

## Оценка надежности межсистемных связей с промежуточными подстанциями

КОВАЛЕВ Г.Ф.

*На практике встречаются ситуации, когда при оценке технико-экономической эффективности межсистемной связи между двумя автономно работающими энергосистемами требуется учет надежности этой передачи в условиях сооружения и работы, существенно отличающихся от рекомендуемых справочными и нормативными материалами. В статье исследуются и предлагаются решения возникающих при этом проблем. Рассмотрены проблемы выбора схемы электропередачи, целесообразности сооружения переключательных пунктов по соображениям надежности, достоверности информации о надежности линий электропередачи, учете плановых ремонтов при оценке надежности межсистемной связи и др. Излагается методика оценки надежности при проектировании на примере одной из реальных электропередач. В заключение даются рекомендации по целесообразности учета особых условий применения межсистемных связей.*

**Ключевые слова:** автономная энергосистема, схема электропередачи, межсистемная связь, оценки надежности, аварийность, технико-экономическая эффективность

В России еще достаточное число энергосистем, работающих автономно. Особенно это характерно для ряда регионов Дальнего Востока, Сибири и Севера. Экономика этих регионов развивается и требует новых энергетических мощностей. При этом возможны различные варианты: сооружение новых станций в электродефицитных районах или сооружение станций в соседних регионах, если они обходятся гораздо дешевле, с последующей передачей энергии по линиям электропередачи (ЛЭП) в дефицитный район. Иногда в каком-либо регионе по каким-то причинам уже имеется избыток генерирующей мощности и встает вопрос о целесообразности ее использования там, где намечается создание новых производств. И в этом случае должна решаться задача объединения двух соседних систем для совместной работы посредством сооружения электропередачи. При этом условия сооружения и работы этой передачи оказываются существенно отличающимися от рекомендуемых справочными и нормативными материалами.

В таких ситуациях при оценке технико-экономической эффективности требуется учет надежности предполагаемых межсистемных связей. Учет фактора надежности позволяет выбрать (или отвергнуть) схему электропередачи: одноцепную; двухцепную на одних или разных опорах; по одной трассе или разным; без наличия или с наличием переключательных пунктов или промежуточных подстанций (ПП) и т.п. Наличие ПП необходимо потому, что связи между автономными системами в российских условиях приходится сооружать зна-

чительной длины, в 2–3 раза превосходящей рекомендуемые по совокупности параметров.

В этих особых условиях поддержание режимных параметров электропередачи без сооружения ПП невозможно, но при этом представляет интерес влияние ПП на надежность связи.

**Проблема достоверности информации о надежности линий электропередачи.** Что касается исходной информации в части аварийности оборудования, используемой при оценке надежности межсистемных связей, то следует принимать во внимание следующие обстоятельства.

Во времена СССР имели место регулярный сбор данных об аварийности энергооборудования и обработка этих данных для получения характеристик надежности оборудования. Полученные характеристики публиковались в соответствующих справочниках и директивных документах [1]. Выполнял эту работу ОРГРЭС. Особенностью этих характеристик было то, что их рекомендовали считать нормативными и использовать в расчетах надежности энергосистем. И хотя было очевидным, что уровни аварийности по регионам страны сильно отличаются и, прежде всего, из-за климатических условий, расчеты и применение значений показателей надежности оборудования по регионам не поощрялись. Считалось, что единая государственная техническая политика в области электроэнергетики и учет климатических условий при проектировании конкретных энергообъектов должны ориентироваться на обеспечение показателей надежности, единых для всех регионов. И оценка ка-

чества работы эксплуатационного персонала проводилась по отклонениям фактических отчетных показателей надежности от средних по стране. Если аварийность была больше средней – считалось, что технический персонал недостаточно уделял внимания вопросам обеспечения надежности функционирования оборудования. Снижение аварийности всегда ставилось в заслугу эксплуатационного персонала.

Сейчас, к сожалению, ОРГРЭС как госорганизация ликвидирован. Энергокомпании сами, каждая на свой лад, собирают и обрабатывают статистику по аварийности оборудования. Органа, обобщающего аварийность оборудования по стране, нет. Нет и рекомендаций, как пользоваться данными. Более того, эти данные стали малодоступными, а если доступны, то вызывают сомнения в их достоверности.

Однако, несмотря ни на что, анализ надежности проводить необходимо. Далее приводятся алгоритм и результаты проведения подобного анализа различных вариантов сооружения межсистемной связи между двумя изолированно работающими региональными системами, в одной из которых открывается производство, требующее для своей работы энергетические мощности, избытки которых имеются в другой, соседней, системе. Необходимо

выбрать такой вариант схемы связи, которая с учетом фактора надежности обеспечивала бы технико-экономическую эффективность обеспечения электроснабжения в объединении.

**Оценка надежности межсистемной связи.** Схема рассматриваемой передачи приведена на рис. 1. Далее проводится оценка надежности обоих вариантов передачи и сравнительный анализ их надежности.

Дополнительно по каждому из вариантов выполнены расчеты надежности при сооружении передачи без ПП; при расположении ПП посередине передачи; при сооружении двух ПП на передаче.

По результатам выполненных расчетов сформулированы рекомендации.

В таблице приведены характеристики ЛЭП 220 кВ, в том числе и надежности, используемые в рассматриваемой межсистемной связи. Из таблицы видно, что при разных материалах характеристики несколько различаются. Для выполнения расчетов надежности в данном случае приняты показатели, приведенные в [3], как наиболее соответствующие современным условиям. Соответственно, принимаются:

1) аварийность ЛЭП 220 кВ: параметр потока отказов  $\lambda_0 = 1,7$  отказ/год на 100 км; среднее время восстановления после отказа  $\tau_{в.о} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  лет/отказ;

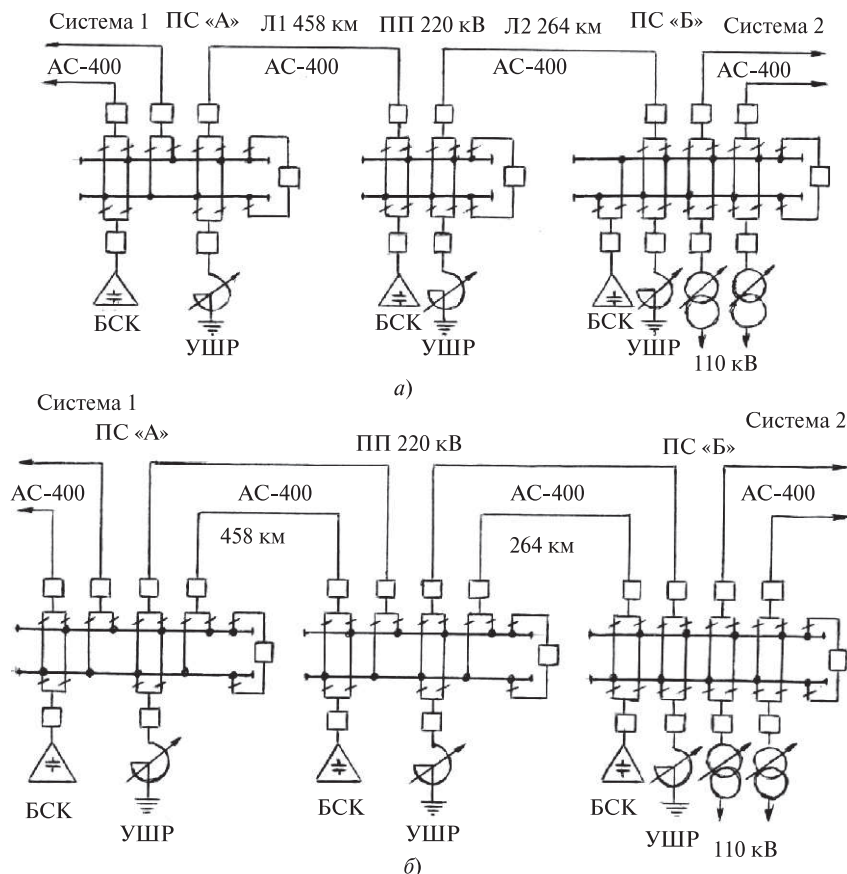


Рис. 1. Схема передачи в одноцепном исполнении (а) и двухцепном (б)

Источник	Параметр									
	Материал опор	Сечение проводов, мм <sup>2</sup>	Передаваемая мощность		Длина ЛЭП, км		Параметр потока отказов $\lambda_o$ , отказ/год/100 км	Среднее время восстановления $\tau_{в.о}$ , лет/отказ	Средняя частота плановых простоев $\mu_o$ , простоев/год на ЛЭП	Средняя продолжительность простоя в плановом ремонте $\tau_{п.о}$ , лет/откл
			натуральная	при разном значении $j^*$	предельная при КПД=0,9	средняя между ПС				
[1]	металл	240—400	135	90—150 $j = 1,1$ А/мм <sup>2</sup>	400	100	0,6	$1,1 \cdot 10^{-3}$	13	$7 \cdot 10^{-3}$
	ж/бетон									
	дерево									
[2]	металл	—	—	—	—	—	1	$1,85 \cdot 10^{-3}$	2,8	$1,74 \cdot 10^{-3}$
	ж/бетон	—	—	—	—	—	0,35	$1,3 \cdot 10^{-3}$	1,5	$1,88 \cdot 10^{-3}$
	дерево	—	—	—	—	—	0,6	$1,5 \cdot 10^{-3}$	5,4	$1,5 \cdot 10^{-3}$
[3]	металл	240—400	135	74—123 $j = 0,9$ А/мм <sup>2</sup>	400	100	1,7	$1,6 \cdot 10^{-3}$	3,0	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	ж/бетон									
	дерево									

\*  $j$  – удельная экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

2) плановые простои ЛЭП 220 кВ: средняя частота  $\mu_o = 5$  простоев/год на одну линию; средняя продолжительность одного простоя  $\tau_{п.о} = 2,9 \cdot 10^{-3}$  лет.

По приведенным данным определяются и другие характеристики надежности:

1) удельная наработка на отказ:

$$T_o = \frac{1}{\lambda_o} = \frac{1}{1,7} = 0,58824 \text{ лет} \cdot 100 \text{ км} / \text{отказ}$$

или в часах

$$T_o = T_o [\text{лет}] T_{\text{год}} [\text{ч}] = 0,58824 \cdot 8760 = 5152,94 \text{ ч} \cdot 100 \text{ км} / \text{отказ};$$

2) удельная относительная длительность (вероятность) отказа:

$$g_o = \lambda_o \tau_{в.о} = 1,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 0,00272 \text{ отн. ед.} / 100 \text{ км}$$

или в часах

$$T_v = g_o T_{\text{год}} [\text{ч}] = 0,00272 \cdot 8760 = 23,83 \text{ ч} / \text{год на } 100 \text{ км};$$

3) относительная длительность (вероятность) нахождения ЛЭП в плановых простоях:

$$\xi_o = \mu_o \tau_{п.о} = 5 \cdot 2,9 \cdot 10^{-3} = 0,0145$$

или в часах

$$T_{п} = \xi_o T_{\text{год}} [\text{ч}] = 0,0145 \cdot 8760 = 127,02 \text{ ч} / \text{год}.$$

В приведенных формулах  $T_{\text{год}}$  – число часов в году, равное 8760.

1. Надежность одноцепной схемы (рис. 1,а).

1.1. Схемы замещения для расчетов надежности данного варианта<sup>1</sup> (рис. 2).

Для двух последовательно соединенных элементов надежность объекта вычисляется по [4]:

$$p_{св} = p_{Л1} p_{Л2}, \tag{1}$$

где  $p_{св}$  – вероятность работоспособного состояния всей связи;  $p_{Л1}$  – вероятность работоспособного состояния Л1;  $p_{Л2}$  – то же Л2.

1.2. В соответствии с исходными данными  $q_o = 0,00272$  (см. выше). Тогда вероятность отказа Л1:

$$q_1 = q_o \frac{L_1}{100} = 0,00272 \frac{458}{100} = 0,01246, \tag{2}$$

где  $L_1$  – длина Л1, км;  
то же Л2:

$$q_2 = q_o \frac{L_2}{100} = 0,00272 \frac{264}{100} = 0,00718, \tag{3}$$

где  $L_2$  – длина Л2, км.

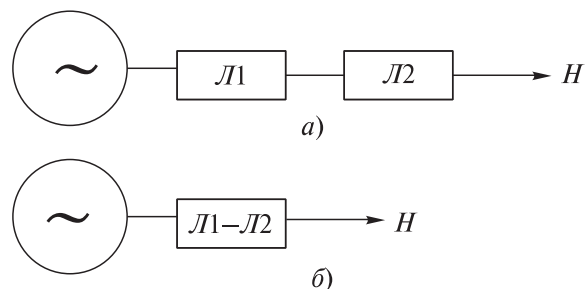


Рис. 2. Расчетные схемы замещения для варианта по рис. 1,а: а – Л1 – ЛЭП 220 кВ длиной 458 км; Л2 – ЛЭП 220 кВ длиной 264 км; б – эквивалентная схема замещения двух ЛЭП (Л1 и Л2)

<sup>1</sup> Аварийность распреедустрийств (РУ) подстанций (переключательных пунктов) по известным причинам не учитывается (считается, что надежность РУ на несколько порядков выше).

Вероятность работоспособного состояния

Л1:

$$p_{Л1} = 1 - q_1 = 1 - 0,01246 = 0,98754; \quad (4)$$

то же Л2:

$$p_{Л2} = 1 - q_2 = 1 - 0,00718 = 0,99282. \quad (5)$$

Вероятность работоспособного состояния связи согласно (1):

$$p_{св} = 0,98754 \cdot 0,99282 = 0,98045 \approx 0,98. \quad (6)$$

Д р у г и е х а р а к т е р и с т и к и надежности рассматриваемой связи:

*время* безаварийного состояния передачи в течение года

$$T_p = p_{св} T_{год} = 0,98 \cdot 8760 = 8584,8 \text{ ч/год};$$

*время* нахождения передачи в аварийном состоянии в году

$$T_{ав} = q_{св} T_{год} (1 - p_{св}) T_{год} = \\ = (1 - 0,98) \cdot 8760 = 175,2 \text{ ч/год}.$$

1.3. *Учет плановых ремонтов передачи.* С одной стороны, плановые ремонты должны быть нормированы и обязательны для исполнения. Очевидно, в приведенных исходных данных (см. таблицу) даны нормативные значения.

С другой стороны, проведение плановых ремонтов характеризуется большими возможностями в плане их организации с целью снятия сопутствующих им нарушений нормального электроснабжения потребителей. Так, можно перейти от плановых ремонтов к ремонтам по состоянию (если хорошо организовано диагностирование линий), совмещению плановых ремонтов с аварийными (но тогда нужна другая статистика). Плановые ремонты можно планировать так, чтобы они проводились во время, когда линии разгружены (в выходные дни или вне рабочих смен предприятий в течение суток и прочее).

Ремонты под напряжением не требуют погашения или ограничения потребителей. Их организация и проведение тщательно проработаны (еще с сороковых годов прошлого века) и широко применяются в случае необходимости.

Однако рассмотрим наиболее тяжелый случай с позиций надежности, а именно: все необходимые плановые ремонты проводятся с отключением ЛЭП в соответствии с нормативами (см. таблицу).

Имея в виду, что  $T_{п} = 127,02$  ч/год для каждой Л1 и Л2, и если принять, что плановые ремонты на обоих участках не совмещаются (самый тяжелый случай в смысле надежности), то простой всей передачи в плановых ремонтах в течение года составят

$$T'_{п\Sigma} = T_{п1} + T_{п2} = 127,02 + 127,02 = 254,04 \text{ ч/год}.$$

Суммарное время простоя ЛЭП в авариях и плановых ремонтах

$$T'_{ав+п\Sigma} = T_{ав} + T'_{п\Sigma} = 175,2 + 254,04 = 429,24 \text{ ч/год}.$$

Время нахождения сети в рабочем состоянии

$$T'_{раб.св} = T_{год} - T'_{ав+п\Sigma} = 8760 - 429,24 = 8330,76 \text{ ч/год},$$

откуда вероятность (относительная длительность) рабочего состояния передачи

$$p'_{св} = T'_{раб.св} / T_{год} = 8330,76 / 8760 = 0,951.$$

Если же принять, что плановые работы на обоих участках совмещаются (что обычно и делается на практике), тогда  $T''_{п\Sigma} = 127,02$  ч/год и

$$T''_{ав+п\Sigma} = T_{ав} + T''_{п\Sigma} = 175,2 + 127,02 = 302,22 \text{ ч/год},$$

а

$$T''_{раб.св} = T_{год} - T''_{ав+п\Sigma} = 8760 - 302,22 = 8457,78 \text{ ч/год}$$

и

$$p''_{св} = T''_{раб.св} / T_{год} = 8457,78 / 8760 = 0,9655.$$

Если проводить плановые ремонты под напряжением, то

$$p'''_{св} = p_{св} = 0,98 \text{ (см. (6))}.$$

Таким образом, можно рассматривать вероятность работоспособного состояния данной схемы в диапазоне от 0,95 до 0,98, т.е. надежность этой схемы зависит от организации эксплуатации сети.

Оценка аварийности (надежности) связи в данном случае является лишь начальным этапом решения более широкой задачи. Аварийность может быть и небольшой (это всегда хорошо) и весьма большой, но при этом может иметь место положительный технико-экономический эффект. Это необходимо подтверждать соответствующим расчетом системного эффекта с учетом фактора надежности. Поэтому окончательный вывод о целесообразности сооружения конкретной межсистемной линии для конкретных условий можно сделать после проведения соответствующих системных расчетов, а не только надежности самой связи. С этой целью следует использовать имеющиеся программы расчета системных эффектов [5 и др.].

В дополнение к основному расчету проведем расчеты некоторых гипотетических схем с целью выяснения изменения их надежности в сравнении с основной проектной схемой (рис. 1,а).

1.4. *Надежность одноцепной передачи без ПП.* Схема замещения представлена на рис. 3. В таком

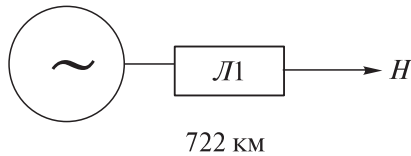


Рис. 3. Схема замещения одноцепной передачи без ПП

случае длина ЛЭП составит  $L = L_1 + L_2 = 458 + 264 = 722$  км.

Если условно считать техническое обеспечение работоспособности такой ЛЭП в допустимой области выполненным, то вероятность работоспособного состояния определится выражением

$$P_{св722} = 1 - q_{св722},$$

где  $q_{св722} = q_0 \frac{L}{100} = 0,00272 \frac{722}{100} = 0,0196384$ .

Следовательно,

$$P_{св722} = 1 - 0,0196384 = 0,9803616.$$

1.5. Надежность одноцепной передачи с ПП точно посередине. Схема замещения представлена на

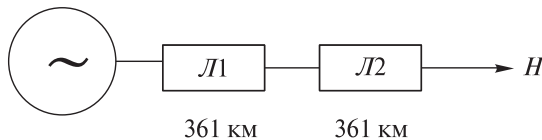


Рис. 4. Схема замещения передачи с ПП посередине ЛЭП

рис. 4. В этом случае длина каждого участка равна  $L_1 = L_2 = L / 2 = 722 / 2 = 361$  км.

Используя формулы (1)–(6), вычисляются:

1) вероятность отказа Л1 и Л2

$$q_1 = q_2 = q_0 \frac{L_1}{100} = q_0 \frac{L_2}{100} = 0,00272 \frac{361}{100} = 0,00098192;$$

2) вероятность работоспособного состояния Л1 и Л2

$$P_{Л1} = P_{Л2} = 1 - q_1 = 1 - q_2 = 1 - 0,00098192 = 0,9901808.$$

3) вероятность работоспособного состояния связи (1)

$$P_{св361+361} = P_{Л1} P_{Л2} = 0,9901808^2 = 0,980458.$$

1.6. Надежность одноцепной передачи с двумя ПП. Схема замещения представлена на рис. 5. Длина каждого участка ЛЭП равна  $L_1 = L_2 = L_3 = L / 3 = 240,67$  км.

Вероятность отказа Л1, Л2 и Л3



Рис. 5. Схема замещения одноцепной передачи с двумя ПП

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_0 \frac{L_1}{100} = q_0 \frac{L_2}{100} = q_0 \frac{L_3}{100} = 0,00272 \frac{240,7}{100} = 0,0065462.$$

Тогда вероятность работоспособного состояния Л1, Л2, Л3

$$P_1 = P_2 = P_3 = 1 - q_1 = \dots = 1 - 0,0065462 = 0,993453$$

и вероятность работоспособного состояния связи

$$P_{св3 \times 240,67} = P_{Л1} P_{Л2} P_{Л3} = 0,993453^3 = 0,9804872.$$

Результаты выполненных расчетов надежности для различных вариантов исполнения одноцепной связи приведены далее:

Вариант ЛЭП	Значение $P_{св}$
без ПП	0,9803616
с одной ПП*	0,9804500
с одной ПП посередине	0,9804580
с двумя ПП	0,9804872

\*Реальный проект.

Из анализа приведенных данных следует, что для одноцепной связи надежность практически не меняется при сооружении переключательных пунктов. Таким образом, ПП, обеспечивая необходимые режимные параметры работы связи, на ее надежность не оказывают существенного влияния.

2. Надежность двухцепной схемы (рис. 1,б). 2.1. Схема замещения для расчетов надежности данного варианта представлена (рис. 6).

Для двух параллельно соединенных элементов (рис. 6,а) надежность работоспособного состояния вычисляется по [4]:

$$P_{i-j} = 1 - q_i q_j, \tag{7}$$

следовательно,

$$P_{1-2} = 1 - q_1 q_2; \quad P_{3-4} = 1 - q_3 q_4.$$

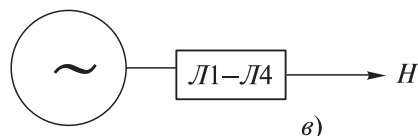
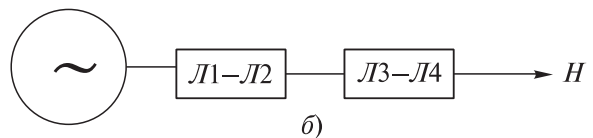
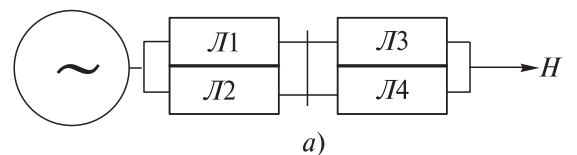


Рис. 6. Расчетные схемы замещения для передачи на рис. 1,б: а – Л1 – 458 км; Л2 – 458 км; Л3 – 264 км; Л4 – 264 км; б – Л1 – Л2 – эквивалентная схема замещения двух параллельно работающих элементов передачи Л1 и Л2, аналогично Л3 и Л4; в – Л1–Л4 – эквивалентная схема замещения всей передачи

Для двух последовательно соединенных элементов (рис. 6,б) надежность системы (рис. 6,в) вычисляется по формуле (1):

$$P_{св} = P_{1-4} = P_{1-2} P_{3-4}.$$

В приведенных формулах  $q_i$  – вероятность аварийного состояния  $i$ -го элемента;  $q_j$  – вероятность аварийного состояния  $j$ -го элемента схемы. В данном случае  $i = 1, 3; j = 2, 4$  (см. рис. 6,а);  $p_{i-j}$  – вероятность работоспособного состояния объекта из двух параллельно работающих элементов  $i$  и  $j$  (рис. 6,б);  $P_{св} = P_{1-4}$  – вероятность работоспособного состояния всей связи (см. рис. 6,в). Предполагается при этом, что каждый из элементов схемы (Л1–Л4) обеспечивает необходимую пропускную способность (производительность).

2.2. С учетом 2.1 и в соответствии с исходными данными определяются:

1) вероятность отказов элементов Л1 и Л2

$$q_1 = q_2 = q_0 \frac{L_1}{100} = q_0 \frac{L_2}{100} = 0,00272 \frac{458}{100} = 0,01246,$$

где  $L_1 = L_2$  – длина Л1 и Л2;

2) вероятность отказов элементов Л3 и Л4

$$q_3 = q_4 = q_0 \frac{L_3}{100} = q_0 \frac{L_4}{100} = 0,00272 \frac{254}{100} = 0,00718,$$

где  $L_3 = L_4$  – длина Л3 и Л4;

3) вероятность работоспособного состояния параллельных элементов Л1 и Л2

$$P_{1-2} = 1 - q_1 q_2 = 1 - 0,01246^2 = 1 - 0,0001552 = 0,9998448;$$

4) вероятность работоспособного состояния параллельных элементов Л3 и Л4

$$P_{3-4} = 1 - q_3 q_4 = 1 - 0,00718^2 = 1 - 0,0000515 = 0,9999485.$$

Для связи в целом вероятность работоспособного состояния составит

$$P_{св} = P_{1-4} = P_{1-2} P_{3-4} = 0,9998448 \cdot 0,9999485 = 0,9997933.$$

Другие характеристики надежности рассматриваемой передачи:

время безаварийного состояния передачи в течение года

$$T_p = P_{св} T_{год} = 0,9997933 \cdot 8760 = 8758,19 \text{ ч/год};$$

время нахождения передачи в аварийном состоянии в году

$$T_{ав} = q_{св} T_{год} = (1 - P_{св}) T_{год} = (1 - 0,9997933) \cdot 8760 = 8760 - 8758,19 = 1,81 \text{ ч/год}.$$

2.3. Учет плановых ремонтов. Схема сети такова, что правильно организованное проведение плано-

вых ремонтов не будет приводить к дополнительным нарушениям электроснабжения потребителей. Поэтому плановые простои всей передачи в данном случае следует считать равными нулю. Следует только избегать одновременных простоев двух цепей на одном участке. Это несложно, если отдельные цепи ЛЭП имеют разные опоры.

Конечно, возможно наложение аварийных отключений другой ЛЭП на плановые ремонты на линии того же участка, но это в соответствии со статистикой имеет вероятность на два-три порядка ниже, чем обычные отключения. Тем более, если плановые работы назначаются и выполняются в периоды низких нагрузок передачи и при благоприятных погодных условиях.

Сравнивая расчеты пп. 1 и 2, можно сделать вывод, что переход от одноцепной передачи к двухцепной существенно повышает ее надежность (с  $0,91 \div 0,98$  до  $0,9998$ ).

В дополнение к основному расчету далее приведены по аналогии с п. 1 расчеты некоторых гипотетических схем с целью выявления изменения надежности передачи в сравнении с основной проектной схемой (рис. 1,б).

2.4. Надежность двухцепной передачи без ПП. Схема замещения представлена на рис. 7. В этом случае длина каждой ЛЭП составит  $L = 722$  км.

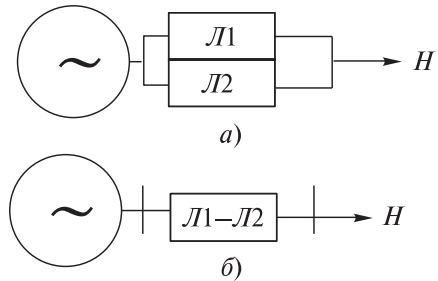


Рис. 7. Схема замещения передачи без ПП

Для двух параллельно работающих элементов (рис. 7,а), как было показано в п. 2.1, вероятность работоспособного состояния вычисляется по формуле (7).

С учетом пп. 2.1 и 2.2

$$q_1 = q_2 = q_0 \frac{L}{100} = 0,00272 \frac{722}{100} = 0,0196384.$$

Вероятность работоспособного состояния всей передачи определится как

$$P_{св \times 722} = 1 - q_1 q_2 = 1 - 0,0196384^2 = 1 - 0,0003856 = 0,9996144.$$

2.5. Надежность двухцепной передачи с ПП точно посередине. Схема замещения представлена на рис. 6, но только длина Л1–Л4 будет равна

$L = L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 722/2 = 361$  км. Соответственно, вероятность отказов элементов Л1–Л4 равна

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_0 \frac{L}{100} = 0,00272 \frac{361}{100} = 0,0098192.$$

Вероятность работоспособного состояния параллельных элементов Л1–Л2 и Л3–Л4

$$p_{1-2} = p_{3-4} = 1 - q_1 q_2 = 1 - q_3 q_4 = 0,0098192^2 = 1 - 0,0000964 = 0,9999036.$$

Для передачи в целом вероятность работоспособного состояния

$$P_{св2 \times 361} = p_{1-4} = p_{1-2} p_{3-4} = 0,9999036^2 = 0,9998072.$$

2.6. *Передача двухцепной схемы с двумя ПП* (рис. 8). Для данной схемы длина каждой ЛЭП (Л1–Л6)  $L = 722/3 = 240,67$ .

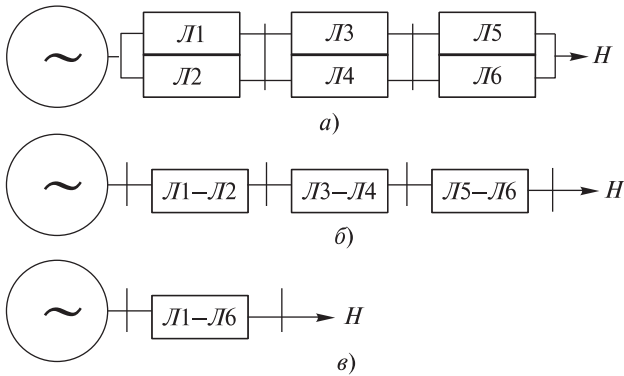


Рис. 8. Схема замещения двухцепной передачи с двумя ПП

Вероятность отказа элементов Л1–Л6

$$q_1 = \dots = q_6 = q_0 \frac{L}{100} = 0,00272 \frac{240,67}{100} = 0,0065462;$$

вероятность работоспособного состояния параллельных элементов Л1–Л2, Л3–Л4 и Л5–Л6

$$p_{1-2} = p_{3-4} = p_{5-6} = 1 - q_1 q_2 = 1 - 0,0065462^2 = 0,9999572.$$

Для передачи в целом вероятность работоспособного состояния

$$P_{св3 \times 240,67} = p_{1-6} = p_{1-2} p_{3-4} p_{5-6} = 0,9999572^3 = 0,9998716.$$

Результаты выполненных расчетов надежности для различных вариантов исполнения двухцепной связи приведены далее:

Вариант ЛЭП	Значение $P_{св}$
без ПП	0,9996144
с одной ПП*	0,9997933
с одной ПП посередине	0,9998072
с двумя ПП	0,9998716

\*Реальный проект

Из анализа приведенных данных следует, что для двухцепной связи, так же как и для одноцепной, надежность практически не меняется при сооружении ПП, т.е. можно сделать вывод, что ПП на надежность передачи не оказывают существенного влияния.

2.7. *Расчеты надежности различных вариантов двухцепной связи при увеличении аварийности ЛЭП.* Расчеты, выполненные в пп. 2.1–2.6, были проведены для аварийности ЛЭП, увеличенной вдвое.

Вместо  $\lambda_0 = 1,7 \frac{\text{отказ}}{\text{год} \cdot 100 \text{ км}}$  и  $\tau_{в.о} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  лет / отказ

было принято  $\lambda_0 = 3,4 \frac{\text{отказ}}{\text{год} \cdot 100 \text{ км}}$  и

$\tau_{в.о} = 3,2 \cdot 10^{-3}$  лет / отказ.

При этом значение  $q_0$  увеличилось с 0,00272 до 0,01088 отн. ед./100 км.

Полученные результаты расчетов приведены далее:

Варианты ЛЭП	Значение $P_{св}$
без ПП	0,9938294
с одной ПП*	0,9967550
с одной ПП точно посередине	0,9969171
с двумя ПП	0,9979439

\*Реальный проект.

Сравнивая эти результаты с результатами расчетов двухцепной связи, следует сделать вывод, что аварийность линий существенно влияет на надежность передачи. Увеличение аварийности вдвое снижает вероятность работоспособного состояния передачи на порядок, в данном случае с 0,9998 до 0,997, что, естественно, требует при проектировании передачи стараться как можно точнее учитывать фактическую повреждаемость линий в регионе сооружения связи.

**Выводы.** 1. Переход от одноцепной передачи к двухцепной существенно повышает надежность передачи (с 0,91 с учетом простоев в плановых ремонтах и с 0,98 без учета плановых простоев до 0,9998).

2. Сооружение переключательных пунктов — дорогое мероприятие, но для надежности оно не является обязательным (существенно не повышает надежность передачи); ПП нужны по техническим причинам — для обеспечения режимных параметров передачи в допустимой области: для поддержания напряжения, управления потоками реактивной мощности, снижения потерь, обеспечения статической и динамической устойчивости.

3. Размещение ПП и увеличение их числа для надежности передачи также особой роли не играют.

4. Простои ЛЭП в плановых ремонтах для двухцепной передачи перестают влиять на безотказность, если выполняются технически грамотно в

соответствии с рекомендациями директивных материалов.

5. Выполненная оценка влияния аварийности ЛЭП на надежность передачи показала, что аварийность оказывает решающее влияние на надежность передачи в целом. Так, увеличение  $\lambda_o$  и  $\tau_{в.о}$  вдвое приводит к снижению вероятности работоспособного состояния передачи с 0,9998 до 0,9967, что соответственно увеличивает время аварийных простоев передачи в течение года с 1,81 ч до  $T_B = (1-p_{св}) T_{год} = (1-0,996755)8760=28,43$  ч в год.

6. Следует обратить внимание на то, что оценка надежности связи является лишь начальным этапом решения более широкой задачи: оценки системного эффекта энергообъединения с учетом фактора надежности. Окончательный вывод о целесообразности сооружения межсистемной связи для конкретных условий можно сделать после проведения соответствующих системных расчетов технико-экономической эффективности с учетом надежности проектируемой передачи. При этом возможны ситуации, когда положительный технико-эко-

номический эффект будет давать вариант сооружения менее надежной, но более дешевой связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** по проектированию электроэнергетических систем/ Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 352 с.
2. **Электротехнический справочник**: в 4-х т., 9-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2004, т. 3, 964 с.
3. **Справочник** по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012, 376 с.
4. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2002, 575 с.
5. **Ковалёв Г.Ф., Лебедева Л.М.** Надежность систем электроэнергетики. – Новосибирск: Наука, 2015, 224 с.

[11.01.2017]

*А в т о р: Ковалёв Геннадий Федорович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института им. М.И. Калинина в 1960 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Учет комплексного фактора надежности в оценке системного эффекта при управлении развитием современных ЭЭС» в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Ведущий научный сотрудник ИСЭМ СО РАН.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 4, pp. 13–21.*

## Reliability assessment of interconnection tie-lines with Intermediate Substations

**KOVALEV Gennadii F.** (*Melentyev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*) – *Leading Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

*In practice the situations occur when an analysis of technical efficiency and cost-effectiveness of an interconnection tie line between two off-grid systems requires that its reliability be considered for the conditions of construction and operation that differ greatly from those recommended in reference and normative materials. In the paper the solutions to the related problems are studied and proposed. The research focuses on the problems related to the choice of a transmission line scheme; the effectiveness of construction of switching points for reasons of reliability, validity of data on reliability of power transmission lines, consideration of planned maintenances for the assessment of the interconnection tie-line reliability, etc. A methodology is presented to assess the reliability at the stage of design on the example of a real power transmission line. In conclusion the recommendations for the consideration of special conditions of using the interconnection tie-lines are made.*

**К е у в о р д s:** *off-grid system, transmission line scheme, interconnection tie-line, reliability assessment, emergency rate, technical economic efficiency*

#### REFERENCES

1. **Spravochnik po proyektirovaniyu elektroyenergeticheskikh sistem/ Pod red. S.S. Rokotyana i I.M. Shapiro** (Guide to the design of power engineering systems/Edit. by S.S. Rokotyana and I.M. Shapiro). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 352 p.
2. **Elektrotekhnicheskii spravochnik v 4kh t.** (Electrical reference in 4 vol.). Moscow, Publ. MPEI, 2004, vol. 3, 964 p.

3. **Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setei/ Pod red. D.L. Faibisovicha** (Guide to the design of electrical circuits/Edit. by D.L. Faibisovich). Moscow, Publ. «ENAS», 2012, 376 p.
4. **Ventstel' Ye.S.** *Teoriya veroyatnostei* (Probability theory). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 2002, 575 p.
5. **Kovalev G.F., Lebedeva L.M.** *Nadezhnost' sistem elektroyenergetiki* (The reliability of the electric power systems). Novosibirsk, Publ. «Nauka», 2015, 224 p.

[11.01.2017]