но в действительности о НВ известно не так уж мало: поражающая способность применяемого оружия, ожидаемая балльность землетрясения, распределение координат его эпицентра и т. д. Но эти знания обычно не учитываются; по сути дела НВ и не исследуется, и не моделируется. Исследуется лишь сама СЭ, что применительно к задачам живучести методологически неоправдано.

Таким образом, сценарность, присущая минимаксному подходу, исчезает, как только мы исследуем фактическое соотношение определенности и неопределенности в части состояний физической среды «НВ — СЭ». Появляются несколько реально ожидаемых сценариев. Требование единого показателя живучести заставляет осуществлять свертку отдельных показателей живучести в аддитивный показатель живучести на основе системы весовых коэффициентов, характеризующих ожидаемый вклад того или иного сценария в общую картину. Эти вклады обычно оцениваются экспертно и представляют собой не что иное как субъективные вероятности, и при идеально произведенной экспертизе значения этих вероятностей будут совпадать с вероятностями, полученными на основе принципа максимума неопределенности и импликативных вероятностных схем (см. [3]).

4. НВ-гипотезы и соответствующие им импликативные вероятностные схемы.

Представленное обоснование применения вероятностных методов к исследованию живучести дает возможность конструировать вероятностную НВ-гипотезу (НВ-тест). Далее будем использовать обобщенную НВ-гипотезу следующего вида:

НВ представляет собой поток элементарных событий, следующих друг за другом через малые промежутки времени;

момент наступления первого НВ предполагается известным;

НВ обладает стратегией, выражающейся через вероятностный закон распределения деформаций НВ по элементам системы и через зависимость текущего элементарного НВ от предыстории. Назовем стратегию НВ независимой, если содержание текущего НВ не зависит от предыстории поражения элементов в СЭ. Если пораженный элемент исключается из рассмотрения в последующих НВ (не подлежит НВ), то будем называть такую НВ-стратегию зависимой.

Определенному типу НВ-гипотезы, как будет видно далее, однозначно соответствует своя импликативная вероятностная схема. Введем N — число объектов СЭ, n — число НВ на СЭ, y — состояние СЭ, y_u — состояние СЭ, характеризующееся u пораженными при НВ объектами СЭ, $Pr(y \mid n)$ — вероятность перехода СЭ в состояние y за n НВ. В таблице приведены некоторые возможные импликативные вероятностные схемы. Соответствующие им формулы:

№ п/п	Тип стратегии: нс — независимая зс — зависимая	Число одновременно попадающих в НВ объектов (кратность НВ)	Вероятность возникновения текущего j-го НВ $j = \overline{1, n}$	Стойкость i-го объекта СЭ к j-му НВ	Номер соотношения для импликативных вероятностей	Источник
1	нс	1	$1/N$	0	(1)	[10, 11]
2	нс		$\binom{N}{r}^{-1}$	0	(2)	[10]
3	зс	1	$(N-j+1)^{-1}$	0	(3)	[11]
4	зс	r	$(N-jr+1)^{-1}$	0	(4)	—
5	зс	1	$(N-j+1)^{-1}$	p_1	(5)	—
6	зс	r	$(N-jr+1)^{-1}$	p_1	(6)	—
7	нс	1	γ_i, $i = \overline{1, N}$ i — номер объекта СЭ	p_{ij}	(7)	[13]

$$Pr_1(y_u \mid n) = N^{-n}\binom{N}{u}\, u!\, S(n, u), \tag{1}$$

где $S(n, u)$ — числа Стирлинга второго рода [9], (:) — комбинаторное число сочетаний;

$$Pr_2(y_u \mid n, r) = \binom{N}{r}^{-n}\binom{N}{u}\sum_{\partial=0}^{u}(-1)^{u+\partial}\binom{u}{\partial}\binom{\partial}{r}^{n}, \tag{2}$$

$$Pr_3(y_u \mid n) = \Delta_{un} = \begin{cases} 1, & u = n \\ 0, & u \neq n \end{cases}, \tag{3}$$

$$Pr_4(y_u \mid n, r) = \Delta_{u(n \cdot r)}, \tag{4}$$

$$Pr_5(y_u \mid n, p_1) = \binom{n}{u} p_1^{n-u}(1-p)^u, \tag{5}$$

где p_1 — вероятность сохранения работоспособности объекта СЭ при одноразовом НВ;

$$Pr_6(y_u \mid n, r, p_1) = \binom{n\,r}{u} p_1^{nr-u}(1-p_1)^u, \tag{6}$$

$$Pr_7(y \mid n) = \sum_{(n_1 + \ldots + n_N = n)} \binom{n}{n_1 \ldots n_N} \prod_{i=1}^{N} \gamma_i\, Pr(x_i \mid n_i), \tag{7}$$

где $(\ldots)$ — полиномиальный коэффициент, x_i — индикатор поражения i-го объекта СЭ (1, если объект не поражен, 0 — поражен).

$$Pr(x_i \mid n_i) = \begin{cases} P_{in_i}, & x_i = 1 \\ 1 - P_{in_i}, & x_i = 0 \end{cases}. \tag{8}$$

Используя результаты теории случайных размещений и аппарат взаимно противоположных комбинаторных тождеств [9], можно получить (что и было сделано) еще 10—20 импликативных схем вида (1) — (7). Приведение этих схем ограничивается рамками одной публикации. Отметим лишь, что конструируя ту или иную схему, следует максимально правдоподобно моделировать ожидаемые НВ. Тем самым строится некий НВ-тест, по реакции СЭ на него можно судить о мере живучести исследуемой СЭ.

5. Показатели живучести СЭ.

Введем Y — множество работоспособных состояний СЭ по выбранному критерию. Выделим три класса показателей живучести СЭ: детерминированные, вероятностные и интегральные.

5.1. Детерминированные показатели живучести СЭ:

1) $d_Y = c_Y - 1$ [14, 15], (9)

где c_Y — минимальное число элементов СЭ, поражение которых приводит к отказу СЭ по Y-критерию;

2) m_Y — максимальное число элементов СЭ, поражение которых не приводит к отказу СЭ по Y-критерию;

3) $F_Y(u)$ — число работоспособных по Y-критерию состояний СЭ при условии u пораженных элементов СЭ. Справедливо также

$$F_Y(d_Y) = \binom{N}{D_Y}, \quad F_Y(d_Y + 1) < \binom{N}{d_Y + 1},$$

$$F_Y(m_Y) > 0, \quad F_Y(m_Y + 1) = 0; \tag{10}$$

4) n_Y — минимальное число НВ, которое может привести к отказу СЭ [2, 16].

5.2. Вероятностные показатели живучести СЭ:

6) условный закон выживаемости СЭ по Y-критерию — вероятность сохранения работоспособности СЭ при условии n НВ:

$$R_Y(n) = Pr(\forall\ y \in Y \mid n), \tag{11}$$

7) условный закон уязвимости СЭ по Y-критерию

$$Q_Y(n) = Pr(\forall\ y \bar{\in} Y \mid n) = 1 - R_Y(n). \tag{12}$$

5.3. Интегральные показатели живучести СЭ. Определим множество работоспособных состояний СЭ Y скалярно:

$$Y = \{D > (1 - \varepsilon)\, D_0\}, \tag{13}$$

где D — максимум эффективности функционирования СЭ, ε — уровень предельно допустимого относительного дефицита эффективности, D-варианта. Тогда интегральные показатели:

8) средний ожидаемый относительный дефицит эффективности

$$\bar{\varepsilon}(n) = \int_0^1 Q_Y(n)\, d\varepsilon, \tag{14}$$

где Y имеет вид (13);

9) коэффициент сохранения эффективности

$$K(n) = 1 - \bar{\varepsilon}(n), \tag{15}$$

10) среднеожидаемое значение дефицита эффективности функционирования СЭ

$$\Delta\bar{D}(n) = \bar{\varepsilon}(n)\, D_0, \tag{16}$$

11) среднеожидаемое значение эффективности функционирования

$$\bar{D}(n) = \bar{k}(n)\, D_0 = D_0 - \Delta D(n). \tag{17}$$

При этом термин «среднеожидаемый» применительно к показателям пунктов 10) и 11) означает, что проводится осреднение по всем возможным сценариям НВ на СЭ.

6. Обобщенная постановка задачи. Рассматривается физическая среда, в которую входят СЭ и случайно распределенные по ней НВ. При этом СЭ характеризуется: 1) целями функционирования, изменяющимися с изменением условий функционирования; 2) технической, алгоритмической и функциональной структурами (16); 3) назначением и функциональными особенностями элементов

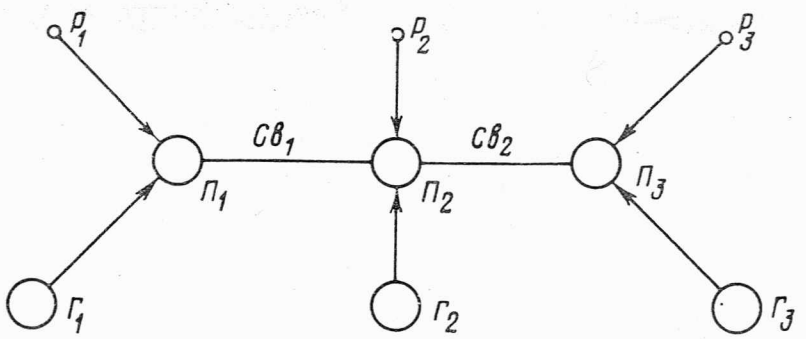

Рис. 1. Структура трехгенераторной электроэнергетической системы

системы; 4) текущим состоянием системы, обусловленным состояниями элеме и связей между ними; 5) критерием работоспособности системы — гран между множествами работоспособных и неработоспособных состояний СЭ характеристиками средств обеспечения живучести (СОЖ) четырех типов: внеш СОЖ противостояния НВ (например, системы безопасности, региональные с ства противовоздушной обороны (ПВО)); внутренних СОЖ противостояния (например, объектовые средства ПВО, защитные укрытия, противосейсмиче инженерные решения); внутренних СОЖ борьбы за живучесть в условиях фекта гонок» (16) (скажем, таких, как средства пожаротушения, аварийно-становительные команды, источники автономного энергоснабжения); внеш СОЖ аварийного восстановления системы из последствий НВ (скажем, с гражданской обороны и т. п.).

Внешнее окружение СЭ характеризуется своим пространством НВ (полиго НВ) в аспектах: 1) расчетным числом НВ; 2) расчетной стратегией НВ; расчетной интенсивностью и продолжительностью НВ; 4) уровнем неопреде ности об НВ, обусловленной соответствующей информационной ситуацией (тер заимствован из [5]) [1].

Отображение пространства НВ на пространство состояний СЭ обусловли ряд дополнительных аспектов, связанных с этим отображением, а именно пол множество допустимых зон НВ; информационную ситуацию о функционирова СОЖ в условиях заданных НВ, выбранных из множества допустимых.

Появляется необходимость проанализировать живучесть СЭ в данной по новке задачи и выдвинуть инженерные рекомендации и технические предложен направленные на повышение живучести рассматриваемой СЭ.

7. Пример анализа живучести СЭ комбинаторно-вероятностными метода Рассмотрим пример, который иллюстрирует анализ живучести СЭ вероятностны методами, а также решение задачи оптимизации СЭ по критерию живучес

7.1. Постановка задачи. Трехгенераторная электроэнергетическая сист (рис. 1) функционирует в условиях n НВ. Ниже приведены значения генера Γ_i в узлах $i = \overline{1,3}$, нагрузки Π_i, а также исходных значений подводимого к уз непоражаемого при НВ ресурса генерации P_i суммарной мощностью $P = 6$ М

i	Γ_i, МВт	Π_i, МВт	P_i, МВт
1	7	10	2
2	15	10	2
3	12	10	2

Требуется сделать анализ живучести данной ЭЭС при следующих допущен математической модели.

А. Допущения об ЭЭС: а) пропускные способности межузловых связей

[1] Под информационной ситуацией здесь и далее понимается формально описанная гра между знанием и незнанием об объекте исследования (например, система предпочтений одних другим).

и $Св_2$ достаточны для любых перетоков мощности в ЭЭС; б) критерий работоспособности ЭЭС Y — обеспечение требуемой нагрузки в каждом из узлов ЭЭС, т. е. $Y = \{П_i = 10$ МВт, $i = \overline{1,3}\}$.

Б. Допущения о НВ: а) стратегия НВ — независимая; б) n — число НВ.

В. Совместные допущения об ЭЭС и НВ: а) зоны НВ $\{Г_1\}$, $\{Г_2\}$, $\{Г_3\}$, $\{Св_1\}$, $\{Св_2\}$; б) существует система предпочтений одних НВ другим, зафиксированная рядом приоритетов одних зон НВ перед другими

$$\{Г_2\} \succ \{Г_1\} \succ \{Г_3\} \succ \{Св_1\} \ominus \{Св_2\},$$

где $\succ$ означает отношение строгого предпочтения, а $\ominus$ — отношение безразличия. Отсюда

$$\gamma_{Г_2} > \gamma_{Г_1} > \gamma_{Г_3} > \gamma_{Св_1} = \gamma_{Св_2},$$

где γ_Θ — вероятность нанесения НВ по зоне Θ;

$$\Sigma_{(\Theta)} \gamma_\Theta = 1$$

в) элементы ЭЭС являются нестойкими к НВ.

(Замечание. Здесь и далее мы ничего не говорим о значениях вероятностей γ_Θ).

7.2. Решение задачи анализа. Проанализируем живучесть ЭЭС по выбранным показателям вида (9)—(12). Прямой полный перебор состояний ЭЭС показывает, что ЭЭС остается работоспособной всего в трех состояниях: 1) ни один из элементов не поражен при НВ; 2) поражена только связь $СВ_2$; 3) поражен только генератор $Г_1$. Поражение же генераторов $Г_2$, $Г_3$ в связи $Св_1$ приводит к отказу ЭЭС по выбранному критерию.

Получаем

$$d_Y = 0, \tag{18}$$

$$m_Y = n_Y = 1, \tag{19}$$

$$F_Y(0) = 1, \quad F_Y(1) = 2, \quad F_Y(2 \div 5) = 0. \tag{20}$$

Оценим $R_Y(n)$ и $Q_Y(n)$ на основе схемы Горшкова (7) [3] при $p_{ij} = 0^j$ (см. таблицу):

$$R_Y(n = 1) = \gamma_{Г_1} + \gamma_{Св_2},$$

$$R_Y(n = 2) = \gamma^2_{Г_1} + \gamma^2_{Св_2},$$

$$\ldots$$

$$R_Y(n) = \gamma^n_{Г_1} + \gamma^n_{Св_2}, \tag{21}$$

$$Q_Y(n) = 1 - \gamma^n_{Г_1} - \gamma^n_{Св_2}. \tag{22}$$

При получении формул (18)—(22) был использован полный перебор состояний ЭЭС, $2^5 = 32$. Определение эффективности функционирования СЭ в каждом конкретном состоянии осуществлялось на основе простейшей потоковой модели.

Возникает вопрос, возможно ли распорядиться суммарным ресурсом генерации с тем, чтобы максимизировать живучесть ЭЭС. Здесь требуется решение задачи оптимизации в следующей постановке:

$$R_Y(n) \to \max,$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = P = \text{const},$$

$$P_i \geq 0.$$

7.3. Решение задачи оптимизации. Для $n = 1$

$$R_y(n = 1) = \gamma_{Г_1} + \gamma_{Св_2} + \gamma_{Св_1}\delta_{Св_1}, \tag{23}$$

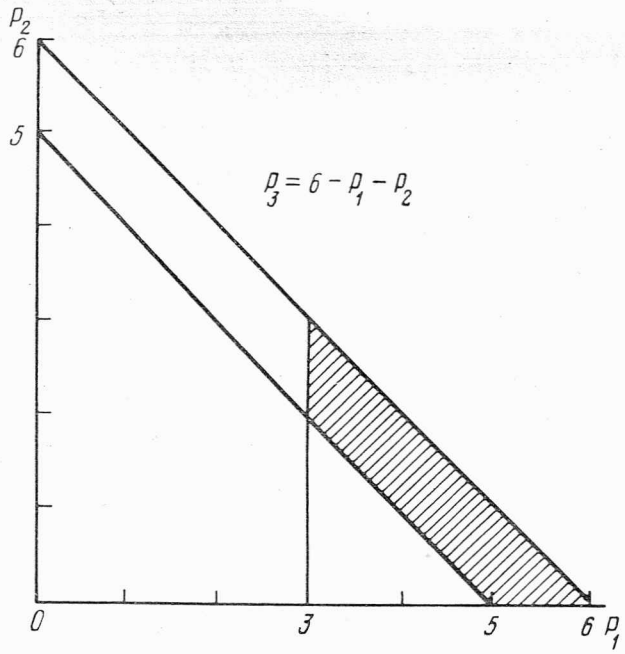

Рис. 2. Оптимальное распределение ресурса генерации

где

$$\delta_{Св_1} = \begin{cases} 1, & P_1 \geq 3 \\ 0, & P_1 < 3 \end{cases}.$$

Здесь видно, что если $P_1 \geq 3$, то элемент $Св_1$ перестает быть «узким» в смысл живучести местом. Положив

$$P_1 \in [3, 6], \quad P_2 + P_3 \in [0, 3[, \tag{2}$$

максимизируем (23)
Тогда

$$d_Y = 0, m_Y = 2 = n_Y + 1,$$

$$F_Y(0) = 1, \quad F_Y(1) = 3, \quad F_Y(2) = \begin{cases} 1, & P_1 + P_2 < 5 \\ 2, & P_1 + P_2 \geq 5 \end{cases},$$

$$F_Y(3-5) = 0.$$

При $n = 2$

$$R_Y(n=2) = \gamma^2_{Г_1} + \gamma^2_{Св_1}\delta_{Св_1} + \gamma^2_{Св_2} + 2\gamma_{Г_1}\gamma_{Св_2}\delta_{Г_1Св_2} + 2\gamma_{Св_1}\gamma_{Св_2}\delta_{Св_1Св_2},$$

где

$$\delta_{Св_1} = \begin{cases} 1, & P_1 = 3 \\ 0, & P_1 < 3 \end{cases},$$

$$\delta_{Г_1Св_2} = \begin{cases} 1, & P_1 + P_2 \geq 5 \\ 0, & P_1 + P_2 < 5 \end{cases},$$

$$\delta_{Св_1Св_2} = \begin{cases} 1, & P_1 \geq 3 \\ 0, & P_1 < 3 \end{cases}.$$

Теперь максимум живучести достигается при

$$P_1 \geq 3, \quad P_1 + P_2 \geq 5, \quad P_3 = 6 - P_1 - P_2 . \tag{2}$$

Графически область оптимального распределения ресурса (25) показана на р 2 (область заштрихована). Видим, что относительно (24) произошло некотор ужесточение ограничений на допустимое значение ресурса в каждом из узл

И наконец, поскольку при распределении ресурса (25) достижимы все работоспособные состояния ЭЭС при однократном и двукратном поражениях объектов ЭЭС (при трехкратном и более поражениях таких состояний нет), то (25) является оптимальным распределением ресурса генерации при любых n.

Решение задачи оптимизации показывает, что даже в условиях полной неопределенности относительно значений аксиологических вероятностей γ_Θ мы в состоянии принимать уверенные проектные решения по обеспечению живучести СЭ. Это обусловлено существенными структурно-функциональными особенностями самой СЭ, которые эффективно выявляют вероятностное НВ-тестирование. Однако не следует думать, что риск принятия решения по обеспечению живучести СЭ отсутствует и в других подобных задачах. Напротив, по мере усложнения СЭ возрастает и многовариантность НВ, что часто вызывает сужение области оптимальности принимаемых решений.

Выводы. Возникновение в СЭ прецедента масштабных аварий с катастрофическими последствиями, а также рост числа причин подобных аварий требуют специальных научных исследований. Существенная неопределенность в части воздействий и их последствий в СЭ делают невозможным использование традиционных методов анализа надежности СЭ в указанных случаях. Появляются некоторые сомнения в возможности использования и известных минимаксных методов при анализе живучести СЭ. В настоящей работе при анализе живучести СЭ предлагается применять комбинаторно-вероятностные методы. Основные особенности этих методов:

1. В качестве исходных данных при анализе живучести используются вероятности трех основных типов: объектные, валентные, аксиологические. Возможность применения вероятностей того или иного типа в каждом случае рассматривается отдельно.

2. Исходные вероятности оцениваются наилучшим образом на основании результатов теории принятия решений в условиях неопределенности.

3. Результирующие вероятностные показатели живучести оцениваются по специальным импликативным вероятностным схемам, которые однозначно соответствуют принимаемой гипотезе о воздействии (НВ-гипотезе).

4. По результатам теории принятия решений в условиях неопределенности верифицируется оптимальность принимаемых решений в условиях колебаний исходной вероятностной информации.

5. Вся функционально-технологическая специфика конкретной СЭ учитывается в соответствующей функциональной модели. В то же время вероятностные описания носят инвариантный характер относительно специфики СЭ. Это говорит о том, что методология исследования живучести СЭ комбинаторно-вероятностными методами не меняется при переходе от одного типа СЭ к другому (скажем, от электроэнергетической системы к системе газоснабжения). Эта особенность делает возможным исследование живучести топливно-энергетического комплекса страны или региона на основе единой функционально-вероятностной модели.

6. Из работы видно, что задача обеспечения живучести СЭ понимается здесь как специфическая задача управления эффективностью кибернетической системы в условиях сильных внешних возмущений. Отсюда же вытекает и методика исследования живучести: по аналогии с теорией автоматического управления (где передаточная функция элемента может быть определена по реакции отклика этого элемента на известный входной сигнал) можно заметить, что живучесть как свойство в работе исследуется по значению показателей живучести как отклику на фиксированный вероятностный НВ-тест.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 21027-75. Системы энергетические. Термины и определения.
2. *Руденко Ю. Н., Ушаков И. А.* Надежность систем энергетики. М.: Наука, 1986. 252 с.
3. *Кравец А. С.* Природа вероятности. М.: Мысль, 1976. 173 с.
4. *Реньи А.* Письма о вероятности. М.: Мир, 1970. 93 с.

5. *Трухаев Р. И.* Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981.
6. *Недосекин А. О.* Обеспечение функциональной живучести сетей связи: анализ и принятие ний//Пути совершенствования сетей и комплексов технических средств связи. Отраслевая молодых ученых и специалистов. Л.: НПО «Красная заря», 1989. С. 10—13.
7. *Ушаков И. А.* О живучести территориально-распределенных систем//Методические вопрос следования надежности больших систем энергетики. Вып. 20. Иркутск: СЭИ СО АН С 1980. С. 10—14.
8. *Малашенко Ю. Е., Рогожин В. С., Ферапонтов Е. В.* Живучесть сетевых систем. М. В СССР, 1989. 62 с.
9. *Риордан Дж.* Комбинаторные тождества. М.: Наука, 1982. 256 с.
10. *Недосекин А. О.* Анализ живучести автоматизированного комплекса на основе точечной ли//Приборы и системы управления. 1989. № 11. С. 12—14.
11. *Недосекин А. О.* Сопоставительный анализ безотказности и живучести технических сис сетевой структурой//Повышение качества и надежности промышленных изделий: Тез. док ЛДНТП, 1989. С. 15—18.
12. *Рябинин И. А., Парфенов Ю. М.* Надежность и эффективность структуры сложных техниче систем//Основные вопросы теории и практики надежности. Минск: Наука и техника, С. 25—40.
13. *Горшков В. В.* Логико-вероятностный метод расчета живучести сложных систем//Киберне 1982. № 1. С. 104—107.
14. *Недосекин А. О.* Связь отказоустойчивости и живучести в функционально-избыточных техниче системах//Проблемы комплексной автоматизации судовых технических средств: Тез. докл НПО «Аврора», 1989. С. 208—209.
15. *Черкесов Г. Н.* Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, МДН 1987. 56 с.
16. *Астров В. В., Симаков И. П., Черкесов Г. Н.* Применение методов вероятностной логи исследования операций к анализу живучести пространственно-распределенных энергетиче систем//Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1980. С. 32—42.

Санкт-Петербург

Поступила в редак 1.III.