

4. **Макоклюев Б.И.** Расчет и планирование режимных параметров, балансов мощности и электроэнергии АО-энерго и предприятий сетей с помощью программных комплексов «Энергостат» и «РБЭ». / **Б.И. Макоклюев**, - М.: Сборник докладов «Современные методы и средства расчета, нормирования и снижения технических и коммерческих потерь электроэнергии в электрических сетях» НЦ ЭНАС, 2000.
5. **Макоклюев Б.И.** Прогнозирование потребления электроэнергии в АО «Мосэнерго». / **Б.И. Макоклюев, А.И. Владимиров, Г.И. Фефелова**, – ТЭК N 4, 2001. - с. 56–57.
6. **Ивашенко В.А.** Модели автоматизированного прогнозирования электрических нарузов промышленных предприятий / **В.А. Ивашенко, М.В. Колоколов, Д.А. Васильев** // Управление большими системами. Выпуск 34 с.254 – 266.
7. **Денискин В.В.** Основы экономическо прогнозирования в пищевой промышленности / **В.В. Денискин**, – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 192с.
8. **Светульников И.С.** Методы и модели социально-экономического прогнозирования / **И.С. Светульников, С.Г. Светульников**, - М.: Издательство Юрайт, 2014. – 351 с.
9. **Лукашин Ю.П.** Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / **Ю.П. Лукашин**, – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416с.

Рукопис подано до редакції 25.03.16

УДК621.337.41

О.Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, доц.

Криворожский национальный университет

В.О. ЧЕРНАЯ, канд. техн. наук, доц., В.О. ЧЕРНЫЙ, студент

Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ЗАЩИТЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассмотрены способы защиты транзисторных модулей широтно-импульсных преобразователей в структурах тяговых электротехнических комплексов. Предложена схема защиты силовых модулей от превышения тока. Приведены результаты моделирования аварийных ситуаций в тяговых полупроводниковых преобразователях и схем их защиты.

**Ключевые слова:** преобразователь, ток, напряжение, электрическая защита, пробой, электровоз, тяговый двигатель

**Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями.** Вопросы защиты импульсных преобразователей (ИП) как структурных элементов тяговых электротехнических комплексов являются весьма важными и актуальными, так как связаны с надежностью функционирования тягового электропривода и комплекса в целом [1,2]. Особенно это актуально для электромеханических систем рудничных видов электровозов, где главенствующую роль играют весогабаритные показатели. Большинство современных преобразователей на основе полупроводниковых приборов имеют в своем составе встроенные элементы защиты силовых модулей, которые позволяют избежать развития аварийных ситуаций при работе ИП, однако далеко не все они учитывают специфику условий эксплуатации рельсового транспорта в подземных условиях [3–6].

**Анализ исследований и публикаций.** Среди многообразия способов защиты тягового электрического оборудования с импульсными преобразователями (ИП) напряжения от проявления различных внутренних факторов следует выделить максимальную токовую защиту (МТЗ). Данный вид быстрodeйствующей защиты призван срабатывать при превышении значений мгновенного тока в нагрузке или в силовых *IGBT* модулях преобразователя [7]. Современные виды МТЗ имеют два уровня реализации: на уровне микропроцессорной системы управления и на уровне управляющих драйверов *IGBT*. В первом случае выходной ток преобразователя относится к числу обязательно измеряемых координат электропривода (как для реализации контура регулирования тока в системе управления электроприводом, так и для реализации токовых защит). Микропроцессорная система управления в определенные дискретные моменты времени выполняет аналогово-цифровое преобразование величины выходного тока преобразователя и при превышении заданного значения блокируется управление всеми ключами преобразователя. Во втором случае в связи с ограниченными функциональными возможностями

микропроцессорной системы управления отсутствует возможность защиты преобразователя от сквозных токов, которые могут возникнуть, например, при пробое одного из *IGBT*. Поэтому управляющие драйвера транзисторов должны содержать функцию защиты ключей от превышения значений уровней тока.

Защита транзисторных ключей широтно-импульсного преобразователя является одной из важнейших функций, которая обеспечивает их высокую надежность. Ключи преобразователей в тяговых структурах тяговых электроприводов могут быть повреждены при возникновении повреждений в тяговых двигателях, соединительных кабелях, соединяющих преобразователь и двигатель, а также при ошибочных включениях двух ключей, что приводит к возникновению сквозного тока. При таких неисправностях ток через транзисторы очень быстро возрастает, что в случае отсутствия соответствующих быстродействующих защит непременно приведет к их выходу из строя. Таким образом, только превентивно своевременное определение неисправности позволит своевременно закрыть транзистор до возникновения факта пробоя, «сдержав» рост тока короткого замыкания.

Наиболее опасным типом коротких замыканий в преобразователях является сквозное замыкание одного плеча, поскольку ток короткого замыкания протекает по цепи с очень низким сопротивлением и быстро достигает значений, которые в несколько раз превышают допустимый ток ключа.

Существующие способы защиты *IGBT* базируются на измерении тока коллектора, напряжения коллектор-эмиттер и напряжения на затворе. Наиболее надежным способом является подключение датчика тока (трансформатора тока или шунта) последовательно с силовым вентилем [8,9]. Недостатком использования трансформатора тока является отсутствие возможности измерения постоянной составляющей тока, а также необходимость использования магнитного сердечника с широкой полосой пропускания в связи с быстрым нарастанием тока короткого замыкания. Недостаток использования шунта заключается в неэффективном энергопотреблении, а также потенциальной возможности увеличения паразитной емкости силовой цепи. Кроме того, дорогостоящие дополнительные датчики увеличивают габариты силовой части преобразователя, особенно при использовании плоских шин.

Один из существующих способов защиты базируется на использовании токового зеркала и реализуется за счет интеграции чувствительного транзистора в силовой модуль [10]. Токовое зеркало может индцировать наличие перегрузки по току, поскольку ток через зеркало является пропорциональным току в основном *IGBT*. Основным недостатком способа заключается в повышенной сложности производства силовых моделей, дополнительных потерях энергии, а также увеличении общей стоимости модуля.

Среди известных способов защиты транзисторных модулей следует выделить способ, основанный на использовании чувствительного диода для определения напряжения эмиттер-коллектор при превышении максимально допустимого тока. Данный способ не требует использования чувствительного токового элемента, однако с целью устранения ошибочных срабатываний необходимо введение программированной задержки (порядка 1-5 мкс), что позволяет напряжению на коллекторе уменьшиться ниже порогового уровня, завершив переходной процесс включения транзистора. Ток короткого замыкания может достичь очень большого значения за время коммутации, что может привести к повреждению устройства из-за локального перегрева.

Один из известных способов защиты позволяет анализировать изменение напряжения на затворе и скорости нарастания прямого напряжения для определения неисправностей. Эти способы требуют сложной системы защиты и являются чувствительными к паразитной индуктивности, что вызывает шум в напряжении затвора транзистора, а также к току обратного диода, и существенно усложняет практическую реализацию данного способа [11].

**Постановка задачи.** Исследование на математической модели электрических процессов в импульсных преобразователях напряжения с различными способами защиты силовых модулей импульсного преобразователя тягового электротехнического комплекса рудничных электровозов.

**Изложение материала и результаты.** Электроподвижной состав рудничных шахт Украины оснащен тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения и эффективными преобразователями, которые обеспечивают эффективное управление электровозоставом при поддержании на высоком уровне показателей надежности при низких показателях

энергопотребления [12-13]. Однако, несмотря на комплексный подход в решении проблемы энергоэффективности электровозовряд вопросов, в том числе защиты элементов преобразовательных устройств, до сих пор остаются нерешенными.

Один из наиболее рациональных способов защиты ключей ИП постоянного тока от к.з. заключается в использовании измерения тока с помощью индуктивного сопротивления (рис. 1). Принцип действия защиты заключается в следующем. При превышении напряжения на конденсаторе СР выше допустимого уровня срабатывает триггер, который устанавливает аварийный сигнал, блокирующий управление всеми ключами преобразователя.

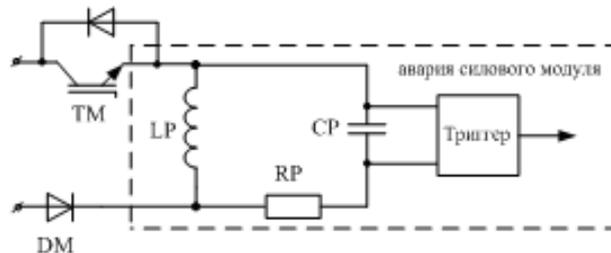


Рис. 1. Схема защиты силовых модулей тягового преобразователя от превышения значений уровня тока

Для исследования работы ИП проведено математическое моделирование, результаты которого представлены на рис. 2-3.

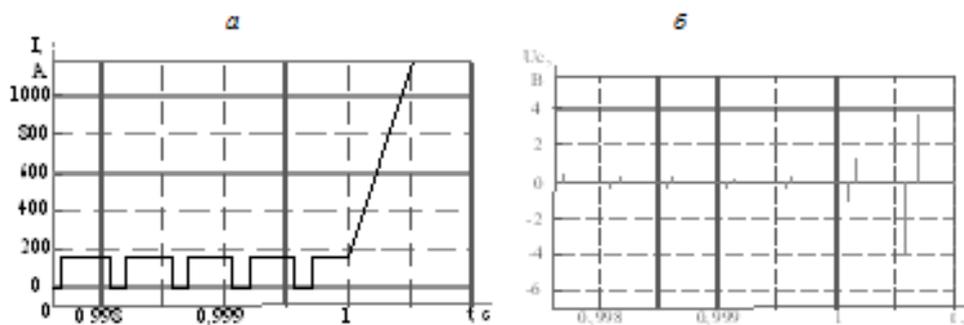


Рис. 2. Результаты моделирования электрических процессов в импульсном преобразователе при отсутствии защиты при пробое ключа: а - ток через транзистор; б - напряжение на конденсаторе схемы защиты

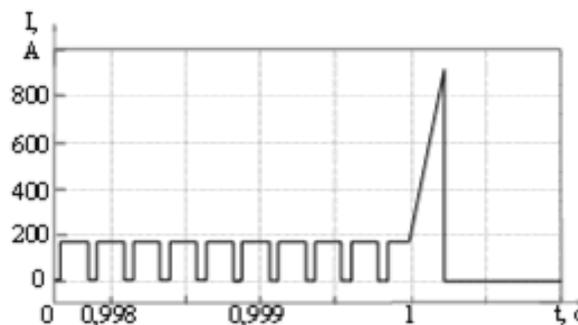


Рис. 3. Результаты моделирования электрических процессов в схеме максимально-токовой защиты транзисторов при пробое ключа

Как видно из результатов моделирования (рис. 2а), при отсутствии в структуре ИП элементов защиты величина тока увеличивается на каждом интервале времени, когда открывается второй ключ того же плеча, в котором находится пробитый транзисторный модуль. Из этого следует, что такой неконтролируемый процесс спровоцирует быстрый выход транзистора из строя. При этом входная защитная аппаратура ИП может не успеть сработать, а даже если предположить своевременное отключение ИП от сети, это не остановит свертток через ИП из-за наличия емкостей. Таким образом, аварийный режим будет наблюдаться до полного разряда емкостей.

Увеличение тока, протекающего через транзисторы, приводит к увеличению величины импульса напряжения на конденсаторе (рис. 2б).

Задача схемы МТЗ – фиксирование момента, в который величина напряжения на конденсаторе превышает заданное значение, что свидетельствует о превышении тока в силовом модуле выше максимально допустимого кратковременного значения. В этом случае схема генерирует аварийный сигнал, блокирующий управление всеми ключами ИП.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что защита, реализованная по указанной схеме, позволит при наличии аварийных режимов, закрыть транзистор до возникновения его пробоя.

Немаловажным вопросом при функционировании ИП является их защита от кратковременного превышения и исчезновения напряжения питания.

Питание преобразователей тягового электропривода шахтных электровозов осуществляется от тяговой сети, которые относятся к сетям с ограниченной мощностью, что создает реальную возможность кратковременного повышения или исчезновения напряжения из-за наличия аномальных режимов работы контактной сети.

Это приводит к повышению или понижению напряжения на входе ИП.

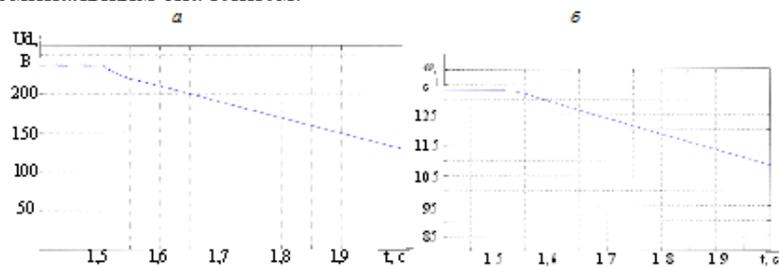
Поэтому система управления должна блокировать работу ИП и информировать машиниста электровоза об отклонении напряжения ниже допустимого уровня, который задается соответствующими параметрами настройки системы.

Повышение напряжения выше допустимого уровня может вызвать повреждение изоляции конденсаторов или даже силовых модулей, понижение напряжения ниже допустимого уровня может свидетельствовать о наличии аварийных ситуаций в выпрямительной части ИП.

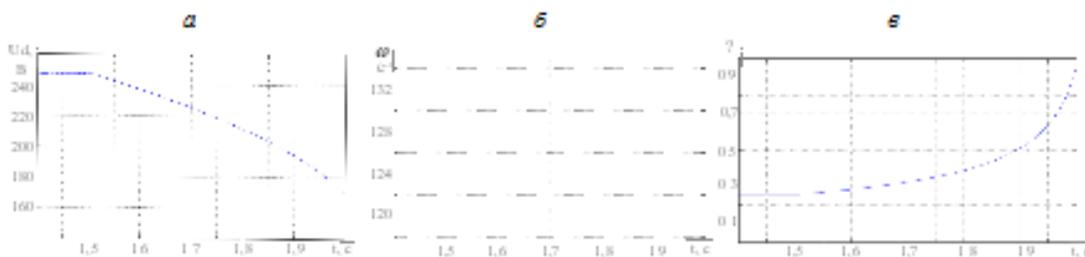
Поскольку при работе ИП напряжение на входе может изменяться, то это приведет к изменению уровня выходного напряжения, что может вызвать несанкционированные колебания частоты вращения тяговых электрических двигателей (ТЭД), а следовательно и скорости движения электровоза.

Для устранения указанных недостатков система управления ТЭД должна выполнять функцию стабилизации выходного напряжения, компенсируя изменение напряжения на входе ИП.

Поскольку это напряжение является измеряемым сигналом для реализации названных защит, то реализация такой функции требует лишь коррекции ширины активного импульса выходного напряжения в зависимости от соотношения между текущей величиной входного напряжения и ее номинальным значением.



**Рис. 4.** Результаты моделирования электрических процессов при исчезновении напряжения питания и отсутствии компенсации изменения напряжения в импульсном преобразователе: *а* - график изменения напряжения на входе импульсного преобразователя; *б* - график изменения скорости тягового двигателя



**Рис. 5.** Результаты моделирования электрических процессов при пропадании напряжения питания и компенсации изменения напряжения в импульсном преобразователе: *а* - график изменения напряжения на входе импульсного преобразователя; *б* - график изменения скорости тягового двигателя; *в* - график изменения скважности импульсов выходного напряжения

На рис. 4 представленны результаты моделирования работы системы при отсутствии функции компенсации изменения напряжения на входе ИП.

Из графиков на рис. 4 видно, что при снижении напряжения питания наблюдается постепенный разряд конденсаторов на входе ИП, что вызывает уменьшение выходного напряжения ИП, а также падение частоты вращения ТЭД.

В случае превышения напряжения на входе ИП система управления должна отслеживать два уровня уставки защиты: уровень включения тормозного транзистора, а также аварийный уровень напряжения, при котором следует производить отключение входной контактной аппаратуры с целью защиты элементов ИП.

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы системы при наличии компенсации «бросков» напряжения.

Из полученных графиков следует заключение - при наличии компенсации изменения напряжения несмотря на падение входного напряжения ИП за счет увеличения скважности импульсов сохраняются те же значения среднего за период выходного напряжения, а значит и частота вращения ТЭД. Т.о. система защиты позволяет сохранить установившийся режим работы электроподвижного состава несмотря на снижение напряжения сети.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Существующие виды современных электрических защит элементов полупроводниковых преобразователей позволяют предотвратить развитие аномальных режимов в силовой цепи тягового электропривода, но не обеспечивают полной защиты, поскольку не достаточно адаптированы к условиям и режимам работы на электроподвижном составе рудничных шахт.

Одними из существенных недостатков современных способов защиты силовых IGBT модулей, которые сдерживают их широкое внедрение на рудничных электровозах, являются их высокие массогабаритные и стоимостные показатели.

Предложенный на основе исследования электрических процессов вариант схемотехническое решение защиты силовых модулей от аварийных режимов позволяет при минимальных изменениях в структуре преобразователя достичь максимального эффекта от защиты в случае возникновения и развития аномальных режимов.

#### Список литературы

1. Дебелый, В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта [Текст] / В.Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С. 30–31.
2. Синчук, О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте [Текст] / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, О. В. Ершов. – К. : АДЕФ–Украина, 1998. – 280 с.
3. V. John, B. Suh, T. A. Lipo Fast-clamped short-circuit protection of IGBT's [Text] / IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, №. 2, pp. 477–486, 1999.
4. L. Chen, F. Z. Peng. Active fault protection for high power IGBTs [Text] / IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 2050–2054, 2009.
5. M. A. Rodriguez, A. Claudio, D. Theilliol, L. G. Velan A new fault detection technique for IGBT based on gate voltage monitoring [Text] / IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1001–1005, 2007.
6. Синчук, О.М. Нештатні режими структури системи захисту відних при функціонуванні двоосних електровозів [Текст] / О. М. Синчук, В. О. Чорна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 2. – С. 100–103.
7. Максимальная токовая защита. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1991. – 96 с.
8. Макаренко, М. П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу [Текст] / М. П. Макаренко, В. І. Сенько, М. М. Юрченко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – Київ. – 2005. – 241 с.
9. Мікропроцесорна техніка [Текст] / Ю. І. Якименко [та ін.] ; під ред. Т.О. Терещенко. - К. : ІВЦ Видавництво «Політехніка», «Кондор», 2004. – 440 с.
10. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. В 3-х томах: Т. 1 [Текст] / П. Хоровиц, У. Хилл. - М. : Мир, 1993. - 413 с.
11. Сенько В. І. Електроніка і мікросхемотехніка : у 4 т. Т. 3. Цифрові пристрої / В. І. Сенько, М. В. Панасенко, Є. В. Сенько, М. М. Юрченко, Л. І. Сенько. – Х., 2008. – 400 с.
12. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов [Текст] / О. Н. Синчук [и др.] ; под ред. О. Н. Синчука. – К. : ІЕДНАУ, 2006. – 252 с.
13. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: [Текст]: учеб. пособие / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, О. В. Пасько [и др.] ; под ред. О. Н. Синчука. - Кременчук: ИП Щербатих О. В., 2008. – 88 с.

Рукопись поступила в редакцию 29.03.16