



А. И. Ширковец



М. В. Ильин

DOI: 10.34831/EP.2023.29.12.003
УДК 621.311

Термическая стойкость экранов одножильных силовых кабелей в электрической сети 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали

ШИРКОВЕЦ А. И., канд. техн. наук
ИЛЬИНЫХ М. В.

ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электроводской пр., 1
eng@pnpbolid.com

Особенностью кабельных сетей напряжением 20 кВ, получивших распространение в энергосистеме Москвы, является обязательное использование силового низкоомного резистора, включённого в нейтраль обмотки 20 кВ питающего трансформатора 110–220 кВ и предназначенного для обеспечения работы релейной защиты от замыканий на землю. Это позволяет обеспечить селективное отключение на участках сети и сохранить ресурс её кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, выполненных преимущественно кабелями одножильной конструкции.

Выбор сечения медного экрана таких кабелей определяется допустимым нагревом при протекании аварийного тока, который выбирается для двухфазного короткого замыкания или однофазного замыкания на землю. В прикладных исследованиях данной темы, инструкциях заводов – изготовителей кабельной техники, а также действующих стандартах предлагаются разные подходы. Поэтому вопрос обоснования в проектной практике того или другого вида повреждения для подбора оптимального сечения экрана силовых кабелей 20 кВ до настоящего времени остаётся открытым.

В статье приведены результаты расчёта токов КЗ в металлических экранах одножильных кабелей 20 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена в зависимости от времени отключения повреждения и варьируемого сопротивления резистора в нейтрали. Расчёты выполнены для экранов сечением 16, 25 и 35 мм², которые являются минимально допустимыми по термической стойкости кабелей согласно ГОСТ 34834–2022. Показано, что для выбора незаниженного сечения экрана кабелей 20 кВ и сохранения их ресурса, ввиду ненулевой вероятности повреждения разноимённых фаз линии (в том числе из-за механических порывов), следует использовать значения тока двухфазного КЗ на землю.

Для определения значений аварийного тока и его растекания по экранам КЛ выполнена серия расчётов для участка кабельной сети 20 кВ на компьютерной модели в программе MATLAB Simulink. Приведены результаты определения тока двухфазного КЗ на землю и соответствующих токов в экранах линии при различных условиях повреждения и способах заземления экранов КЛ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая сеть 20 кВ, одножильный кабель, изоляция из сшитого полиэтилена, термическая стойкость, сечение экрана, двухфазное короткое замыкание на землю, однофазное замыкание на землю, сопротивление резистора, релейная защита, время отключения, аварийный ток, компьютерная модель, программа MATLAB Simulink, расчётная схема, режим заземления экранов.

Электрические сети напряжением 20 кВ, благодаря известным преимуществам в части повышенной пропускной способности и высокой степени автоматизации, особенно остро востребованных в энергорайонах со сверхвысокой плотностью нагрузки, активно развиваются в энергосистеме Московского региона с 2003 – 2004 гг. [1, 2]. Строительство кабельных и реже воздушных сетей 20 кВ проводится предприятиями ПАО «Россети», в числе которых «МЭС Центра», «Россети Московский регион», «Россети Тюмень», «Россети Екатеринбург», а также АО «ОЭК». Эксплуатируются десятки под-

станций с высшим напряжением 110 – 500 кВ и распределительными устройствами 20 кВ, протяжённость кабельных сетей такого класса только по Москве достигает нескольких тысяч километров.

Для сооружения кабельных линий (КЛ) 20 кВ в Москве применяются преимущественно одножильные кабели сечением 120 – 500 мм², выполненные на 100 % с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Проверка термической стойкости жил однофазных кабелей при проектировании проводится по максимальному току трёхфазного КЗ $I^{(3)} = 12 \div 18$ кА на шинах 20 кВ центров питания 110 – 220 кВ. Как правило, при по-

строении распределительной сети 20 кВ используются кабели с сечениями жилы 120 – 240 мм² для перемычек между соединительными и трансформаторными пунктами и 240 – 500 мм² — для магистральных линий. Если первые могут иметь медные экраны до 35 мм², то вторые в подавляющем большинстве оснащены экранами 50 и 70 мм² с допустимыми односекундными токами 10,2 и 14,2 кА соответственно.

Трёхжильные кабели 20 кВ с изоляцией из СПЭ с круглыми токопроводящими жилами не применяются из-за повышенной жёсткости, большого радиуса изгиба, невозможности захода в малогабаритные ячейки без переходных муфт. Внедряются оригинальные конструкции трёхжильных кабелей 20 кВ с секторными жилами, обладающие лучшими массогабаритными характеристиками и незначительными потерями мощности из-за наведенных токов в экранах при их двухстороннем заземлении [3].

Стандартным решением для кабельных сетей 20 кВ является заземление нейтрали питающего трансформатора 110 – 220 кВ на стороне низшего напряжения через низкоомный резистор сопротивлением 12 Ом. Заимствованное в электросетевой французской компании EDF подобное решение для широкого класса сетей среднего напряжения с кабелями из СПЭ отражено в новых Правилах технической эксплуатации [4], в п. 619 которых указано: «*Низкоомное резистивное заземление нейтрали следует применять в случаях, когда однофазное замыкание на землю должно быть селективно отключено в течение минимально возможного времени, а также при наличии в электрической сети силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена*». Главный принцип введения такой нормы — сохранение ресурса полимерной изоляции, не обладающей свойством восстановления электрической прочности после пробоя, благодаря быстрому отключению первого замыкания. Очевидно, это снижает риск возникновения двойной «земли» или двухфазного короткого замыкания (КЗ) на землю. Вследствие снижения нагрева теоретически появляется возможность применять экран меньшего сечения. На практике всё несколько сложнее.

До настоящего времени в сетях с низкоомным заземлением нейтрали дискуссионным является вопрос о выборе вида КЗ для правильного выбора сечения экрана кабеля и его проверки на термическую стойкость. Традиционный подход опирается на использование в расчёте тока двухфазного КЗ, так как последний значительно превышает ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) вне зависимости от режима нейтрали сети 6 – 35 кВ. В [5, пп. 4.1.4] указано: «*Выбор номинального сечения медного экрана производится из номенклатурной шкалы заводов- изгото-*

вителей и подтверждается расчётом термической стойкости с учётом режима нейтрали сети при протекании тока КЗ максимальной величины и продолжительности». В то же время стандартом ПАО «Россети» для сетей с низкоомным резистивным заземлением нейтрали регламентирован расчёт экрана по току ОЗЗ, который всегда меньше тока двухфазного КЗ [6, пп. 8.5.1]. Выбор способа заземления экранов КЛ 20 кВ, формально связанный с сечением экрана кабелей, не является предметом настоящего исследования. Техническая политика в разных эксплуатирующих организациях отличается, поэтому экраны линий 20 кВ, в зависимости от их сечения, способа прокладки КЛ и расчётных потерь мощности в экранах, могут заземляться с одной или с двух сторон [7].

Определение аварийного тока для выбора сечения экрана

Условие термической стойкости жил и экранов КЛ при протекании токов КЗ является важным, но не единственным в комплексе проектных расчётов по выбору параметров кабеля и кабельной арматуры. Полноценные расчёты выполняются, исходя из конструкции КЛ, условий её прокладки, нагрузочных режимов, способа заземления экранов и ряда других факторов. Созданы программы, автоматизирующие данный процесс с учётом взаимосвязи рассчитываемых параметров кабеля [8, 9].

Учитывая минимизацию вероятности перехода ОЗЗ в двухфазное КЗ на землю при низкоомном резистивном заземлении сети 20 кВ, предложение выбирать сечение экранов кабеля с изоляцией из СПЭ по току ОЗЗ $I^{(1)}$, который существенно ниже тока двухфазного КЗ на землю $I^{(1,1)}$, представляется закономерным. Это должно снизить стоимость сооружения и трудозатраты на эксплуатацию линий благодаря применению типовой схемы двухстороннего заземления экранов сечением 16–35 мм². Следует быть уверенными, однако, что такой экран выдержит воздействия аварийных токов до их отключения релейной защитой без необратимого разрушения экранных проволок (рис. 1).

Специальные эксперименты, проведённые в сети 20 кВ, показали, что дуга с током до 860 А, возникающая при имитации однофазного замыкания фазы на экран кабеля АпВнг — 3(1×120/35)-20, за время действия защиты $t_{\text{ОЗЗ}} = 1,5$ с не приводила к повреждению изоляции рядом расположенных фаз КЛ [10]. На основании этого сделан вывод, что расчётным случаем выбора сечения экрана кабеля в сети с резистивно-заземлённой нейтралью является ОЗЗ. Несмотря на очень качественную постановку авторами исследования [10] редких и имеющих высокую практическую ценность измерений с заземляю-



Рис. 1. Перегрев (а) и перегор (б) экранных проволок аварийными токами в экране одножильного силового кабеля

щей дугой в кабельной изоляции, об однозначности результатов в части условия выбора экрана кабеля, по мнению авторов, говорить пока рано. Эффективные ограничения любого экспериментального исследования в действующей электрической сети не позволяют добиться статистически значимой вариативности. Это касается как первичных параметров сети, где проводится эксперимент, так и динамических параметров самой дуги в силу стохастического характера её горения [11]. Определённое искажение результатов связано также с искусственным формированием частичного повреждения кабеля для организации дугового замыкания.

Проверка экранов одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ в сети 20 кВ могла бы проводиться по току замыкания на землю $I_{\text{ОЗЗ}}$ только при одном условии — если время его отключения составляет $t_{\text{ОЗЗ}} < 0,1$ с. В этом случае вероятность возникновения двухфазного КЗ или двухместного замыкания на землю исчезающе мала. Но ввиду настройки защит от ОЗЗ по ступеням селективности от распределительной подстанции к питающему центру происходит накопление уставки по времени срабатывания до единиц секунд. Принимая во внимание возможность несрабатывания устройства релейной защиты на повреждённом участке или отказ выключателя, время существования повреждения будет ограничено уже временем действия резервной защиты ввода на питающем центре, равном 3–4 с. Более того, исходя из приблизительной оценки доли механических повреждений в ряде случаев 40 % (остальные условно считаются отказами из-за так называемого «старения изоляции»), нельзя исключить вероятность порыва двух фаз КЛ с одновременным, или близким по времени, возникновением двухместного КЗ относительно «земли». При этом время отключения двухфазного КЗ на землю с помощью максимальной токовой защиты мало отличается от времени отключения ОЗЗ с помощью токовой защиты нулевой последовательности и в обоих случаях может достигать 1,5–1,7 с.

В этих условиях для исключения перегора экранных проволок необходимо предусматривать «запас прочности» и выбирать экран по току $I^{(1,1)}$, оцениваемому для сети 20 кВ при токе трёхфазного КЗ $I^{(3)}$ как $I^{(1,1)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} (12 \div 18) = 10,4 \div 15,7$ кА для нормированной длительности протекания 1 с. Если сечение экрана не соответствует воздействию тока $I^{(1,1)}$ при заданном времени срабатывания релейной защиты, возможно его термическое разрушение на разных участках линии.

Подчеркнём, что при используемых в эксплуатации выдержках времени 0,5–1,7 с на отключение однофазного повреждения со стороны распределительной или питающей подстанции проверка термической стойкости экранов должна быть выполнена по току двухфазного КЗ на землю $I^{(1,1)}$, поскольку в этом случае нельзя пренебрегать вероятностью возникновения второго ОЗЗ.

Снижение тока ОЗЗ и времени его отключения, если это возможно, позволит снизить риск выхода заземляющей дуги за пределы повреждённой фазы КЛ (рис. 2), что несёт опасность термического повреждения расположенных рядом кабелей других фаз с возникновением двойных замыканий, особенно при прокладке «треугольником».

Расчёт токов в экране кабеля в сети с резистором в нейтрали

При низкоомном резистивном заземлении нейтрали сети 20 кВ в месте однофазного замыкания, в большинстве случаев находящимся в кабельной муфте или резе на строительной длине КЛ, протекает значительный ток, который определяется током резистора в нейтрали и ёмкостным током кабельных линий. Ёмкости трансформаторов, реакторов, шин относительно «земли» на три порядка ниже фазной ёмкости кабелей, поэтому ими можно пренебречь.

В связи с активным развитием кабельных сетей 20 кВ в столице происходит существенное увеличение их ёмкостных токов. Если ранее они редко превышали 100 А, то к настоящему времени, благодаря подключению новых потребителей и прокладке новых линий, ёмкост-

ные токи возросли до значений $I_C = 550 + 850$ А на секцию [12]. Поэтому ток замыкания в сети 20 кВ значительно отличается от тока резистора 12 Ом, который формально равен $I_R = 1000$ А. Активно-ёмкостный результирующий ток, рассчитанный при условии объединения двух секций 20 кВ с $I_{C1} = 550$ и $I_{C2} = 850$ А и отключением одного питающего трансформатора 220/20 кВ (со своим резистором в нейтрали) достигнет:

$$I_{O33} = \sqrt{(I_{C1} + I_{C2})^2 + I_R^2} = \sqrt{(550 + 850)^2 + 1000^2} = 1720 \text{ А.} \quad (1)$$

Для получения незаниженных значений токов в экране можно пренебречь эквивалентным сопротивлением растекания тока по оболочкам кабелей и заземляющих устройств, а также для работы при наибольшем рабочем напряжении сети $U_{НР}$ на 20 % увеличить расчётное значение тока ОЗЗ по формуле (1). В этих условиях наибольшее значение $I_{O33} = 2060$ А.

При заданных условиях расчёт допустимого сопротивления резистора в нейтрали, необходимый для определения термической стойкости экрана кабеля, может быть выполнен на основе известного выражения, применяемого для оценки фактического тока КЗ в экране с учётом увеличения времени его протекания $t_{КЗ}$ свыше 1 с. Применив закон Ома, для наибольшего рабочего напряжения сети $U_{НР} = 24$ кВ получим:

$$R_{\text{доп}} = U_{НР} \sqrt{\frac{t_{КЗ}}{3I_K^2 - I_C^2}}, \quad (2)$$

где $I_K = 0,203S_3$ – допустимый ток односекундного КЗ в медном экране сечением S_3 , кА; $1/\sqrt{t_{КЗ}}$ — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение времени $t_{КЗ}$ протекания тока I_K в экране более 1 с.

Из (2) следует, однако, что корректная оценка минимально допустимого сопротивления резистора в нейтрали для обоснованного заключения о сохранении термической стойкости экрана должна быть выполнена для случая минимального ёмкостного тока (в предельном случае $I_C = 0$), поэтому следует использовать формулу (3):

$$R_{\text{min}} = \frac{U_{НР}}{I_K} \sqrt{\frac{t_{КЗ}}{3}}. \quad (3)$$

ГОСТ 34834–2022 [13] регламентирует сечения экранов 16, 25 и 35 мм² как минимальные, при которых ток в экране при его двустороннем заземлении не превышает 15 % Результаты расчёта по формуле (3) для этих сечений экрана при различном времени отключения ОЗЗ приведены на рис. 3.

Результаты расчёта (рис. 3) свидетельствуют, что сопротивление резистора, выбранное по условию термической стойкости экранов кабелей 20 кВ с сечением экрана 16 мм² в течение 2,5 с,



Рис. 2. Результат термического воздействия однофазной заземляющей дуги в кабеле при отключении повреждения за время до 10 с (а) и удержании его до 1 мин (б)

должно быть не менее 6,8 Ом. В случае увеличения времени отключения линии 20 кВ до 5 с минимальное сопротивление резистора составит 9,5 Ом. При наибольшем рабочем напряжении сети ток резистора с минимально допустимым сопротивлением, протекающий в экране кабеля, соответствует допустимому току термической стойкости экрана при времени более 1 с погрешностью в доли процента (табл. 1). Отсюда следует, что предельное условие, которое будет являться расчётным для выбора сечения экрана, отвечает минимальному сопротивлению резистора, сопоставимому с сопротивлением цепи протекания тока двухфазного КЗ на землю. Это подтверждает корректность выбора экрана по току $I^{(1,1)}$.

Расчёты показали, что при организации в сети 20 кВ релейной защиты от ОЗЗ, действующей по типу токовой отсечки без выдержки времени либо с выдержкой в пределах 0,1 с, термическая стойкость экрана обеспечивается для минимальных сечений экранов кабеля 16 – 35 мм² при сопротивлении резистора 6,8 – 2,6 Ом. При использовании экранов больших сечений допустимое сопротивление резистора снижается, достигая долей Ом, т.е. значений, сопоставимых с сопротивлением заземляющего устройства подстанции. Можно показать, что для сечения 50 мм² допустимое сопротивление в нейтрали по условию термической стойкости экрана односекундному току составит не менее 1,4 Ом, а для 70 мм² — не менее 1 Ом. Это лишнее практического смысла и снова возвращает нас к необходимости принять в качестве расчётного ток КЗ $I^{(1,1)}$.

При наибольшем рабочем напряжении сети ток от резистора в нейтрали сети 20 кВ, с учётом наибольшей выдержки времени на отключение однофазного повреждения, не должен превышать 2 кА при сечениях экрана 16 мм² (табл. 1). Это вполне реальный случай, кабели с соотношением сечений жила/экран 120/16 применяются в распределительной сети, но только при заданной топологии сети выдержка времени на их отключение будет существ-

венно ниже расчётной и не достигнет даже 1 с. Следовательно, эти токи не будут представлять опасности с точки зрения избыточного нагрева кабеля.

Учитывая приведённые оценки увеличения суммарного тока ОЗЗ до 1720 (2060) А за счёт развития сети и повышения её ёмкостного тока, справедливо заключить, что применяемое типовое сопротивление резистора 12 Ом является приемлемым для любых расчётных условий выбора экрана КЛ и не ограничивает использование кабелей с минимальным сечением экранов 16 – 35 мм² в распределительной сети 20 кВ. Однако следует помнить следующее.

Во-первых, для исключения пережога экранов на значительной длине КЛ необходимо предусматривать расчёт по наибольшему аварийному току. Учитывая реальные выдержки времени на отключение ОЗЗ и риск повреждения нескольких фаз КЛ, следует выбирать экран по току двухфазного КЗ на землю, который с учётом наблюдаемого увеличения ёмкостного тока сети составит $I^{(1,1)} = (6 \div 9)I^{(1)}$.

Во-вторых, существуют технологические ограничения, не позволяющие заводам-изготовителям применять минимальные сечения экранов 16 – 25 мм² для жил сечением выше 400 мм², поскольку в этом случае невозможно «закрыть» экранными проволоками поверхность кабеля для выравнивания напряжённости поля. Поэтому в ГОСТ 34834–2022 [13] для кабелей с сечением жилы до 120 мм² предусмотрено сечение экрана не ниже 16 мм², для кабелей (150 – 300) мм² — 25 мм², для кабелей (400 – 630) мм² — 35 мм². Для конкретных схем сети 20 кВ сечение экрана может быть принято на 1 – 2 ступени выше стандартного, что обосновывается расчётами.

Расчёт аварийных токов в экранах кабельных линий 20 кВ на компьютерной модели

Для расчётных исследований используется модуль (подпрограмма) Simulink со специализированными библиотеками SimPowerSystems в составе про-

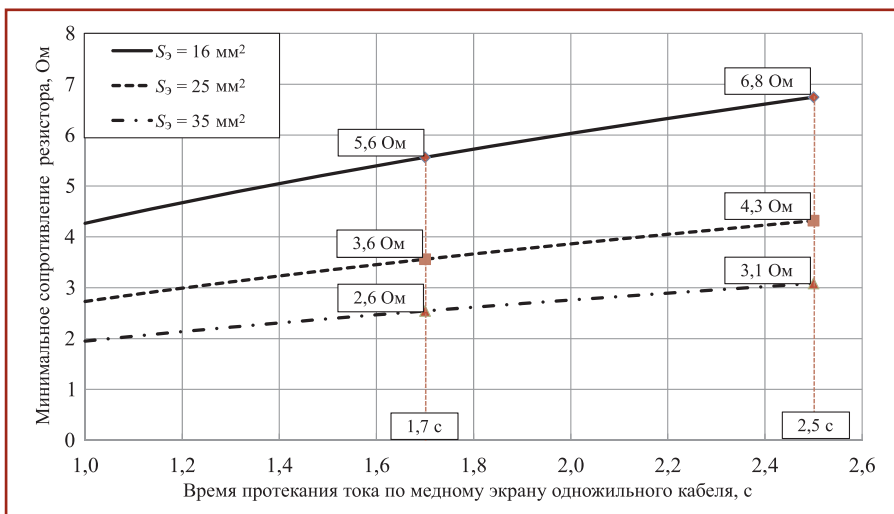


Рис. 3. Минимально допустимое сопротивление резистора в нейтрали сети 20 кВ по условию обеспечения термической стойкости экранов

граммного комплекса MATLAB. Расчёт выполняется для электрической схемы, основными элементами которой являются электроэнергетическая система (ЭЭС), силовой трансформатор ТРДН-160000/220-У1, однофазные токоограничивающие реакторы РТОС-2500-0,35-20, отходящие от секции 20 кВ кабельные линии (КЛ-1 и КЛ-2) с коммутационными аппаратами VD4 в ячейках, эквиваленты остальных ёмкостей и проводимостей сети 20 кВ (C_f и R_f соответственно). Со стороны питающей подстанции поддерживается напряжение 22 кВ, ёмкостный ток ОЗЗ моделируемого участка сети составляет 385 А. Резистор в нейтрали 20 кВ трансформатора $R_N = 12 \text{ Ом}$ заземлён через сопротивление питающей подстанции.

Для определения незаниженного тока, который должен быть использован при оценке термической стойкости экранов КЛ, необходимо рассчитать ток в месте повреждения (моделируются ОЗЗ, двухфазное КЗ на землю, трёхфазное КЗ) и соответствующие токи в экранах КЛ для нескольких вариантов развития аварийного повреждения.

Каждая КЛ 20 кВ выполнена тремя одножильными пофазно-экранированными кабелями АПвПуг-20-(1×500/70), длина линии по трассе составляет 10 км, кабели уложены треугольником, глубина заложения в грунте — 1 м. Данные условия заложены в компьютерную модель, где КЛ задаётся ненагруженной шестипроводной линией (три жилы — три экрана) с распределёнными частотно-зависимыми параметрами и формируется с помощью двух блоков «Distributed Parameters Line», определяющих два одинаковых по длине участка по 5 км. Это сделано для организации точки замыкания фаз на экраны линии в её середине, где экраны кабелей не заземлены. По концам КЛ экраны кабе-

лей либо заземлены через сопротивление ($R_{ЗУ}$) заземляющего устройства (ЗУ) питающей и распределительной подстанций, показанных на расчётной схеме как $R_{ЗУ ПС} = 0,17 \text{ Ом}$ и $R_{ЗУ РП} = 0,5 \text{ Ом}$ (варианты 1, 2, 3, 6, 7 в табл. 2), либо разземлены со стороны распределительной подстанции (варианты 4, 5 в табл. 2). Второе достигается введением активных сопротивлений значением 10^8 Ом в заземляющие цепи экрана каждой фазы.

Поскольку расчётная схема с одной отходящей КЛ — частный случай схемы с двумя линиями (КЛ-1 и КЛ-2), для иллюстрации построенной компьютерной модели приведена только вторая схема (рис. 4). Чтобы исключить загрязнение нефункциональными элементами, на приведённой модели не показаны виртуальные осциллографы тока в цепях «экран — ЗУ» и «фаза — экран». Расчёты токов в экранах КЛ при разных условиях повреждения выполнены преимущественно для схемы с двухсторонним заземлением экранов линий (варианты 1, 2, 3, 6, 7 в табл. 2). Дополнительно для определения наибольшего тока $I^{(1,1)}$ при одностороннем разземлении экранов выполнен расчёт для схемы с одной КЛ при двухфазном одноместном КЗ в начале или середине линии (варианты 4, 5 в табл. 2).

Серия расчётов проведена для изучения параметров КЗ, имитируемых в пределах одной КЛ, когда контур растекания аварийного тока включает только экраны и жилы фаз этой линии и ЗУ питающей подстанции 220 кВ и запитанной распределительной подстанции 20 кВ (варианты 1 – 6 в табл. 2). Дополнительные расчёты выполнены для схемы с двумя отходящими КЛ-1 и КЛ-2 (вариант 7 в табл. 2) при замыкании двух разноимённых фаз на разных линиях с целью определения наибольшего тока $I^{(1,1)}$ при такой конфигурации сети.

Моделируемое оборудование и топология участка сети 20 кВ соответствуют реальным условиям и отображают фрагмент действующей энергосистемы. Началом КЛ считаем шины 20 кВ питающей подстанции, концом КЛ — шины запитанной распределительной подстанции 20 кВ. Одноместным КЗ (1,1) является замыкание разноимённых фаз на заземлённые экраны одной линии в одном и том же месте кабеля (варианты 2, 3, 4, 5 в табл. 2), двухместным — если происходит повреждение изоляции одной фазы на экран в одной точке линии, а другой фазы — в другой точке той же линии либо на иной отходящей КЛ (в варианте 7 табл. 2 реализовано второе условие).

Число расчётов было ограничено приведёнными в табл. 2 вариантами из соображений разумного минимума. Моделирование схемы с увеличением числа отходящих КЛ, иным размещением точек замыкания и точек контроля токов в экранах кабелей, вариацией сечений экранов и жил разных КЛ и прочее — приведёт лишь к увеличению числа частных случаев. Такое моделирование имеет смысл выполнять для конкретных схем сетей при проектировании.

Проведённые расчёты показали следующее. Ток ОЗЗ в месте повреждения оказался на 7 % ниже определённого аналитически как геометрическая сумма тока резистора и ёмкостного тока сети, что можно объяснить некоторым его ограничением за счёт ненулевого сопротивления ЗУ и контура «жила — экран». Корректность расчёта тока двухфазного КЗ на землю, обознача-

Таблица 1

Сопоставление тока в экране кабеля при минимальном допустимом сопротивлении резистора (напряжение $24 / \sqrt{3} \text{ кВ}$) и тока термической стойкости

| Время отключения замыкания, с | Ток в режиме замыкания, А, при минимальном сечении медного экрана, мм ² | | | | | |
|-------------------------------|--|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 16 | | 25 | | 35 | |
| | расчётный | допустимый | расчётный | допустимый | расчётный | допустимый |
| 1,0 | 3248 | 3300 | 5075 | 5100 | 7105 | 7100 |
| 1,7 | 2491 | 2540 | 3892 | 3912 | 5449 | 5445 |
| 2,0 | 2297 | 2333 | 3588 | 3606 | 5024 | 5020 |

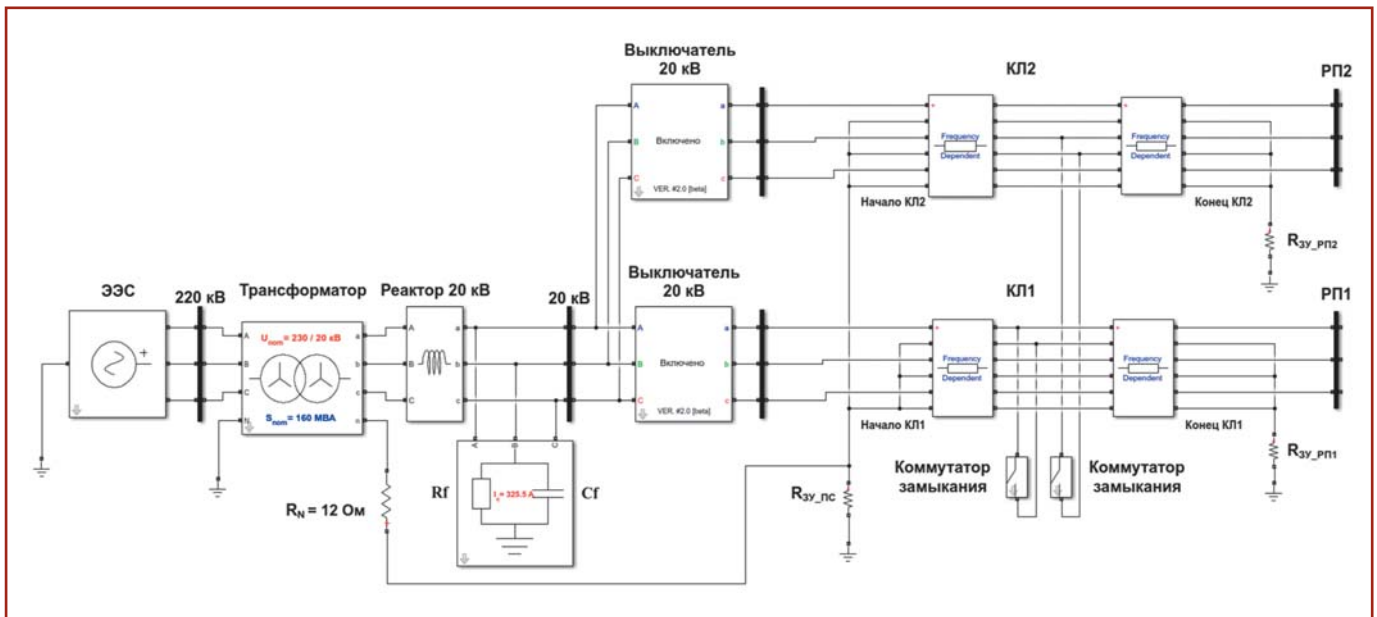


Рис. 4. Стилизованная расчётная модель в пакете MATLAB Simulink для исследования растекания аварийных токов по экранам кабельных линий 20 кВ

емого как КЗ (1,1), подтверждается его правильным соотношением с током трёхфазного КЗ (3), которое составило 0,88 (на практике применяют 0,87) для наибольших значений 13 320 А и 15 090 А соответственно. Также следует отметить, что для смоделированного участка сети 20 кВ ток КЗ (1,1) в начале кабеля и в точке замыкания превышает расчётный ток ОЗЗ в более широком диапазоне, чем предполагалось ранее (6 – 9 раз), а именно — в 4,9 – 13,3 раза.

Целесообразно оценить снижение тока ОЗЗ в экране замкнутой на него фазы при удалении точки наблюдения от точки замыкания. Отмечена следу-

ющая закономерность: если рассматривать однофазное повреждение в середине КЛ, то при движении в сторону источника ток в экране повреждённой фазы к шинам подстанции снижается до 1,5 раз (998/673), а к конце кабеля — почти до 3 раз (998/342). По другим фазам, ввиду целостности их изоляции и связи экранов через ЗУ на подстанции и распределительной подстанции, заметного изменения токов не отмечено. Токи в экранах неповреждённых фаз относительно невелики (140 – 160 А), их изменение в пределах 6 – 14 % существенным назвать нельзя.

Принципиально важно подчеркнуть два момента: во-первых, наибольшие токи КЗ (1,1), которые должны приниматься в расчёте термической стойкости экранов КЛ, возникают при КЗ (1,1) в одной и той же точке кабеля при условии повреждения в начале отходящей линии, что эквивалентно замыканию на шинах 20 кВ, электрически близких к источнику питания. Во-вторых, значения этих токов не отличаются (расхождение по фазе В не является определяющим для выбора расчётного значения) в схеме с двухсторонним заземлением экранов и их разземлением в конце КЛ на питаемой распределительной подстан-

Таблица 2

Действующие значения токов замыкания и токов в экранах КЛ 20 кВ, полученные при расчётах на компьютерной модели

| № п/п | Вид замыкания и его условия | Режим заземления экранов КЛ | Ток замыкания, А | | Токи в экранах кабеля, А | | | | | |
|-------|---|---|------------------|--------|--------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | | | | | Начало КЛ | | | Конец КЛ | | |
| | | | Фаза А | Фаза В | Фаза А | Фаза В | Фаза С | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
| 1 | ОЗЗ фазы А в середине кабеля на экран | Заземлены по концам КЛ на сопротивления $R_{зу\ пс}$ и $R_{зу\ рп}$ | 998 | — | 673 | 158 | 142 | 342 | 148 | 160 |
| 2 | КЗ (1,1) фаз А и В в середине кабеля на экран | Заземлены по концам КЛ на сопротивления $R_{зу\ пс}$ и $R_{зу\ рп}$ | 6379 | 5886 | 3373 | 3079 | 81 | 3027 | 2967 | 81 |
| 3 | КЗ (1,1) фаз А и В в начале кабеля на экран | Заземлены по концам КЛ на сопротивления $R_{зу\ пс}$ и $R_{зу\ рп}$ | 13320 | 12810 | 13320 | 13320 | 16 | 4 | 4 | 7 |
| 4 | КЗ (1,1) фаз А и В в начале кабеля на экран | Заземлены только в начале КЛ на сопротивление $R_{зу\ пс}$ | 13320 | 12810 | 13320 | 12810 | 24,14 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | КЗ (1,1) фаз А и В в середине кабеля на экран | Заземлены только в начале КЛ на сопротивление $R_{зу\ пс}$ | 4889 | 4578 | 4889 | 4578 | 23,67 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | КЗ(3) фаз А, В, С в начале кабеля на экран | Заземлены по концам КЛ на сопротивления $R_{зу\ пс}$ и $R_{зу\ рп}$ | 15090 | 15090* | — | — | — | — | — | — |
| 7 | КЗ (1,1) фазы А на КЛ-1 и фазы В на КЛ-2 в середине кабеля на экран | Заземлены по концам КЛ на сопротивления $R_{зу\ пс}$ и $R_{зу\ рп}$ | КЛ-1 | | | | | | | |
| | | | 6482 | — | 4717 | 2221 | 344 | 2841 | 488 | 362 |
| | | | КЛ-2 | | | | | | | |
| — | 6082 | 1278 | 5373 | 318 | 410 | 2702 | 298 | | | |

* Такой же ток в фазе С.

ции. В этом случае высокое продольное сопротивление экранов «запирает» весь ток КЗ (1,1) в цепи «экран в начале КЛ – ЗУ питающей подстанции» (варианты 3, 4 в табл. 2).

При КЗ (1,1) в середине КЛ наблюдается относительно равномерное растекание токов по экранам линии, что выражается в близких значениях токов в начале и конце КЛ (вариант 2 в табл. 2). Заслуживает внимания простой и логичный факт: электрическое удаление точки КЗ (1,1) от источника питания приводит к существенному ограничению токов в экранах КЛ — по сравнению с замыканием в начале кабеля снижение достигает 2,9 – 4,4 раза по фазе с меньшим током (вариант 2). Можно показать, что смещение замыкания к концу КЛ либо снижение сечения экранов приведёт к ещё более заметному уменьшению токов в экранах замкнутых фаз, что связано в том числе со снижением напряжения при удалении от источника питания. Способ обустройства экранов в данном случае (присоединены они или нет к ЗУ на нагрузку) слабо

влияет на ток в экране в конце КЛ, питающей эту нагрузку.

Из анализа результатов расчёта при двухместном КЗ (1,1) (вариант 7 в табл. 2) следует, что токи в замыкаемых фазах (фаза А на КЛ-1 и фаза В на КЛ-2) непосредственно в точке замыкания достаточно близки между собой, а растекание токов в экранах так же, как и в случае одноместного КЗ (1,1), подчинено закону Ома: токи в экранах в начале и конце одной и той же линии на замкнутой фазе существенно больше, чем токи в экранах этой же фазы, но на другой линии. И если в точке замыкания, которое создаётся в середине каждой линии, на разноименных фазах КЛ-1 и КЛ-2 аварийные токи отличаются всего на 6 %, то в начале КЛ разница тока в экранах составляет 14 %, а в конце КЛ — всего 5 %. Это означает, что чем дальше «точка наблюдения» находится от источника питания и от места повреждения, тем меньше разница токов в экранах повреждённых фаз.

Фрагменты характерных осциллограмм расчётных токов при поврежде-

нии главной изоляции жил на заземлённый хотя бы с одной стороны экран кабеля приведены на рис. 5 – 8, также на них указаны наибольшие амплитудные значения тока в экранах для расчётного времени отключения 0,5 с. Ток замыкания в модели регистрируется с помощью виртуального осциллографа в цепи «фаза – экран» непосредственно в точке повреждения, ток в экране КЛ измеряется таким же способом в цепи «экран – земля (заземляющее устройство)» в начале и конце линии.

Расчёты с использованием модели подтвердили, что наиболее тяжёлые условия, с точки зрения термической стойкости экранов КЛ, создаются при замыкании экранов двух фаз в одном и том же месте кабеля — одноместное КЗ (1,1). Критическим является случай замыкания в точке схемы, близкой к источнику питания. Это соответствует первым метрам кабеля на выходе с питающей подстанции в сторону линии, включая кабельную концевую муфту в ячейке. Каскадное замыкание двух разноимённых фаз на «землю» в разных

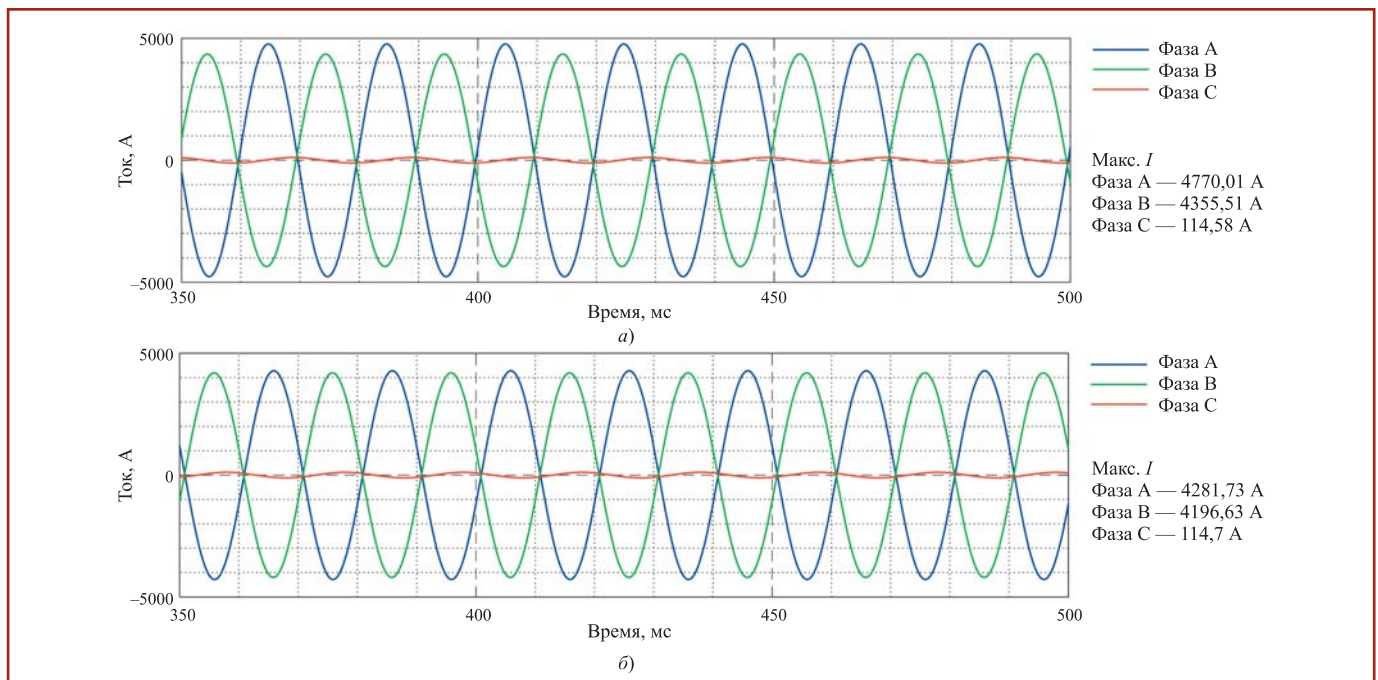


Рис. 5. Осциллограммы токов в экранах кабеля в начале (а) конце (б) КЛ при одноместном КЗ (1,1) в середине кабеля

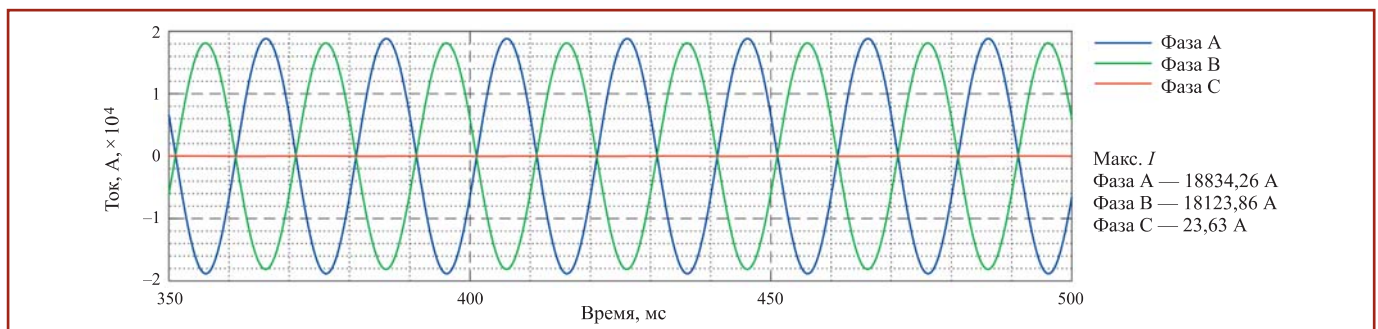


Рис. 6. Осциллограммы токов в экранах кабеля в начале КЛ при одноместном КЗ (1,1) в начале кабеля

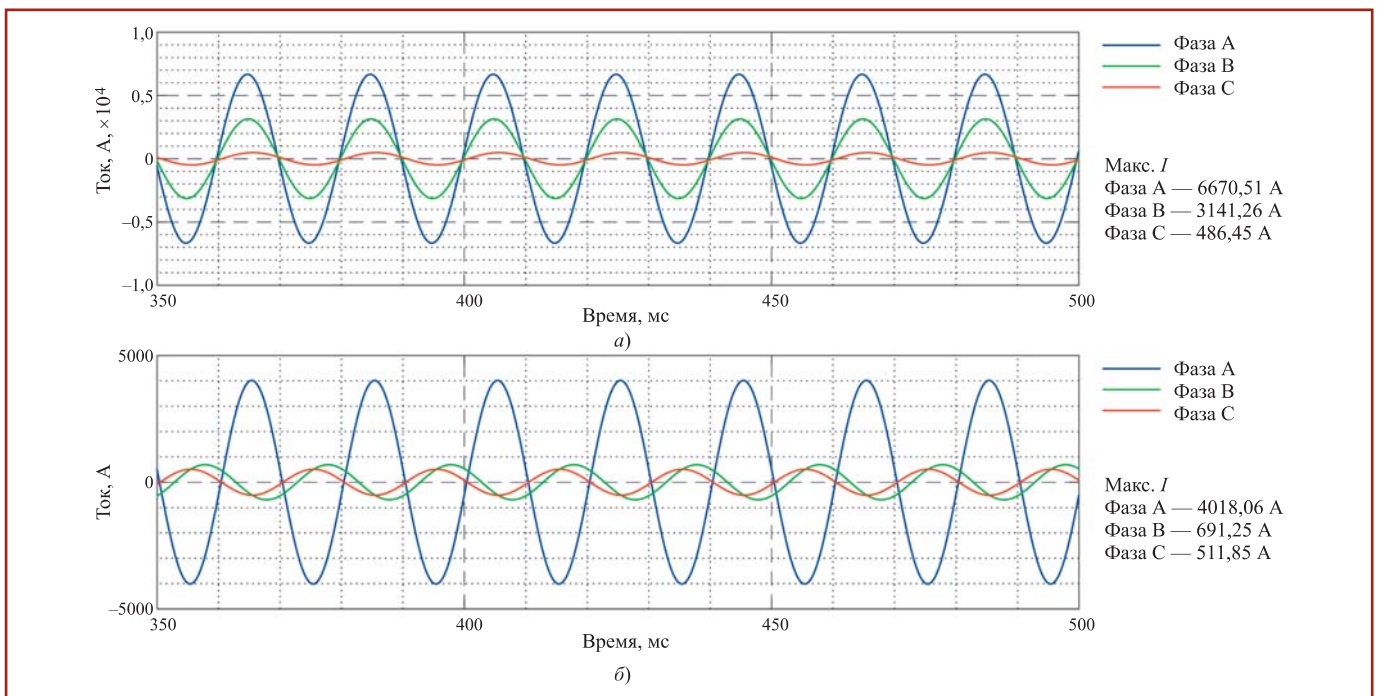


Рис. 7. Осциллограммы токов в экранах кабеля в начале (а) и конце (б) КЛ-1 при двухместном КЗ (1,1) в середине кабеля (замыкание фазы А на КЛ-1 и фазы В на КЛ-2)

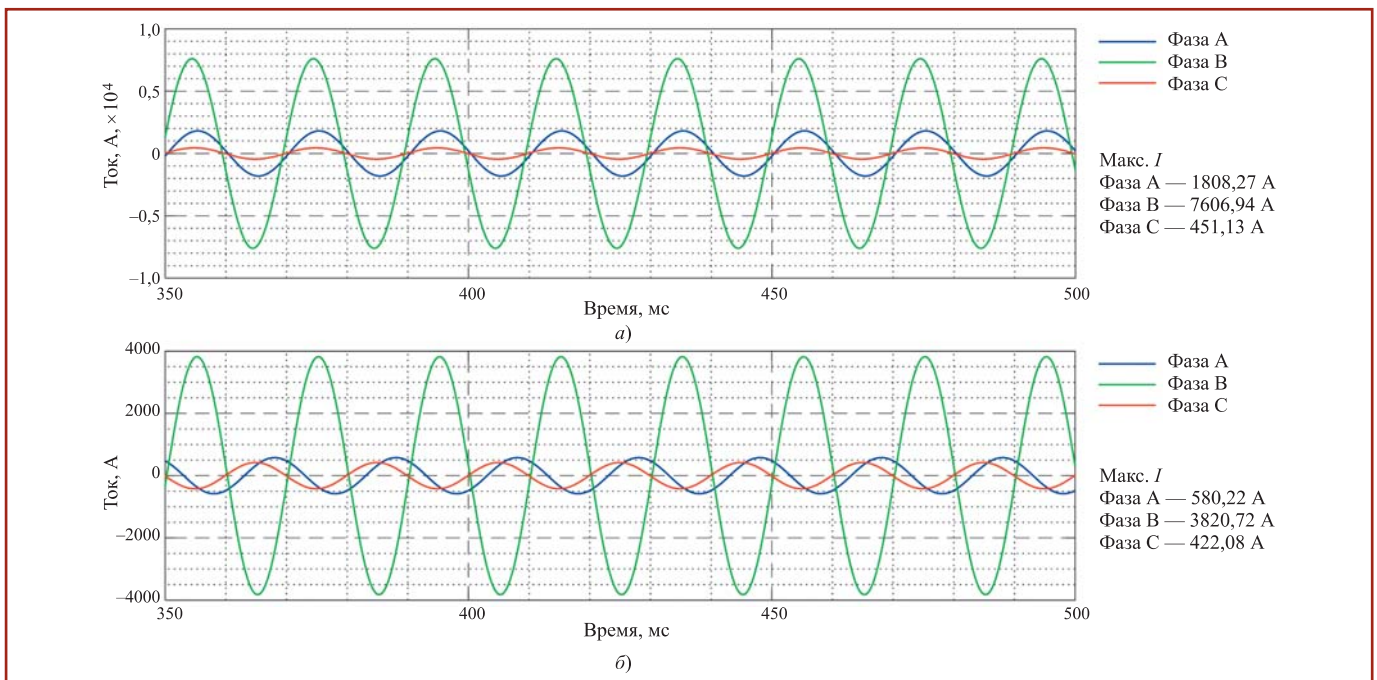


Рис. 8. Осциллограммы токов в экранах кабеля в начале (а) и конце (б) КЛ-2 при двухместном КЗ (1,1) в середине кабеля (замыкание фазы А на КЛ-1 и фазы В на КЛ-2)

точках сети сопровождается протеканием меньшего тока $I^{(1,1)}$, так как он ограничивается сопротивлением экранов, ЗУ (в значительно меньшей степени — жил кабеля), включённых в контур замыкания.

Таким образом, аналитические исследования и расчёты аварийных токов в экранах КЛ 20 кВ на компьютерной модели убедительно показали, что для выбора сечения экрана кабеля 20 кВ по условию термической стойкости дол-

жен сохраняться критерий проверки при двухфазном токе КЗ, как и в случае изолированной или заземлённой через ДГР и высокоомный резистор нейтрали [6, пп. 8.5.1.2]. Для корректного расчёта параметров жилы и экрана кабеля с использованием наибольших токов КЗ целесообразно использовать методику, изложенную в [14] и адаптированную для выбора проектного решения в специализированных компьютерных программах.

Выводы

1. Выбор сечения экранов одножильных кабелей в кабельной сети 20 кВ должен быть выполнен на основе расчёта по току двухфазного КЗ на землю. Для проверки термической стойкости экрана кабеля в сети с низкоомным резистивным заземлением не рекомендуется использовать значение тока замыкания на землю, которое в 5 – 13 раз

меньше расчётного тока двухфазного КЗ на землю. При увеличении ёмкостных токов в сети 20 кВ до значений, сопоставимых с током от резистора 12 Ом, разница токов ОЗЗ и КЗ (1,1) будет несколько снижаться.

2. Традиционный принцип выбора сечения экрана кабеля 20 кВ технически обоснован и практически не зависит от режима нейтрали в сетях 6 – 35 кВ. Причины этого — достаточно большие выдержки времени отключения ОЗЗ, кратно превышающие 0,1 с, а также риски одновременного или почти одновременного повреждения двух фаз линии из-за механического воздействия (порыва кабеля) или термического действия заземляющей дуги. Аргументом в пользу выбора тока КЗ (1,1) для проверки термической стойкости экрана является следующий: время отключения двухфазного КЗ на землю релейной защитой сопоставимо со временем отключения ОЗЗ и в обоих случаях может достигать 1,5 – 1,7 с.

3. Применяемое типовое сопротивление резистора 12 Ом приемлемо для любых расчётных условий выбора экрана КЛ и не ограничивает использование кабелей с минимальным сечением экранов 16 – 35 мм² в распределительной сети 20 кВ. Расчётные токи резистора с минимальным сопротивлением, протекающие в экране кабеля, соответствуют допустимым токам термической стойкости экрана, которые нормируются заводами-изготовителями, для времени 1 с и более. Это подтверждает правильность определения сечения экрана по наибольшему току в цепи «жила – экран», которым является ток двухфазного КЗ.

4. Проведены расчёты аварийных токов, включая ток ОЗЗ, ток КЗ (1,1) и ток КЗ (3) на модели участка сети 20 кВ в программе MATLAB Simulink. Показано, что расчётным током, который используется для оценки термической стойкости экранов, является ток одноместного КЗ (1,1) в начале кабеля, на минимальном удалении от питающего центра. В экранах кабеля на выходе его с подстанции протекает ток, практически равный 0,87⁽³⁾.

5. На компьютерной модели проанализированы разные случаи замыкания КЗ (1,1) и соответствующие токи в экранах КЛ в начале и конце линии. Показано, что от точки замыкания на линии ток в экранах снижается в обе стороны относительно равномерно. Наибольшие значения токов наблюдаются, что естественно, в двух повреждённых фазах. Разземление экранов КЛ со стороны нагрузки слабо влияет на из-

менение токов в экранах, регистрируемых в конце линии.

6. Проектные расчёты для выбора оптимального сечения экрана силового кабеля следует выполнять в комплексе с выбором других параметров КЛ, отработкой решения по определению способа заземления экранов – одно-сторонним или двухсторонним. Для этого можно использовать специальные программы, созданные с учётом действующих стандартов и реализующих методику ГОСТ Р МЭК 60949–2009.

7. В качестве мероприятий по снижению сечения экранов одножильных кабелей 20 кВ (для сокращения наведенных токов и потерь мощности в них в случае прокладки фаз КЛ в плоскости, улучшения экономической привлекательности проектов новых линий) можно предложить более глубокое ограничение токов КЗ и сокращение времени их отключения релейной защитой. Одной из эффективных мер может стать применение трёхфазных конструкций кабелей с секторными жилами.

8. Выявлено, что в сетях 20 кВ с резистивно-заземлённой нейтралью строятся и эксплуатируются линии с кабелями с сечением жилы 240 – 500 мм², которые в подавляющем большинстве имеют медные экраны сечением не менее 50 мм², способные в течение 1 с выдерживать аварийные токи свыше 10 кА. Это означает, что проектные организации имеют возможность обосновать хотя и более дорогостоящие, но более надёжные решения по выбору КЛ с достаточным запасом по сечению экранов кабелей, рассчитанных на протекание токов двухфазного КЗ на землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огиенко И. И. Анализ топологии электрических сетей 20 кВ по критериям оптимизации, наблюдаемости, энергоэффективности // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 1(46). С. 66 – 70.
2. Львов М. Ю., Камнев Д. Ю. Применение класса напряжения 20 кВ в системах электроснабжения современных мегаполисов // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 5. С. 83 – 88.
3. Мещанов Г. И. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 и 20 кВ с токопроводящими жилами секторной формы // Энергия единой сети. 2016. № 4(27). С. 58 – 66.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. Приказом Минэнерго России от 04.10.2022 № 1070, введ. в действие с 06.03.2023 г. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202212060056>.

5. СТО 56947007-29.060.20.020–2009. Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 – 35 кВ. Введ. с изм. от 10.05.2018 (повторно). URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.060.20.020-2009_izm_10052018.pdf.

6. СТО 34.01-21.1-001–2017. ПАО «Россети». Распределительные электрические сети напряжением 0,4 – 110 кВ. Требования к технологическому проектированию. Введ. 02.08.2017 (с изменениями от 28.09.2021, 28.12.2022). URL: https://old.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/%D0%A1%D0%A2%D0%9E_34.01-21.1-001-2017v2022.pdf.

7. Дмитриев М. В. Заземление экранов кабелей 20 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 2(41). С. 34 – 37.

8. Дмитриев М. В. CABLE. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619699, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.07.2019.

9. Косяков А. А., Неугодинов И. П., Чернов А. Н. Программа для расчета кабелей из сшитого полиэтилена (Calc-C). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613320, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.04.2013 г.

10. Майоров А. В., Челаэнов А. А., Шунтов А. В. Об однофазных замыканиях на землю в электрической сети 20 кВ // Электротехника. 2018. № 6. С. 62 – 66.

11. Ширковец А. И., Губаев Д. Ф. Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала // Изв. вузов. Сер. «Проблемы энергетики». 2012. № 9 – 10. С. 121 – 134.

12. Григорьев Д. А. Анализ причин ложной работы логических защит шин в сетях 20 кВ при росте емкостных токов / Д. А. Григорьев, Ю. П. Гусев, К. В. Колесникова и др. // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3(44). С. 8 – 15.

13. ГОСТ 34834–2022. Кабели силовые с экструдируемой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Введ. в действие 30.06.2023. URL: <https://www.elec.ru/files/2022/09/19/GOST-34834-2022.pdf>.

14. ГОСТ Р МЭК 60949–2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. Введ. в действие 01.01.2010. URL: <https://www.elec.ru/files/2017/08/11/GOST-R-МЕК-60949-2009.pdf>.