

Способы снижения напряжений, наведенных на кабельные линии 6–500 кВ

УДК 621.315.21

В № 6(45) журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» за 2017 год была опубликована статья «Напряжения, наведенные на кабельные линии 6–500 кВ» [1], где было показано, что на отключенные кабели может наводиться напряжение промышленной частоты 50 Гц, достигающее десятков вольт на каждый километр длины трассы и представляющее опасность для ремонтного и обслуживающего персонала. Новая статья на эту тему призвана дополнить собой соображения, изложенные в материале 2017 года.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент Санкт-Петербургского политехнического университета

Ключевые слова:
кабельная линия, однофазный кабель, магнитное поле, наведенное напряжение, безопасность персонала

ВВЕДЕНИЕ

Статья [1] рассматривала наводки, которые возникают на отключенных от сети кабелях за счет магнитного поля расположенных поблизости:

- кабельных линий (КЛ);
- воздушных линий (ВЛ).

Согласно [1] наведенное напряжение промышленной частоты 50 Гц зависело от многих факторов и в нормальном режиме работы сети могло достигать 50 Вольт на каждые 1000 м длины трассы и каждые 1000 А тока работающей КЛ или ВЛ, а при коротком замыкании (КЗ) в сети — до 500 Вольт на 1000 м и 1000 А тока КЗ.

Указанные значения наводок представляют серьезную опасность для людей, которые занимаются прокладкой КЛ, их ремонтом и обслуживанием. К сожалению, в отечественных нормативных документах по кабельным линиям, например в [2], внимание уделяется, главным образом, земляным работам и проверке того, что КЛ отключена (см. п. 5.3 из [2]), а наведенные напряжения даже не упоминаются как заслуживающий внимания фактор риска. Поэтому в [1] предложено инициировать разработку национального стандарта по вопросам обеспечения безопасности работ на КЛ в условиях наведенных напряжений.

По имеющейся информации, в настоящее время создание такого стандарта пока еще не планируется, однако несколько сетевых компаний проявили интерес к тематике и пытаются сформулировать позицию по данному вопросу, чтобы лучше защитить свой персонал. Автор надеется, что новая статья по наводкам не только дополнит первую статью [1], но и послужит поводом еще раз обратить внимание на существующую проблему.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА

Наводки на отключенную КЛ могут быть от соседних КЛ и/или ВЛ, причем как только от одной линии, так и сразу от нескольких; как от линии такого же класса напряжения, так и от линии иного. Для определенности рассмотрим наиболее часто встречающийся случай — двухцепную КЛ (рисунок 1), где единственным источником наводок на отключенную

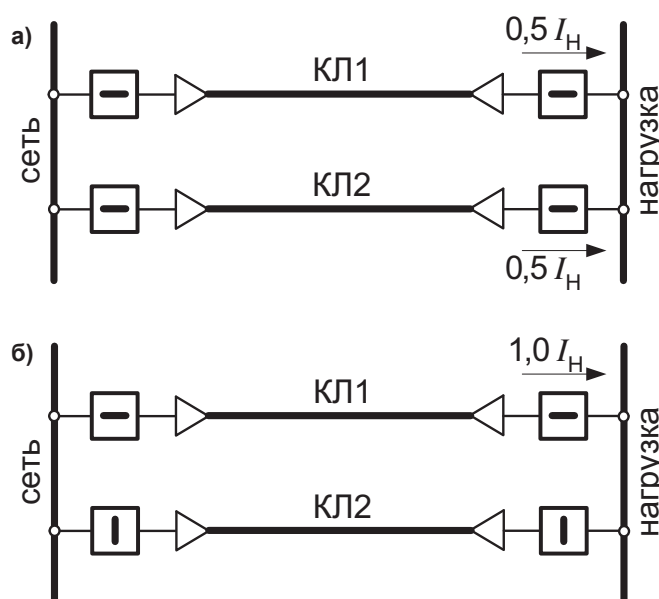


Рис. 1. Двухцепная КЛ:
а) обе цепи в работе; б) одна из цепей отключена

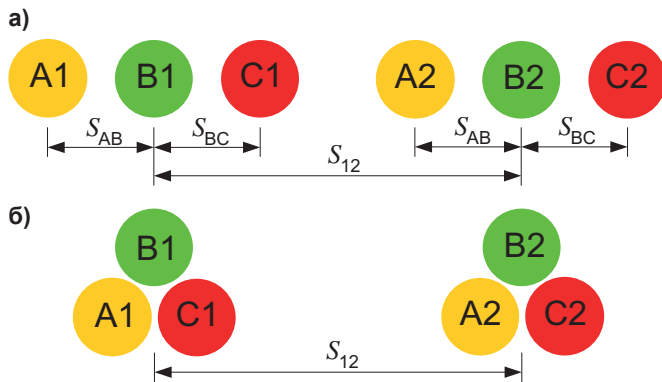


Рис. 2. Основные способы расположения однофазных кабелей двухцепной КЛ: а) в ряд; б) сомкнутым треугольником

цепь является другая цепь, оставшаяся в работе. При этом положим, что обе цепи выполнены однофазными кабелями (рисунок 2).

Согласно [1] причиной наводок на отключенную цепь (пусть КЛ2) является магнитное поле фазных токов КЛ1, зависящее от следующих факторов:

- взаимное расположение однофазных кабелей (ряд или треугольник);
- расстояния S_{AB} и S_{BC} между фазами цепи;
- расстояние S_{12} между соседними цепями;
- схема заземления экранов КЛ (двустороннее, одностороннее и др.);
- режим КЛ1 (нормальный режим или КЗ в сети);
- вид КЗ (симметричное или несимметричное);
- наличие транспозиции самих однофазных кабелей (не путать с экранами).

Если в [1] расчеты наведенных напряжений на отключенную КЛ2 выполнены по формулам, то сейчас проведем их с помощью известной канадско-американской компьютерной программы EMTP. Применение EMTP потребовалось потому, что к перечню влияющих факторов теперь добавлены еще несколько:

- заземление жил по концам отключенной КЛ2, выполняемое на время работ;
- число фаз КЛ2, в которых одновременно выполняются работы;
- вид транспозиции однофазных кабелей (меняются местами только две крайние фазы или же меняются местами все три фазы КЛ).

НАИБОЛЕЕ ОПАСНАЯ ФАЗА ОТКЛЮЧЕННОЙ КЛ2

Цепь КЛ1 вызывает наводки на жилы и экраны отключенной КЛ2, однако основное внимание уделим только экранам КЛ2, поскольку они находятся ближе к поверхности кабеля, то есть именно к экранам персонал прикоснется в первую очередь.

Наводка на элементы отключенной КЛ2 определяется величиной магнитного поля, которое создано работающей КЛ1 в месте прохождения КЛ2. В [1] показано, что наибольшей величины это поле достигает в следующих условиях:

- фазы КЛ1 проложены в ряд с большим расстоянием S_{AB} между фазами;
- расстояние S_{12} между цепями КЛ1 и КЛ2 минимально.

В [1] рассмотрены наводки только для средней фазы В2, поскольку как раз до нее вычисляется расстояние между цепями S_{12} . Однако важно понимать, что при рядной прокладке наибольшая наводка будет не для средней фазы В2, а для той из двух крайних (А2, С2), которая ближе всего к работающей цепи КЛ1 (в условиях рисунка 2 это фаза А2, и для нее в [1] расчеты не демонстрировались).

На рисунке 3 приведены наводки для наиболее опасной фазы А2 и пунктиром для сравнения приведены наводки для средней фазы В2 (заимствованы из статьи [1]). Поскольку наведенные напряжения существенно снижаются по мере роста S_{12} , то здесь и далее использована логарифмическая шкала. Например, в случае $S_{12} = 0,5$ м и $S_{AB} = 0,2$ м наводка составляет на 1000 м длины трассы и 1000 А тока КЛ1: – около 50 В для фазы В2 (пунктирная линия № 3); – около 90 В для фазы А2 (сплошная линия № 3), что опаснее для персонала, чем при работах на фазе В2.

Минимальные наводки на КЛ2 характерны, когда однофазные кабели лежат сомкнутым треугольником, поскольку при этом происходит хорошая компенсация магнитных полей трех фаз работающей КЛ1. На самом деле, в рамках треугольника степень компенсации полей также зависит и от диаметра кабелей d : чем меньше d , тем лучше удастся приблизить друг к другу три магнитных поля, и тем лучше они компенсируют друг друга.

В [1] при изучении сомкнутого треугольника диаметр однофазного кабеля принимался $d = 100$ мм, и это значение характерно скорее для кабелей 110–500 кВ. Здесь же в новой статье, говоря о сомкнутом треугольнике, примем $d = 50$ мм, что относится скорее к кабелям классов 6–35 кВ. Чтобы проследить степень влияния d на наводки при прокладке фаз сомкнутым треугольником, на рисунке 3 на примере В2 даны значения напряжений как для случая $d = 50$ мм (зависимость № 1), так и для случая $d = 100$ мм (зависимость № 1', взятая из [1]). Видно, что, скажем, при $S_{12} = 0,5$ м наводка для $d = 50$ мм составляет 6 В / 1000 м / 1000 А, а для $d = 100$ мм наводка больше и равна 10 В/1000 м/1000 А.

Итак, можно утверждать, что с ростом номинального напряжения кабелей и сечения их жилы наведенные напряжения становятся опаснее, поскольку

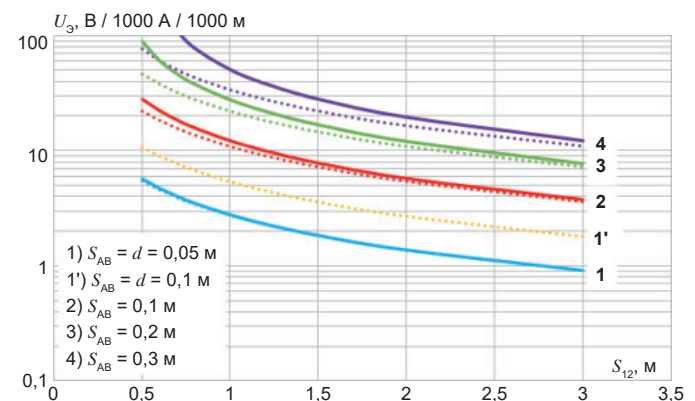


Рис. 3. Напряжение, наведенное на экраны отключенной КЛ2: сплошная линия — наводка на крайнюю фазу А2; пунктир — наводка на среднюю фазу В2

при этом, во-первых, происходит рост диаметра кабеля d , что ухудшает компенсацию полей трех фаз работающей КЛ1. Во-вторых, происходит рост токов жил работающей КЛ1 (соразмерно сечению), а наводка на КЛ2 как раз пропорциональна этим токам.

Отметим, что все расчеты рисунка 3 выполнены при одностороннем заземлении экранов работающей КЛ1 и отключенной КЛ2, поскольку этот случай позволяет оценить максимальные уровни наведенных напряжений. Рассмотрим далее другие схемы заземления экранов и то, как они повлияют на наведенные напряжения.

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭКРАНОВ РАБОТАЮЩЕЙ КЛ1

Наводки на КЛ2 определяются магнитным полем КЛ1, а значит зависят и от токов жил КЛ1 ($I_{ЖА1}$, $I_{ЖВ1}$, $I_{ЖС1}$), и от токов экранов КЛ1 ($I_{ЭА1}$, $I_{ЭВ1}$, $I_{ЭС1}$). Токи в экранах, в свою очередь, зависят от принятой для них схемы заземления (см. [3]) и возникают лишь при простом двустороннем заземлении (рисунок 4а). Для других схем токов в экранах нет, но зато имеются напряжения $U_{ЭА1}$, $U_{ЭВ1}$, $U_{ЭС1}$, достигающие наибольших значений в узлах транспозиции (рисунок 4б) или на разземленном конце экранов (рисунок 4в).

При простом двустороннем заземлении (рисунок 4а) экранные токи $I_{ЭА1}$, $I_{ЭВ1}$, $I_{ЭС1}$ пропорциональны токам в жиле $I_{ЖА1}$, $I_{ЖВ1}$, $I_{ЖС1}$, причем отношение токов в экранах и в жилах зависит от двух основных факторов [3]:

- расстояние S_{AB} между соседними фазами и способ их взаимного расположения (ряд или треугольник);

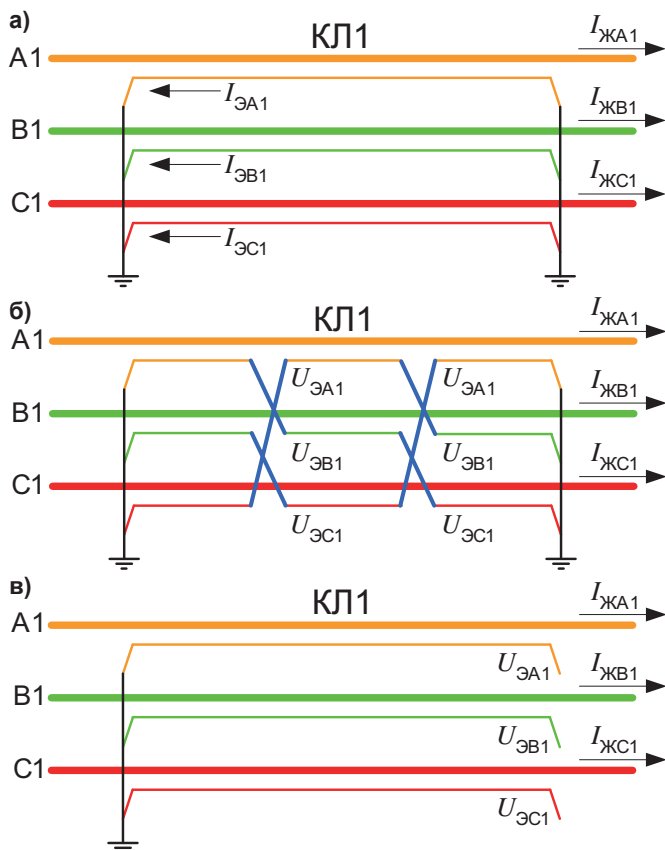


Рис. 4. Схемы соединения экранов КЛ1: а) двустороннее заземление; б) двустороннее с транспозицией экранов; в) одностороннее заземление

- сечение экрана $F_{Э}$ и его материал (медь или алюминий).

Положим для определенности, что три однофазных кабеля КЛ1 с медными экранами сечением $F_{Э} = 95 \text{ мм}^2$ расположены в ряд с расстоянием $S_{AB} = 0,2 \text{ м}$ (точно так же выполнена и отключенная КЛ2). Для этих условий на рисунке 5 представлены результаты расчетов наводок на фазы А2, В2, С2 отключенной КЛ2:

- при двустороннем заземлении экранов КЛ1 (сплошная линия на рисунке 5);
- при одностороннем заземлении экранов КЛ1 (пунктирная линия на рисунке 5).

Во всех расчетах экраны и жилы КЛ2 находились в состоянии, показанном на рисунке 6а: экраны имели одностороннее заземление, а жилы КЛ2 оставались никак не связанными с землей.

Во-первых, рисунок 5 еще раз подтверждает вывод, сделанный ранее на основе рисунка 3: при рядном расположении фаз наибольшие наводки на отключенную КЛ2 характерны не для средней фазы В2, а для той крайней фазы, которая расположена ближе всего к работающей КЛ1 (то есть для фазы А2).

Во-вторых, из рисунка 5 следует, что при малых расстояниях S_{12} между КЛ1 и КЛ2 наводки на отключенную КЛ2 выше при одностороннем заземлении экранов рабочей КЛ1, тогда как при больших расстояниях S_{12} наоборот — наводки выше при двустороннем. Однако, в целом, для принятых исходных данных ($S_{AB} = 0,2 \text{ м}$, $F_{Э} = 95 \text{ мм}^2$) можно утверждать, что схема заземления экранов работающей КЛ1 слабо повлияет на наводки для отключенной КЛ2.

Поскольку основной целью исследований является определение наибольших наведенных напряжений (а они достигаются при малых S_{12}), то для дальнейших расчетов будем полагать, что экраны КЛ1 имеют одностороннее заземление, ведь как раз для одностороннего заземления наводки при малых S_{12} будут наибольшими (рисунок 5). Также это позволит не конкретизировать сечение экранов $F_{Э}$, которое надо было бы учитывать при двустороннем заземлении экранов. Таким образом, все получаемые далее результаты и выводы можно считать достаточно обобщенными, никак не привязанными

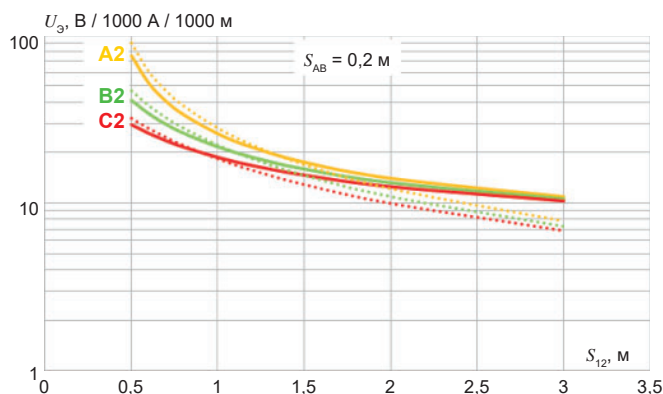


Рис. 5. Напряжение, наведенное на фазы А2, В2, С2 отключенной КЛ2: сплошная линия — при двустороннем заземлении экранов КЛ1 (рисунок 4а); пунктир — при одностороннем заземлении экранов КЛ1 (рисунок 4в)

к каким-то конкретным параметрам КЛ, и в тоже время позволяющими оценить наилучшие условия для обслуживающего персонала.

Разобравшись с влиянием схемы заземления экранов рабочей КЛ1, перейдем к другому вопросу — влиянию на наводки факта заземления жил отключенной КЛ2.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЖИЛ ОТКЛЮЧЕННОЙ КЛ2

Как и всегда ранее, на данном этапе полагаем, что экраны отключенной КЛ2 имеют одностороннее заземление (рисунок 6). Напряжение, наведенное на такие экраны, дает представление о наводках и для всех других возможных схем заземления экранов КЛ2. Например, при двустороннем заземлении экранов КЛ2 персонал, вскрывший оболочку кабеля и разрезавший проволоки экрана для того, чтобы подготовить КЛ2 к монтажу муфты, окажется под точно таким же напряжением, как имеется в конце одностороннего экрана в условиях рисунка 6. Поэтому схема заземления экранов КЛ2, показанная на рисунке 6, является не случайной, и рассматривать другую не следует.

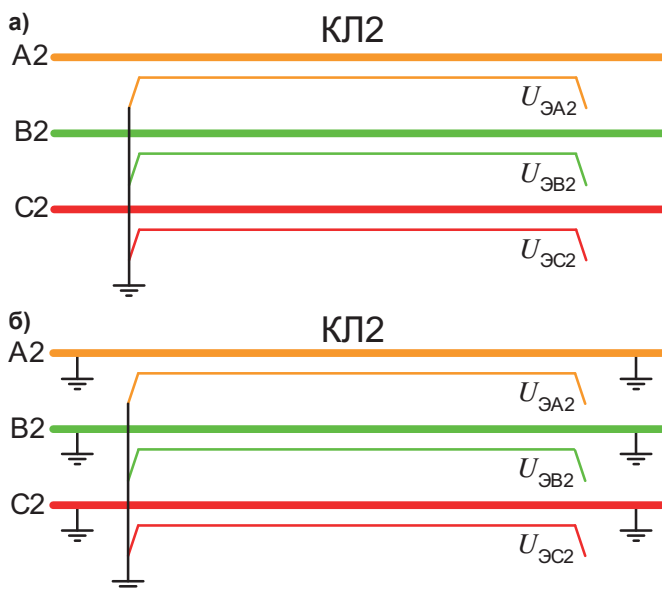


Рис. 6. Обустройство жил отключенной КЛ2, выполняемое на время проведения работ: а) жилы не заземлены (или заземлены только с одной стороны); б) жилы заземлены одновременно в обоих концах КЛ2

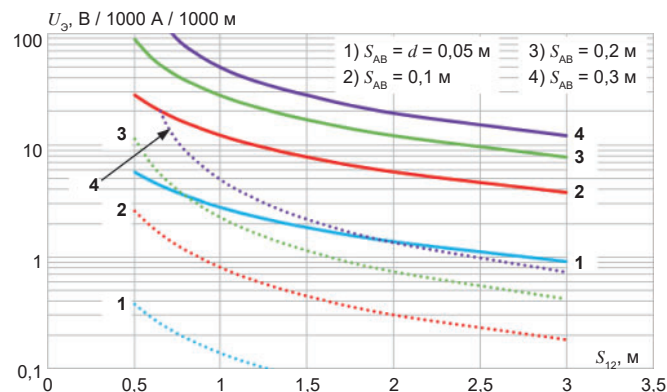


Рис. 7. Напряжение, наведенное на экран А2 отключенной КЛ2: сплошная линия — когда жилы КЛ2 не заземлены (рисунок 6а) или заземлены с одной стороны; пунктир — когда жилы КЛ2 заземлены с двух сторон (рисунок 6б)

Действительный интерес представляет не схема заземления экранов КЛ2, а наличие/отсутствие заземления жил КЛ2. Если жилы отключенной КЛ2 вообще не заземлены (рисунок 6а) или заземлены только на одном из двух концов КЛ2, то в таких жилах не может проходить наведенный ток, и поэтому они не способны повлиять на магнитное поле работающей КЛ1 и как-то снизить наводки на экраны КЛ2.

Если жилы отключенной КЛ2 заземлены одновременно в обоих концах КЛ2 (рисунок 6б), то создается путь для прохождения наведенного тока, и такой ток сможет ослабить магнитное поле КЛ1 и связанные с ним наводки на экраны КЛ2. Эффект от появления двустороннего заземления жил КЛ2 показан на рисунке 7. Например, если при $S_{12} = 0,5$ м и $S_{AB} = 0,2$ м без заземления жил КЛ2 наводка на фазу А2 была 90 В / 1000 м / 1000 А (сплошная линия № 3), то после двустороннего заземления жил КЛ2 наводка снизилась в 9 (!) раз до 10 В / 1000 м / 1000 А (пунктирная линия № 3).

Анализ рисунка 7 склоняет к выводу о том, что двустороннее заземление жил КЛ2 обеспечивает безопасность работ на отключенной КЛ2. К сожалению, этот вывод является ошибочным. Чтобы пояснить, рассмотрим различные варианты работ на отключенной КЛ2.

ВАРИАНТЫ РАБОТЫ НА ОТКЛЮЧЕННОЙ КЛ2

В месте проведения работ, обозначенном на рисунке 8 разрывом экранов (и жил), на каждом разрыве

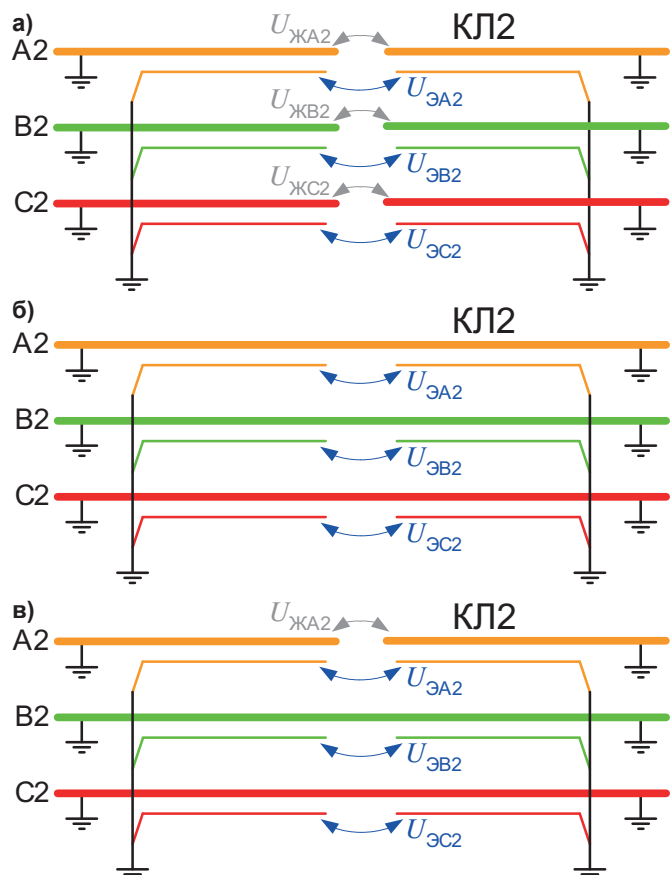


Рис. 8. Варианты работ на отключенной КЛ2 с двусторонним заземлением жил: а) монтаж трех муфт; б) обслуживание экранов; в) монтаж одной муфты

есть три наведенных напряжения промышленной частоты 50 Гц:

- 1) слева от разрыва на экране (жиле) относительно земли;
- 2) справа от разрыва на экране (жиле) относительно земли;
- 3) продольно на разрыве экрана (жилы).

Первые два напряжения меняются в зависимости от того, где именно вдоль трассы КЛ2 проводятся ремонтные работы — в начале, в средней части, в конце. Третье же напряжение не зависит от места работ и представляет собой величину, равную разности первого и второго напряжений — именно оно показано на рисунке 8 на разрывах экранов (жил).

Из-за ограниченности объема статьи на рисунке 8 даны лишь некоторые частные случаи выполнения работ на отключенной КЛ2. Положим, что во всех этих случаях «для обеспечения безопасности» в обоих концах КЛ2 выполнено заземление жил А2, В2, С2 (и даже экранов А2, В2, С2). Несмотря на принятые меры, покажем, что:

- наводки в схеме рисунка 8а полностью совпадают с наводками в схеме рисунка 6а и поэтому могут представлять опасность (см. сплошные кривые на рисунке 7);
- наводки в схеме рисунка 8б полностью совпадают с наводками в схеме рисунка 6б и поэтому менее опасны (см. пунктирные кривые на рисунке 7).

На рисунке 8а показан вариант, когда КЛ2 разделана и готова к монтажу трех соединительных муфт. К сожалению, двустороннее заземление жил А2, В2, С2 тут не имеет смысла, ведь в месте проведения работ все три жилы оказались разорваны, что исключило возможность прохождения по ним наведенных токов и тем самым исключило снижение результирующего магнитного поля и вызванных им наводок на КЛ2. Следовательно, продольные наведенные напряжения $U_{\text{ЭА2}}, U_{\text{ЭВ2}}, U_{\text{ЭС2}}$ на разрывах экранов КЛ2 будут точно такими же, как они были относительно земли в схеме рисунка 6а на конце односторонне заземленных экранов КЛ2. Интересно, что для рисунка 8а продольные наводки на жилы $U_{\text{ЖА2}}, U_{\text{ЖВ2}}, U_{\text{ЖС2}}$ совпадают с $U_{\text{ЭА2}}, U_{\text{ЭВ2}}, U_{\text{ЭС2}}$.

На рисунке 8б отображен вариант, который может возникнуть при совершенно различных обстоятельствах. Например, в рамках ремонта проложенной кабельной линии осуществляется подготовка к монтажу трех соединительных муфт, для чего с трех фаз КЛ2 уже успели снять оболочку и разрезать три экрана, однако разрезать жилы пока не успели. Или же, скажем, на КЛ2 выполнена транспозиция экранов, и персонал, осуществляя ее обслуживание, открыл коробки транспозиции и изъяс три экранные перемычки. Или, например, КЛ2 имеет заземление экранов с одной стороны (разрыв экранов не в средней части КЛ2, а на конце), и персонал открыл концевые коробки с целью проверки экранных ОПН. Во всех названных случаях наведенные напряжения $U_{\text{ЭА2}}, U_{\text{ЭВ2}}, U_{\text{ЭС2}}$ будут точно такими же, как они были в схеме рисунка 6б.

Рассмотрев два пограничных случая рисунков 8а и 8б (наиболее опасный и наименее опасный) предложим какой-то третий, промежуточный — он приведен на рисунке 8в. Его можно трактовать, например, вот так: на отключенной КЛ2 делается монтаж соединительной муфты фазы А2, и одновременно оказались демонтированы три перемычки в узле транспозиции (или, скажем, нет транспозиции, а просто экраны КЛ2 имеют одностороннее заземление экранов). Отметим, что разрыв экранов В2 и С2 отчасти является надуманным и сделан для того, чтобы уйти от двустороннего заземления экранов и указания конкретного сечения экранов. Если все же полагать для схемы рисунка 8в, что экраны В2 и С2 не имеют разрыва, то наводки на А2 от этого почти не изменятся, ведь у фаз В2 и С2 и без того уже заземлены сами жилы.

Наводки на экран (и жилу) фазы А2, возникающие в схеме рисунка 8в, показаны на рисунке 9 пунктирными линиями, а сплошными для сравнения показаны наводки в самой опасной схеме на рисунке 8а (или, что тоже самое, в схеме на рисунке 6а).

Например, при $S_{12} = 0,5$ м и $S_{\text{АВ}} = 0,2$ м наводка на фазу А2 составляет:

- 60 В / 1000 м / 1000 А (пунктир № 3) при монтаже одной муфты;
- 90 В / 1000 м / 1000 А (сплошная № 3) при монтаже сразу трех муфт.

При увеличении расстояния между цепями до $S_{12} = 0,75$ м наводка на А2 будет:

- 20 В / 1000 м / 1000 А (пунктир № 3) при монтаже одной муфты;
- 45 В / 1000 м / 1000 А (сплошная № 3) при монтаже сразу трех муфт.

Если длина трассы равна, скажем, 4000 метров, а ток в жиле работающей КЛ1 равен 500 А, то при распространенном на практике $S_{12} = 0,75$ м у персонала в руках окажется напряжение 40 В (при монтаже одной муфты) и 90 В (при монтаже трех муфт) — оба напряжения вполне можно полагать смертельными. Следовательно, безопасность работ на отключенных КЛ является серьезным вопросом и особенно в тех случаях, когда фазы КЛ прокладываются в ряд на расстоянии друг от друга, а не сомкнутым треугольником.

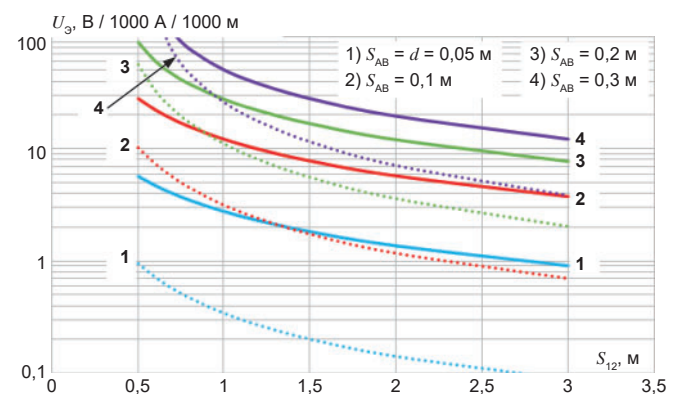


Рис. 9. Напряжение, наведенное на экран А2 отключенной КЛ2: сплошная линия — когда жилы КЛ2 не заземлены или заземлены с одной стороны (рисунок 8а); пунктир — когда жилы двух фаз КЛ2 заземлены с двух сторон (рисунок 8в)

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА КЛ2

Если фазы КЛ1 и КЛ2 проложены сомкнутым треугольником (рисунок 2б) на всем протяжении трассы или хотя бы на значительной ее части, то это уже является надежным способом защиты персонала от наведенных напряжений. В тех случаях, когда проложить фазы сомкнутым треугольником по каким-то причинам нельзя, для защиты персонала рекомендуется выполнять транспозицию двух крайних фаз или транспозицию всех трех фаз (рисунок 10).

Эффективность транспозиции самих однофазных кабелей (не следует путать с транспозицией экранов) продемонстрирована на рисунке 11, который получен при $S_{AB} = 0,2$ м в схеме рисунка 8в, где осуществляется монтаж одной муфты А2. Например, при распространенных на практике $S_{12} = 0,75$ м и $S_{AB} = 0,2$ м:

- транспозиция двух крайних фаз снижает наводку от 20 В / 1000 м / 1000 А до 14 В;
- транспозиция трех фаз снижается наводку от 20 В / 1000 м / 1000 А до 8 В.

При типовых длинах КЛ и характерных токах жил, погонная наводка уровня 8 В / 1000 м / 1000А уже едва ли способна вызвать опасное воздействие на персонал.

ВЫВОДЫ

Проведение монтажа, ремонта, обслуживания отключенных от сети цепей КЛ всегда сопряжено с риском для персонала оказаться под воздействием наведенного напряжения промышленной частоты. Опасность наводок увеличивается по мере роста длины КЛ и класса ее напряжения (так как с ростом класса возрастают токи в жилах КЛ, а также среднее расстояние между осями фаз вдоль трассы КЛ).

Безопасность работ на КЛ в условиях наведенных напряжений достойна того, чтобы стать поводом для разработки в России отдельного нормативного документа. Для снижения наводок в сетях всех классов 6–500 кВ следует:

- прокладывать фазы КЛ сомкнутым треугольником на большей части трассы КЛ;
- в случае прокладки фаз в ряд использовать транспозицию двух крайних фаз КЛ или же транспозицию всех трех фаз КЛ (не путать с транспозицией экранов);
- на время работ заземлять по концам жилы и экраны отключенных КЛ;
- размещать цепи КЛ возможно дальше друг от друга;

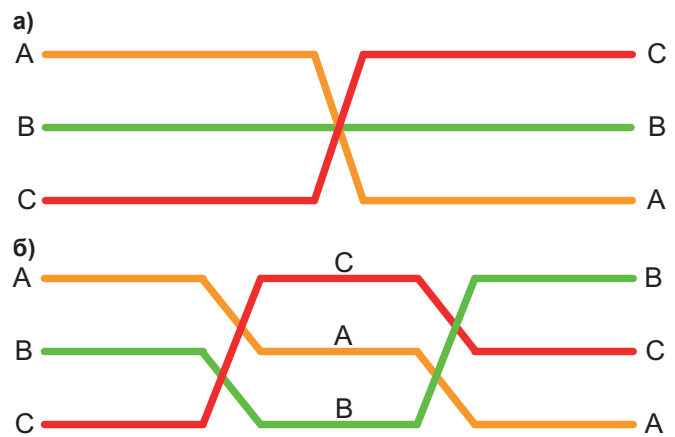


Рис. 10. Транспозиция самих однофазных кабелей при их прокладке в ряд: а) только двух крайних фаз; б) всех трех фаз

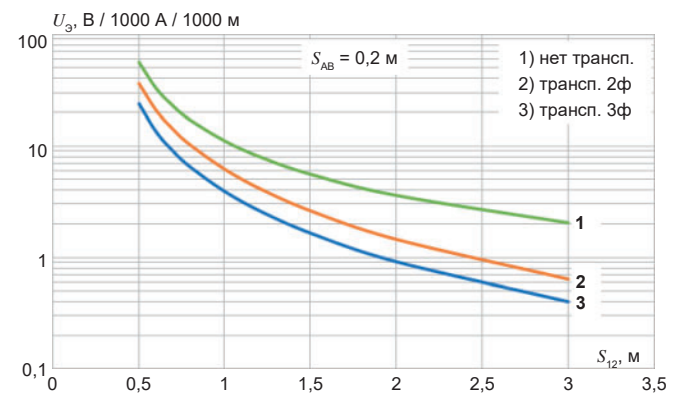


Рис. 11. Напряжение, наведенное на экран А2 отключенной КЛ2 в схеме рисунка 8в

- при ремонтах сразу нескольких фаз, сопряженных с разделкой экранов (и жил), работы лучше выполнять поочередно, переходя к следующей фазе только после восстановления целостности заземленной по концам предыдущей фазы.

В некоторых случаях для гарантии полной безопасности проведения работ можно рекомендовать выводить из работы не одну, а сразу обе цепи КЛ, заранее переведя потребителей на питание от других источников.

Рассуждения, содержащиеся в статье, относятся к нормальному режиму сети, когда токи КЛ не превосходят нескольких сотен ампер. Если же в сети имеется короткое замыкание, то токи жил КЛ существенно возрастают, что влечет за собой рост наводок на отключенную цепь. Особенно опасными наводки на отключенную цепь будут, как показано в [1], при несимметричных коротких замыканиях в сети. Защита персонала в таком случае — отдельная тема для исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Напряжения, наведенные на кабельные линии 6–500 кВ // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ: передача и распределение, 2017, № 6(45). С. 86–91.
2. СТО 56947007-29.060.20.072-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2011.
3. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.

REFERENCES

- 1.
- 2.
- 3.