

Проверка кабельных линий 6–500 кВ при коротких замыканиях. Условия термической стойкости и невозгораемости

УДК 621.315.21

Двадцать лет назад в 1998 году РАО «ЕЭС России» выпустило циркуляр «О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания» [1]. Появление такого документа, по всей видимости, стало следствием ряда пожаров, которые были обусловлены неверным выбором сечений кабельных линий. Вместе с тем, новые стандарты по кабельным линиям 6–500 кВ, выпущенные в последние годы, уже не содержат указаний о проверке кабелей на невозгорание при воздействии токов короткого замыкания, и по этой причине проектные организации постепенно исключили подобную проверку из своей практики. В новой статье сделана попытка разобраться, действительно ли можно не опасаться возгорания кабельных линий 6–500 кВ при коротких замыканиях. Также здесь предложены формулы для проверки КЛ на невозгораемость, которых нет ни в циркуляре [1], ни в других нормах.

Дмитриев М.В.,

к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

ВВЕДЕНИЕ

При коротком замыкании (КЗ) в кабельной линии (КЛ) ток КЗ проходит вдоль жилы КЛ до места повреждения ее изоляции, где попадает в экран, по которому возвращается к концам КЛ и через заземляющие устройства экрана уходит в землю. Проверка кабеля на термическую стойкость и невозгораемость заключается в расчете температур жилы и экрана, достигаемых за время прохождения тока КЗ, и сравнение этих температур с допустимыми значениями, при которых изоляция КЛ (и оболочка КЛ):

- не плавится и не деградирует;
- не воспламеняется.

Предельная температура термостойкости изоляции КЛ достигается раньше, чем температура воспламенения. По всей видимости, именно поэтому считается, что если при КЗ кабель прошел проверку термостойкости, то проверка невозгораемости уже лишена смысла и может не выполняться. Однако есть ряд аргументов, которые показывают недостаточную корректность сложившейся практики.

1. Для неотчетливых КЛ и/или КЛ малой протяженности с целью экономии средств появились предложения [2, 3] проверять термостойкость для случая, когда КЗ отключается основной защитой, а не резервной, что позволяет применять кабели сниженного сечения жилы и экрана. Несмотря на это, невозгораемость КЛ все равно необходимо проверять по резервной защите, и, следовательно, может получиться, что сохранение термостойкости

Ключевые слова:

кабельная линия, сшитый полиэтилен, короткое замыкание, термическая стойкость, невозгораемость

Keywords:

cable line, cross-linked polyethylene, short circuit, thermal stability, non-ignition

КЛ при малом времени защиты не будет означать сохранение невозгораемости КЛ при большом времени.

2. Согласно [4] и другим нормативным документам проверка термической стойкости проводников всегда выполняется с учетом не только периодической, но и аperiodической составляющей тока КЗ. Несмотря на такое базовое правило, расчет термической стойкости КЛ по непонятным причинам проводится без учета тепла, выделившегося от аperiodической составляющей. Внимание на это впервые было обращено в [2], где показано, что аperiodическая составляющая оказывает заметное влияние на температуру жилы и экрана. Позднее к такому же выводу пришли и в [3]. Наличие аperiodической составляющей, неучтенной при проверке термической стойкости КЛ, теоретически способно перегреть кабель до температур самовозгорания.

3. В соответствии с материалами СИГРЭ [5] при выборе сечения кабелей надо принимать во внимание возможность повторного прохождения по ним токов КЗ, то есть следует учитывать наличие автоматического повторного включения (АПВ). Если линия целиком кабельная, то АПВ на ней запрещено ПУЭ и другими документами, однако для кабельно-воздушных линий (КВЛ), имеющих и кабельные, и воздушные участки, АПВ зачастую все же используется. К сожалению, не всегда термическая стойкость жил и экранов КЛ проверяется с учетом повторного протекания токов КЗ в цикле неуспешного АПВ. Например, возможна ситуация, когда на стадии проекта АПВ на КВЛ было запрещено и не учитывалось при выборе кабелей, однако позже сетевая компания поменяла решение и ввела АПВ — тогда КЗ на кабельном участке КВЛ даст неуспешное АПВ и, вероятно, приведет к перегреву КЛ до температуры самовозгорания. Расчет температуры кабелей при АПВ на КВЛ выполнен в [3].

4. Возгорание кабеля вряд ли является проблемой для тех КЛ, которые были проложены в открытом грунте. Однако в последние годы КЛ все чаще размещают в грунте в полимерных трубах (рисунок 1а), и тогда воздух, заполняющий трубу, способен сыграть негативную роль, если кабель разогреет до температуры самовозгорания. Вопросы горения кабелей в полимерных трубах рассмотрены, например, в [6, 7] и представляются заслуживающими серьезного внимания.

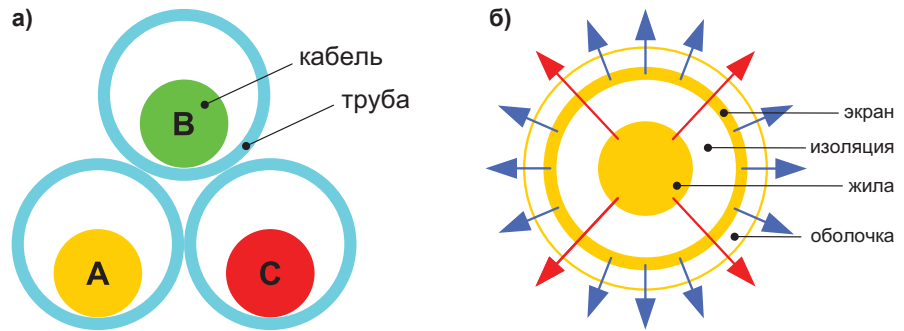


Рис. 1. Однофазный кабель 6–500 кВ: а) пофазная прокладка в трубах; б) охлаждение жилы и экрана

Итак, отсутствие в нормах на кабели четкой информации о выборе времени прохождения тока КЗ, а также об учете АПВ и аperiodической составляющей тока КЗ, может привести не только к ошибкам при проверке КЛ на термическую стойкость, но и к более серьезным последствиям — достижению КЛ температуры самовозгорания. Ситуация усугубляется ростом числа КЛ, проложенных в трубах.

По мнению автора, если ошибки и неточности при проверке термической стойкости КЛ еще допустимы, то проверка невозгораемости КЛ должна проводиться с учетом абсолютно всех факторов, повышающих температуру кабеля — это максимальное время КЗ, наличие аperiodической составляющей, неуспешное АПВ для КВЛ (или даже несколько таких АПВ подряд).

МЕСТО И ВИД КЗ

При КЗ проверка КЛ может осуществляться:

- на термическую стойкость;
- на невозгораемость;
- на наведенные токи и напряжения.

Важно понимать, что в перечисленных случаях рассматриваются разные места возникновения КЗ:

- КЗ в самом кабеле — рисунок 2а (вопросы термической стойкости и невозгораемости);
- КЗ в сети вне кабеля — рисунки 2б и 2в (вопросы наведенных токов и напряжений).

Следует отметить, что в расчетах термической стойкости и невозгораемости используется полный

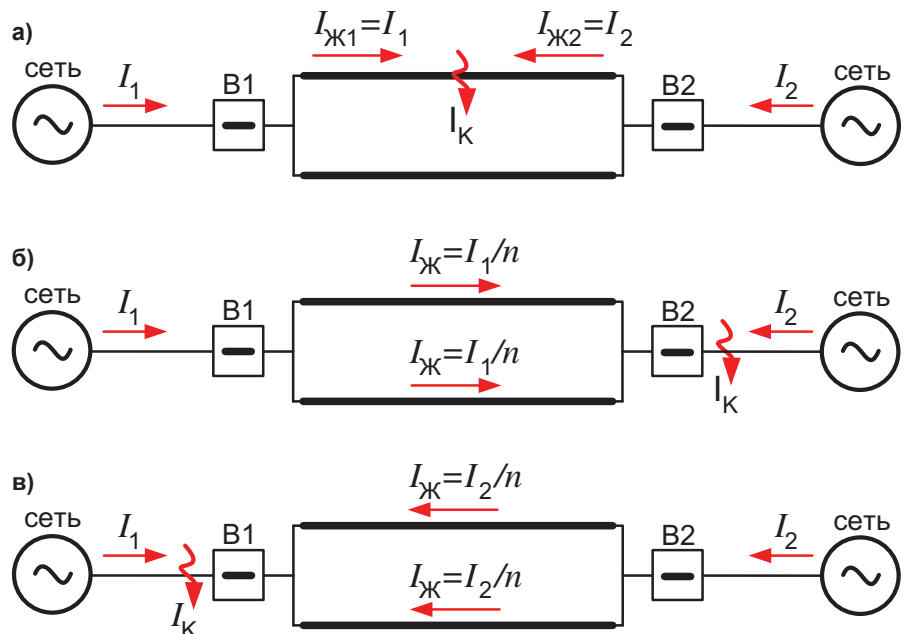


Рис. 2. КЗ в сети с КЛ, имеющей n кабелей на фазу: а) КЗ непосредственно в КЛ; б) КЗ на шинах в конце КЛ; в) КЗ на шинах в начале КЛ

ток КЗ $I_k = I_1 + I_2$, определяемый суммой составляющих тока КЗ от обоих концов КЛ (рисунок 2а). При этом не имеет значения, сколько у КЛ кабелей на каждую фазу или сколько у нее параллельных цепей.

Если говорить о расчетах наведенных токов и напряжений, то здесь важную роль играет не весь ток КЗ, а только та его часть, которая проходит по жиле КЛ, и поэтому здесь уже важно учитывать число кабелей на фазу. Из двух схем на рисунках 2б и 2в, отличающихся местом КЗ, расчеты достаточно сделать в той, где ток в жиле больше.

Далее в статье основное внимание сосредоточим на вопросах термостойкости и невозгораемости, так как наведенные в экранах и жилах КЛ токи и напряжения уже были подробно изучены [8, 9].

При КЗ непосредственно в КЛ величины токов в жилах и экранах КЛ будут зависеть от двух факторов:

- от схемы сети (кольцевая или радиальная);
- от схемы заземления экранов (двустороннее заземление, двустороннее заземление с транспозицией, одностороннее заземление).

В качестве примера на рисунке 3 рассмотрено КЗ для КЛ в кольцевой схеме (линия имеет двустороннее питание). В условиях рисунка 3 ток КЗ является суммой токов жил слева $I_{Ж1}$ и справа $I_{Ж2}$ от места повреждения, он равен $I_k = I_{Ж1} + I_{Ж2}$, аналогично ток КЗ может быть найден через токи экранов $I_k = I_{Э1} + I_{Э2}$. Эти правила нарушаются в двух случаях. Во-первых, когда экраны имеют одностороннее заземление (рисунок 3б), что обеспечивает $I_k = I_{Э1}$ или $I_k = I_{Э2}$ (зависит от того, на каком из двух концов КЛ заземлены экраны). Во-вторых, когда схема сети радиальная (на конце «нагрузка», а не «сеть»), что обеспечивает $I_k = I_{Ж1}$.

Видно, что в общем случае каждый из токов $I_{Ж1}$, $I_{Ж2}$, $I_{Э1}$, $I_{Э2}$ по отдельности оказывается меньше полного тока КЗ I_k . Несмотря на это, в проектной практике вне зависимости от схемы сети и схемы заземления экранов для упрощения расчетов и во избежание ошибок проверку жил и экранов КЛ проводят на полный ток КЗ I_k .

Проверка жилы и экрана выполняется при одном и том же токе I_k . Поскольку у многих КЛ сечение жилы в несколько раз больше, чем сечение экрана, то главную опасность ток КЗ представляет именно для экранов, и именно их проверке следует уделять основное внимание.

В качестве конкретной величины I_k используют наибольший из токов КЗ на шинах в начале и конце КЛ.

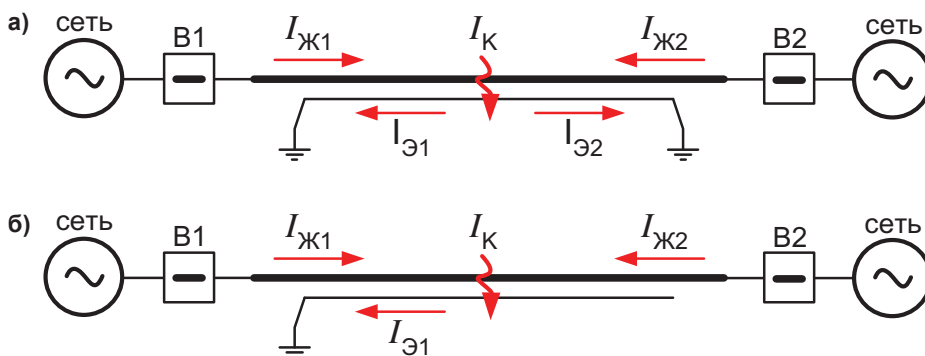


Рис. 3. Повреждение КЛ в кольцевой схеме: а) двустороннее заземление экранов без транспозиции или с ней; б) одностороннее заземление экранов

Например, если в начале КЛ $I_k = 20$ кА, а в конце КЛ $I_k = 30$ кА, то проверку термической стойкости и невозгораемости КЛ необходимо проводить для $I_k = 30$ кА. Все цифры — это действующие значения периодической составляющей тока КЗ, а параметры аperiodической составляющей оговаривается отдельно.

Согласно нормативным документам ([4] и др.) при проверке проводников на термическую стойкость (и невозгораемость) в качестве расчетного вида КЗ следует принимать тот, который обеспечит наибольший нагрев:

- трехфазное или однофазное КЗ в сетях с заземленной нейтралью;
- трехфазное или двухфазное (двойное) КЗ в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью.

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ КЗ И УЧЕТ АПВ

В стандартах [10, 11], посвященных КЛ 6–500 кВ, приводятся формулы для проверки термической стойкости кабелей. Хотя результаты расчетов существенно зависят от величины тока КЗ I_k и длительности его прохождения t_k , в документах [10, 11] по непонятным причинам нет указаний о том, какое t_k использовать.

Формулы для проверки термической стойкости упрощаются, если закладывать в расчеты время $t_k = 1$ с, и поэтому в [10, 11], а также в каталогах кабельных заводов примеры расчета выполнены именно при $t_k = 1$ с. Наличие указанных примеров и одновременное отсутствие правил выбора t_k привело некоторых проектировщиков к мысли о том, что использование $t_k = 1$ с вполне оправданно и законно. С этим никак нельзя согласиться, ведь на самом деле t_k может быть как менее, так и более 1 с.

В статьях [2, 3] высказывается предположение, что правила выбора t_k должны зависеть от степени ответственности КЛ, а также от ее длины. Для протяженных КЛ 6–35 кВ допустимо проверять жилы и экраны при времени действия основной защиты — это снизит стоимость КЛ, позволит минимизировать сечение экранов, что обеспечит возможность их простого двустороннего заземления без риска появления в экранах значительных наведенных токов и потерь мощности, характерных для КЛ с повышенными сечениями экранов [8].

Для протяженных КЛ 6–35 кВ и для любых КЛ 110–500 кВ простое заземление экранов с двух сторон обычно не применяется, а предпочтение отдается заземлению с одной стороны или транспозиции, обеспечивающих полное отсутствие экранных токов

и потерь мощности, причем вне зависимости от сечения экранов КЛ. Поэтому выбор КЛ на малые величины времени t_k , приводящий к снижению сечения экрана, тут никак не повлияет на потери в экранах, тогда как стоимость замены КЛ, если КЛ потеряет термическую стойкость при КЗ, будет высока (в силу большой длины и/или класса напряжения). Следовательно, перечисленные КЛ лучше проверять не по основной,

а по резервной защите, закладывая в расчеты повышенные значения t_k .

В части выбора времени t_k интересна позиция, изложенная в ГОСТ [4], где в п. 4.1.5 написано: «Расчетную продолжительность КЗ при проверке проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость следует определять путем сложения времени действия основной релейной защиты, в зону которой входят проверяемые проводники и электрические аппараты, и полного времени отключения соответствующего выключателя, а при проверке кабелей на невозгораемость — путем сложения времени действия резервной релейной защиты и полного времени отключения ближайшего к месту КЗ выключателя».

Сложно утверждать, можно ли распространять требования этого общего ГОСТ на кабели со СПЭ-изоляцией, имеющие свою собственную специфику, но, по крайней мере, изучив ГОСТ, целесообразно согласиться со следующим:

- значения времени t_k , используемые в расчетах термической стойкости и невозгораемости, не обязательно должны быть равны друг другу, а могут существенно отличаться;
- при проверке невозгораемости время t_k должно выбираться с запасом и отвечать действию резервной защиты, но никак не основной.

В п. 4.1.5 ГОСТ сказано, что t_k получается суммированием времени действия основной (резервной) защиты, а также полного времени отключения выключателя. Хотя в ГОСТ не упоминается возможность отказа выключателя КЛ, но в некоторых случаях его можно было бы учесть, заложив в расчеты t_k не простое отключение, а отключение с действием устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ). Впрочем, надежность современных выключателей — отдельная тема исследований.

Кроме перечисленных вопросов есть и еще один важный — необходимо дать в нормативных документах разъяснение понятию «резервная защита». Например, п. 9.9.3 Стандарта [12] гласит «Установка второй быстродействующей защиты предусматривается на особо ответственных линиях напряжением 110–220 кВ. Две основные быстродействующие защиты должны устанавливаться на кабельных и кабельно-воздушных линиях, а также на воздушных линиях в местах массовой застройки». Эта фраза означает, что для определенных линий предусматривается установка второй быстродействующей защиты, которая обеспечивает такое же время отключения КЗ как и основная защита, дублирует собой основную защиту, но при этом формально не является резервной.

Под спорное понятие «резервная защита» попадает и устройство ЛЗШ (логическая защита шин), применяемое для сетей среднего напряжения, которое обеспечивает отключение КЗ в линии с меньшим временем, чем вышестоящая защита (которая формально является резервной).

При определении времени t_k следует учитывать наличие на линии АПВ. Если для чисто кабельных линий АПВ запрещено, то для КВЛ встречается три варианта:

- 1) повторное включение КВЛ запрещено;
- 2) повторное включение разрешено только тогда, когда КЗ находится на воздушном участке КВЛ, а не на кабельном («селективное АПВ»);
- 3) повторное включение КВЛ разрешено.

Возможность повторного прохождения по КЛ тока КЗ есть только в третьем варианте организации АПВ. Также следует отметить, что попытки включить КВЛ под напряжение могут повторяться несколько раз подряд, и это следует принимать во внимание при определении t_k для каждого конкретного объекта. Поскольку АПВ бывает растянуто во времени, то процесс нагрева КЛ уже не будет адиабатическим, и придется учитывать охлаждение КЛ за время бестоковой паузы.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИЛЫ И ЭКРАНА

В настоящее время при строительстве КЛ 6–500 кВ в России и в мире массово используют кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) как однофазные, так и трехфазные. На рисунке 1б показана конструкция однофазного кабеля, включающая в себя жилу, изоляцию, экран и оболочку.

Согласно нормам [10, 11] и многим другим документам термическая стойкость (термостойкость) кабелей со СПЭ-изоляцией сохраняется, если за время прохождения тока КЗ температура:

- не превышает 250°C для жилы;
- не превышает 350°C для экрана.

Указанные температуры используются при обязательной проверке кабелей всех классов 6–500 кВ на термостойкость при прохождении токов КЗ, и главная цель такой проверки — убедиться в отсутствии перегрева СПЭ-изоляции. Однако здесь возникает вопрос: если жила и экран с разных сторон примыкают к одной и той же СПЭ-изоляции, то почему для экрана допустимая температура существенно выше, чем для жилы? Ответ на вопрос, по всей видимости, заключается в том, что кроме максимальной температуры жилы и экрана также важно и время, в течение которого эта температура сохраняется.

В [13] была дана оценка постоянным времени охлаждения жилы и экрана, и было показано, что отведение тепла от экрана идет гораздо быстрее, чем от жилы. Это несложно понять по рисунку 1б, где отведению тепла от жилы мешает изоляция и оболочка, тогда как отведению тепла от экрана — лишь оболочка. Таким образом, при КЗ для экрана допускается более высокая температура (350°C), чем для жилы (250°C), но зато экран быстрее охлаждается в сравнении с жилой.

Строго говоря, неверно принимать для всех кабелей термостойкость жилы и экрана на одном и том же уровне 250°C и 350°C соответственно. Как было показано в [13], процесс охлаждения КЛ существенно зависит от сечения ее жилы и толщины ее изоляции, в свою очередь определяемой классом напряжения КЛ. Однако едва ли проектные организации готовы к детальным проверкам термической стойкости КЛ, да и не найти достаточного числа экспериментальных данных, свидетельствующих об опасности тех или иных сочетаний температуры и времени ее воздействия.

Табл. 1. Физические свойства меди и алюминия

Величина	Размерность	Медь	Алюминий
γ	кг/м ³	8890	2700
c	Дж/(кг·К)	380	920
ρ_0	Ом·м	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
α	о.е.	0,0039	0,0049

Табл. 2. Коэффициент K по (2) для жилы и экрана

Элемент	Материал	$T_H, ^\circ\text{C}$	$T_K, ^\circ\text{C}$		$K, \text{кА/мм}^2$	
			Термич. стойкость	Невозгораемость	Термич. стойкость	Невозгораемость
Жила	Медь	90	250	400	0,141	0,180
	Алюминий				0,094	0,119
Экран	Медь	80	350	550*	0,174	0,207
	Алюминий				0,115	0,136

* требует подтверждения

Обсудив термостойкость, обратимся к невозгораемости. В циркуляре [1], а также в ГОСТ [4] и СТО [10] указывается, что для КЛ с СПЭ-изоляция предельная температура жилы по условиям невозгораемости составляет 400°C (при времени до 4 с). Никаких указаний относительно предельной температуры экрана КЛ найти не удалось и, вероятно, этот вопрос может стать интересной темой для исследований, а пока остается только догадываться, какую именно температуру экрана КЛ следовало бы принять в качестве предельной с точки зрения невозгораемости.

Если в вопросах термостойкости КЛ допустимые температуры жилы и экрана, составляющие 250°C и 350°C, отличаются друг от друга в 1,4 раза, то можно было бы предположить, что и в вопросах невозгораемости допустимые температуры жилы и экрана отличаются примерно также. Тогда, опираясь на предельную температуру жилы 400°C, в качестве предельной температуры экрана экспертно примем 550°C. Еще раз подчеркнем, что эта цифра пока не имеет экспериментального обоснования, а является предположением.

ПРОВЕРКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ И НЕВОЗГОРАЕМОСТИ

В статье [2] показано, что во избежание недопустимого разогрева проводника проходящим по нему током КЗ его сечение должно удовлетворять неравенству:

$$K \cdot F \geq I_K \sqrt{K_A \cdot t_K}, \quad (1)$$

где F — сечение проводника (мм²); I_K и t_K — ток КЗ (кА) и время его прохождения (с); K — коэффициент, зависящий от свойств проводника (кА√с/мм² или проще кА/мм²); K_A — коэффициент (о.е.), учитывающий аperiodическую составляющую тока КЗ (отсутствие аperiodической составляющей отвечает случаю $K_A = 1$).

Предельная температура проводника T_K , превышение которой недопустимо, входит в выражение для коэффициента K , согласно [2] имеющее вид:

$$K = \sqrt{\gamma \cdot c \cdot (T_K - T_H) / \rho}, \quad (2)$$

где γ — удельная плотность материала проводника; c — удельная теплоемкость материала проводника; T_K и T_H — начальная и конечная температура проводника; $\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T_{CP} - T_{20})]$ — удельное активное сопротивление материала проводника; ρ_0 — удельное активное сопротивление проводника при температуре $T_{20} = 20^\circ\text{C}$; α — темпера-

турный коэффициент сопротивления проводника, $T_{CP} = (T_K - T_H)/2$ — средняя температура проводника при его нагреве от T_H до T_K .

Начальная температура T_H жилы и экрана указана в СТО [11] (см. п. 5.1.10 и п. 8.2). Подставляя в формулы (1) и (2) температуру T_K , отвечающую термостойкости или невозгораемости, можно проверить кабель, соответственно, на термостойкость или невозгораемость. Необходимые характеристики меди и алюминия даны в таблице 1, результаты расчетов коэффициента K — в таблице 2, пример расчета для медного экрана КЛ — в таблице 3 (без учета аperiodической составляющей тока).

Выбор медного экрана для примера расчета обусловлен двумя причинами. Во-первых, сечение экрана обычно в разы меньше, чем сечение жилы, и поэтому при КЗ именно экран КЛ, а не жила, первым достигает предельных температур. Во-вторых, выбирая между экранами из меди или алюминия, в России традиционно отдают свое предпочтение меди.

Если бы время t_K при проверке на термостойкость и время t_K при проверке на невозгораемость совпадали, то тогда из таблицы 3 следовал бы вывод: предельные токи КЗ по условию невозгораемости в 1,19 раза (на 19%) превышают предельные токи КЗ по условию термостойкости. Поскольку времена t_K для проверок термостойкости и невозгораемости могут не совпадать друг с другом, то сложно заранее утверждать, в каком соотношении будут находиться токи КЗ, предельные по термостойкости и невозгораемости. Следовательно, отказ от проверки невозгораемости КЛ, который произошел за последние годы, нельзя считать обоснованным и безопасным.

Отсутствие в нормах четких правил по

Табл. 3. Допустимый ток КЗ по (1). Рассмотрен медный экран при $t_K = 1$ с и $K_A = 1$

$F_{\text{э}}, \text{мм}^2$	$I_K, \text{кА}$	
	Термическая стойкость ($K = 0,174$)	Невозгораемость ($K = 0,207$)
35	6,1	7,2
50	8,7	10,4
70	12,2	14,5
95	16,5	19,7
120	20,9	24,8
150	26,1	31,1
185	32,2	38,3
240	41,8	49,7
300	52,2	62,1
400	69,6	82,8

выбору t_k , по учету аperiodических токов (коэффициент K_A), по учету АПВ на КВЛ не позволяет сделать вывод, что выполненная проектировщиком проверка термостойкости КЛ также гарантирует и невозгораемость КЛ.

АПЕРИОДИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТОКА КЗ

Пример осциллограммы тока КЗ, содержащей затухающую аperiodическую составляющую, показан на рисунке 4. Согласно [2] учет аperiodической составляющей тока КЗ можно выполнить при помощи коэффициента K_A , входящего в формулу (1):

$$K_A = 1 + \frac{1 - \exp(-2t_k/\tau_k)}{t_k/\tau_k}, \quad (3)$$

где t_k — время прохождения тока КЗ; τ_k — постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ.

Коэффициент K_A зависит от постоянной времени τ_k , которая, в свою очередь, зависит от схемы сети, но в первом приближении может быть принята равной 75 мс для шин подстанций и 315 мс для шин электростанций. Значения K_A даны в таблице 4, откуда видно, что отказ от учета аperiodической составляющей наиболее опасен:

- для КЛ, проложенных на территории электрических станций или вблизи от них;
- при малых длительностях КЗ.

В качестве примера рассмотрим проверку медного экрана сечением 150 мм² для случая, когда кабель проложен в сети собственных нужд электрической станции ($\tau_k = 0,315$ с). Пусть время КЗ одинаково и при проверке на термостойкость, и при проверке на невозгораемость и составляет $t_k = 0,6$ с. Тогда $K_A = 1,513$ о.е. (таблица 4).

Ток КЗ, предельный по условиям **невозгораемости**, может быть получен при $K = 0,207$ кА/мм² (таблица 2). С помощью (1) найдем I_k :

$$I_k = \frac{K \cdot F}{\sqrt{K_A \cdot t_k}} = \frac{0,207 \cdot 150}{\sqrt{1,513 \cdot 0,6}} = 32,6 \text{ кА}. \quad (4)$$

Ток КЗ, предельный по условиям **термостойкости**, может быть получен при $K = 0,174$ кА/мм² (таблица 2). С помощью (1) найдем I_k :

$$I_k = \frac{K \cdot F}{\sqrt{K_A \cdot t_k}} = \frac{0,174 \cdot 150}{\sqrt{1,513 \cdot 0,6}} = 27,4 \text{ кА}. \quad (5)$$

Предельным для экрана будет признано меньшее из двух значений тока КЗ, полученных в (4) и (5). При условии равенства закладываемого в расчеты времени t_k меньшим по величине всегда будет ток КЗ при проверке термостойкости (5), и тогда может показаться, что в проверке невозгораемости (4) нет смысла. Однако проблема заключается в том, что расчет термостойкости КЛ проектировщик делает не так, как показано в (5), а без учета аperiodического тока:

$$I_k = \frac{K \cdot F}{\sqrt{t_k}} = \frac{0,174 \cdot 150}{\sqrt{0,6}} = 33,7 \text{ кА}. \quad (6)$$

Итак, в условиях примера проектная организация будет полагать, что медный экран сечением 150 мм²:
 – остается термостойким при токе КЗ вплоть до 33,7 кА (6), хотя на самом деле предельный ток КЗ для такого экрана составляет всего 27,4 кА (5);
 – без проблем выдержит любые токи КЗ менее 33,7 кА (6), хотя на самом деле уже при токе 32,6 кА (4) возможно возгорание кабеля.

Видно, что учет аperiodической составляющей тока КЗ особенно важен для КЛ, которые проложены в сети собственных нужд электрических станций, так как, во-первых, здесь достигаются наибольшие K_A и, во-вторых, прокладка КЛ идет не в грунте, а в лотках, галереях, эстакадах, что может способствовать развитию огня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мнению автора, в настоящее время проектирование КЛ проводится с рядом ошибок, которые не позволяют быть уверенным, что прокладываемые КЛ на самом деле при КЗ обладают термостойкостью и невозгораемостью. В подобной ситуации разумным было бы вернуть в проектную практику проверку невозгораемости КЛ, о которой говорится в циркуляре [1] и ряде других документов. Также актуальным является внесение дополнений в нормы по КЛ, где отдельно по термостойкости и отдельно по невозгораемости следовало бы дать ответы на все важнейшие вопросы, связанные с проверкой сечений жилы и экрана:

- выбор расчетного тока КЗ I_k ;
- учет аperiodической составляющей тока КЗ;
- выбор расчетной длительности КЗ t_k ;
- критерии выбора между основной и резервной защитой;

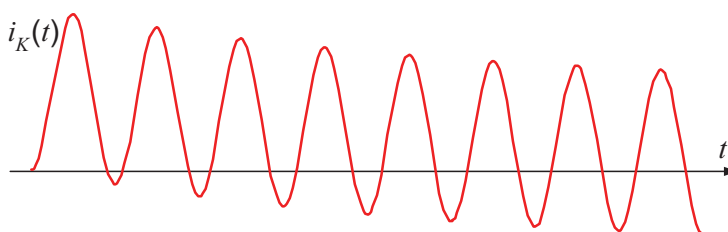


Рис. 4. Ток КЗ, содержащий аperiodическую составляющую


Табл. 4. Поправочный коэффициент K_A в формуле (1)

t_k , с	K_A , о.е.	
	подстанция $\tau_k = 0,075$, с*	станция $\tau_k = 0,315$, с*
0,1	1,698	2,481
0,2	1,373	2,133
0,4	1,187	1,725
0,6	1,125	1,513
0,8	1,094	1,391
1	1,075	1,314
1,2	1,063	1,262
1,4	1,054	1,225
1,6	1,047	1,197
1,8	1,042	1,175
2	1,038	1,157

* требует подтверждения

- определение понятия «резервная защита»;
 - необходимость учета УРОВ и его параметры;
 - учет АПВ на КВЛ, число повторных включений, их временные параметры;
 - предельные температуры жилы и экрана (в литературе не встречается предельной температуры экрана КЛ по условию невозгораемости);
 - методы проверки и расчетные формулы (в литературе не встречается формул для проверки жил и экранов КЛ по условию невозгораемости).
- Интересно было бы разобраться и с тем, как возникает горение изоляции КЛ, если снаружи она по-

крыта экраном и оболочкой; как долго должна сохраняться высокая температура жилы и/или экрана для начала горения; как процессы в КЛ изменятся, если оболочка имеет НГ-исполнение или покрыта огнестойким составом.

В условиях, когда прокладка КЛ в трубах стала носить массовый характер, но при этом нет порядка с проверкой КЛ на термическую стойкость и невозгораемость, следует признать обоснованной техническую политику сетевых компаний, которые применяют на своих объектах специальные полимерные трубы с внутренним НГ-слоем. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Циркуляр № Ц-02-98 (Э). О проверке кабелей на возгорание при воздействии тока короткого замыкания. РАО «ЕЭС России». Утв. 16.03.1998 г.
2. Дмитриев М.В. Экраны однофазных кабелей 6–500 кВ. Выбор сечения с учетом апериодической составляющей тока КЗ // *Новости Электротехники*, 2014, № 4(88). С. 34–37.
3. Алексеев В.Г., Дементьев Ю.А., Смекалов В.В. Особенности выбора кабелей 110–500 кВ для кабельных и кабельно-воздушных линий // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*, 2017, № 1(40). С. 84–92.
4. ГОСТ 52736-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Стандартинформ, 2007. 40 с.
5. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks / CIGRE Working Group B5.23, 2014, p. 241.
6. Смелков Г.И. и др. К вопросу о распространении горения электропроводок, прокладываемых в грунте в пластмассовых трубах // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*, 2018, № 2(47). С. 116–121.
7. Дмитриев М.В. Пожарная опасность кабельных линий 6–500 кВ в полимерных трубах // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*, 2018, № 2(47). С. 122–127.
8. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. 152 с.
9. Дмитриев М.В. Напряжения, введенные на кабельные линии 6–500 кВ // *ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение*, 2017, № 6(45). С. 86–91.
10. СТО 56947007-29.060.20.020-2009. Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
11. СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
12. СТО 56947007-29.240.10.028-2009. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.
13. Дмитриев М.В. Кабельные линии 6–500 кВ. Тепловой расчет при коротком замыкании // *Новости Электротехники*, 2014, № 5(89). С. 52–55.

REFERENCES

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
5. Short Circuit Protection of Circuits with Mixed Conductor Technologies in Transmission Networks / CIGRE Working Group B5.23, 2014, p. 241.6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.