

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.316:176.681.3

Демин Юрий Ильич, Киркоров Олег Робертович

ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6–10 КВ С ТИРИСТОРНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

В статье рассмотрены условия и алгоритмы применения тиристорных выключателей для повышения надежности работы систем электроснабжения 6–10 кВ (СЭС) в аварийных режимах: при перерывах питания и коротких замыканиях (КЗ). Определены наиболее перспективные схемы включения тиристорных выключателей в состав одно- и двухсекционной СЭС. Это бесконтактное распределительное устройство (БРУ), тиристорный короткозамыкатель (ТОУ) и тиристорный автоматический ввод резерва (АВР). Приведены результаты элементов численного эксперимента, полученного с помощью программы САПР – СЭС для ЭВМ, разработанной в СКФУ. Сделаны выводы о допустимости применения тиристорных выключателей для повышения надежности электроснабжения в нормальных и аварийных режимах.

Ключевые слова: тиристорный короткозамыкатель и АВР, бесконтактное распределительное устройство, система электроснабжения.

Yuri Dyomin, Oleg Kirkorov

RESEARCH EMERGENCY TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS 6 – 10 KV WITH THE THYRISTOR SWITCHES

The conditions and the algorithms of thyristor switches to improve the reliability of power supply system 6 – 10 kV (SES) in emergency conditions: when power interruptions and short circuits (a short circuit). The most promising circuit for the thyristor switches in the composition of one – and two-piece SES. It is non-contact switchgear (BRU), thyristor shorting (TOU) and thyristor automatic transfer switch (ATS). The results of the elements of the numerical experiment, obtained with CAD program – SES computer, developed at the NCFU. Conclusions about the permissibility of the use of thyristor switches to improve the reliability of power supply in normal and emergency modes.

Key words: thyristor shorting and ATS, contactless switchgear, power supply system.

В настоящее время большинство СЭС, в первую очередь в России, оснащены выключателями, имеющими ряд существенных недостатков: необходимость достаточно сложного обслуживания, большие промежутки коммутаций, значительные коммутационные перенапряжения и т. п. Вынужденное разделение СЭС при КЗ на части приводит к резкому ухудшению параметров качества электроэнергии, увеличению потерь в сетях, не позволяет обеспечивать пуски и самозапуски двигателей основных технологий, усложняет построение сетей за счет установки в них реакторов, увеличения мощности устройств коммутации и т. п. Электроприемники СЭС, как правило, нуждаются в регулировании мощности в нормальных и пусковых режимах. Кратковременные перерывы электроснабжения (даже не более 0,2 сек) приводят к расстройству технологических процессов и большому экономическому ущербу. Многие из вышеперечисленных проблем можно решить с помощью применения в СЭС тиристорных выключателей (ТВ), обеспечивающих возможность бестоковой коммутации, синхронного управления, токоограничения и регулирования мощности [1]. Наиболее перспективные исследования в области разработки и применения ТВ получены в Институте энергетической

электроники СПБ (ИЭЭ) [1]: бесконтактное распредустройство (БРУ), в котором все традиционные выключатели заменены ТВ; тиристорный короткозамыкатель (ТОУ), осуществляющий режимы токоограничения в цикле искусственного КЗ по специальному алгоритму с помощью ТВ [1]; тиристорный автоматический ввод резерва (ТАВР), осуществляющий подпитку места КЗ до его отключения ТВ (либо при потере питания одной секции) и ввода резерва, работающим параллельно межсекционному выключателю ТВ [1].

ТВ в СЭС в основном не допускают применения существующих методик расчета процессов при проектировании и эксплуатации таких систем, поэтому необходимо проводить исследования математических моделей, реализованных на ЭВМ. Ввиду актуальности включения названных устройств в СЭС рассмотрим алгоритмы и порядок их функционирования на основе исследований, которые осуществлены с помощью программы САПР – СЭС, разработанной в СКФУ и СПбПУ Петра Великого [2]. Представленный материал базируется на основных положениях, математической модели и программы САПР – СЭС, поэтому дан с учетом принятой там терминологии, математических объектов и расчетных схем [2].

1. БРУ. СЭС с ТВ имеет две модификации БРУ [3]: с общим блоком принудительной коммутации и без него. Наиболее простым и надежным является вариант, полученный при отказе от блока искусственной коммутации (рис. 1). Данная схема позволяет решить многие вопросы технологического характера в нормальных режимах, а также достаточно быстро ликвидировать КЗ в цикле естественной коммутации. Таким образом, проводим исследования БРУ без блока искусственной коммутации при ликвидации КЗ за счет применения различных способов его управления.

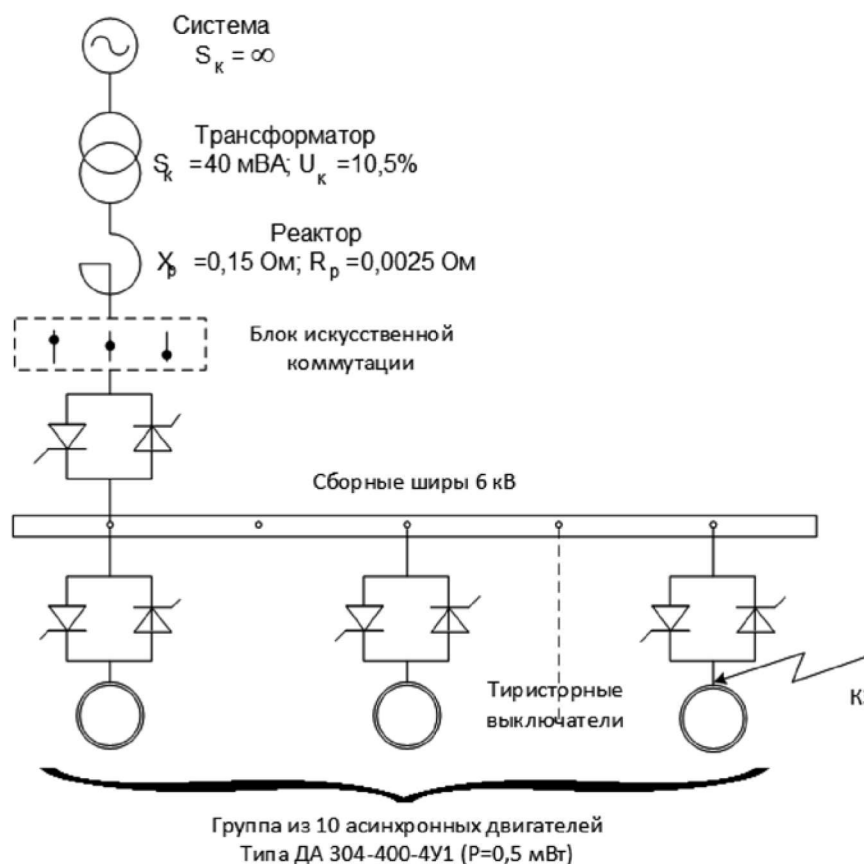


Рис. 1. Исходная схема СЭС с БРУ

Исследуемая СЭС с БРУ (рис. 1) используется для электроприемников с частыми коммутациями и требует регулирования электрических параметров. Такими электроприемниками являются часто коммутируемые асинхронные двигатели (АД) [4], в частности электродвигатели дробилок обогатительных фабрик. Коммутация указанных АД требует обеспечения «мягкого» подключения к питающим сетям.

Исследовались системные и параметрические режимы БРУ. В зависимости от места подключения источника питания подлежат исследованию три вида управления БРУ (рис. 1) при аварии: 1) блокируются ИУ ТВ фидера с КЗ; 2) блокируются ИУ системного ТВ, а в цикле АПВ сборные шины (СШ) – отключается ТВ фидера с КЗ при срабатывании отсечки релейной защиты. К параметрическим можно отнести способы, при которых ИУ подаются на ТВ единообразно как в нормальном, так и в аварийном режимах работы СЭС. Для этих целей использованы методы управления углами зажигания тиристорных ТВ, соизмеримыми с углом нагрузки φ_n . Учитывая технологические колебания φ_n ПС, можно подавать ИУ на ТВ с углом зажигания, имеющим постоянную ширину, равную

$$\beta = \varphi_n + \Delta\varphi; \beta \leq 90; \quad (1)$$

где $\Delta\varphi$ – допуск, учитывающий технологические изменения в нормальном режиме работы СЭС.

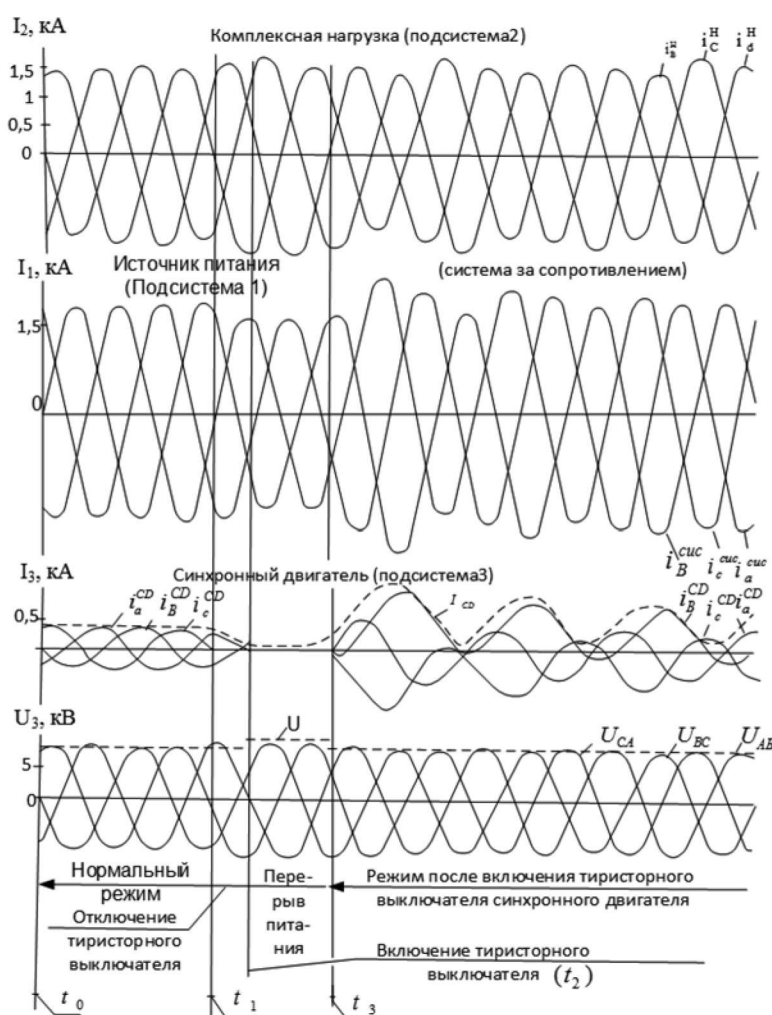


Рис. 2. Процесс, возникающий при кратковременном перерыве питания синхронного двигателя в СЭС с БРУ

Для исследований выбраны АД (СД) с мощностями 1; 0,5; 0,4; 0,25 (2,5) МВт с подключением к СШ по 5–10 штук (кроме фидера с КЗ, к которому подключен один АД. На рис. 2–4 приведены примеры расчетных осциллограмм для режимов потери питания и КЗ в СЭС с БРУ и АД (синхронными двигателями). Расчеты процессов при различных уставках срабатывания устройства управления БРУ в режимах АПВ и блокировки ИУ по току через ТВ показали, что для заданной схемы СЭС (рис. 1) в качестве уставки необходимо выбирать производные токов. Характерной особенностью работы БРУ в режиме регулирования, обнаруженной в процессе численного эксперимента, являются практически идентичные процессы, возникающие при различных способах управления углом β . В нормальных условиях (до КЗ) БРУ устойчиво работает как при постоянном, так и при переменном $\Delta\phi$ (1). Первый случай, для рассмотренной нагрузки, обоснован при углах (5–10)°. Автоматическое регулирование $\Delta\phi$ при соблюдении соотношения (1) – достаточно гибкая система, обеспечивающая надежную работу БРУ в нормальных условиях для широкого диапазона изменения характера нагрузок. Тем не менее при аварии этот способ по степени оперативности локализации КЗ ничем не отличается от случая, при котором угол β постоянен. Для практики можно рекомендовать выбор такой системы регулирования β , которая бы позволяла обеспечивать надёжное функционирование БРУ в нормальных режимах работы. Исследования процессов проводились без учета конкретного способа управления БРУ.

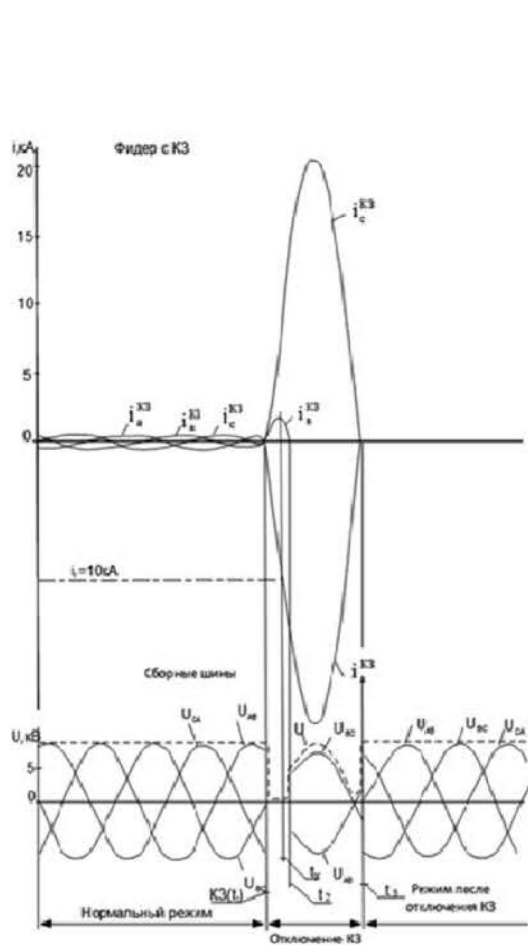


Рис. 3. Процесс отключения трехфазного КЗ в СЭС с БРУ

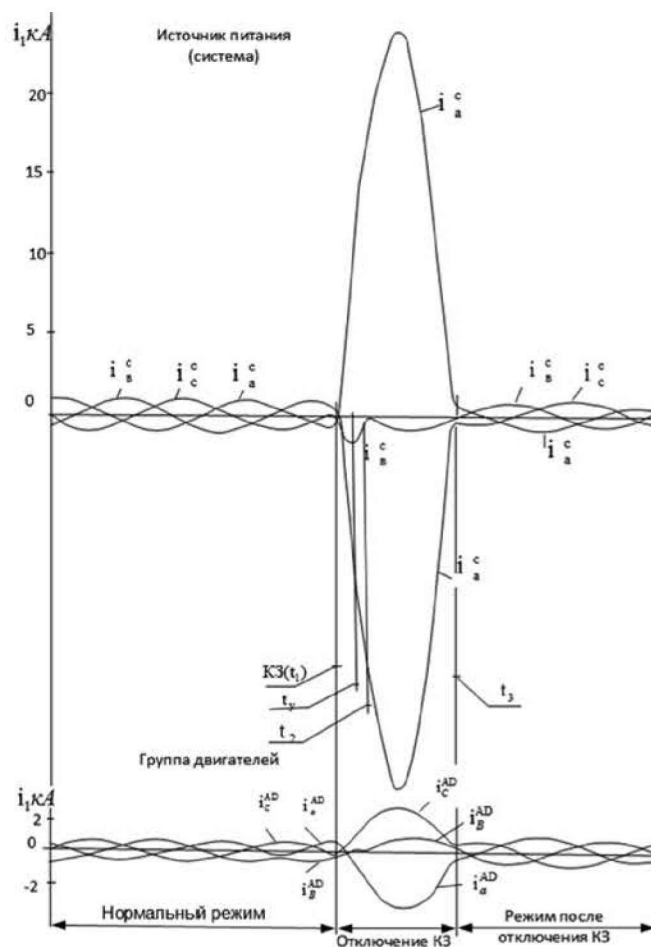


Рис. 4. Процесс отключения трехфазного КЗ в СЭС с БРУ и группой АД

2. ТОУ (рис. 5). Принцип работы ТОУ основывается на сверхбыстром включении ТВ сопротивления в момент возникновения КЗ [1]. Отвод токов КЗ на короткозамыкатель облегчает условия отключения и функционирования коммутационных элементов СЭС. В системах с контактной аппаратурой количество включений ТОУ связано с числом ступеней релейной защиты. Например, в случае одной ступени релейной защиты производится два включения [1]:

- первое, в течение одного-двух периодов промышленной частоты (после обнаружения КЗ), для ограничения ударных токов;
- второе, с задержкой на известный интервал действия релейной защиты фидера с КЗ на время работы привода защищаемого выключателя (для ограничения токов отключения этого аппарата).

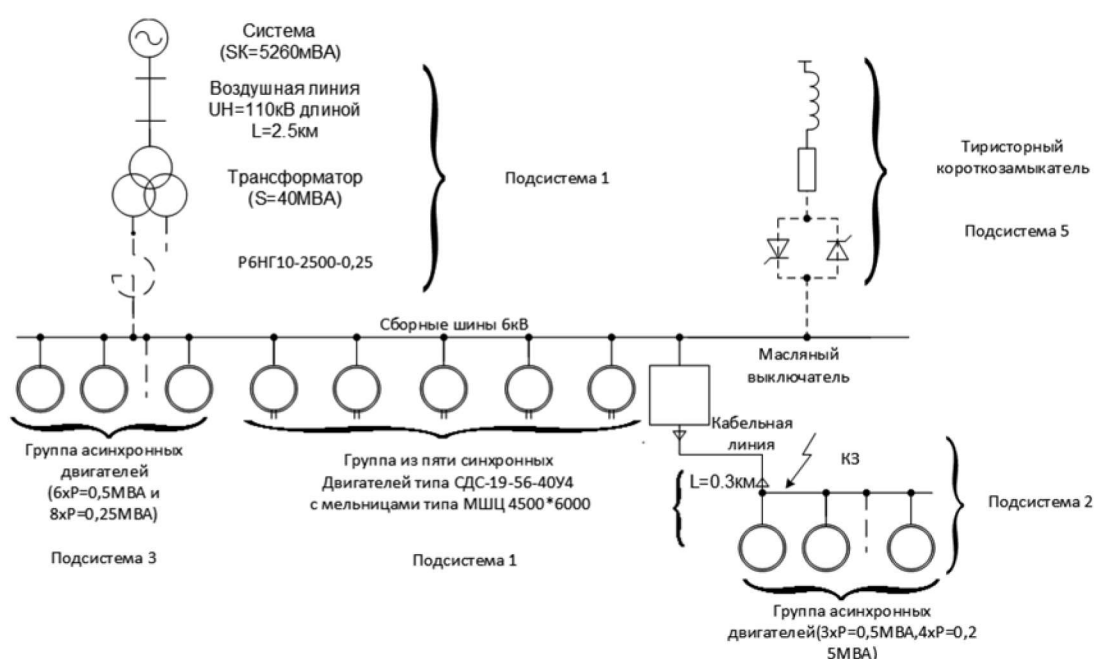


Рис. 5. Расчетная схема реконструируемой СЭС обогатительной фабрики с ТОУ

Исследуем процессы с помощью САПР – СЭС в реконструируемой СЭС обогатительной фабрики комбината «Печенганикель» с ТОУ (рис. 5). Расчетные осциллограммы приведены на рис. 6, 7. В момент времени $t_{кз}$ происходит трехфазное КЗ за сопротивлением кабельной линии. При превышении током системного фидера уставки срабатывания, равной 27 кА, в момент времени t_y производится первое включение ТОУ ($t_{откл} \dots t_{вкл} \dots t_n$), осуществляемое для ограничения ударных токов (рис. 6). При этом ударный ток в выключателе защищаемого фидера не превышает 22,5 кА. Величины периодических составляющих и ударных токов КЗ через контактный выключатель в аналогичных режимах работы СЭС и при отсутствии короткозамыкателя, определенные с помощью САПР – СЭС, соответственно равны 24,5кА; 65,4кА.

Таким образом, при первом включении короткозамыкателя достигается высокая степень (минимум 2,9-кратная степень) токоограничения (рис. 6). В момент времени $t_{откл}$ происходит первое отключение короткозамыкателя. Длительность первого подключения составляла 1,5 периода промышленной частоты. Срабатывание релейной защиты фидера с КЗ происходит в промежутке времени ($t_{отк} \dots t_{вк}$). В момент времени $t_{вк}$ второй раз включается тиристорный короткозамыкатель. Его окончательное отключение происходит в момент t_c , т. е. после локализации КЗ (t_n). Действующий ток

в фидере защищаемого выключателя не превышает допустимой величины и в момент отключения находится в пределах 7 кА. В процессе функционирования через тиристорный выключатель короткозамыкателя отводится ток с амплитудой, равной 24 кА. При втором подключении ТОУ средний коэффициент токоограничения равен 3,5.

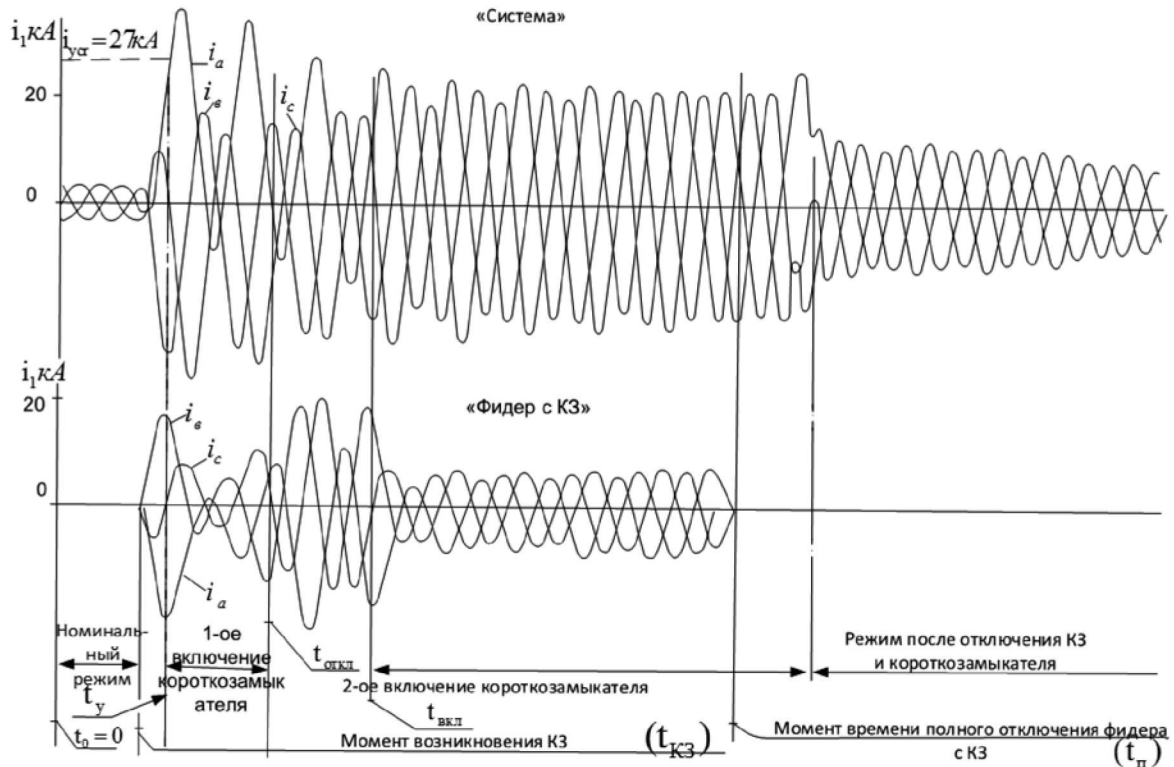


Рис. 6. Процесс, возникающий при отключении КЗ в СЭС с короткозамыкателем

Рассмотрим особенности процессов в синхронных двигателях при КЗ с действием ТОУ (рис. 7). Синхронные двигатели, подключенные на сборные шины, сохраняют устойчивую работу без осуществления разгрузки и гашения поля, т.к. скольжение ротора при рассматриваемой длительности КЗ $\Delta t_{кз} = 0,18$ с не превышает допустимой величины. В процессе КЗ и действия тиристорного короткозамыкателя срабатывает форсировка возбуждения. Кратность форсировки для напряжения возбуждения U_f равна 1,4. Все это способствует подъему уровня остаточного напряжения на сборных шинах СЭС. Максимальные колебания электромагнитного момента двигателей в переходном процессе составляют 22 % от допустимых, вычисленных при наихудших условиях повторного включения. Средний ток несинхронного включения $I_{сд}$ (рис. 7) двигателей не превышает 1,7 от пускового, т. е. величины 20 кА. Это свидетельствует о допустимости самозапуска двигателя.

На первом качании угол $\delta_{сд}$ (рис. 7) двигателей достигает максимальной величины, равной 105° , поэтому после ликвидации аварии они не выпадают из синхронизма. Восстановление питания после отключения КЗ в СЭС сопровождается повышением напряжения сборных шин, обусловленным действием форсировки возбуждения и несинхронным включением двигателей. В дальнейшем процесс затухает. Приведенный анализ подтверждается тем, что величина предельного времени отключения КЗ $t_{пер}$, при котором обеспечивается 100% вероятность самозапуска рассматриваемых синхронных двигателей не превышает $\Delta t_{кз}$. Предельное время рассчитывается по выражению:

$$t_{\text{нр}} = (U_c / M_{\text{мех}}) \cdot \sqrt{M_{\text{м}} \cdot T_j} = 0,236 \text{ с}, \quad (2)$$

где $U_c = 1,05$; $M_{\text{мех}} = 1$ – соответственно напряжение системы и момент сопротивления на валу двигателей (номинальный), в о. е.; $T_j = 2000$ рад; $M_{\text{м}} = 2,5$ – параметры синхронного двигателя.

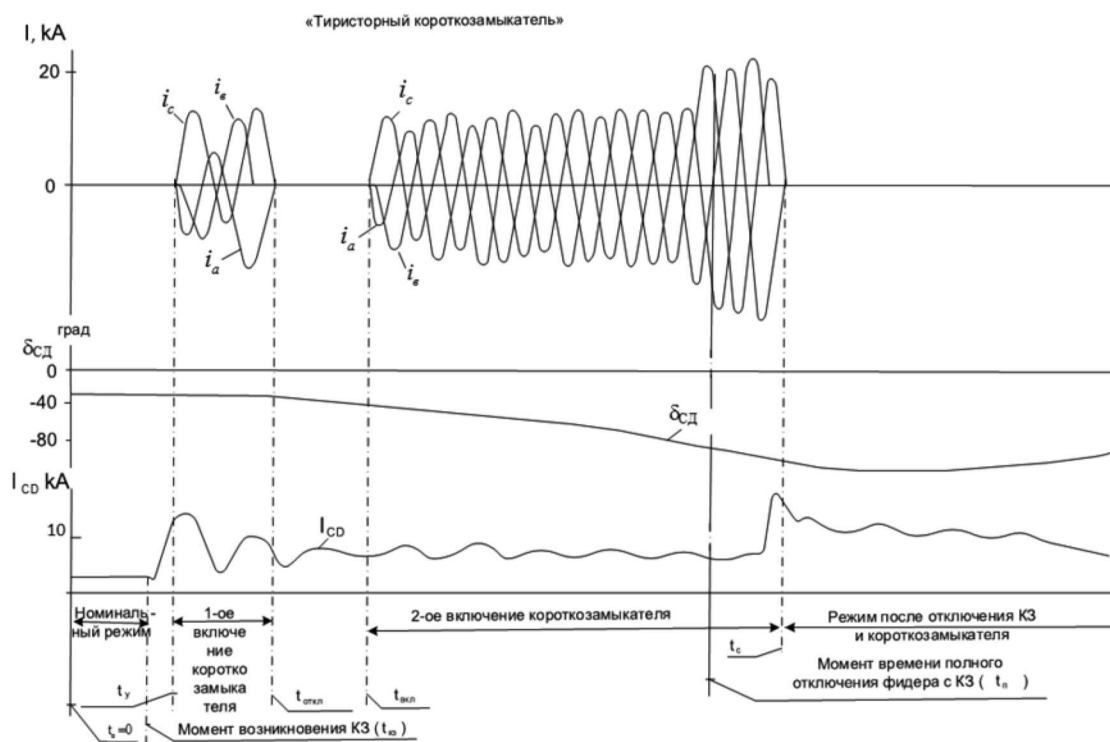


Рис. 7. Процесс, возникающий в двигателях СЭС при действии ТОУ

3. ТАВР. Наиболее характерными случаями потерь питания любой из рассматриваемых секций являются отключения питания выключателем B_3 (либо B_4) и КЗ в линии высокой стороны (рис. 8). В условиях действия традиционного АВР на секционном выключателе при кратковременном отключении источника любой из секций полный цикл «отключения – включения», связанный с восстановлением питания, в лучшем случае длится не менее $(0,2 \dots 0,3)$. Данный промежуток состоит из суммы времен включения секционного выключателя, действия устройства традиционного АВР и выключателя (B_1 либо B_2), ликвидирующего последствия аварии. Еще больший перерыв питания будет наблюдаться при КЗ на высокой стороне источников питания, отключаемых даже без выдержек времени.

Для уменьшения времени перерыва питания на каждую секцию и секционный выключатель устанавливаются следующие устройства (рис. 8):

- $\PhiНОП$ – фильтры напряжения обратной последовательности, определяющие факт возникновения несимметричных КЗ;
- $P_{\text{обр}}$ – датчики, фиксирующие перетоки активной мощности (для выявления случаев: отключения B_3 либо B_4 , КЗ непосредственно на секции 1 либо 2, КЗ в линии высокой стороны);
- U_o – датчик биений напряжений между секциями (анализирует напряжения биений между секциями 1 и 2);
- U – датчики напряжений, блокирующие импульсы управления тиристорного выключателя при КЗ на секциях 1 либо 2;

д) B_p – установка задержки времени (для отстройки от кратковременных срабатываний датчиков: U_ϕ , ФНОП, $P_{обр}$, перекосов и т. п.). Включение тиристорного выключателя АВР осуществляется логическими схемами, выдающими сигналы на подачу и блокировку импульсов управления. В качестве логических функций используются данные, получаемые от 4 из перечисленных устройств:

- логическая схема «И» (сигнал на подачу импульсов) сортируется первыми тремя устройствами;
- логическая схема «НЕ» (запрет на подачу импульсов) отдается четвертым датчиком.

Рассмотрим характерные случаи работы ТАВР с описанными системами управления. При исчезновении питания (отключение выключателей B_3 либо B_4 .) происходит срабатывание датчика U_ϕ на секционном выключателе. Логические схемы «И» и «НЕ» формируют сигналы на запуск системы подачи импульсов управления тиристорным выключателем АВР. После включения тиристорного выключателя производится периодическое измерение направления перетоков активной мощности с помощью датчиков $P_{обр}$ определения ввода, на котором необходимо отключать выключатель (B_1 либо B_2).

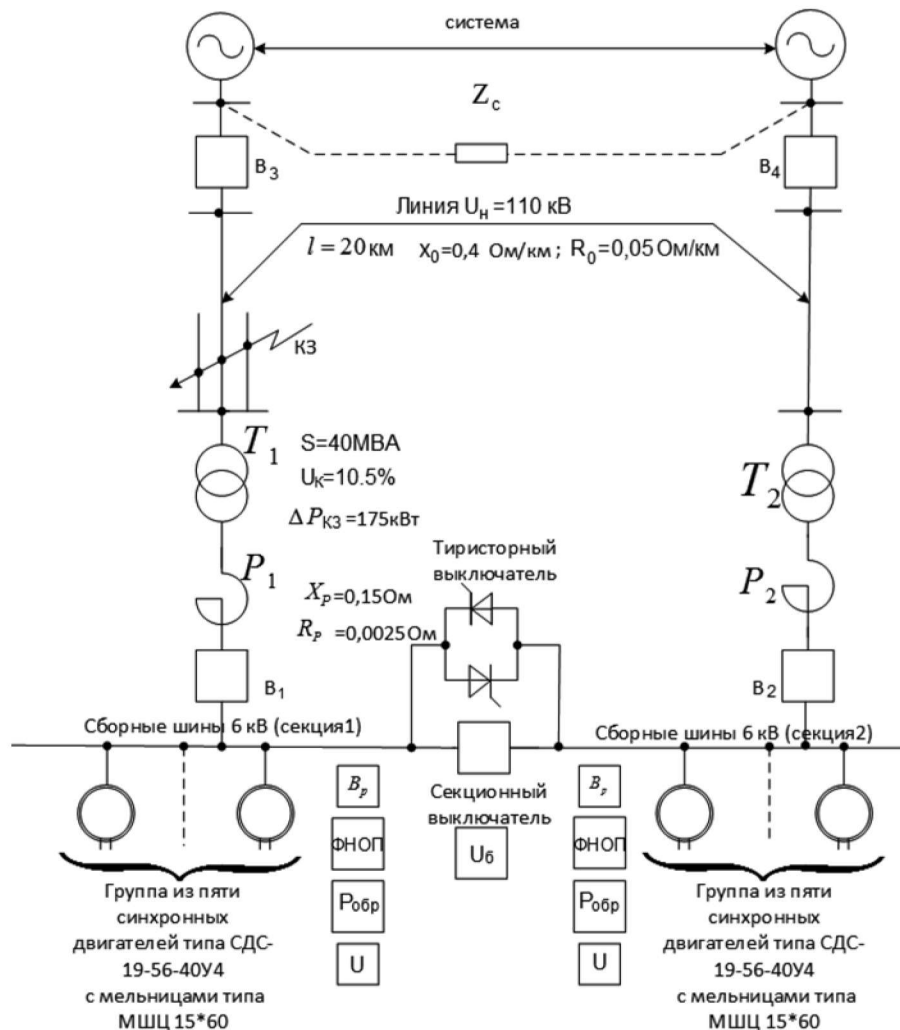


Рис. 8. Исследуемая схема СЭС с ТАВР

При возникновении трехфазного КЗ на высокой стороне источника (например, первой секции, рис. 8) срабатывают датчики $P_{обр}$ и U_6 (при несимметричном КЗ дополнительно срабатывает датчик ФНОП). Все это приводит к запуску системы подачи импульсов управления тиристорным выключателем. В дальнейшем возможны следующие варианты коммутаций. АВР на секционном выключателе ориентируется на предварительное отключение КЗ (сначала выключателем B_3 , а затем B_1). Только после этого подается сигнал на запуск включения секционного выключателя.

Одним из путей решения этой задачи в условиях применения ТАВР является его подключение непосредственно после выдачи логическими схемами «И» и «НЕ» сигналов на запуск системы подачи импульсов управления. В этот же момент подаются команды на осуществление коммутации межсекционных выключателей: отключение B_1 и включение секционного (рис. 8). С учетом наихудшей фазы КЗ, работы приводов, интервала времени действия релейной защиты и автоматики, принято, что B_1 отключается спустя 0,21 с после возникновения аварии. Время включения секционного выключателя принято равным 0,215 с. В качестве расчетных были выбраны следующие условия: фаза трехполюсного КЗ, происходящего на высокой стороне трансформатора в конце линии электропередачи, равна 30° . Двигатели снабжены статическими возбудителями с краткостью форсировки напряжения возбуждения U_f , не превышающей 1,4. Секционные ключи ТАВР нормально разомкнуты. В режиме исчезновения питания отключение B_3 осуществляется без выдержки времени спустя период промышленной частоты после начала расчета.

На рис. 9, 10 приведены расчетные осциллограммы процессов, полученные для режима исчезновения питания в СЭС с тиристорным АВР. Присоединение ТАВР сопровождается несинхронным включением и срабатыванием форсировки, которая на данном этапе способствует сохранению двигателями устойчивой работы двигателя на первом качании. Максимальный угол $\delta_0 = 33^\circ$. Он превышает номинальный не более чем на 25 %. Наибольшая величина колебаний электромагнитного момента в процессе качаний составляет 5,8 от номинального и не превышает допустимой для данного двигателя (исходя из наихудших условий самозапуска). Токи двигателей не превышают пусковых. Максимальные амплитудные значения токов через ТВ составляют 15 кА, а средний действующий коммутируемый ток находится в пределах 7...10 кА.

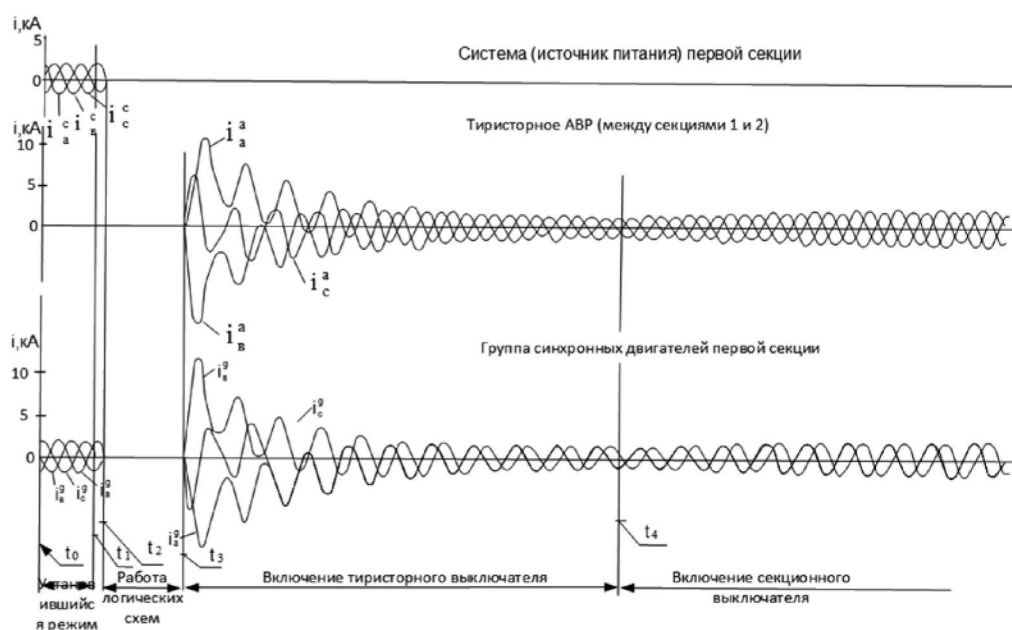


Рис. 9. Процессы, возникающие при исчезновении питания первой секции двухсекционной СЭС и действия ТАВР

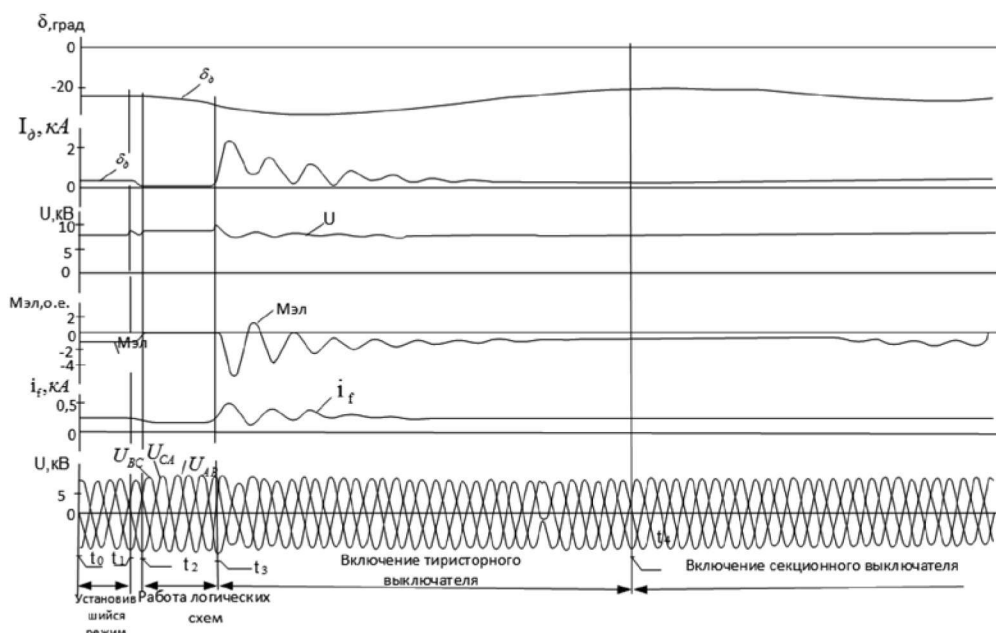


Рис. 10. Процесс, протекающий в синхронных двигателях при исчезновении питания первой секции двухсекционной СЭС и действия ТАВР

Исследования режима трехфазного КЗ в конце линии высокой стороны источника питания секции 1 (рис. 8) показали следующие результаты. На первом качании устойчивость двигателей сохраняется без применения дополнительных мероприятий по её обеспечению, максимальный угол $\delta_0 = 70^\circ$ превышает исходный приблизительно в 3 раза. Скольжение ротора при данном угле не успевает достигнуть величины (0,05), при которой необходимо включать гашение поля и осуществлять его разгрузку. Поэтому очевидны преимущества от применения ТАВР. Электромагнитный момент и токовые перегрузки двигателей в процессе ликвидации аварии и действия АВР не превышают допустимых, рекомендованных для синхронных двигателей исходя из наихудших условий повторного включения. Поэтому нет необходимости применения специальных мероприятий по укреплению демпферных обмоток. Самозапуск успешен.

Литература

1. Рубашов Г. М. Бесконтактная аппаратура в системах электроснабжения. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 96 с.
2. Демин Ю. И. Моделирование электрических систем с помощью булевой алгебры // Вестник СевКавГТУ. Ставрополь: СевКавГТУ. 2012. № 4. С. 32–36.
3. Демин Ю. И. Определение расчетных условий для исследования системы электроснабжения 6–10 кВ с бесконтактным распрееделением // Материалы XIV Междунар. семинара «Физико-математическое моделирование систем». Воронеж: ГОУВПО «Воронежский гос. техн. университет», 2015. Ч. 1. С. 65–72.
4. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами / Л. П. Петров и др. М.: Энергия, 1970. 128 с.