

1. Перенапряжения в сетях 6-35кВ

При эксплуатации на изоляцию электрооборудования, наряду с длительным воздействием рабочего напряжения воздействуют кратковременные перенапряжения.

Основными характеристиками перенапряжений являются кратность, повторяемость, форма кривой и широта охвата сети.

Кратность – отклонение максимального значения напряжения U_{\max} к амплитуде наибольшего рабочего напряжения на данной изоляционной конструкции $\sqrt{2}U_{нр}$: $k = U_{\max} / \sqrt{3}U_{нр}$. Однако при измерениях или расчётах для определения кратности U_{\max} обычно относят не к величине $\sqrt{2}U_{нр}$, а к фактической амплитуде рабочего, имеющего место непосредственно перед появлением перенапряжения или установившегося после него. (Рис. 1).

Повторяемость определяется ожидаемым числом случаев возникновения перенапряжения за данный промежуток времени, например в год.

Форма кривой перенапряжения обуславливается длиной фронта, длительностью, числом импульсов и временем существования данного перенапряжения.

Широта фронта сети – число изоляционных конструкций, на которые одновременно воздействует данное перенапряжение.

Все перечисленные параметры перенапряжений в основном случайны.

В зависимости от причины возникновения перенапряжения различаются на внутренние и внешние.

Внешние перенапряжения возникают при ударах молнии в конструкции электрооборудования (линии электропередач и т.п.), а также внешних по отношению к сети источников энергии.

Внутренние перенапряжения развиваются за счёт энергии подключенных к сети генераторов или реактивных элементов, а также вследствие различных процессов, аварий и коммутации элементов сети, в том числе и повторных зажигания электрической дуги.

Главным источником внешних перенапряжений в сетях 6-35кВ являются атмосферные разряды, возникающие перенапряжения при прямых ударах молнии в токоведущие элементы, заземлённые части электроустановок, индуктирование напряжений и набегающих волн с линий.

Для электрических сетей наибольшую опасность представляют удары молнии в токоведущие элементы. При таких ударах на токоведущих частях импульсы перенапряжения могут достигать нескольких мегавольт, что вполне достаточно для прямого перекрытия любой изоляции.

Прямые удары молнии в заземлённые части конструкций установок создают кратковременные перенапряжения, которые могут обуславливать обратные перекрытия с заземлённых элементов на токоведущие.

Индуктированные перенапряжения – результат взаимной магнитной (индуктированной) и электрической (емкостной) связи молнии с токоведущими и заземлёнными элементами электрической сети. Они имеют значительно меньшую величину по сравнению с перенапряжениями при прямых ударах молнии в токоведущие и заземлённые части электроустановок. Однако, индуктированные перенапряжения представляют главную опасность для изоляции сетей 6-35кВ.

Импульсы перенапряжений могут также оказывать влияние на изоляцию подстанций, расположенных на значительном удалении от места удара молнии, так как они распространяются по линии на значительные расстояния с малым затуханием. Эти перенапряжения называют набегающими волнами. Распространяясь по обмоткам машин и трансформаторов, волны могут воздействовать на их главную и витковую изоляцию, а проходя через трансформатор - на изоляцию электрооборудования, подключённого к другим его обмоткам. Возникающие на подстанции перенапряжения, как правило, превышают напряжение набегающей волны за счёт волновых процессов на ошиновке и в электрооборудовании.

Внутренние перенапряжения в зависимости от их длительности воздействия на изоляцию подразделяются на квазистационарные и коммутационные.

Квазистационарные перенапряжения возникают при неблагоприятных сочетаниях параметров сети и продолжаются до тех пор пока такое сочетание существует.

Из квазистационарных перенапряжений для сетей 6-35кВ наибольший интерес представляют резонансные и феррорезонансные. Резонансные перенапряжения возникают при несимметрии сети, например в неполнофазном (однофазном или двухфазном) питании силовых трансформаторов через воздушную или кабельную линию. Феррорезонансные перенапряжения имеют место в контурах, содержащих ёмкость и индуктивность с насыщенным магнитопроводом, когда индуктивность по сравнению с нормальным режимом может падать на порядок и более.

Коммутационные перенапряжения возникают при быстрых изменениях режимов работы элементов сети (отключение и включение коммутационных аппаратов), пробоях изоляции (в том числе повторных зажигании дуги), резких изменениях параметров нелинейных элементов.

Включение линии во время их коммутации под напряжением с одного конца при разомкнутом противоположном вызывают перезарядку ёмкости фаз на землю от начального до установившегося значения. Поскольку при оперативных включениях линий на них отсутствует напряжение ($U_0 = 0$) перенапряжение обычно составляет кратность $K \leq 2$. При АПВ (когда $U_0 \neq 0$)

Автор: Янсюкевич Виктор Александрович – yanviktor.narod.ru
и при несоответствии полярности напряжений (например линии и шин) перенапряжения могут иметь кратность $K \geq 3$.

Отключение линий могут происходить при отсутствии или наличии повторных замыканий между расходящимися контактами коммутационного аппарата. При их отсутствии перенапряжения практически не возникают. Наоборот, при неоднократных горениях и гашениях дуги между контактами процесс подобен процессам при неоднократных АПВ. Кратность перенапряжений в этом случае $K \geq 3,5$.

Включение индуктивных элементов сети (электрические машины, трансформаторы) сопровождаются колебательным зарядом емкостей обмоток и других элементов (например шин, кабелей). Обычно в этом случае $K \leq 2$. Однако, разброс моментов включения фаз и наличие обмотки, выполненной по схеме «треугольник» способствует увеличению перенапряжений на запаздывающих фазах до $(2,5-3,0)U_{\phi}$.

Перенапряжения при отключении индуктивных элементов возникают из-за быстрого принудительного уменьшения (обрыва) тока в выключателе. При этом энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля ёмкости отключенной обмотки и подключенного к ней оборудования. Перенапряжения в зависимости от значения обрываемого тока и соотношения L и C могут достигать опасных для изоляции величин.

При неустойчивых горениях и гашениях дуги между фазными проводниками и землёй в сетях 6-35кВ возникают так называемые дуговые перенапряжения с кратностью 3,5-4,0.

2. Характеристики сетей 6-35кВ.

Основными элементами сетей средних классов напряжения являются трансформаторы. В таблице 1.2 приведена кратность атмосферных перенапряжений относительно наибольшего рабочего и номинального напряжений сети для трансформаторов с нормальной изоляцией.

Учитывая значительную долю повреждений от внутренних перенапряжений в таблице 1.3 приведены допустимые для нормальной изоляции сетей 6-35кВ кратности внутренних перенапряжений. Аналогично построена таблица 1.4 для трансформаторов с облегчённой изоляцией, предназначенных для работы в сетях, в которых исключена возможность проникновения атмосферных перенапряжений. По этой причине определяющими для них являются внутренние перенапряжения.

Допустимая величина этих перенапряжений определена по формуле:

$$U_{\text{доп}} = \delta_{\text{вн}} K_{\text{вн}} U_{\text{н}}$$

где: $\delta_{\text{вн}} = 1,3$ – коэффициент импульса при внутренних перенапряжениях;

$U_{\text{н}}$ – испытательное напряжение;

$K_{\text{вн}} = 0,9$ – коэффициент кумулятивности

Как видно из всего вышесказанного, запас прочности для изоляции трансформаторов довольно высок.

Изоляция электрических машин является наиболее существенной частью, которая определяет надёжность и срок службы машины в основном по причине старения под действием различных факторов.

Основной причиной повреждения изоляции электродвигателей является совместное действие тепловых, механических и электрических воздействий, а также влияние окружающей среды (влажность, загрязнённость, высокая температура и т.д.). Тепловое старение органических составляющих изоляции (смолы, бумага, ткани) сильно снижает электрическую прочность машинной изоляции. Неорганические составляющие (слюда, стекло, асбест) не подвержены тепловому старению при обычных для электродвигателей рабочих температурах. Тепловое старение делает изоляцию уязвимой для механических воздействий. При работе машин их обмотки подвергаются воздействию электрических усилий от действия электромагнитных сил при нормальных или аварийных режимах, что приводит к их перемещению. Кроме того, обмотки подвержены воздействию сил, возникающих при тепловых расширениях неодинаковых для различных частей.

Для новой изоляции все эти воздействия не представляют большой опасности, но при потере механической прочности, изоляция менее способна противостоять обычным условиям вибрации или ударов, разности тепловых расширений и сжатий меди, стали и конструктивных деталей.

В силу вышесказанного, в процессе эксплуатации прочность изоляции машин снижается (Рис. 1.2). Как видно из рисунка, прочность изоляции снижается интенсивно в первые годы работы, а затем это снижение уменьшается. Через несколько лет после ввода машины в эксплуатацию прочность её изоляции снижается примерно на 30%.

Уровень прочности изоляции электродвигателей при перенапряжениях характеризуется коэффициентом импульса:

$$U_{\pi} = U_{\text{имп}}/U_{\sim}$$

где: $U_{\text{имп}}$ – импульсное пробивное напряжение

U_{\sim} - амплитудное значение переменного (выдерживаемого в течение 1 минуты) напряжение

Обычно для новой изоляции среднее значение $K_{\pi} = 1,22-2,0$. Для состарившейся изоляции при наличии дефектов K_{π} снижается до 1,0 и даже 0,5-0,8. Такое же положение имеет место для витковой изоляции.

Замыкание на землю является одной из основных причин возникновения существенных перенапряжений в сетях 6-35кВ.

В большинстве случаев большое количество замыканий на землю возникает по причинам, не зависящим от протяженности сети. В кабельных линиях они связаны с повреждениями в основном концевых и в меньшей степени соединительных муфт, линейных разъединителей, в воздушных сетях – повреждениями коммутационной аппаратуры и ударами молнии.

Замыкания на землю в сетях с изолированной или резонансно-заземлённой нейтралью не сопровождается немедленным отключением потребителей, при этом допускается длительная (до 2 часов) работа сети.

Электрические сети напряжением 6-35кВ имеют изолированную или заземлённую через дугогасящий реактор нейтрали. Применение дугогасящих реакторов поставлено только в зависимости от величины емкостного тока замыкания на землю и имеет целью обеспечить такой уровень тока, который давал бы возможность в течение длительного времени не отключать потребителей.

Реальная практика применения дугогасящих реакторов в сетях с большими токами замыкания на землю показывает, что недостатки такой системы приводят к тому, что остаточный ток оказывается большим, а его самогашение становится невозможным.

Кроме того, в системе с дугогасящим реактором возникают опасные внутренние перенапряжения. Наиболее опасными оказываются перенапряжения, создаваемые дуговыми замыканиями, и часто не вследствие их высокой кратности, а тем, что они многократно воздействуют на всю сеть и вызывают множественные повреждения изоляции с последующим значительным ущербом. Многократные пробой ослабленных мест изоляции при высоких кратностях перенапряжениях вблизи высоковольтных электродвигателей создают крутые волны перенапряжений, приводящие к повреждению витковой изоляции электродвигателей

3. Грозозащита ВЛ 3-35кВ.

Подвеска грозозащитных тросов, являющаяся основным мероприятием на линиях 110кВ и выше, мало эффективна для линий 3-35кВ, что вызвано низкой импульсной прочностью изоляции 3-35кВ. Вследствие этого вероятность обратного перекрытия при ударах молнии в опору или в трос оказались бы, при обычных значениях сопротивления заземления опор, весьма значительной. Поэтому линии 3-35кВ сооружаются, как правило без тросов. Исключения составляют лишь особо ответственные линии 35кВ на металлических опорах.

Несмотря на это линии 3-35кВ имеют ряд особенностей создающих благоприятные условия для их грозозащиты.

Во-первых, эти линии реже подвергаются прямым ударам молнии из-за их относительно небольшой высоты и протяжённости. Нередко они оказываются частично защищёнными за счёт

возвышающихся над ними объектами: зданиями, высокими деревьями, линиями более высокого напряжения и т.п.

Во-вторых, наличие изолированной или заземлённой через дугогасящий реактор нейтрали в сетях 3-35кВ облегчает борьбу с последствиями импульсных перекрытий изоляции, способствует гашению дуги однофазного замыкания на землю. Возникшая дуга однофазного перекрытия гаснет, и опасность для линий 3-35кВ представляют лишь перекрытия между фазами или одновременное перекрытие с нескольких фаз на землю.

В-третьих, линии 3-35кВ часто сооружают не деревянных опорах. В этом случае длина пути грозового перекрытия изоляции увеличивается за счёт импульсной прочности дерева. Уменьшается вероятность перекрытия и вероятность перехода импульсного в дугу короткого замыкания. Однако при этом существует вероятность расщепления опор прямым попаданием молнии.

Отдельные места линий требуют дополнительных мер защиты. К таким местам относятся:

- пересечение линий электропередач между собой
- пересечение линий электропередач с линиями связи, трамвайными линиями и линиями электрифицированной железной дороги
- опоры линий электропередач со сниженной изоляцией
- высокие пролёты переходных пролётов
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях

Защита пересечений линий вызвана необходимостью предотвратить аварии в случае грозового перекрытия с верхней линии на нижнюю линию электропередачи или линию связи.

Отдельные металлические и железобетонные опоры линий, выполненных главным образом на деревянных опорах без тросов, представляют собой место со сниженной импульсной электрической прочностью изоляции. Эти места целесообразно защитить трёхфазным комплектом разрядников или ОПН.

4. Защита подстанций.

Грозозащита подстанций усложняется тем, что за счёт многократных отражений, волны перенапряжения на подстанции могут быть выше, чем на линии.

Прямой удар молнии представляет опасность для открытых распределительных устройств (ОРУ), зданий, масло- и нефтехозяйств, дымовых труб и других наземных сооружений.

Защита зданий и сооружений, имеющих металлические несущие конструкции или металлическую кровлю, достаточно обеспечивается путём заземления металлических частей. Кирпичные, бетонные и железобетонные сооружения, а также металлические опоры, поддерживаю

Автор: Янсюкевич Виктор Александрович – yanviktor.narod.ru

провода на подстанции, защищают молниеотводами, устанавливаемыми на этих сооружениях, или отдельно стоящими молниеотводами. Зона защиты молниеотводов должна охватывать всю территорию вместе с возвышающимися объектами. Тем самым обеспечивается надёжная защита от прямых ударов молнии.

Для защиты пожаро- и взрывоопасных объектов необходимо предусматривать также защиту от искрообразования между всеми соприкасающимися металлическими частями путём обеспечения надёжного сварного контакта между ними.

Если молниеотвод установлен на портале, то при ударе молнии на нём возникает высокое напряжение и может произойти обратное перекрытие гирлянды с портала на провод. Когда установлены отдельно стоящие молниеотводы или используются прожекторные мачты, то перекрытие может произойти по воздуху между молниеотводом и проводами или оборудованием. Для защиты от таких перекрытий необходимо обеспечить достаточно малые сопротивления заземлителей. В некоторых случаях целесообразно удалить молниеотвод от электрооборудования.

Возникает опасность пробоя в земле между индивидуальным заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и другими подземными устройствами: кабелями, трубопроводами и т.п. При таком пробое на рабочее заземление подстанции высокое импульсное напряжение с заземляющего устройства может попасть на корпус трансформатора и повредить его обмотки низкого напряжения. Для защиты от таких повреждений необходимо применять разрядники на обмотках НН и обеспечить достаточное удаление заземляющих проводников электрооборудования от заземления молниеотвода.

Основными средствами защиты подстанции от набегающих волн перенапряжения с линий электропередач являются вентильные разрядники и ОПНы. При этом главным условием является максимальное приближение разрядника к защищаемому оборудованию. Однако при близких ударах молнии ток через разрядник может быть настолько велик, что существует возможность повреждения как самого разрядника, так и защищаемого оборудования. Для уменьшения такой вероятности необходимо устанавливать дополнительные разрядники на подходах к подстанции (за 1-2 пролёта на линии).

5. Внутренние перенапряжения.

Внутренние перенапряжения в сетях с изолированной нейтралью, возникающие при дуговых замыканиях на землю показаны на рисунке 3.12. Как видно из рисунка максимальные перенапряжения могут достигать значений 2.16 и 2.97.

Исследования показали, что уменьшить перенапряжения можно включением в нейтраль высокоомного резистора, при этом сохраняется возможность работы сети при замыкании на землю в течение некоторого времени.

Автор: Янсюкевич Виктор Александрович – yanviktor.narod.ru

Дуговые замыкания и перенапряжения, возникающие при этом показаны на рисунке 3.13.

Высоковольтные вакуумные выключатели – надёжные аппараты, имеющие высокие механический и коммутационный ресурс, пожаро- и взрывобезопасность, быстродействие и бесшумность, малый вес.

Указанные и другие причины обуславливают массовое применение вакуумных выключателей.

Некоторые особенности процесса гашения дуги в вакуумном выключателе (например, явление многократных повторных зажигания и гашений дуги) могут в редких случаях приводить к возникновению высоких кратностей перенапряжений.

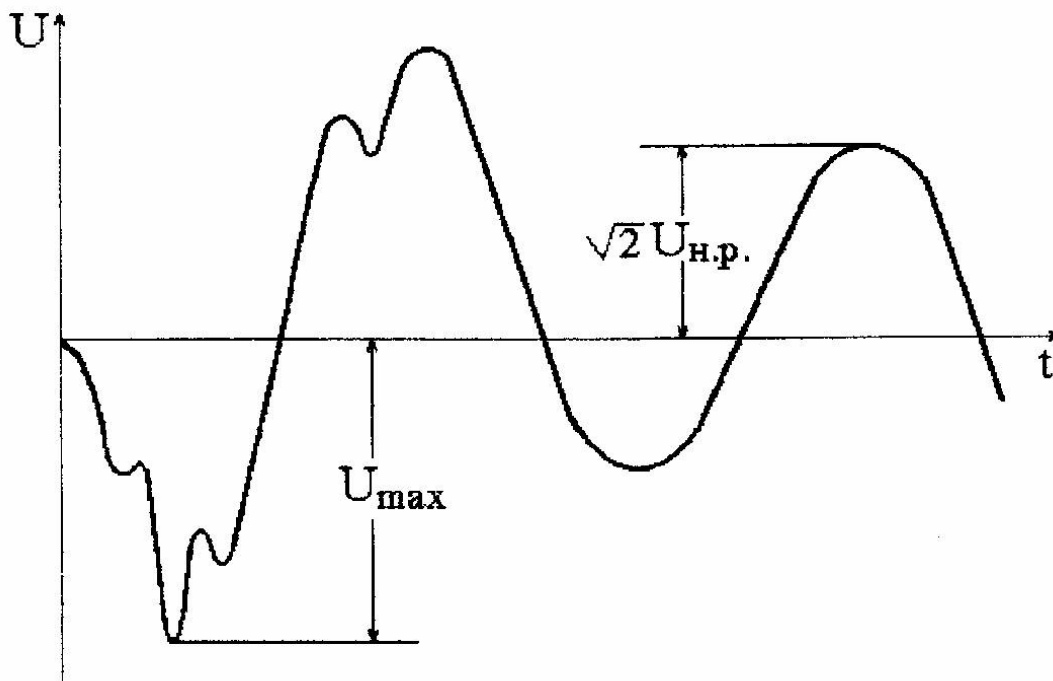


Рис. 1.1 Осциллограмма перенапряжений

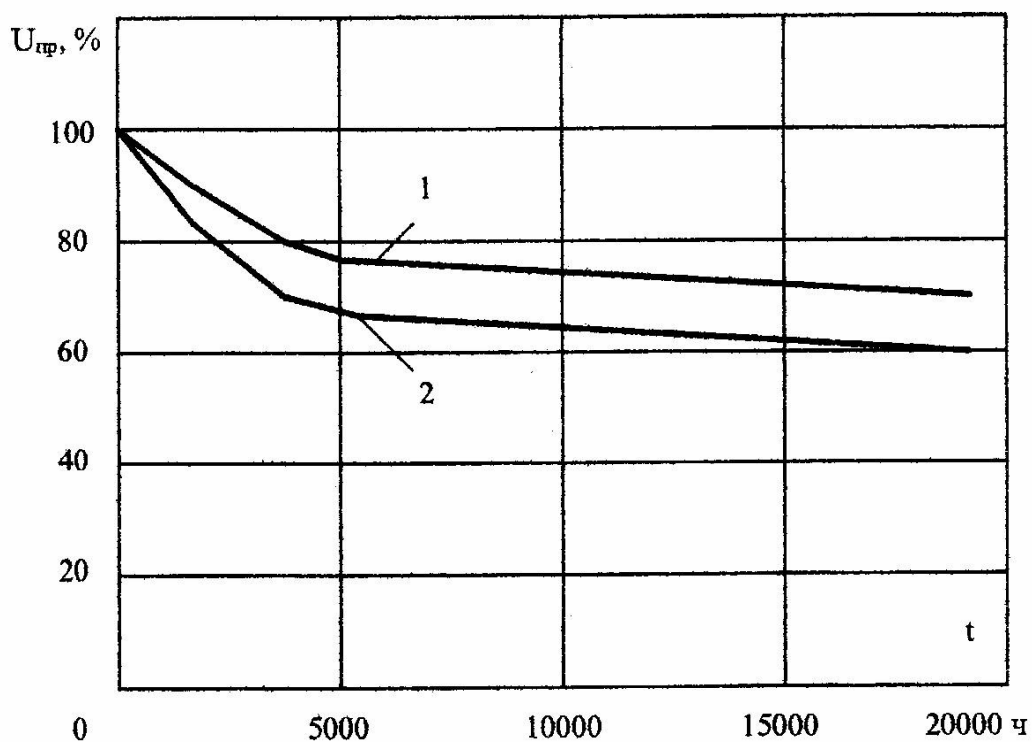


Рис. 1.2 Зависимость электрической прочности (процент от прочности новой изоляции) при 50 Гц от числа часов работы в эксплуатации:
1 - для отечественных машин; 2 - по данным США.

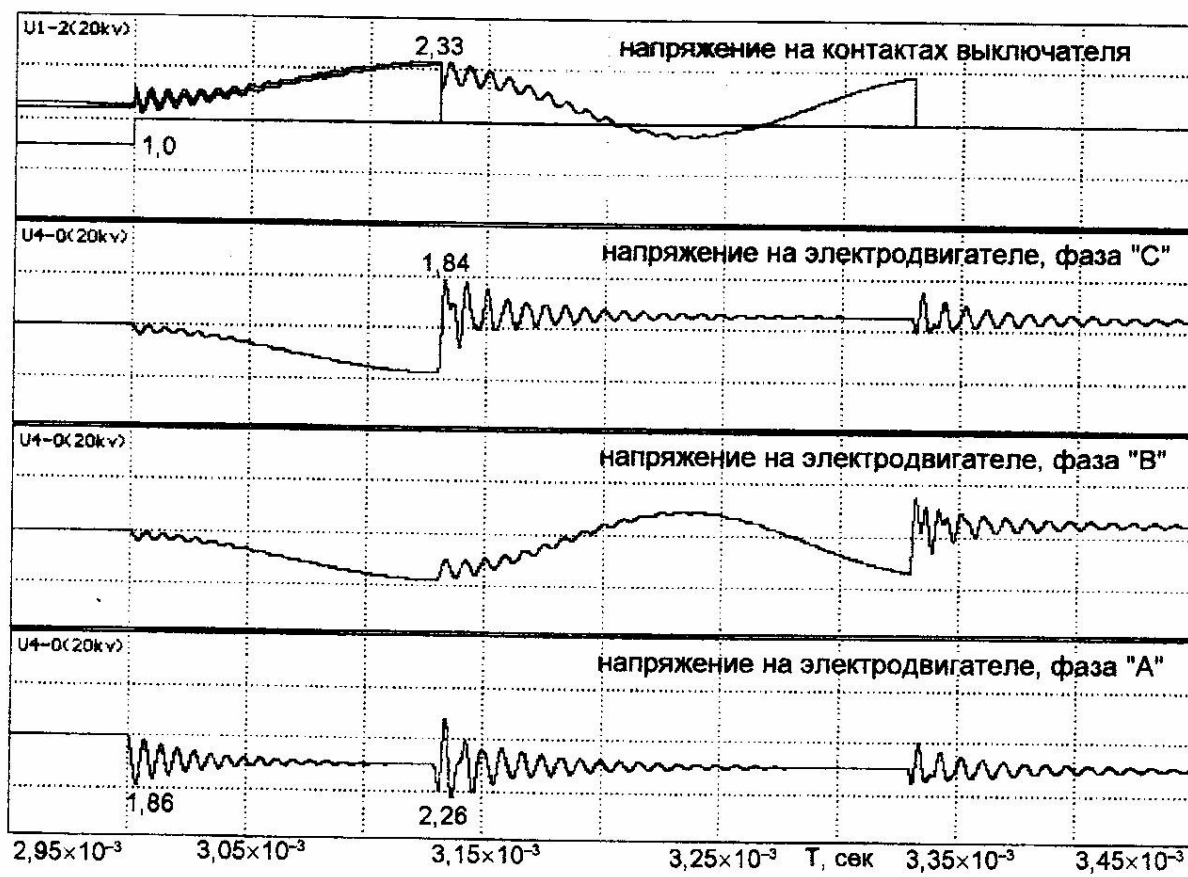


Рис. 3.27. Пуск электродвигателя мощностью 630 кВт и напряжением 6 кВ.

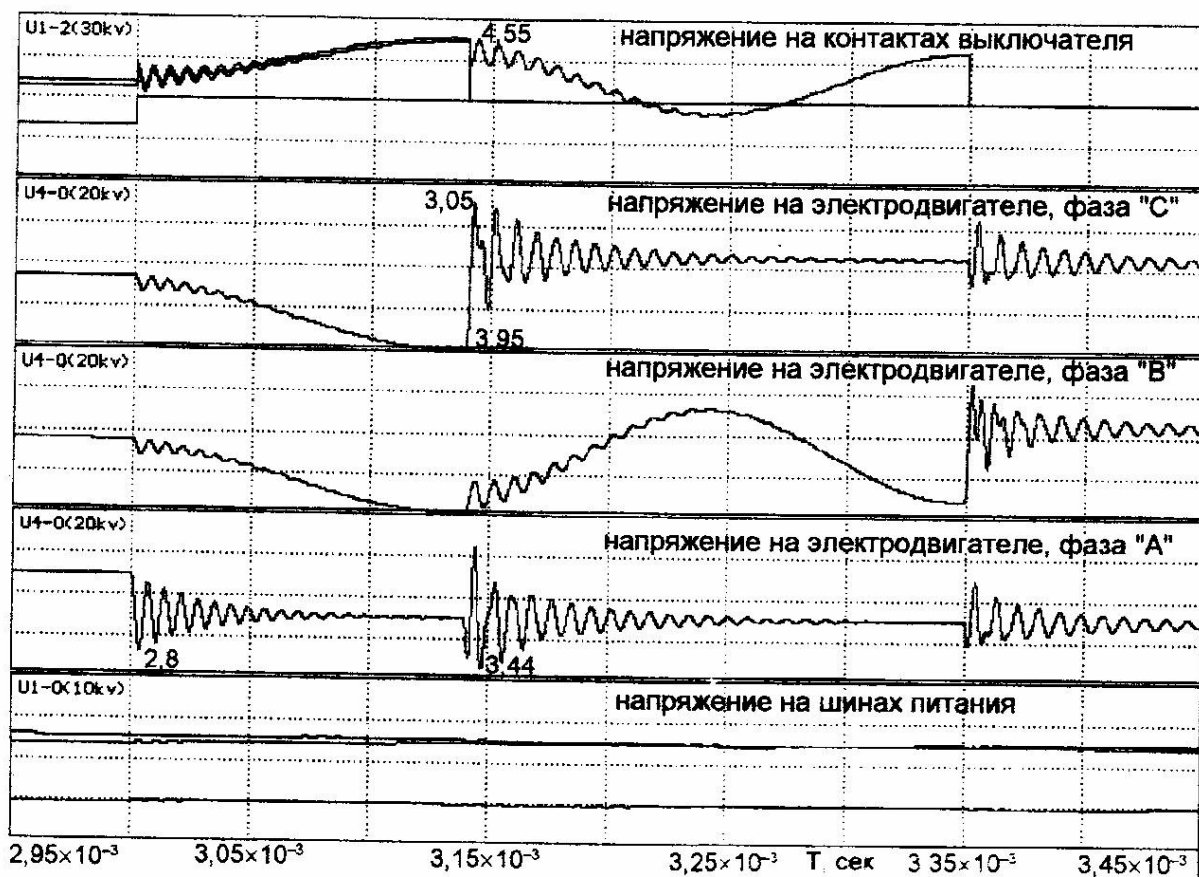


Рис. 3.28. Самозапуск электродвигателя мощностью 630 кВт и напряжением 6 кВ.

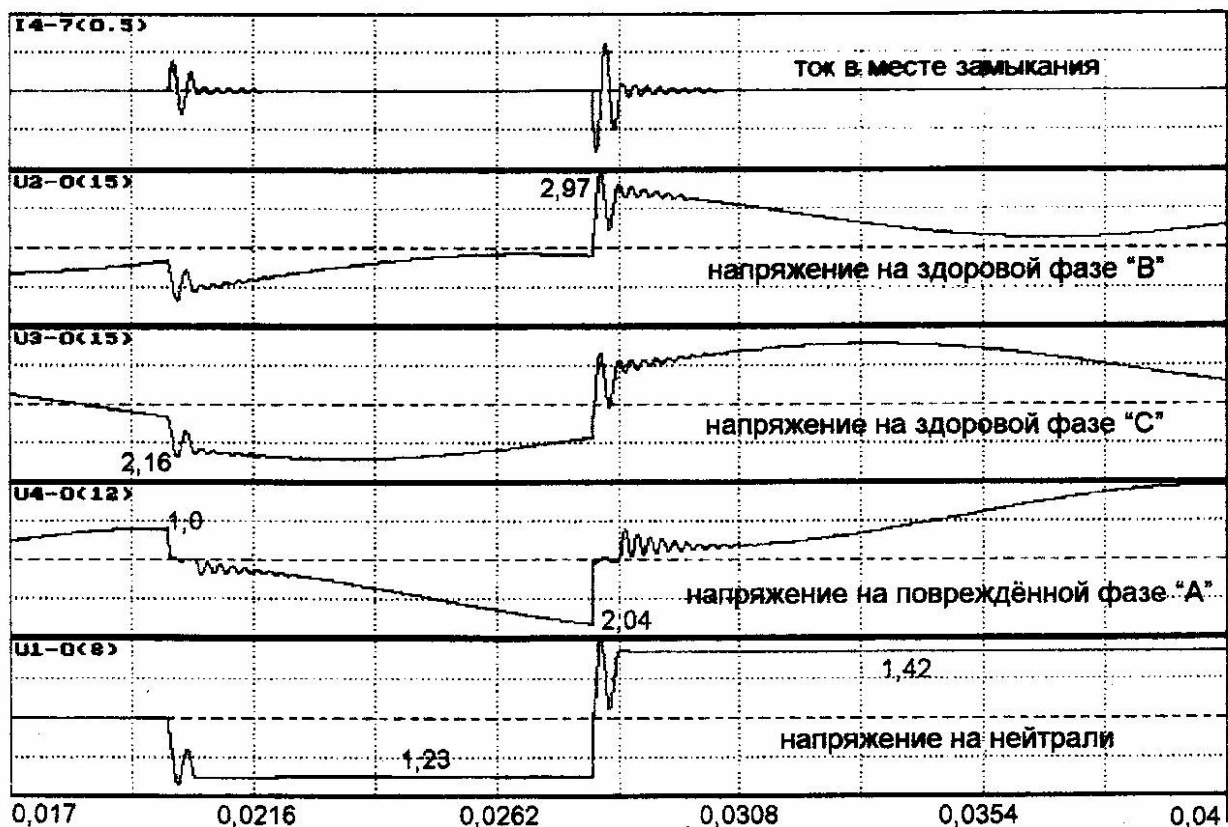


Рис. 3.12. Дуговое замыкание в сети 6 кВ с изолированной нейтралью. Ток замыкания 5 А.

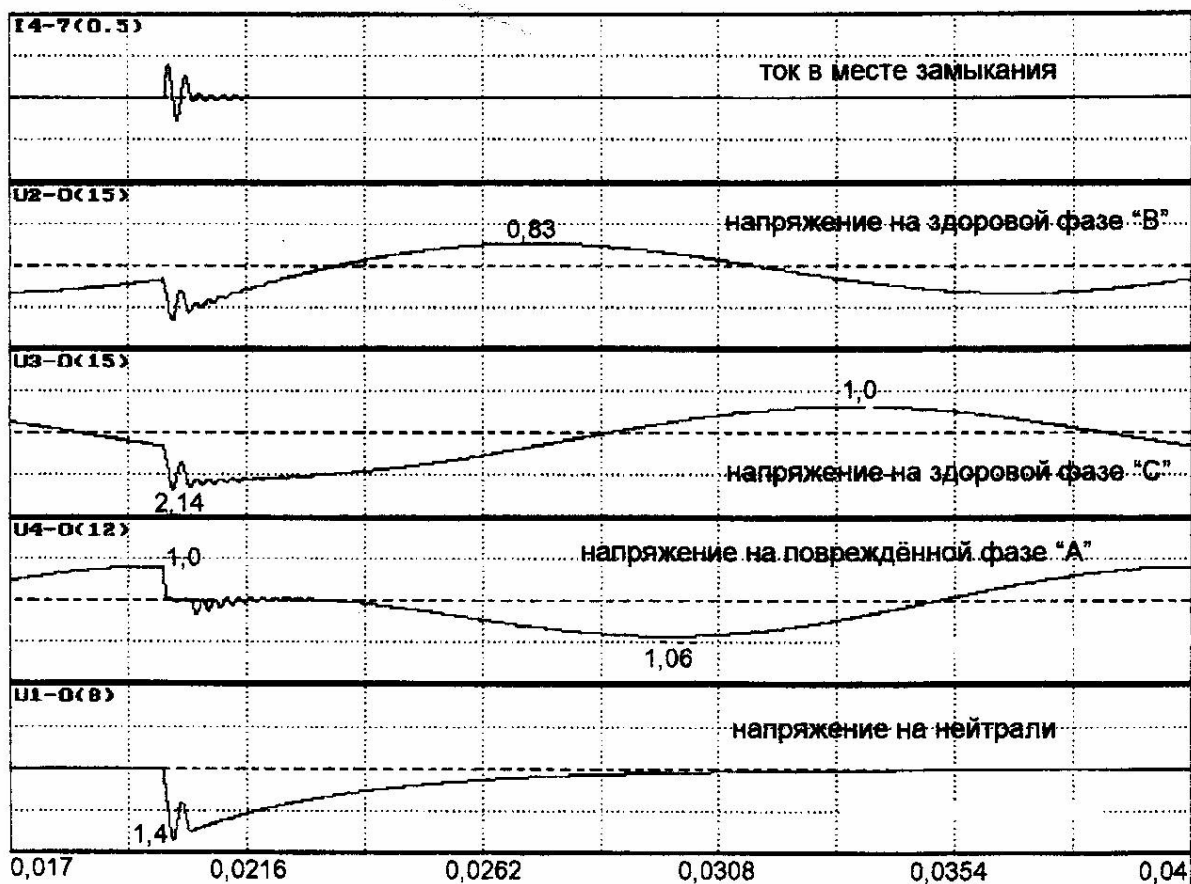


Рис. 3.13. Дуговое замыкание в сети 6 кВ с высокоомным заземлением нейтрали через резистор 700 Ом. Ток замыкания 7 А.

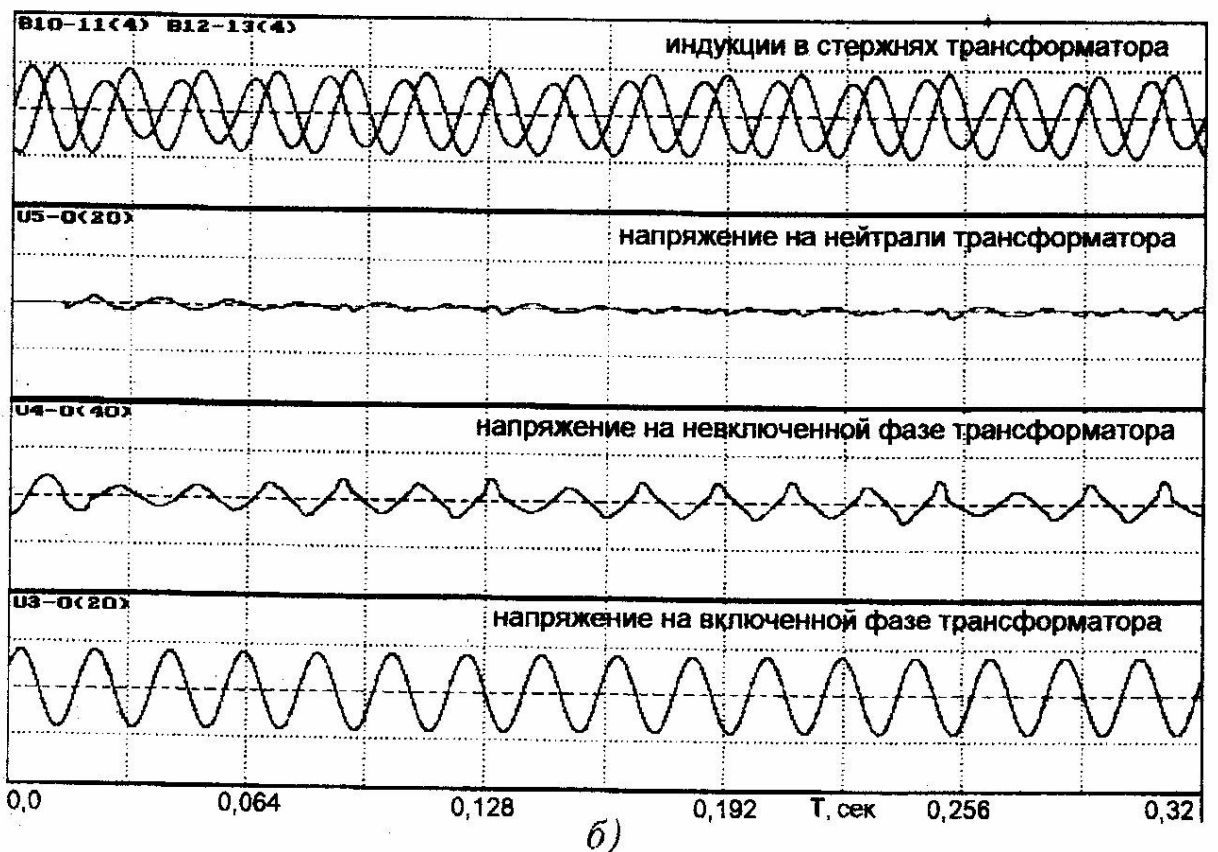
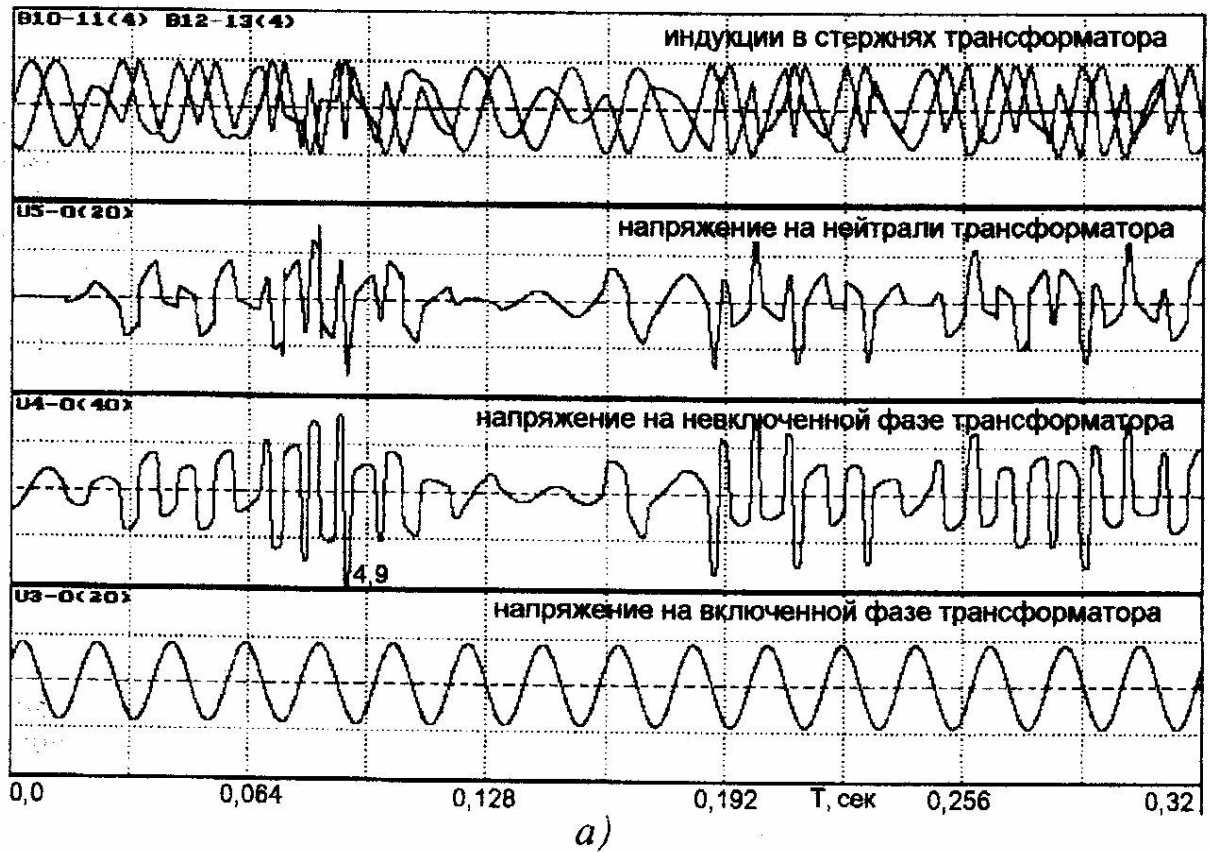


Рис. 3.34. Феррорезонансные перенапряжения при неполнофазном подключении ненагруженного трансформатора напряжением 10 кВ; мощностью 1000 кВА; $I_{xx}=1,6\%$; $u_k=5,5\%$ и емкостью кабельного присоединения трансформатора — 0,1 мкФ. Трансформатор с изолированной нейтралью (а); с нейтралью, заземленной через резистор 4000 Ом (б).

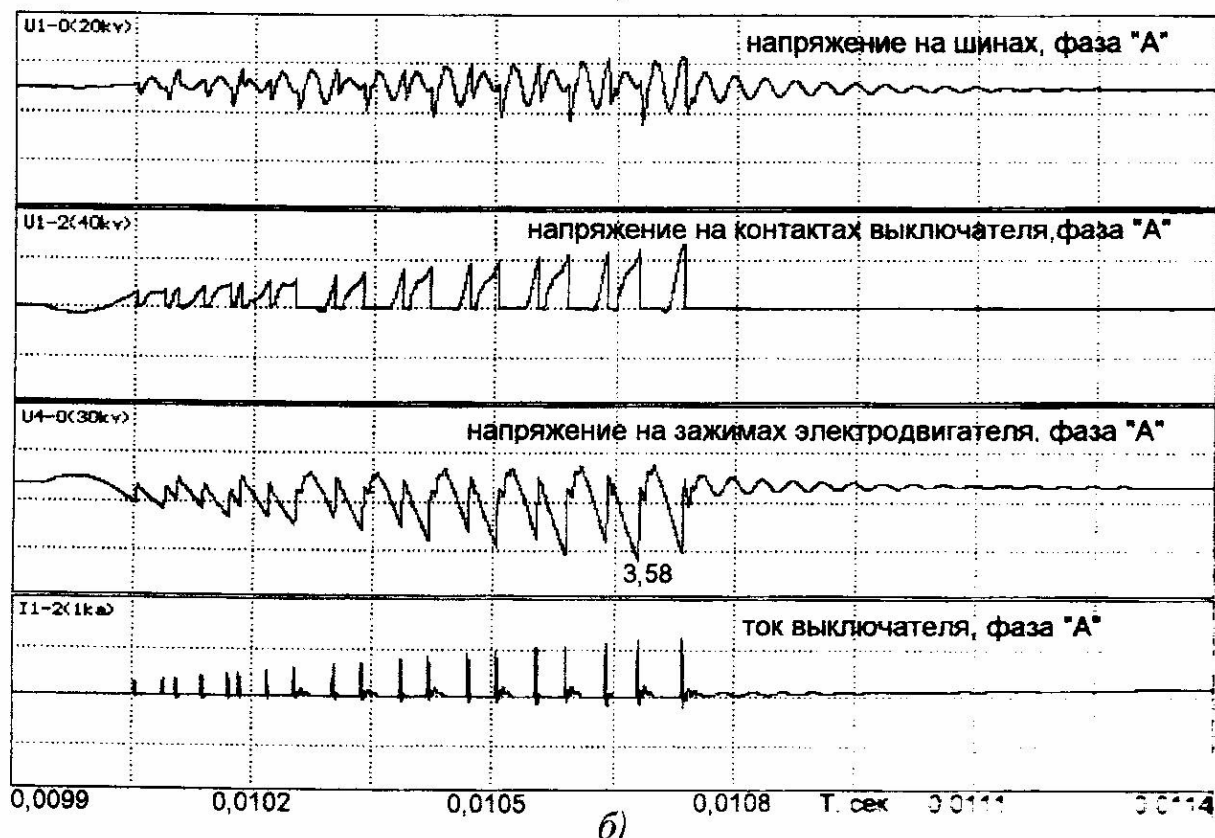
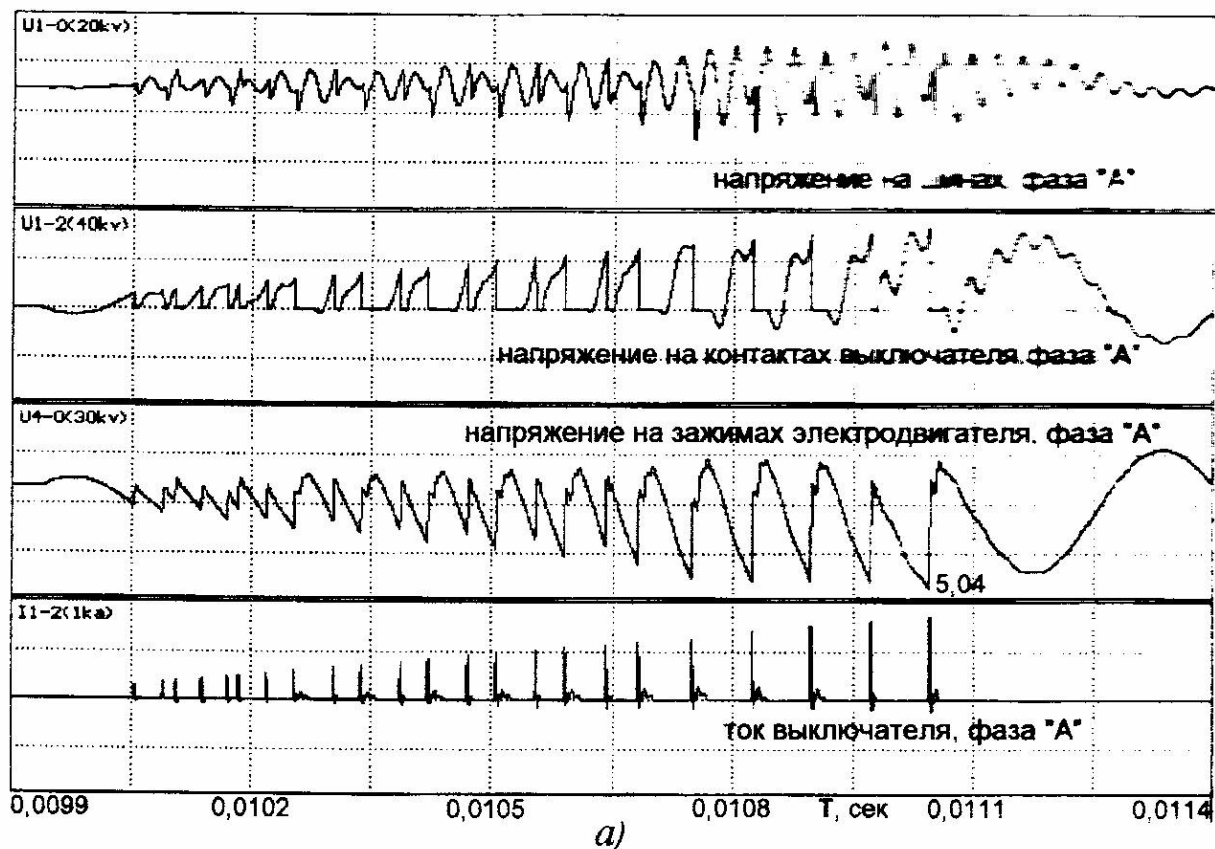


Рис.3.50. а) Отключение пускового тока: ток среза $i_{сз}=5$ А; скорость восстановления диэлектрической прочности $dU_{0}/dt=30$ кВ/мкс; $di/dt=50$ А/мкс; длина кабеля $l_k=100$ м; емкость на шинах $C_{ш}=0.1$ мкФ; мощность электродвигателя $P_{дв}=250$ кВт; начало отключения $t_{откл}=0.1$ мкс

б) Параметры те же, только $t_{откл}=0.092$ мкс и в процессе отключения высокочастотного тока отключения.

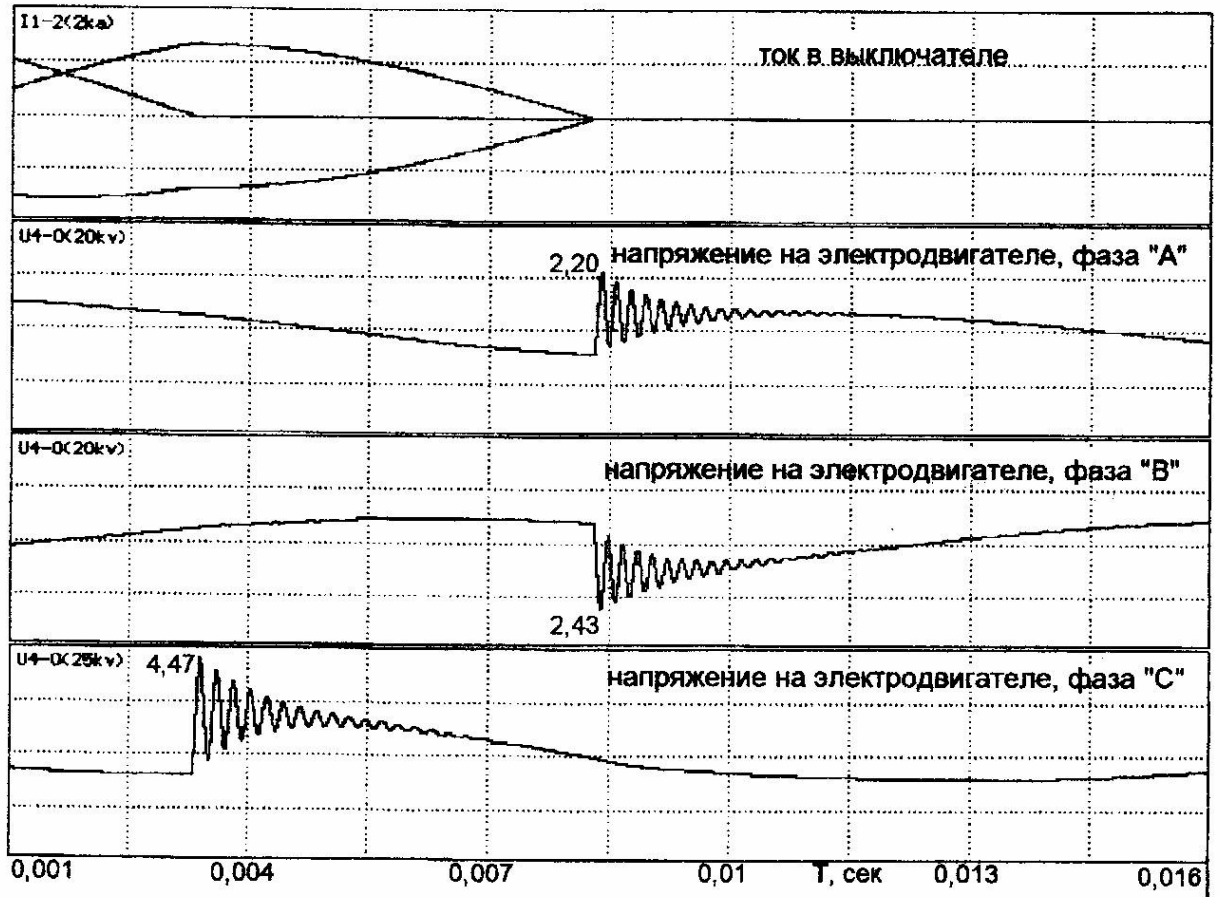


Рис. 3.29. Отключение электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт в режиме асинхронного хода.

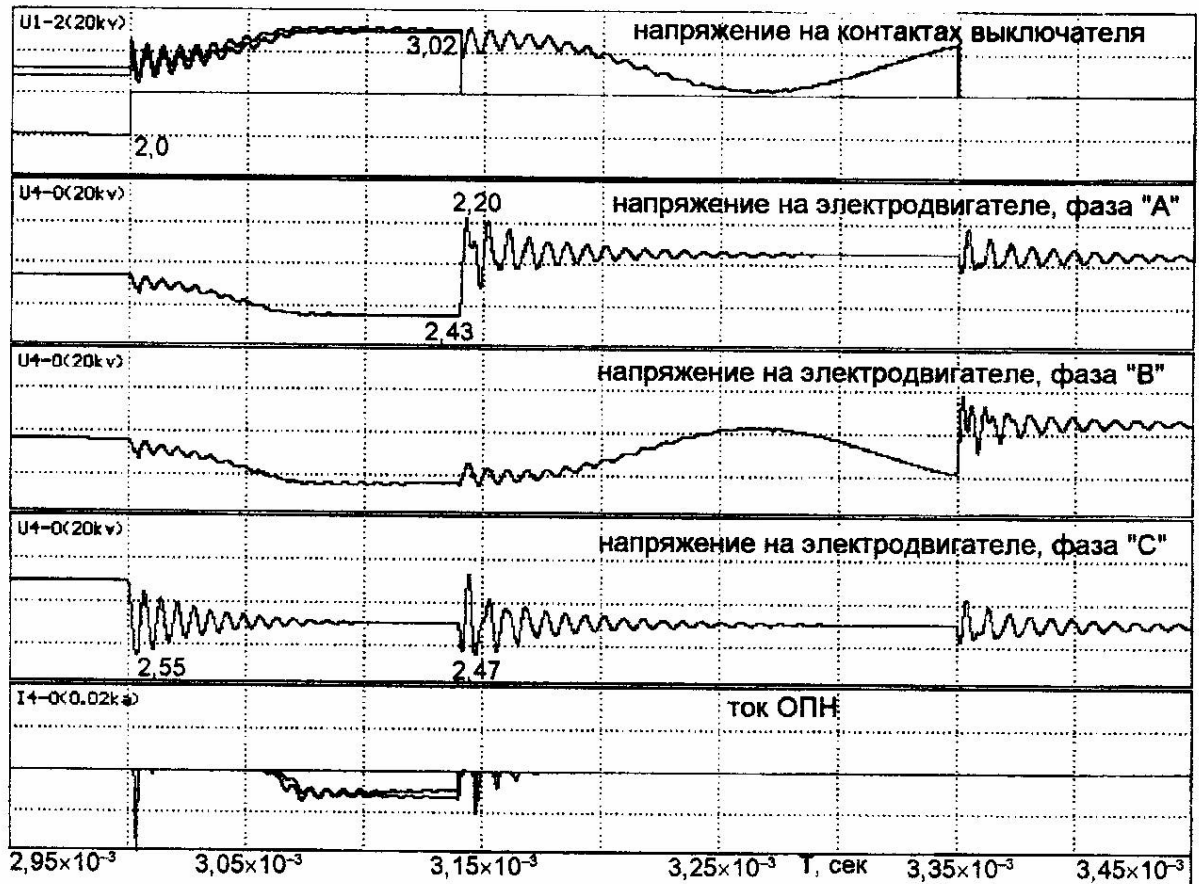


Рис. 3.32. Самозапуск электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт с ОПН у зажимов электродвигателя: $U_{ост}=14,6$ кВ (2,84 о.е.); $I_{ост}=0,3$ кА.

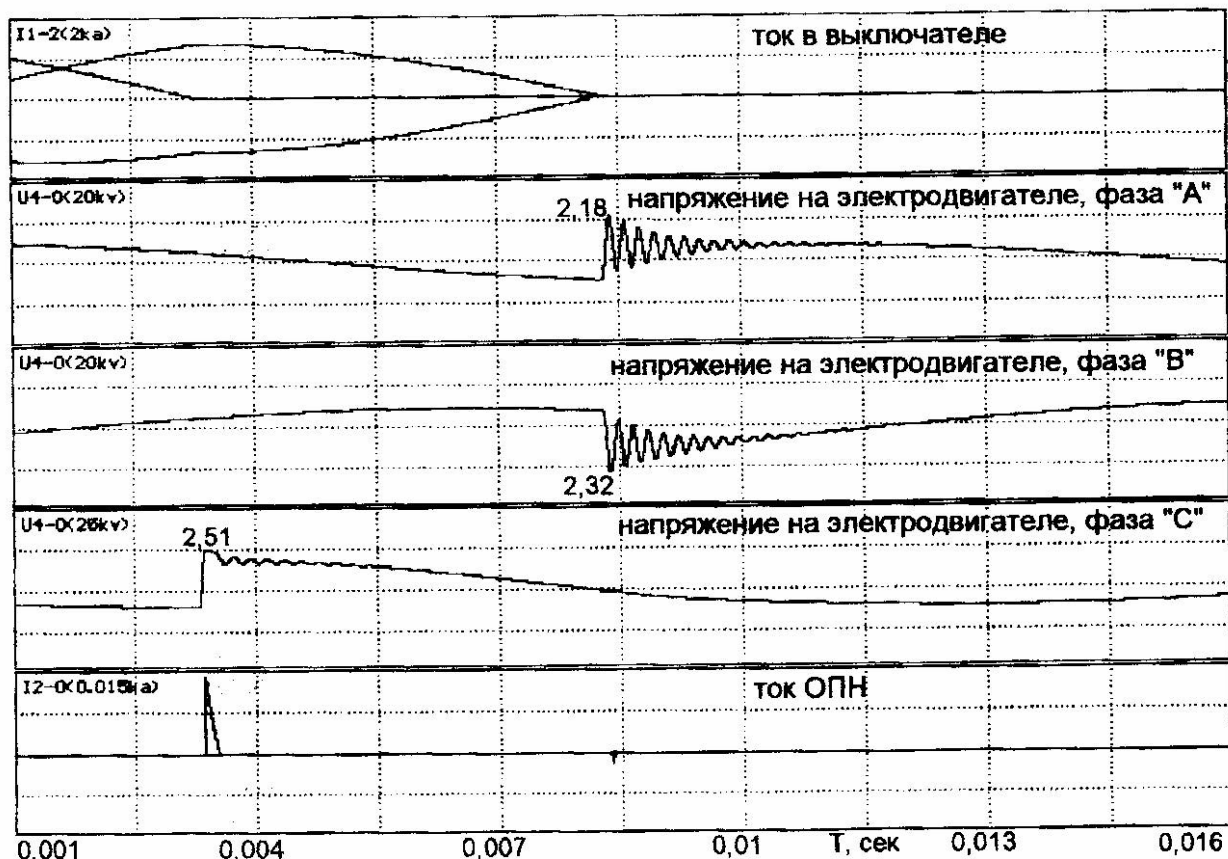


Рис. 3.30. Отключение электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт в режиме асинхронного хода с ОПН в ячейке выключателя: $U_{ост}=14,6$ кВ (2,84 о.е.); $I_{ост}=0,3$ кА.

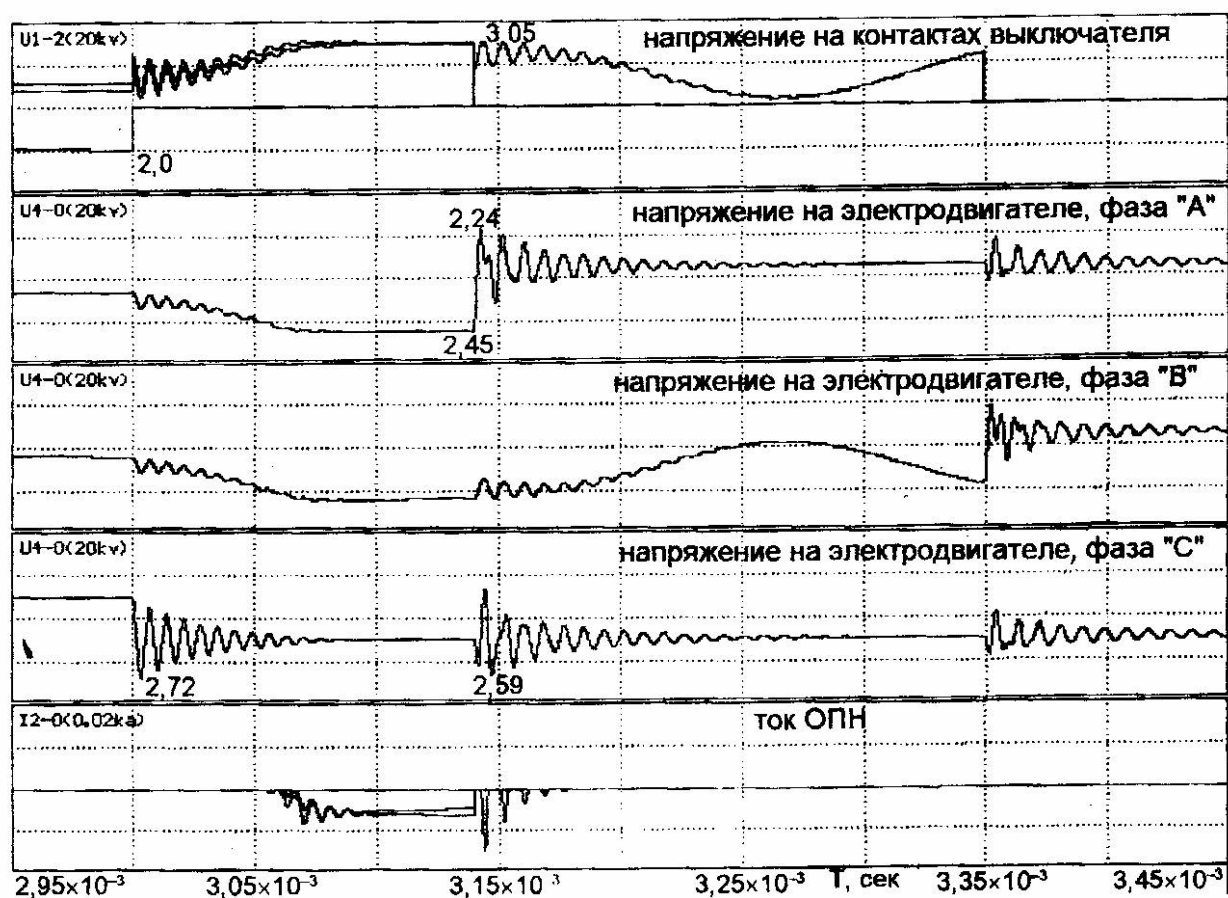


Рис. 3.31. Самозапуск электродвигателя 6 кВ мощностью 630 кВт с ОПН в ячейке выключателя: $U_{ост}=14,6$ кВ (2,84 о.е.); $I_{ост}=0,3$ кА.