

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ешин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в сети электроснабжения произвольной структуры // Вестн. КузГТУ. – 2001. – № 1. – С. 77–81.
2. Ешин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. – 247 с.
3. Негадаев В.А. Модель магистральной структуры электроснабжения для исследования режимов работы совокупности асинхронных двигателей // Вестн. КузГТУ. – 2009. – № 1. – С. 36–43.
4. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Поступила 26.08.2012 г.

УДК 621.3.064;621.316.94

ОГРАНИЧЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИЯХ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

А.Г. Гарганеев, Н.А. Михневич*, Д.В. Нестеров**, А.В. Федоров*

Томский политехнический университет

*Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики, г. Томск

**ООО «Электромашина», г. Кемерово

E-mail: garganeev@rambler.ru; fedorov.06@mail.ru*; ndv74@rambler.ru**

Представлен анализ коммутационных перенапряжений, изложена физика явлений при коммутации трансформаторов и электродвигателей с помощью вакуумных выключателей. Представлены результаты моделирования режимов коммутации, расчетов и выбора защитных цепей для шахтного высоковольтного трансформатора мощностью 1 МВт.

Ключевые слова:

Трансформатор, коммутация, перенапряжение, ограничитель, импульс, вакуумный выключатель.

Key words:

Transformer, switching, overvoltage, limiter, pulse, vacuum circuit breaker.

Надежность работы шахтного электрооборудования обеспечивается в первую очередь прочностью электрической изоляции, находящейся в условиях агрессивной среды, высокой влажности, запыленности и механических воздействий. Ввиду жестких требований, предъявляемых к габаритам шахтного электрооборудования, его изоляция, как правило, не способна выдерживать перенапряжения при их многократных повторениях [1].

Перенапряжения, возникающие на клеммах трансформаторов и электрических машин при коммутации их обмоток, могут достигать больших величин, что приводит не только к выходу из строя дорогостоящего оборудования, но и к возможному появлению потенциала на его корпусе, представляющего большую опасность для человека.

Для защиты от коммутационных перенапряжений шахтных кабельных сетей, трансформаторов и электрических машин применяются нелинейные ограничители напряжений, RC -цепи, разрядники, или их комбинации [1–3].

Согласно первому закону коммутации, ток i в отключаемой индуктивной цепи непосредственно после коммутации остается неизменным. Согласно закону электромагнитной индукции для поддержания тока i в индуктивной цепи с индуктивностью L на размыкаемых контактах создается разность потенциалов (ЭДС) $E = -L(di/dt)$ и ЭДС тем больше, чем меньше время коммутации dt . Отсюда следует, что даже при малых значениях тока,

например, холостого хода мощных трансформаторов с большой индуктивностью обмоток, при коммутациях на клеммах могут возникать опасные перенапряжения.

Основная «физика» явлений, возникающих при коммутациях нагрузок индуктивного характера — электродвигателей и трансформаторов, в принципе, одинакова [2, 4]. Особенности этих явлений заключаются в различиях параметров и режимов, а также связаны с конструкцией и принципом действия коммутатора. Так, в случае отключения трансформатора анализ переходного процесса усложняется переходом волны из обмотки в обмотку через емкостную связь между ними. При этом на характер переходных процессов влияют также собственные емкости обмоток относительно «земли», а также межвитковые емкости. При большой скорости спада тока i перенапряжения несколько ограничиваются входной емкостью C обмотки. Освобождаемая при этом магнитная энергия контура переходит в электрическую энергию конденсатора C , а коэффициент перенапряжения K можно приблизительно оценить по выражению [1]

$$K = i \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

При отключении шахтных трансформаторов перенапряжения могут достигать десятикратных значений, так как входные емкости у них на 1–2 порядка ниже, чем у трансформаторов класса

110–750 кВ. Следует также отметить, что это положение справедливо лишь для случая минимальной емкости коммутируемого участка, т. е. отключения трансформатора, расположенного непосредственно около выключателя.

Коммутация электрооборудования включает в себя процессы включения и отключения. Необходимо отметить, что в процессе включения коммутация фаз происходит не одновременно. Перед замыканием контактов возникает пробой уменьшающихся между ними промежутков. Очередность включения контактов зависит от конструкции выключателя и его настройки. Таким образом, характеристика неодновременности включения полюсов выключателя имеет две составляющие – постоянную и случайного характера. В момент замыкания первого контакта на электродвигатель или трансформатор падает волна напряжения, фронт которой нарастает приблизительно по экспоненте [3, 5]. В результате падения волны на обмотку и отражения ее от стыка «кабель–обмотка» на первой включенной фазе появляются максимальные перенапряжения. Перенапряжения на двух других фазах представляют собой свободные колебания «около» напряжения промышленной частоты. Частота этих колебаний зависит от контура «кабель–нагрузка».

При отключении электропотребителя первым контактом эквивалентные емкость C_3 и индуктивность L_3 соответственно равны [1–3]:

$$C_3 = 2/3(C_1 + 3C_0); L_3 = 1,5L_\phi;$$

при отключении вторым и третьим контактами выключателя

$$C_3 = 0,5(C_1 + 3C_0); L_3 = 2L_\phi,$$

где C_0 – емкость фазы системы «кабель–нагрузка» относительно земли; C_1 – междуфазная емкость кабеля; L_ϕ – индуктивность фазы нагрузки.

Изменение параметров электродвигателя существенно влияет на уровень коммутационных перенапряжений. Максимального уровня перенапряжений следует ожидать при отключении заторможенных или «неразогнанных» электродвигателей. После погасания дуги начинается обмен энергией, заключенной в емкости кабеля, входной емкости нагрузки и индуктивности нагрузки, что приводит к появлению затухающих колебаний с начальной

амплитудой $\sqrt{U_0^2 + i_0^2 \frac{L}{C}}$ [1–3].

Как правило, для коммутации шахтного электрооборудования в настоящее время применяются вакуумные выключатели. Отключение вакуумного выключателя характеризуется, *во-первых*, разбросом времени коммутации отдельных фаз (1...3 мс), а *во-вторых*, многократными зажиганиями дуги в вакуумной камере. Для вакуумных выключателей характерно чрезвычайно быстрое восстановление электрической прочности межконтактного промежутка после отключения тока, что ведет к высокой отключающей способности и к способности прерывать высокочастотные токи до сотен килогерц.

Как было отмечено ранее, физическая суть перенапряжений при срезе тока сводится к переходу электромагнитной энергии, запасенной в индуктивности, в электростатическую, связанную с напряжением на емкости отключаемой части сети. Перенапряжения при срезе тока редко превосходят значений (2...3) U_ϕ (U_ϕ – фазное напряжение) при отключениях электродвигателей, поскольку обычно достаточно велики емкости кабелей и малы индуктивности. Однако при отключении ненагруженных трансформаторов, да и еще при малых емкостях коротких кабелей и шин, перенапряжения при срезах могут быть значительны. Значительно более тяжелые воздействия на изоляцию, чем срезы тока, могут вызвать многократные повторные зажигания дуги в вакуумном выключателе. В процессе многократных повторных зажиганий межконтактная прочность выключателя возрастает. Одновременно растут напряжения повторных зажиганий, амплитуда токов высокочастотных колебаний, а также перенапряжения на отключаемой обмотке («эскалация напряжений»). Многократные повторные зажигания создают серию импульсов перенапряжений с крутыми фронтами, которые воздействуют на витковую изоляцию обмоток [2, 3].

При отключении электродвигателей есть различия в зависимости от того, вращается он с номинальной скоростью или заторможен. Отключение вращающегося двигателя (на холостом ходу или с номинальной нагрузкой) дает обычно умеренные перенапряжения, поскольку магнитная энергия поля исчезает не сразу, а расходуется на нагрев обмотки ротора. Перенапряжения возникают за счет небольших энергий полей рассеяния статора.

К существенно большим перенапряжениям приводит отключение практически неподвижного двигателя. В особо неблагоприятных условиях перенапряжения могут превышать значения $7U_\phi$ при мощности двигателей 100–200 кВт вакуумными выключателями с короткими кабелями. Подобные явления присутствуют и при коммутациях трансформаторов, если они нагружены. При холостом ходе, как было отмечено ранее, уровень перенапряжений может быть в несколько раз выше, чем у электродвигателей.

Иногда при включении вакуумных выключателей наблюдается отскок (дребезг) контактов, что сопровождается перенапряжениями. Природа этих перенапряжений такая же, как и при отключении, но воздействия на изоляцию менее жесткие.

Особенности включения трансформатора на сетевое напряжение связаны, прежде всего, с реальной кривой намагничивания сердечника, вследствие чего возможны режимы его насыщения, и, как следствие, кратное увеличение тока намагничивания. Затухание свободного тока вызывается рассеянием или поглощением энергии магнитного поля свободного потока не только в активном сопротивлении обмотки, но и в стали сердечника вследствие потерь на вихревые токи. Это приводит

к уменьшению времени затухания этого тока. Для мощных трансформаторов характерны низкие значения сопротивления обмоток, поэтому основным демпфирующим фактором в них являются «стальные» потери. Время установления тока холостого хода может составлять несколько секунд. С точки зрения возникновения перенапряжений отключение непосредственно после включения трансформатора (пока не установился ток холостого хода) является неблагоприятным режимом. С одной стороны, при насыщаемом сердечнике индуктивность обмотки уменьшается, однако, с другой стороны, сильно возрастающий в амплитуде ток, входящий в выражение магнитной энергии в квадрате, кратно ее увеличивает. Таким образом, подобная коммутация способна привести к пробоям изоляции обмотки трансформатора.

Наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений при отключении индуктивных нагрузок вакуумными выключателями, является RC -цепь в сочетании с нелинейным ограничителем напряжения. В принципе, можно обойтись и без ограничителя напряжений, однако в этом случае RC -цепь получается громоздкой ввиду необходимости поглощения в единицу времени большой энергии, кроме того, она загружает дополнительным емкостным током питающую сеть. В случае совместного использования RC -цепей с нелинейным ограничителем напряжения первый фронт импульса принимает на себя RC -цепь, а затем вступает в работу ограничитель, разгружая ее по мощности. Отметим некоторые полезные свойства RC -цепи, которая при отключении:

- уменьшает амплитуду перенапряжений при срезе тока, так как увеличивает емкость отключаемой нагрузки. При этом снижается также амплитуда восстанавливающегося после среза тока напряжения;
- демпфирует высокочастотные колебания при повторных зажиганиях и в меньшей степени колебания после срезов тока;
- снижает частоту колебаний после среза токов, т. е. уменьшает частоту восстанавливающегося напряжения, чем снижает возможность повторных зажиганиях;
- сдвигает нуль тока высокочастотных колебаний относительно максимума напряжения, поэтому в момент гашения при нуле тока напряжение на емкости ниже максимального. Это снижает восстанавливающееся напряжение и возможность повторных зажиганиях;
- снижает крутизну фронта перенапряжений при повторных зажиганиях вследствие снижения частоты колебаний из-за увеличения емкости. Это облегчает воздействие на продольную изоляцию.

Вместе с тем демпфирующие RC -цепи имеют определенные недостатки:

- емкость RC -цепи увеличивает общий емкостной ток замыкания на землю в сети. Так как емкость цепочки в несколько раз должна пре-

вышать емкость на землю защищаемого присоединения, то при большом числе таких присоединений возможно резкое увеличение тока замыкания на землю и связанная с этим необходимость в ряде случаев установки дугогасящих устройств, усложняющих режимы и эксплуатацию сети;

- трудности размещения защитной цепочки вблизи выводов электроустановки, особенно на действующих объектах [5–7].

При использовании демпфирующей RC -цепочки обусловленное ею затухание колебаний имеет максимум при определенном значении R , поскольку при $R=0$ и $R=\infty$ затухание отсутствует. Для определения оптимальных параметров RC -цепи достаточно рассмотреть один неблагоприятный цикл «срез тока–повторное зажигание», такой, в котором имеются условия, способствующие образованию наибольших перенапряжений. Срез тока происходит вблизи максимума напряжения источника, последующее повторное зажигание дуги — на максимуме напряжения на контактах. Изменяя при определенном C сопротивление R демпфирующей цепочки, можно найти значение R , соответствующее минимальным перенапряжениям. При этом в цепи создается режим наибольшего демпфирования колебаний, вызванных однократным повторным зажиганием. В таком режиме и в серии повторных зажиганиях минимальными будут как сами перенапряжения, так и последующее восстанавливающееся после каждого погасания дуги напряжение, что, в свою очередь, затрудняет повторное зажигание. Однако существуют и другие условия выбора элементов демпфирующей цепи, например, конструктивного характера, наличие стандартного «ряда» сопротивлений и емкостей, а также дополнительное использование ограничителей напряжения.

Вышеизложенные соображения были приняты во внимание при расчете защитной RC -цепи в совокупности с нелинейным ограничителем напряжения для трансформатора мощностью 1 МВт при соединении первичной обмотки звездой и при наилучшей возможной нагрузке, в качестве которой может выступать «неразвернувшийся» асинхронный электродвигатель соответствующей мощности (750 кВт). Для проведения моделирования в пакетах прикладных программ *Matlab Simulink* и *Multi-sim 10* были проведены предварительные расчеты:

- элементов Т-образной схемы замещения трансформатора [4];
- элементов Г-образной схемы замещения асинхронного электродвигателя [4];
- статической характеристики нелинейного ограничителя напряжения при аппроксимации трех ломаными линиями;
- эквивалентных емкостей трансформатора (первичной обмотки, вторичной обмотки, межобмоточной) и электродвигателя (статорной).

Расчетная схема моделирования представлена на рис. 1.

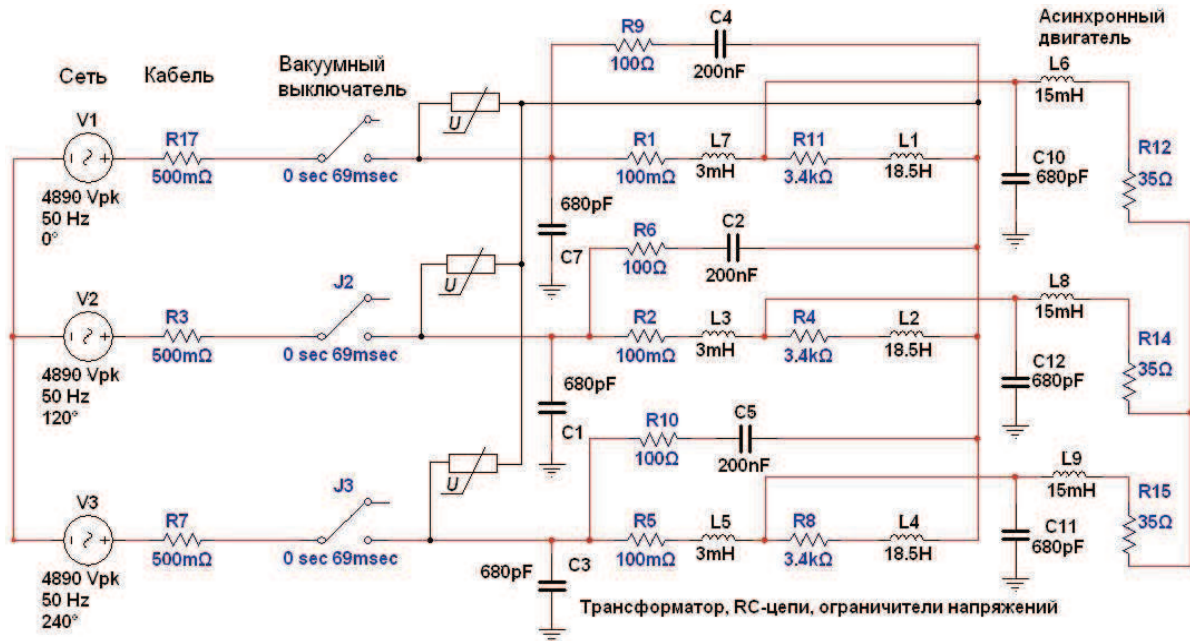


Рис. 1. Схема моделирования процессов коммутации трансформатора в Multisim 10

В представленной схеме оставлены емкости, оказывающие наибольшее влияние на характер перенапряжений. Параметры электродвигателя пересчитывались из каталожных данных. В Т-образной схеме замещения трансформатора использовано последовательное соединение индуктивности намагничивающего контура и активного сопротивления, характеризующего потери в стали сердечника. Эти параметры изначально рассчитывались для параллельного соединения исходя из опыта холостого хода и короткого замыкания, а затем пересчитывались при постоянстве коэффициента мощности для последовательного соединения.

Последовательное соединение этих компонентов более «физично», поскольку позволяет более корректно оценить процесс включения трансформатора в сеть с точки зрения «успокоения» тока. Параллельное соединение при энергетической эквивалентности обладает практически нулевыми демпфирующими свойствами в момент включения. Ток холостого хода при моделировании практически не успокаивается, что не соответствует действительности. В момент выключения параллельная схема с «потерями в стали» существенно снижает перенапряжения, что также не соответствует действительности, поскольку с физической точки зрения непосредственно в момент коммутации, перемагничивания, а, следовательно, потерь на гистерезис нет. С учетом того, что в трансформаторе присутствует емкость обмотки, которая не ограничивает импульсный ток в момент коммутации в контуре, в данной работе для оценки перенапряжений была принята именно последовательная схема. Индуктивность рассеяния L_σ трансформатора оценивалась по выражению:

$$L_\sigma = \frac{U_{кз} \% U_{ном}}{100 I_{ном} \omega},$$

а величина сопротивления потерь в стали R_0 при массе сердечника m_{cm} и удельных потерях $p_{1,5/50}$ при индукции 1,5 Тл, частоте 50 Гц проверялись выражением:

$$R_0 = \frac{(1,5 U_{ф.ном})^2}{P_{1,5/50} m_{cm}}.$$

Энергия, выделяемая на резисторе RC-цепи, оценивалась интегралом

$$W_R = \int_0^t u_R(t) i_R(t) dt$$

при графическом интегрировании осциллограмм и составила для выключения трансформатора, нагруженного на «неразвернувшийся» электродвигатель, 185 Дж при времени 1 мс.

В случае отключения трансформатора на холостом ходу выделяемая энергия на резисторе на порядок меньше (при меньших габаритах резистора), а его мощность составляет величину около 5 Вт.

Поскольку гасить выделяемую при коммутации энергию целесообразно непосредственно в источнике ее накопления, т. е. на «фазах» трансформатора, а средняя точка «звезды» не заземлена, то RC-цепи, которые, как и ограничитель напряжения нельзя присоединять к «земле», необходимо присоединять к искусственно организованной «технологической» средней точке первичной обмотки. Поскольку среднее значение тока коммутации весьма невелико, искусственный нулевой провод может быть небольшого сечения.

Наибольшее перенапряжение возникает в момент достижения фазным током максимального значения, поскольку этот момент времени характеризуется максимальной запасенной в обмотках энергией. Фаза тока относительно фазного напряжения может меняться в зависимости от режима работы цепи (от холостого хода до максимальной мощности).

При моделировании также варьировалось время выключения отдельных фаз относительно друг друга (2...3 мс), что присуще вакуумному выключателю. Ввиду большого числа сочетаний вычислительных экспериментов RC -цепи были выбраны на наихудший режим коммутации.

На рис. 2–4 представлены осциллограммы отключения трансформатора в различных режимах. На холостом ходу (рис. 2, а) коммутация трансформатора может привести к перенапряжениям порядка 70...80 кВ. Наличие высокочастотных колебаний определяется параметрами схемы замещения. В реальном трансформаторе может наблюдаться большее затухание, поскольку активное сопротивление «стальных» потерь зависит не только от на-

пряжения, но и от частоты. Использование RC -цепи, рассчитанной на самый тяжелый режим коммутации трансформатора с «неразвернувшимся» электродвигателем, снимает перенапряжение (рис. 3, б).

В случае коммутации трансформатора без RC -цепей с «неразвернувшимся» электродвигателем, перенапряжения могут достигать значений более 100 кВ (рис. 3, а). RC -цепи (100 Ом, 200 нФ) снимают перенапряжения на уровне 32 кВ (рис. 3, б). При этом на резисторе RC -цепи выделяется большая мощность (рис. 4, а). Применение ограничителя напряжений разгружает RC -цепи по мощности, ограничивая перенапряжения до заданного уровня (рис. 4, б, в).

В зависимости от мощности трансформатора, типа нагрузки, его конструктивного исполнения параметры RC -цепей, строго говоря, будут различными. Однако, с точки зрения унификации и в условиях небольшой номенклатуры высоковольтных резисторов и конденсаторов, для мощностей трансформаторов 250 кВт – 1 МВт есть смысл выполнять защитные цепи одинаковыми.

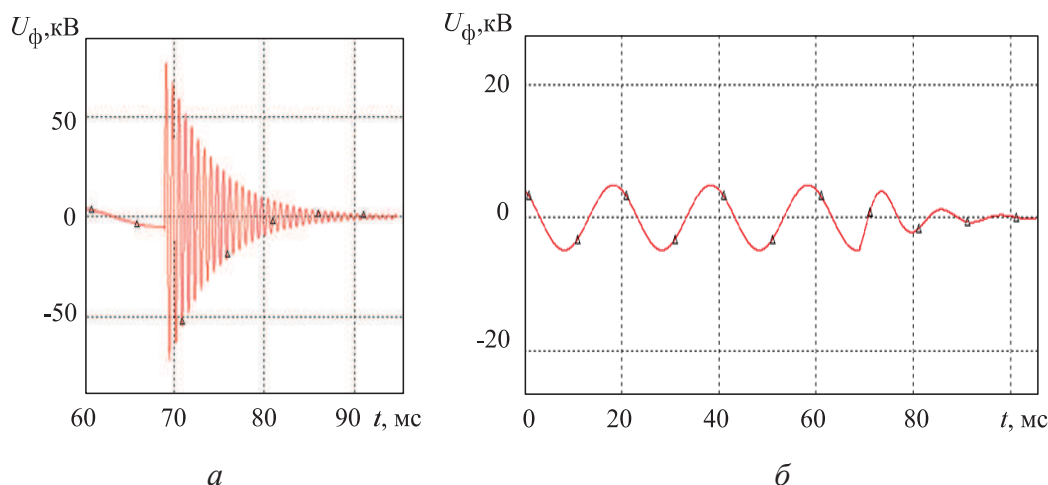


Рис. 2. Фазное напряжение при отключении трансформатора на холостом ходу: а) без RC -цепей; б) с RC -цепями

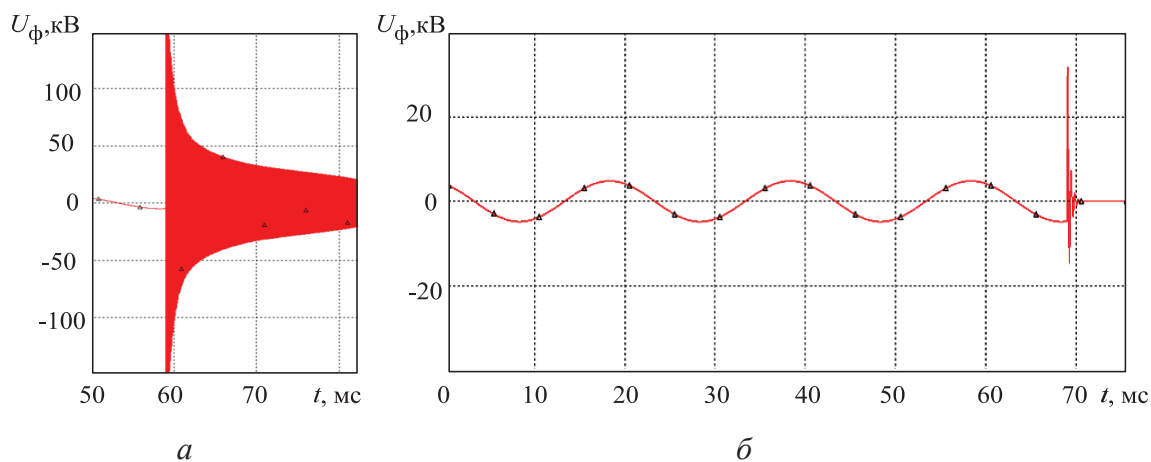


Рис. 3. Фазное напряжение (относительно средней точки «звезды» трансформатора) при отключении трансформатора, нагруженного на «неразвернувшийся» электродвигатель: а) без RC -цепей; б) с RC -цепями

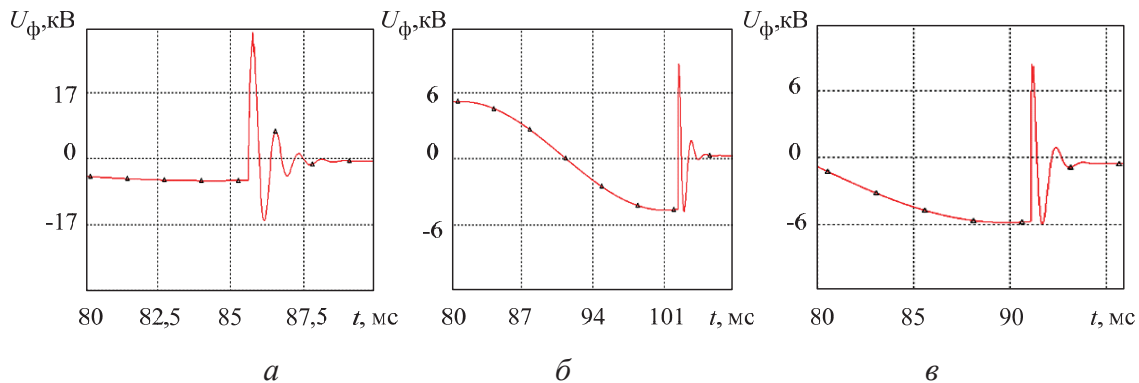


Рис. 4. Отключение трансформатора, нагруженного на «неразвернувшийся» электродвигатель. Напряжение: а) на резисторе RC-цепи; б) фазное с RC-цепями и ограничителем напряжения; в) на резисторе RC-цепи с ограничителем напряжения

Выводы

Коммутация шахтных трансформаторов и электродвигателей с помощью вакуумных выключателей представляет собой потенциальную опасность в части нарушения целостности изоляции их обмоток. Проведенный анализ устранения коммутационных перенапряжений выявил эффективность применения RC-цепей в сочетании с ограничителями напря-

жений для сетей с изолированной нейтралью в диапазоне нагрузок трансформатора от режима холостого хода до режима пуска асинхронного электродвигателя. Данные расчетов и моделирования показали хорошее совпадение с экспериментом на реальном шахтном трансформаторе мощностью 1 МВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 1G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мнухин А.Г., Коневский Б.И. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений. – М.: Недра, 1987. – 143 с.
2. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Лаптев О.И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 343 с.
3. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхерд А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 368 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
5. Базуткин В.В., Евдокунин Г.А., Халилов Ф.Х. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутации индуктивных цепей вакуумными выключателями // Электричество. – 1994. – № 2. – С. 9–13.
6. Рывкин А.М., Лукацкая И.А., Буйнов А.Л. и др. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой // Электрические станции. – 1990. – № 5. – С. 62–67.
7. Беляков Н.Н. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями // Электрические станции. – 1994. – № 9. – С. 65–71.

Поступила 15.03.2012 г.