

Практическое занятие 3

Надежность при эксплуатации СЭС

Задача 3

Структурная схема надежности системы электроснабжения предприятия показана на рис. 1. Номинальная мощность потребителя (с указанием категорий) и номинальные мощности элементов СЭС представлены в табл. 2. В аварийном режиме максимальная пропускаемая мощность элемента СЭС составляет 140 % номинальной мощности.

Таблица 2

схе ма	Номинальная мощность элемента СЭС, МВт					Мощность потребителя, МВт			Номер журнала ремонта для элемента				
	1	2	3	4	5	1 кат	2 кат	3 кат	1	2	3	4	5
1	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2	0,5	1,5	–	4	1	9	17	15
2	1	1	1,3	1	1,3	0,5	1	0,5	13	14	15	3	20
3	3	1	1,8	1	1,8	–	3	–	8	12	16	19	15
4	3	1,2	1,2	1,2	3	–	1,5	1,5	18	14	1	10	2
5	1,2	1,2	3	1,2	1,2	–	2	1	17	1	16	18	3
6	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	1	11	16	2	4	20
7	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	–	5	13	19	2	6
8	1,1	1,1	2	1,1	1,1	–	1	1	17	15	7	18	19
9	2	2	2	2	2	1	2	1	19	20	18	14	8
10	2,2	2,2	4	2,2	2,2	–	3	1	16	12	1	20	16
11	1	1	1	1	1	1	1	1	2	12	19	13	15
12	1	2,1	1	2,1	2,1	1	1	2	17	12	5	6	9
13	1,3	2,1	2,1	1,3	1,3	2	1	1	4	8	7	6	13
14	1,2	3	1,2	1,2	1,2	1	1	1	5	12	16	11	15
15	1	2	2	1	2	–	0,5	1,5	10	8	7	20	3
16	1	1	2	1	2	–	1,5	0,5	15	3	4	11	2
17	1	1	1	1	2	–	1	1	10	1	19	4	10
18	1	1	1	1	1	1	1	–	19	4	18	6	5
19	1	2	1	1	2	–	0,5	1,5	9	10	18	2	3
20	1	2	1	1	1	–	1	1	4	2	14	7	9
21	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	0,5	0,5	3	5	17	14	3	6
22	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2	1	1	17	3	20	9	11
23	1	1,6	1	1	1,6	1	1	1	18	9	6	8	20
24	1	1	1	1	1	0,5	1	1,5	5	2	7	11	8
25	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1	1	6	12	11	14	7
26	1,6	1,8	1,6	1,6	1,8	1	–	2	8	10	4	8	1
27	1,6	1,7	1,8	1,7	1,5	–	2	1	12	6	1	16	9
28	1,6	1,7	1,6	1,6	1,7	–	1	2	13	7	13	10	10
29	1,6	1,7	1,6	1,6	1,7	1	1	1	14	13	9	1	5
30	1,8	1,8	1,7	1,7	1,8	–	2	1	5	17	11	7	3

Журнал аварийных ремонтов элементов представлен в табл. 3. Плановый ремонт продолжительностью 20 ч необходимо предусмотреть 1 раз в год для каждого элемента.

Таблица 3

номер	Журнал аварийных ремонтов
1	15 января (16 ч), 17 марта (8ч), 25 июня (12 ч), 17 ноября (10 ч)
2	11 февраля (29 ч), 14 июля (20 ч), 17 декабря (22 ч)
3	13 марта (7ч), 29 апреля (4ч), 29 мая (3ч), 1 октября (7 ч), 11 ноября (1ч)
4	19 февраля (6ч), 21 апреля (14ч), 22 июля (10 ч), 22 октября (11ч)
5	17 марта (10 ч), 29 октября (15 ч), 20 декабря (12 ч)
6	10 мая (3 ч), 12 июня (4 ч), 23 сентября (5 ч), 6 декабря (3ч)
7	15 марта (2ч), 6 мая (3ч), 9 июня (4ч), 17 июля (4ч), 11 ноября (6ч)
8	2 февраля (20ч), 10 апреля (12ч), 5 июля (3ч), 17 сентября (9ч)
9	1 и 7 февраля (по 2ч), 15 и 17 мая (по 4ч), 18 и 23 ноября (по 8 ч)
10	20 января (10ч), 20 апреля (12ч), 5 июля (14ч), 16 сентября (9ч)
11	11 февраля (12ч), 17 апреля (6ч), 1 и 11 июля (по 12ч), 17 октября (7ч)
12	3 число 2, 4, 6, и 10 месяца (по 4 ч), 15 число 1, 5 и 7 месяца (по 6ч)
13	5 число 3, 7, 12 месяца (по 10ч), 23 число 1, 5, 6, 9 и 11 месяца (по 5ч)
14	7 число 2, 4, 7, 9 и 11 месяца (по 9ч), 22 число 3, 4 и 12 месяца (по 6ч)
15	25 число 2, 3, 6, 8, 11 месяца (по 20ч), 2 число 2, 10 и 12 месяца (по 9ч)
16	16 числа 3, 5, 8, 10 и 12 месяца (по 5ч), 3 числа 2, 4 и 7 месяца (по 9ч)
17	1 и 10 марта (по 8 ч), 4 и 29 мая (по 6ч), 7 и 27 июня (по 5ч), 10 окт. (3ч)
18	6 апреля (32 ч), 7 сентября (20ч), 13 декабря (15 ч)
19	13 января (3ч), 25 июля (10ч), 23 декабря (18 ч)
20	13 числа каждого месяца (по 13ч), 21 апреля (2ч)

Графики ремонтов элементов

схема	Элементы				
	1	2	3	4	5
1	17	1	7	8	9
2	2	11	6	1	2
3	1	2	11	7	16
4	16	5	12	3	4
5	15	2	3	5	6
6	6	7	20	14	19
7	9	8	3	10	11
8	15	18	10	7	19
9	13	1	12	6	20
10	13	5	3	17	9
11	4	9	17	1	8
12	14	17	11	8	10
13	19	4	5	12	20
14	4	12	13	2	3
15	15	12	13	13	4
16	16	10	18	16	19
17	17	3	14	18	20
18	5	15	7	11	9
19	17	6	15	8	14
20	10	18	4	5	17
21	14	16	8	2	18
22	11	12	16	19	20
23	14	1	14	13	15
24	10	7	17	9	16
25	15	6	9	10	10
26	8	19	13	9	7
27	12	7	8	20	5
28	4	2	6	3	19
29	5	1	3	18	4
30	1	11	2	6	20

Ущерб от аварийного простоя потребителей 3 категории 500 руб./МВт*ч, 2 категории – 4000 руб./МВт*ч, 1 категории – недопустимый ущерб. Ущерб от планового простоя в 2 раза меньше. Ущерб от внезапности для потребителей 3 категории 1000 руб./МВт, 2 категории – 20000 руб./МВт, 1 категории – недопустимый ущерб. График работы предприятия – непрерывный.

Потери энергии при ее передаче в нормальном режиме при напряжении 10 кВ составляют 4 %. Каждый час проведения ремонтных работ – 2 т.р. Стоимость электроэнергии 2 руб./кВт *ч.

Требуется:

а) Найти оперативные показатели надежности системы:

- коэффициент готовности;
- коэффициенты простоя от аварийных ремонтов и плановых ремонтов;
- общий недоотпуск электроэнергии (в процентах).
- экономический ущерб от аварийных и плановых отключений.

б) Найти технические показатели надежности:

- среднюю наработку на отказ и ее дисперсию для каждого элемента;
- среднее время аварийного ремонта и его дисперсию для каждого элемента;
- коэффициент отказов для каждого элемента;
- коэффициент относительного простоя для каждого элемента.
- дополнительные затраты на проведение ремонта.

в) Сделать вывод о надежности системы и ее элементов.

Пример к задаче 3

Решить задачу 3 для схемы на рис. 11. Журнал ремонтов ее элементов представлен в табл. 4. Номинальная мощность элементов СЭС 1МВт, мощность потребителя 0,8 МВт – 1 категория, 1 МВт – 2 категория. Показатели ущерба взять из задачи 3.

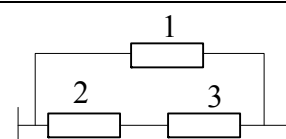


Рис. 11

Журнал ремонтов элементов

Таблица 4

Период	Элемент 1		Элемент 2		Элемент 3	
	День ремонта	Время ремонта	День ремонта	Время ремонта	День ремонта	Время ремонта
январь	–	–	5 (авар) 20 (авар)	4 4	–	–
февраль	35 (авар)	4	42 (авар)	7	–	–
март	–	–	62 (план)	20	–	–
апрель	105 (план)	10	–	–	–	–
май	–	–	142 (авар)	2	–	–
июнь	–	–	–	–	155 (авар)	17
июль	–	–	197 (авар)	3	–	–
август	235 (авар)	2	215 (авар) 234 (авар)	6 6	–	–
сентябрь	265 (авар)	6	249 (авар) 258 (авар) 268 (план)	4 12 24	252 (авар)	9
октябрь	–	–	–	–	–	–
ноябрь	328(авар)	9	–	–	–	–
декабрь	348(план)	11	338 (авар)	3	–	–

Решение

1. Оперативные показатели надежности

1.1. Обработка журнала ремонтов

По журналу ремонтов (табл. 4) в табл. 5 получаем продолжительность ремонтов элементов, ч.

Таблица 5

	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3	Итого
Аварийные ремонты	21	51	26	98
Плановые ремонты	21	44	–	65
Всего	42	95	26	163

1.2. Расчет коэффициентов

Коэффициент готовности это отношение времени, в течении которого система полностью работоспособна к времени наблюдения

$$K_{\Gamma} = \frac{t_h}{t} = \frac{8640 - 163}{8640} = 0,98.$$

Коэффициент вынужденного простоя это отношение времени, в течении которого система неработоспособна к времени наблюдения. В данном примере в системе были ограничения электроснабжения, связанные с аварийными и плановыми ремонтами элементов. Поэтому лучше называть это коэффициентом ограничений, который равен

$$K_{oi} = \frac{t_e}{t} = \frac{98}{8640} = 0,011 \text{ (аварии)} \text{ и } K_{oi} = \frac{t_e}{t} = \frac{65}{8640} = 0,009 \text{ (плановый ремонт)}.$$

Если в системе существуют несколько состояний, в которых она не полностью работоспособна, то коэффициенты (вероятности данного состояния) необходимо считать для каждого состояния системы.

1.3. Оценка недоотпуска электроэнергии

В рабочем состоянии по каждой из ветвей системы проходит по 90 % номинальной мощности: $P = 0,9P_{n1} + 0,9P_{n2} = 0,9 \cdot 1 + 0,9 \cdot 1 = 1,8$ МВт.

При отключении элемента 1 ветвь 2,3 может пропустить $1,4P_{n2} = 1,4 \cdot 1 = 1,4$ МВт. Ограничение по мощности будет составлять $(1,8 - 1,4) \cdot 100 / 1,8 = 22$ %.

При отключении элементов 2,3 ветвь 1 может пропустить $1,4P_{n1} = 1,4 \cdot 1 = 1,4$ МВт. Ограничение по мощности будет составлять $(1,8 - 1,4) \cdot 100 / 1,8 = 22$ %.

Общий объем поставки за 360 дней $360 \cdot 24 \cdot 1,8 = 15550$ МВт*ч. Согласно расчету продолжительность ограничений 163 ч. Следовательно, общий недоотпуск электроэнергии $163 \cdot 0,22 \cdot 1,8 = 64,5$ МВт ч, что составляет $64,5 / 15550 = 0,004$ или 0,4 %.

1.4. Оценка экономического ущерба предприятию

Ограничение мощности во время ремонтов не приводит к недопустимым последствиям, поскольку сохраняется электроснабжение всех потребителей 1-ой категории (0,8 МВт). Часть потребителей 2-ой категории $(1,4 - 0,8 - 0,6 = 0,4$ МВт) необходимо отключить. Это приводит к

экономическому ущербу $0,4\text{МВт} \cdot 4000 \text{ руб./МВт ч} = 1,6 \text{ т.р.}$ за каждый час простоя при аварийных отключениях и ущерб $0,4\text{МВт} \cdot 2000 \text{ руб./МВт ч} = 0,8 \text{ т.р.}$ за каждый час простоя при плановых ремонтах, а также ущерб $0,4\text{МВт} \cdot 20000 \text{ руб./МВт} = 8 \text{ т.р.}$ за каждое аварийное отключение. Количество аварийных отключений 16, время аварийного простоя 98 часов, планового простоя 65 часов. Таким образом, общий экономический ущерб составляет $8\text{т.р.} \cdot 16 + 1,6\text{т.р./ч} \cdot 98\text{ч} + 0,8\text{т.р./ч} \cdot 65\text{ч} = 336,8 \text{ т.р.}$

2. Технические показатели надежности

2.1. Нарботка на отказ

Согласно журналу ремонтов (табл. 4) наработка на отказ является случайной величиной, имеющей закон распределения (табл. 6).

Таблица 6

Номер отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Элемент 1	35	130	30	63						
Элемент 2	5	15	22	80	55	18	9	19	15	70
Элемент 3	155	97								

Числовые характеристики случайной величины (табл. 6) рассчитаны в табл. 7.

Таблица 7

	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3
Математическое ожидание $M = \sum_{i=1}^n x_i p_i$	64,5	30,8	126
Дисперсия $D = \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2 p_i$	1588	656	841
Среднеквадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D}$	39,9	25,6	29

2.2. Время восстановления

Согласно журналу ремонтов (табл. 4) время восстановления является случайной величиной, имеющей закон распределения (табл. 8).

Таблица 8

Номер отказа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Элемент 1	4	2	6	9						
Элемент 2	4	4	7	2	3	6	6	4	12	3
Элемент 3	17	9								

Характеристики случайной величины (табл. 8) рассчитаны в табл. 9.

Таблица 9

	Элемент 1	Элемент 2	Элемент 3
Математическое ожидание $M = \sum_{i=1}^n x_i p_i$	5,25	5,1	13
Дисперсия $D = \sum_{i=1}^n (x_i - M)^2 p_i$	6,69	7,5	16
Среднеквадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D}$	2,59	2,7	4

2.3. Коэффициент отказов

Коэффициент отказов это отношение числа отказов данного элемента к общему числу отказов: $K_{(o1)} = 4/16=0,25$, $K_{(o2)} = 10/16=0,625$, $K_{(o3)} = 2/16=0,125$.

2.4. Коэффициент относительного простоя

Коэффициент относительного простоя это отношение времени простоя данного элемента к общему времени простоя

$$K_{(on1)} = 21/98=0,21, K_{(on2)} = 51/98=0,52, K_{(on3)} = 26/98=0,27.$$

2.5. Оценка дополнительных затрат снабжающей организации

Дополнительные затраты снабжающей организации состоят из затрат на проведение ремонта и потерь энергии при ее передаче по резервной схеме. Затраты на проведение ремонтов составляют $163 \text{ ч} * 2 \text{ т.р./ч} = 326 \text{ т.р.}$

При передаче энергии от источника к потребителю энергия разделяется одинаково между различными возможными путями передачи. Таким образом, осуществляется передача по 0,9 МВт по каждой ветви. Тогда ток в ветви $I = P/U = 900 \text{ кВт}/10 \text{ кВт} = 90 \text{ А}$. Если потери при передаче составляют 4% или $\Delta P = 900 \text{ кВт} * 0.04 = 36 \text{ кВт}$, то сопротивление ветви $R_1 = \Delta P / I^2 = 36 \text{ кВт} / (90 \text{ А})^2 = 4,4 \text{ Ом}$. Аналогично, сопротивление $R_{2,3} = 4,4 \text{ Ом}$.

При передаче по резервной схеме через ветвь 1 осуществляется передача 1,4 МВт. Ток $I_\phi = P/U = 1400 \text{ кВт}/10 \text{ кВт} = 140 \text{ А}$. Потери энергии при передаче $\Delta P_\phi = R_1 I_\phi^2 = 4,4 \text{ Ом} * (140 \text{ А})^2 = 86,2 \text{ кВт}$ или $86,2 \text{ кВт} * 100/1400 \text{ кВт} = 6,2\%$ от передаваемой мощности. Таким образом, дополнительные потери при передаче энергии по резервной схеме составляют $6,2 - 4 = 2,2\%$ от передаваемой мощности. Аналогично, при передаче по резервной схеме через ветвь 2,3 дополнительные потери составляют 2,2% от передаваемой мощности.

По резервным схемам передано $1,4 \text{ МВт} * 163 \text{ ч} = 228 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Дополнительные потери $228 \text{ МВт} \cdot \text{ч} * 0.022 = 5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Их стоимость $5000 \text{ кВт} \cdot \text{ч} * 2 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч} = 10 \text{ т.р.}$

3. Выводы

По оперативным показателям

Рассмотренная система имеет высокую надежность, поскольку коэффициент готовности 0,98. Нерабочие состояния ее элементов приводили только к ограничениям в электроснабжении. При этом ограничение электроснабжения потребителей 1-ой категории не допускалось. При снабжении энергией нагрузок 2-ой категории экономический ущерб составил 336,8 т.р. Основной задачей энергетической системы является передача энергии и эта задача выполнена на 99,6%.

По техническим показателям

Из элементов наименее надежным является 2-ой элемент, о чем свидетельствуют наибольшие значения коэффициента отказов 0,625 и коэффициента относительного простоя 0,52. Эти значения получены выше с учетом только аварийных ремонтов. Отказы элементов приводили только к ограничениям электроснабжения. Общие затраты снабжающей организации 336 т.р.