ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

С. Г. Саркисян

К вопросу об определении величины аварийного резерва в энергетической системе

В энергетических системах вопрос установления величины аварийного резерва мощности и энергии имеет существенное значение в деле бесперебойного энергоснабжения потребителей.

Однако способы определения величины необходимого аварийного резерва до настоящего времени не являются строго установленными.

Действующие руководящие указания по проектированию электрических систем [9] предусматривают величину аварийного резерва в размере 10% максимума системы, но не меньше мощности наиболее крупного агрегата. Во всяком случае резервная мощность должна быть такой, чтобы при выходе из строя наиболее мощного агрегата была обеспечена возможность поддержания стандартной частоты без отключения потребителей. Это положение основывается на данных опыта эксплуатации энергетических систем без расчетного обоснования.

Предложенные в научно-технической литературе методы теоретической оценки аварийного резерва основаны на применении законов теории вероятностей, в частности биномиального закона [1, 2, 3, 5, 7, 12], который, как известно, выражается через:

$$P_{n(m)} = C_n^m p^m q^{n-m}, \quad (1)$$

где p — средняя продолжительность аварийного простоя агрегата (показатель аварийности),

$q = 1 - p$ (показатель надежности),

m — число агрегатов в аварии,

n — число рабочих агрегатов системы.

М. А. Мостковым был предложен метод расчета аварийного резерва, основанный на Пуассоновом законе [6].

При вероятностной схеме расчета аварийного резерва обычно принимают, что все рабочие агрегаты по мощности равны либо средней мощности агрегата [2], либо — максимальной [1], т. е. в расчеты вводится приведенное, фиктивное число агрегатов.

Показатель аварийности p в этих расчетах принимается для некоторого приведенного „единичного“ агрегата, без учета мощности отдельных машин и их места в графике нагрузки системы.

Результаты расчетов при таких допущениях получаются разные, что нетрудно показать на приводимом ниже числовом примере.

В качестве примера принята энергосистема с установленной мощностью $N_{уст.} = 175$ мвт в 20 агрегатах различной мощности.

Мощность самого крупного агрегата системы равна 25 мвт. Средняя продолжительность аварийного простоя „единичного“ агрегата, в соответствии с имеющимися рекомендациями [11], принята равной 0,007 годового времени.

Средняя мощность агрегата получается равной 8,75 мвт.

Если все агрегаты системы привести к мощности самого крупного агрегата, то система будет состоять из 7 приведенных агрегатов.

Определение вероятностей аварийного выхода из строя агрегатов проведено по формуле (1) в двух вариантах (см. табл. 1). В первом варианте принято, что система состоит из 20 агрегатов мощностью по 8,75 мвт каждый. Во втором варианте принято, что в системе установлено 7 агрегатов мощностью по 25 мвт. Данные таблицы 1 показывают, что вероятности аварийного выхода агрегатов из строя в первом варианте значительно больше, чем во втором.

Таблица 1

Число агрегатов в аварии	1-й вариант $P_n(m)$	2-й вариант $P_n(m)$
один агрегат	0,1208	0,0469
два	0,00809	0,000993
три	0,000342	0,0000116
четыре	0,00001025	0,00000082

Так как выражение (1) представляет „математическое ожидание“, определяющее количественно как вероятность аварийного выхода из строя агрегатов, так и вероятную продолжительность одновременной аварии m агрегатов при исправном состоянии остальных n машин системы, то умножение данных таблицы 1 на календарное время дает продолжительности аварийного простоя различного числа агрегатов системы в часах (см. таблицу 2).

Таблица 2

Число агрегатов в аварии	Вероятный простой агрегатов при $n_1 = 20$ в часах	Вероятный простой агрегатов при $n_1 = 7$ в часах	Фактический простой агрегатов в часах
0	7827	8340	7818
1	1059,1	411,31	918,3
2	70,9	8,69	20,7
3	2,91	0,115	2,6
4	0,090	0,00072	0,4

При сопоставлении продолжительности аварийного простоя агрегатов, определенных по вероятностной схеме, с фактическими данными по аварийности гидроагрегатов в рассматриваемой системе, не трудно заметить, что данные первого варианта ближе к фактическим.

Изучение данных таблиц 1 и 2 показывает, что вероятность выхода одновременно четырех агрегатов практически равна нулю.

Следовательно, чтобы обеспечить бесперебойную работу энергосистемы достаточно установить три резервных агрегата. Выработку каждого резервного агрегата нетрудно определить с помощью выражения

$$\mathcal{E}_{рез} = N_{рез} P_{п(м)} T_0 k_n, \quad (2)$$

где $N_{рез}$ — мощность резервного агрегата,

T_0 — календарное время в году,

k_n — коэффициент использования установленной мощности системы.

В таблице 3 даны вероятные выработки электроэнергии резервными агрегатами при коэффициенте $k_n = 0,515$.

Таблица 3

Порядковый номер резервных агрегатов		1-й	2-й	3-й
Выработка электроэнергии резервными агрегатами в <i>млн</i>	первый вариант	4760000	318000	13500
	второй вариант	5280000	111800	1305

В первом варианте мощность резервного агрегата принята равной мощности осредненного агрегата, т. е. $8,75$ *млвт*, а во втором варианте — мощности самого крупного агрегата — 25 *млвт*.

В результате проведенных выше расчетов по двум вариантам получились весьма разноречивые данные, не позволяющие оценить достоинства того или другого способа. Кроме того, эти способы не дают возможности определить величину выходящей из строя мощности и соответствующую ей аварийную недовыработку электроэнергии в системе.

В практике проектирования и эксплуатации энергетических систем важно знание вероятности аварийного выхода из строя той или иной рабочей мощности системы. Этому требованию в значительной степени удовлетворяет предлагаемый ниже способ расчета вероятностей аварийного выхода из строя различной рабочей мощности. Суть способа поясняется на примере энергетической системы, в которой установлено 20 агрегатов с суммарной мощностью 260 *млвт*. В расчетах принят показатель аварийности единичного агрегата $p = 0,7\%$ годового времени.

Если допустить, что из 20 рабочих агрегатов $n_1 = 12$ агрегатов имеют мощность по $N_1 = 5$ *млвт*, а $n_2 = 8$ агрегатов имеют

мощность по $N_2 = 25$ *мгвт*, то при выходе из строя одного агрегата последний может быть либо мощности N_1 , либо мощности N_2 . В первом случае в работе остается 11 машин мощности N_1 и 8 машин мощности N_2 , а во втором случае в работе будет 12 машин мощности N_1 и 7 машин мощности N_2 .

При выходе из строя двух агрегатов, оба могут оказаться мощности N_1 или мощности N_2 , либо один мощности N_1 , а другой мощности N_2 . В первом случае в работе останется 10 N_1 и 8 N_2 , во втором случае в работе будут 12 N_1 и 6 N_2 и, наконец, в третьем случае в работе будут 11 N_1 и 7 N_2 . Рассуждая подобным образом, можно определить оставшиеся в работе агрегаты при авариях любого числа их.

Вероятность аварийного выхода из строя агрегатов каждой группы и их сочетания определяется с помощью рекуррентной формулы, полученной из выражения (1) следующим путем: вероятность нахождения в аварии m агрегатов равна:

$$P_{n(m)} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} = \\ = \frac{n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1}{m(m-1)\dots 2 \cdot 1 \cdot (n-m)(n-m-1)\dots 2 \cdot 1} p^m q^{n-m}.$$

При выходе из строя $m+1$ агрегатов из числа n эта вероятность будет равна:

$$P_{n(m+1)} = \frac{n!}{(m+1)!(n-m-1)!} p^{m+1} q^{n-m-1} = \\ = \frac{n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1}{(m+1) \cdot m \dots 2 \cdot 1 \cdot (n-m-1)(n-m-2)\dots 2 \cdot 1} p^{m+1} q^{n-m-1}.$$

Из этих двух уравнений получаем

$$P_{n(m+1)} = \frac{n-m}{m+1} \frac{p}{q} P_{n(m)}. \quad (3)$$

Начальное значение $P_{n(m)}$ получается из выражения (1) при $m=0$. Тогда $p^m=1$, $C_n^m=1$ и выражение $P_{n(m)} = C_n^m p^m q^{n-m}$ примет вид:

$$P_0 = q^n. \quad (4)$$

В таблице 4 даны вероятности аварийного выхода из строя различной мощности системы, подсчитанные с помощью формул (3) и (4). Ход расчета таков: по формуле (4) определяется вероятность того, что в аварийном простое рабочей мощности нет $P_0 = 0,8670$. Далее, по формуле (3) определяются вероятности нахождения в аварии одного агрегата мощности $N_1 = 5$ *мгвт* и $N_2 = 25$ *мгвт*, которые соответственно равны $P_{n_1(m_1+1)} = 0,0734$ и $P_{n_2(m_2+1)} = 0,0459$. Вероятности одновре-

менного выхода из строя двух агрегатов мощности N_1 или N_2 также легко определяются по формуле (3), в которую подставляются вероятности выхода из строя одного агрегата мощности N_1 или N_2 .

Таблица 4

m	m ₁	m ₂	n-m	n ₁ -m ₁	n ₂ -m ₂	Pn(m)	N _{ав}	Э _{ав}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	20	12	8	0,867	0	0
1	1	0	19	11	8	0,0734	5	1650000
	0	1	—	12	7	0,0189	25	5500000
2	2	0	18	10	8	0,00285	10	128000
	0	2	—	12	6	0,00121	59	272000
3	1	1	—	11	7	0,00114	30	558000
	3	0	17	9	8	0,00067	5	4500
	0	3	—	12	5	0,000171	75	5760
4	2	1	—	10	7	0,000161	25	25400
	1	2	—	11	6	0,0001023	55	25300
	4	0	16	8	8	0,000011055	20	95,0
	0	4	—	12	4	0,000000151	100	68,0
	3	1	—	9	7	0,00003379	40	682
	1	3	—	11	5	0,0000144	80	518
	2	2	—	10	6	0,0000397	60	1070

Несколько сложнее определить вероятность совместного выхода из строя двух агрегатов различной мощности — N_1 и N_2 . В этом случае в выражение (1) подставляется вероятность выхода одного агрегата, скажем, мощности N_1 , а в отношении $\frac{n-m}{m+1}$ — число агрегатов мощности N_2 , считая, что из этого числа выходит из строя один агрегат.

Тогда

$$P_{n,(m_1+1)} = \frac{8}{1} \cdot \frac{0,007}{0,993} \cdot 0,0734 = 0,00414.$$

Отношение $\frac{P}{q}$ в формуле (1) остается неизменным во всех проведенных расчетах. Можно было бы поступить наоборот, т. е. взять вероятность выхода агрегата мощности N_2 , а в отношении $\frac{n-m}{m+1}$ подставить число агрегатов N_1 . Результат получился бы один и тот же.

Рассуждая подобным образом, нетрудно подсчитать вероятность выхода из строя трех агрегатов, из которых два имеют мощность N_1 , а один — N_2 и т. д.

В графе 8 таблицы 4 приведены вероятные аварийные мощности системы в мвт, подсчет величины которых проведен по формуле

$$N_{ав} = \sum_{i=1}^k m_i N_{ik}. \quad (6)$$

Здесь индекс $k=1, 2, 3, \dots$ представляет номер группы, к которой принадлежит агрегат данной мощности.

Аварийная недовыработка электроэнергии (см. графу 9, табл. 4), связанная с выходом из строя различной рабочей мощности системы, была подсчитана с помощью выражения (2) при коэффициенте использования установленной мощности $k_u = 0,515$.

Проведенный по предлагаемому способу расчет дал возможность определить как вероятности аварийного выхода из строя той или иной мощности, так и вероятную недовыработку электроэнергии в системе. Знание этих двух показателей позволяет правильно оценить необходимую величину резерва мощности и энергии.

В рассматриваемом случае вероятность аварийного выхода из строя свыше двух агрегатов различной мощности весьма незначительна, мала также аварийная недовыработка электроэнергии, которая в сумме составляет всего 63413 *квтч* или 0,78% всей аварийной недовыработки системы. Сказанное позволяет не учитывать возможности аварийного выхода из строя мощности большей, чем 50 *мгвт*.

Если установить резервную мощность, равную, например, 25 *мгвт*, то надежность системы, определяемая по формуле

$$Q_{n(m)} = 1 - \sum P_{n(m)}, \quad (7)$$

будет равна 0,992.

В формуле (7) $P_{n(m)}$ — вероятность аварийного выхода рабочей мощности, превышающей резервную мощность.

Значительно сократится аварийная недовыработка электроэнергии, которая составит 833 тыс. *квтч* или 10,2% вероятной аварийной недовыработки системы при полном отсутствии резерва. Аварийную недовыработку с учетом резервных мощностей нетрудно определить с помощью формулы

$$\mathcal{E}_{ав} = (N_{ав} - N_{рез}) P_{n(m)} T_0 k_u. \quad (8)$$

В тех редких случаях, когда из строя выходит мощность, превышающая резервную, приходится отключать часть потребителей во избежание снижения частоты системы. Это мероприятие равноценно включенному резерву мощности на электростанциях.

Как показали исследования [8, 10], некоторые потребители могут быть переведены на работу по переменному режиму без ущерба для их суточного технологического режима. Эти потребители получили название потребителей-регуляторов.

К числу таких потребителей относятся некоторые энергоемкие производства, насосные станции и т. п. Следовательно, к частичному несению функций аварийного резерва могут быть привлечены такие потребители-регуляторы. Недоланная им в часы аварийного от-

ключения энергия в силу ее небольшой величины может быть скомпенсирована в другое время в течение года.

Руководствуясь только изложенными соображениями, нельзя определить величину потребной резервной мощности в системе. Величину аварийного резерва можно окончательно установить путем проведения энерго-экономических расчетов, в которых критерием является требование получить минимум народнохозяйственных затрат при заданном уровне производства электроэнергии.

Однако существующие методы энерго-экономической оценки аварийного резерва, как справедливо отмечает И. М. Маркович [4], наталкиваются на серьезные затруднения, связанные с необходимостью оценки убытков народного хозяйства при перерывах энергоснабжения и поэтому не дают результатов.

Можно, однако, не задаваясь целью проведения энерго-экономического анализа, установить некоторую степень надежности системы и в зависимости от этого определить необходимую величину аварийного резерва.

В ы в о д ы

1. Существующие способы определения вероятности аварийного выхода из строя агрегатов не позволяют установить величину выходящей из строя мощности и соответствующую ей величину аварийной недовыработки. В целях уточнения проектирования расчет вероятностей аварийного выхода из строя той или иной рабочей мощности следует проводить по способу, предложенному в настоящей статье. Для упрощения расчетов общее число входящих в систему агрегатов следует разбить на несколько групп по мощности.

2. Вопрос надежности энергоснабжения потребителей нужно рассматривать комплексно: энергосистема-потребитель и учитывать возможности частичного переноса функций резерва на потребителя.

Такое решение вопроса позволит сократить величину установленной резервной мощности системы.

3. Учитывая возможность частичного возложения аварийного резерва на потребителя, при разработке энерго-экономического метода в его основу следует положить принцип получения минимума народнохозяйственных издержек в комплексе энергосистема—потребитель.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Получено 17 V 1954

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Золотарев Т. Л. Гидроэнергетика, ч. I. Госэнергоиздат. М.—Л., 1950.
2. Куценов В. А. О распределении резерва мощности в энергосистемах с крупной регулирующей гидроэлектростанцией. Известия ВНИИ им. Введенского Б. Е., № 43, 1950.

3. Куценов В. А., Замячнина Н. М. Роль регулирующей гидростанции в обеспечении резерва для теплоэнергетической системы. „Электричество“, № 3, 1949.
4. Маркович Н. М. Энергетические системы и их режимы. Госэнергоиздат, М. — Л., 1952.
5. Мостков М. А. Основы теории гидроэнергетического проектирования. Госэнергоиздат, 1948.
6. Мостков М. А. Об аварийном резерве мощности и энергии в электроэнергетической системе. Известия АН СССР, ОТН, № 6, 1953.
7. Никитин С. Н. Методика водно-энергетических расчетов. Госэнергоиздат, 1949.
8. Осепян А. М. Карбидные и ферросплавные печи как потребители-регуляторы сезонной гидроэнергии. „Электричество“, № 8, 1949.
9. Руководящие указания по проектированию энергетических систем. „Электричество“, № 10, 1946.
10. Сасоян Г. А. Электрическая печь, как потребитель-регулятор энергосистемы. „Электричество“, № 9, 1950.
11. Саркисян С. Г. Определение показателя аварийности оборудования ГЭС в гидроэнергетических системах. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), № 2, 194.
12. Ферман Р. А. Методы экономической оценки эксплуатационного резерва электрических систем. „Электрические станции“, № 20, 1932.

Ս. Գ. Սարգսյան

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՍԻՍԵՄՆԵՐՈՒՄ ՎՅԱՐԱՅԻՆ ՌԵԶԵՐՎԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՐՅԻ ՇՈՒՐՋԸ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Էլեկտրակայանների աշխատող ազրեզատների վթարայնության հաճախականությունը որոշող եղանակները հնարավորություն չեն տալիս հաշվարկելու շարքից դուրս եկող հզորություն մեծությունը և նրան համապատասխանող էներգիայի կորուստը: Այդ բանը անհրաժեշտ է գիտենալ, որպեսզի էլեկտրակայանների նախագծման ժամանակ կարելի լինի ճիշտ որոշել վթարային սեղերվի մեծությունը:

Հաղվածում առաջարկվում է հնարավոր հզորության շարքից դուրս գալու հավանականությունը որոշելու եղանակ, որը հիմնված է հավանականությունների մեջ հայտնի բիմոմիալ բաշխման օրենքի վրա: Դուրս բերված սեղերենա ջանաձևեր միջոցով որոշվում է այդ հավանականությունը: Հաշվումները հեշտացնելու համար սխառեմի մեջ մտնող բոլոր ազրեզատները խմբավորվում են ըստ հզորության:

Այն դեպքում, երբ վթարային սեղերվը շարքից դուրս եկած աշխատանքային հզորությունից փոքր է, առաջարկվում է անջատել որոշ էներգետիկ սպառիչներ, որանց ակննդողիական սեմիմը թույլ է սալլիս այդ անելու: Սպառիչներին, անջատման պատճառով, չսփած էլեկտրաէներգիան անհրաժեշտ է հատուցել այլ ժամանակաշրջաններում: այն հաշվով, որպեսզի տալիս ընթացքում արտադրանքի կորուստ սեղի չունենա: