

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ УСТАНОВИВШИХСЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ, НАСТРОЕННЫХ НА ПОЛУВОЛНУ

В. Т. Агафонов

(Представлено профессором, доктором техн. наук И. Д. Кутявиным)

Возникновение значительных перенапряжений в линии и других элементах системы при коротких замыканиях является крупным недостатком электропередач, настроенных на полуволну. Даже в случае точной настройки самой линии в режим полуволны, когда постоянные настроенной линии приобретают значения: $A=D=-1$, $B=C=0$ (без потерь), величина тока к. з., которое происходит близко к концу настроенной линии, определяется только параметрами концевых устройств. Но, как показано в [1], внешнее к. з. не является самым тяжелым для электропередачи, настроенной на полуволну. Наиболее опасно для такой электропередачи к. з. в точке, отделенной от обобщенной э. д. с. генераторов нулевым эквивалентным сопротивлением, т. е. в точке резонансного к. з. Кратность тока к. з. и перенапряжений даже с учетом короны достигает 4—5, а без учета короны — 15—20.

Все это относится к линии, полностью настроенной на полуволну при помощи любых компенсирующих устройств (в дальнейшем кратко к. у.), включаемых в линию.

В [1] исследуется только схема с центральным размещением к. у. В самом же деле резонансные явления во многом будут зависеть от схемы настройки, длины настраиваемой линии и от параметров концевых устройств. В случае использования в качестве к. у. реактивности концевых устройств [2] явления резонанса должны быть дополнительно рассмотрены. Большое значение имеет исследование резонансных явлений не только при трехполюсных к. з., которые бывают очень редко, но и при несимметричных к. з. Рассмотрим резонансные явления схемы электропередачи, настроенной на полуволну при помощи концевых к. у., в качестве которых используются генераторы и трансформаторы. Будем интересоваться только качественной стороной вопроса и не учитывать потери, которые влияют в основном на количественную сторону его.

1. Трехполюсное короткое замыкание

Расчетная схема показана на рис. 1. Пусть данная электропередача характеризуется постоянными A , B , C , D (в общем случае $A \neq D$). При к. з. в конце и начале этой системы, как это видно из общих уравнений,

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= AU_2 + BI_2; \\ I_1 &= CU_2 + DI_2; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= DE_1 - BI_1; \\ I_2 &= -CE_1 + AI_1; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

сопротивления к. з., измеренные соответственно со стороны начала и конца системы, равны:

$$Z_{\kappa} = \frac{B}{D}, \quad Z_{\kappa} = -\frac{B}{A}. \quad (3)$$

Резонансную точку для принятой схемы можно найти следующим путем. Так как сопротивление генератора (имеется в виду эквивалент-

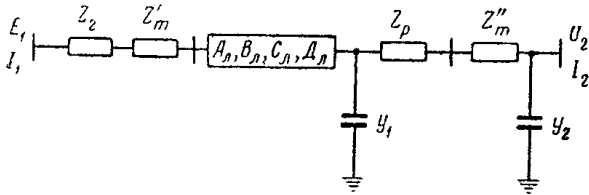


Рис. 1.

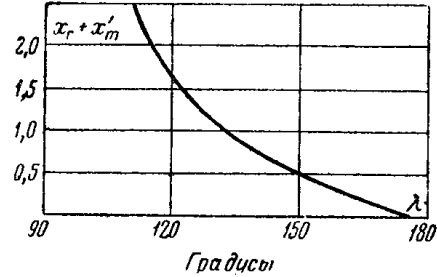


Рис. 2.

ный генератор станции) входит в систему, то, идя от начала системы, можно найти точку, в которой $Z_{\kappa} = \frac{B}{D}$ равнялось бы нулю или при учете потерь было бы чисто активным. Таким же образом можно сделать и относительно приемной системы. Легко видеть, что $Z_{\kappa} = 0$, если $B = 0$.

Приравняв коэффициент B нулю и решая получившиеся уравнения, найдем:

$$\lambda = \operatorname{arctg} \left(-\frac{x_{\Gamma} + x'_{\Gamma}}{z_c} \right). \quad (4)$$

Эта зависимость представлена на рис. 2. Нетрудно видеть, что местоположение точки резонансного к. з. зависит от сопротивления концевой нагрузки и лежит тем дальше за $\lambda = 90^\circ$, чем меньше реактивное сопротивление отправного конца электропередачи. Если длина настраиваемой линии будет не больше 2 000 км, то резонанса при трехполюсном к. з. в пределах длины линии не будет. Интересно при этом выяснить, насколько режим к. з. в любой точке линии приближается к резонансному. Это можно узнать, рассмотрев изменение входного сопротивления электропередачи при к. з. в различных точках, которое будет равно:

$$X_{\kappa.з} = [z_c \operatorname{tg} \lambda + (x_{\Gamma} + x'_{\Gamma})]. \quad (5)$$

Из (5) видно, что сопротивление к. з. непрерывно растет с удалением точки к. з. от отправного конца и становится равным ∞ при $\lambda = 90^\circ$. Сопротивление к. з. становится отрицательным при $\lambda > 90^\circ$ и быстро падает до нуля в точке резонансного к. з., а затем плавно возрастает до величины, равной сопротивлению отправного конца электропередачи ($\lambda = 180^\circ$). При к. з. в линии, длина которой несколько меньше или больше резонансной (вплоть до $\lambda = 180^\circ$), имеет место пониженное значение сопротивления к. з. и, следовательно, лежит полоса наиболее неблагоприятных к. з. для электропередачи. Естественно, что при настройке необходимо стремиться избавиться от этой опасной зоны. Для этого наиболее подходящими являются схемы с концевыми к. у.

Выше было показано, что при длине линии не более 2 000 км резонансная точка не попадает в линию. Посмотрим, где будет находиться резонансная точка относительно отправного конца. Находим эквива-

лентные постоянные системы генератор — трансформатор — линия — концевое к. у. и сопротивление к. з., которое будет равно:

$$X_{к.з.} = \frac{\left\{ \left(\cos \lambda - \frac{x_r + x'_r}{z_c} \sin \lambda \right) + [jz_c \sin \lambda + j(x_r + x'_r) \cos \lambda] j b_1 \right\} \times}{\left(j \frac{\sin \lambda}{z_c} + j \cos \lambda b_1 \right) j (x_p + x''_r) +} \times \frac{j (x_p + x''_r) + j z_c \sin \lambda + j (x_r + x'_r) \cos \lambda}{+ \cos \lambda} \quad (6)$$

По уравнению (6), считая заданными величинами x_r , x'_r , λ , z_c , b_1 и b_2 , можно построить зависимость $X_{к.з.} = f(x_p + x''_r)$ (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что относительно начала системы резонанс будет при к. з. внутри реактивности концевого к. у. Но так как в случае однофазного исполнения реакторов и трансформаторов трехполюсные к. з. практически невозможны, то очевидно, что резонансные явления при трехполюсном к. з. в такой электропередаче относительно ее начала не будут иметь места. Самым тяжелым в этом случае будет трехполюсное к. з. на приемных шинах. В электропередачах же с центральным размещением к. у. резонансная точка обязательно на-

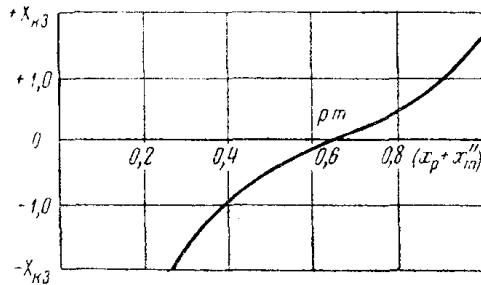


Рис. 3.

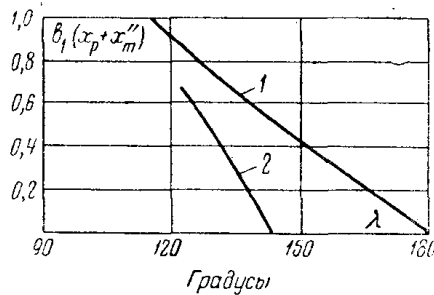


Рис. 5.

$(x_p + x''_r) = \text{const}$ (кривая 2) показана на рис. 5. Как видно из рис. 5, длина линии при к. з., в которой возможен резонанс, будет больше 2000 км. Если учесть конечную мощность приемной системы, т. е. заместить ее эквивалентной э. д. с. и реактивностью, то можно получить:

$$\lambda = \text{arctg} \left[\frac{-[(x_p + x''_r + x_{nc}) + b_2(x_p + x''_r) x_{nc}]}{1 - (x_p + x''_r) b_1 - x_{nc}(b_1 + b_2) + x_{nc}(x_p + x''_r) b_1 b_2} \right] \quad (8)$$

Зависимость λ от x_{nc} , b_2 , $(x_p + x''_r)$ при постоянных других величинах показана на рис. 6: $\lambda = f(x_{nc})$ при $(x_p + x''_r)$; b_2 ; $b_1 = \text{const}$ (кривая 1); $\lambda = f(x_p + x''_r)$ при x_{nc} ; b_1 ; $b_2 = \text{const}$ (кривая 2); $\lambda = f(b_2)$ при x_{nc} ; b_1 ; $(x_p + x''_r) = \text{const}$ (кривая 3).

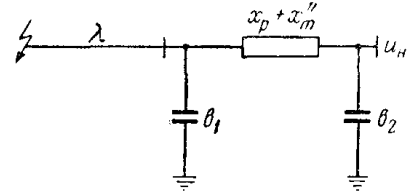


Рис. 4.

ходила бы на линии. Можно определить резонансную точку при трехполюсном к. з. относительно приемной системы (рис. 4).

Приравняв нулю входное сопротивление к. з. и решая относительно λ , получим:

$$\lambda = \text{arctg} \left[\frac{x_p + x''_r}{1 - (x_p + x''_r) b_1} \right] \quad (7)$$

Зависимость $\lambda = f(x_p + x''_r)$ при $b_1 = \text{const}$ (кривая 1) и $\lambda = f(b_1)$ при

В этом случае реактивность приемной системы как бы удлиняет линию и расположение резонансной точки смещается вправо.

Таким образом, наиболее подходящей схемой настройки в режим полуболны с точки зрения режимов трехполюсных к. з. является схема с концевыми к. у., в качестве которых используются генераторы и трансформаторы. Если длина настраиваемой линии будет не более 2 000 км, то резонансных явлений при трехполюсном к. з. в ней не возникает.

2. Несимметричные короткие замыкания

Наиболее удобно и просто можно провести исследование резонансных явлений при несимметричных к. з., используя метод симметричных составляющих [3, 4, 5]. Как известно, определение токов и напряжений при несимметричном к. з.

на основе этого метода приводится к определению этих величин при некотором фиктивном трехполюсном к. з. При анализе используется методика с представлением элементов электрической системы в форме четырехполюсников, дающая возможность учесть распределение постоянных. Матричные параметры элементов схем прямой и обратной последователь-

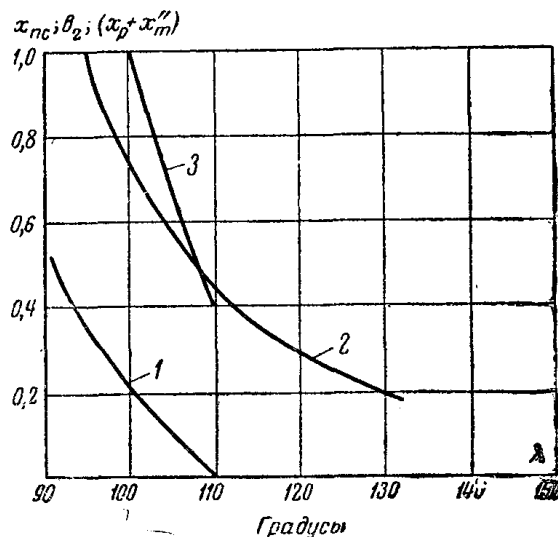


Рис. 6.

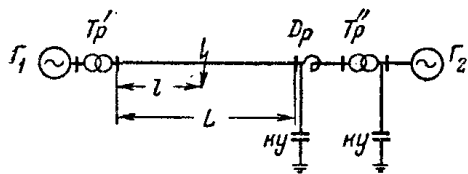


Рис. 7.

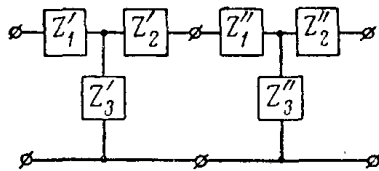


Рис. 9.

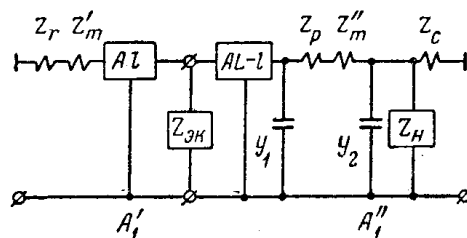


Рис. 8.

ностей определяются известными способами. Для линии они получаются в результате расчета ее при помощи гиперболических функций. Определение матричных параметров цепей с распределенными параметрами в схеме нулевой последовательности дается в [6]. Определив коэффициент распространения и волновое сопротивление для токов нулевой последовательности через гиперболические функции, можно найти матричные параметры эквивалентного четырехполюсника, который при сверхпроводящей стороне будет трехполюсником. Трехполюсники отдельных элементов складываются в схеме каждой последовательности между собой, в результате чего получаем три эквивалентных трехполюсника прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Связав комплексные схемы замещения обратной и нулевой последовательностей в соответствии с уравнениями граничных условий, можно найти параметры эквивалентного трехполюсника, который, будучи введенным в схему прямой последовательности, учитывал бы действие несимметричного к. з. (расчетная схема рис. 7). Составим схему замещения для тока прямой последовательности (рис. 8).

Члены матриц $[A_1']$ и $[A_1'']$ зависят от расстояния до точки к. з. Аналогично составляются схемы замещения для токов нулевой и обратной последовательностей. Преобразуем схемы обратной и нулевой последовательностей до эквивалентной ветви рис. 9. Из рис. 9 видно, что

$$Z_2' + Z_3' = \frac{D_2' - 1}{C_2'} + \frac{1}{C_2'} = \frac{D_2'}{C_2'}; \quad (9)$$

$$Z_1'' + Z_3'' = \frac{A_2'' - 1}{C_2''} + \frac{1}{C_2''} = \frac{A_2''}{C_2''}. \quad (10)$$

Складывая их параллельно, получим:

$$(Z_2' + Z_3') \parallel (Z_1'' + Z_3'') = \frac{A_2'' D_2'}{D_2' C_2'' + A_2'' C_2'}. \quad (11)$$

Такое же по структуре уравнение получим от схемы нулевой последовательности

$$(Z_2' + Z_3') \parallel (Z_1'' + Z_3'') = \frac{A_0'' D_0'}{D_0' C_0'' + A_0'' C_0'}. \quad (12)$$

При однополюсном к. з. сопротивление эквивалентной ветви будет равно:

$$Z_{\text{экв}} = \frac{A_0'' D_0'}{D_0' C_0'' + A_0'' C_0'} + \frac{A_2'' D_2'}{D_2' C_2'' + A_2'' C_2'}. \quad (13)$$

Как известно, эквивалентное сопротивление при двухполюсном к. з. на землю получится от параллельного сложения результирующих сопротивлений схем обратной и нулевой последовательностей, а при

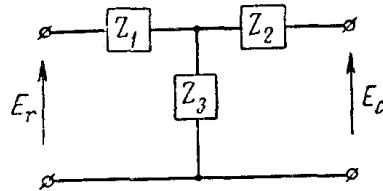


Рис. 10.

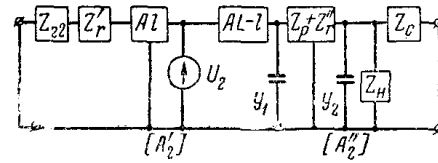


Рис. 11.

двухполюсном — только сопротивлению обратной последовательности. Подставив найденные значения $Z_{\text{экв}}$ в схему замещения прямой последовательности по месту повреждения, находим обобщенную матрицу всех элементов прямой последовательности $[A]$ и приводим схему к виду рис. 10. В схеме: $Z_1 = \frac{A-1}{C}$, $Z_2 = \frac{D-1}{C}$, $Z_3 = \frac{1}{C}$. Режим работы всей системы может быть представлен как результат двух независимых режимов. Один из них имеет место при E_r и $E_c = 0$, второй при E_c и $E_r = 0$. Налагая токи и напряжения этих двух режимов, получим действительный режим работы системы.

Поскольку в схему замещения каждой последовательности входят элементы емкости и индуктивности, зависящие от расстояния до точки к. з., то можно принципиально подобрать такую длину линии до точки к. з., в которой входное сопротивление при к. з. окажется равным нулю (без учета потерь). Рассмотрим однополюсное к. з. Схема прямой последовательности для всех видов к. з. (изменяется только $Z_{\text{экв}}$) показана на рис. 8. Чтобы определить величину $Z_{\text{экв}}$ для однополюсного к. з., необходимо составить схемы замещения обратной и нулевой

последовательностей. Схема обратной последовательности показана на рис. 11, нулевой последовательности—на рис. 12.

Предварительно надо выяснить вопрос о резонансе в схемах обратной и нулевой последовательностей. Дело в том, что при к. з. в какой-нибудь точке настроенной на полуволну электропередачи может быть резонанс в схемах обратной и нулевой последовательностей. Это приводит к значительному возрастанию токов соответствующих последовательностей и к перенапряжениям.

Приведенные выше схемы обратной и нулевой последовательностей (рис. 11, 12) можно рассматривать как общие для всех видов несимметричных к. з., считая, конечно, что для двухполюсного к. з. схемы нулевой последовательности не будет. От вида к. з. будут зависеть только приложенные напряжения к этим схемам в точке к. з. Для упрощения считаем, что токи нулевой последовательности протекают только между трансформаторами отправного и приемного концов линии. Последовательным сложением четырехполюсников находим обобщенные матрицы схем обратной и нулевой последовательностей справа и слева от точки к. з. Затем, приравнявая нулю значения входных сопротивлений к. з. и решая относительно λ и λ_0 , получим длину линии, необходимую для резонанса, в зависимости от параметров к. у. и концевых устройств как справа от точки к. з., так и слева:

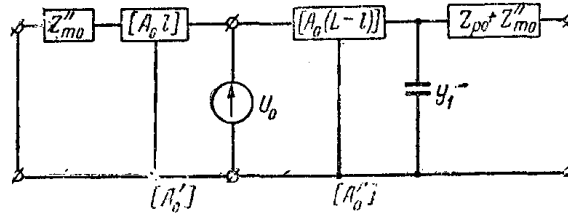


Рис. 12.

1) для схемы обратной последовательности справа

$$\operatorname{tg} \lambda_{(L-l)} = \frac{-(x'_k + x_{c2} - x''_k x_{c2} b_2)}{x''_k x_{c2} b_2 b_1 - b_1 x_{c2} - b_2 x_{c2} - x''_k b_1 + 1}; \quad (14)$$

2) для схемы обратной последовательности слева

$$\operatorname{tg} \lambda_l = -(x_{r2} + x'_r); \quad (15)$$

3) для схемы нулевой последовательности справа

$$\operatorname{tg} \lambda_{0(L-l)} = -\frac{x_{k0}}{z_{c0} - x_{k0} z_{c0} b_1}; \quad (16)$$

4) для этой же схемы слева

$$\operatorname{tg} \lambda_{0l} = -\frac{x'_r}{z_{c0}}. \quad (17)$$

Анализ зависимостей (14), (15) показывает, что резонанс в схеме обратной последовательности возможен при к. з. в линии только в случае, если ее длина будет более 2 000 км. Местоположение резонансной точки зависит от величины элементов к. у. и концевых устройств. Резонанс в схеме нулевой последовательности, ввиду того, что волновая длина линии для тока нулевой последовательности значительно больше, чем для прямой и обратной последовательностей (примерно в 1,5 раза), возникает при длине линии даже меньше 1 500 км.

Теперь вернемся к схеме прямой последовательности. Подставляя значения матричных параметров обобщенных матриц схем обратной и нулевой последовательностей справа и слева от точки к. з. в формулу $Z_{э\kappa\theta}$, определяем его величину, и, найдя затем обобщенные матрицы

схемы прямой последовательности слева и справа от точки к. з. $[A'_1]$ $[A''_1]$, находим обобщенную матрицу всей схемы прямой последовательности, как произведение $[A'_1] Z_{\text{экв}} \cdot [A''_1]$.

По принципу наложения сопротивления к. з. в режиме, когда действует только э. д. с. E_r , а $E_c = 0$, будет равно:

$$Z'_{\text{к.з1}} = \frac{\left(A'_1 + B'_1 \frac{1}{Z_{\text{экв}}}\right) B''_1 + B'_1 D''_1}{\left(C'_1 + D'_1 \frac{1}{Z_{\text{экв}}}\right) B''_1 + D'_1 D''_1}. \quad (18)$$

В режиме, когда $E_r = 0$ и действует E_c , получится

$$Z''_{\text{к.з1}} = \frac{\left(A'_1 + B'_1 \frac{1}{Z_{\text{экв}}}\right) B''_1 + B'_1 D''_1}{\left(A'_1 + B'_1 \frac{1}{Z_{\text{экв}}}\right) A''_1 + B'_1 C''_1}. \quad (19)$$

Определить в общем виде местоположение резонансных точек в схеме прямой последовательности не представляется возможным ввиду различия параметров линии для токов прямой и обратной последовательностей и нулевой последовательности. Это различие параметров расстраивает чистый резонанс, под которым понимается равенство нулю мнимой части сопротивления к. з. в схеме прямой последовательности. Под резонансом в этом случае следует понимать минимальное значение сопротивления к. з., а под резонансной длиной — ту длину при к. з., в которой обеспечивается этот минимум. Расчеты показывают, что минимальное значение сопротивления к. з. в схеме прямой последовательности имеет место при большей длине линии, чем резонансная длина при трехполюсном к. з. Местоположение точки, при к. з. в которой будет минимум сопротивления токам прямой последовательности, не совпадает с резонансными точками схем обратной и нулевой последовательностей. Это указывает на то, что перенапряжения в электропередачах, настроенных на полуволну, могут возникать при однополюсном к. з. в довольно широкой области длины линии.

Для случая двухполюсного к. з. и двухполюсного к. з. на землю условия резонанса в схемах обратной и нулевой последовательностей уже рассмотрены. Что касается схем прямых последовательностей, то изменятся только величины эквивалентных сопротивлений от схем обратной и нулевой последовательностей. Определяя эти сопротивления для двухполюсного к. з. и двухполюсного к. з. на землю и вставляя в схему прямой последовательности, можно затем определить сопротивления к. з. и их минимум. Так как параметры схемы нулевой последовательности не входят в общее выражение сопротивления к. з. для тока прямой последовательности при двухполюсном к. з., то имеет место резонанс и в схеме прямой последовательности. Точка резонанса располагается дальше, чем при трехполюсном к. з. При двухполюсном к. з. на землю чистого резонанса в схеме прямой последовательности не будет, но возможен резонанс в схеме нулевой последовательности при длине линии, меньшей 1 500 км. Для более ясного освещения данного вопроса с целью выяснения количественной его стороны, а также изучения влияния короны требуются дальнейшие исследования.

Выводы

1. Все настроенные на полуволну электропередачи характеризуются резонансными явлениями как при трехполюсном к. з., так и при несимметричных к. з.

2. В зависимости от схемы настройки и длины входящей в нее линии резонансные явления возникают при к. з. в самой линии или при к. з. в других элементах электропередачи.

3. При выборе схемы настройки необходимо стремиться ликвидировать резонансные явления при к. з. в самой линии. Для этого наиболее подходящей будет схема с концевыми к. у., в качестве которых используются генераторы и трансформаторы.

4. Если длина линии, входящей в такую электропередачу, будет не более 2 000 км, то резонансных явлений не будет как при трехполюсном к. з. в пределе длины линии, так и при несимметричных к. з., кроме резонанса в схеме нулевой последовательности при однополюсном к. з. и двухполюсном к. з. на землю.

Литература

1. Вульф А. А. и Щербачев О. В., Режим короткого замыкания в линиях электропередачи, настроенных на полволны, «Электричество», 1945, № 4.

2. Агафонов В. Т., Использование концевых устройств при настройке линий на полуволну (печатается в настоящем сборнике).

3. Вагнер К. Ф. и Эванс Р. Д., Метод симметричных составляющих, ОНТИ, 1936.

4. Щедрин П. Н., Токи короткого замыкания высоковольтных систем, ОНТИ, 1935.

5. Ульянов С. А., Короткие замыкания в электрических системах, Госэнергоиздат, 1952.

6. Атабеков Г. И., Дистанционный принцип защиты дальних электропередач, Ереван, 1953.
