

# Вопросы построения систем аварийной защиты

## тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 1

**В статье рассказывается о методах и средствах защиты силовых электронных устройств при аварийных режимах. Рассматриваются основные требования, методики выбора структуры и построения эффективной системы защиты тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР) с учетом особенностей протекания аварийных процессов. Приводятся результаты моделирования в среде Matlab с помощью инструментов пакета Simulink аварийного процесса срыва инвертирования для различных схем ТПЧ с АИР удвоением частоты, встречными диодами и закрытым входом.**

Иршат Аитов, к.т.н.

aitov-irshat@mail.ru

За последние годы области применения силовых электронных устройств (СЭУ) значительно расширились и практически охватывают все сферы деятельности человека. Из полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов наиболее интенсивно развиваются и используются полевые (MOSFET) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), а также силовые гибридные СГМ и интеллектуальные модули СИМ (IRM) на их основе [1, 2, 3]. Они создают жесткую конкуренцию традиционным и хорошо зарекомендовавшим себя частично управляемым (SCR) и запираемым (GTO) тиристорам, оптотиристорам (LPT), коммутируемым по управляющему электроду, запираемым тиристорам (GCT, IGCT). Однако, несмотря на снижение темпов развития, совершенствование тиристорных продолжится путем разработки новых технологий внутренних соединений и корпусирования, создания и развития СГМ-модулей, в том числе на основе GCT, IGCT, а также новых тиристорных с оптическим управлением и интегрированными функциями самозащиты и повышенными динамическими параметрами [4, 5]. В настоящее время популярность в преобразовательной технике тиристорных и модулей на их основе обусловлена тем, что им присущи относительно высокие значения перегрузочной способности по току, высокий КПД и низкие цены. Применение тиристорных выгодно также и благодаря наличию проверенных временем схемных решений с требуемыми техническими и функциональными возможностями, в установках нижних и средних частот больших и сверхбольших мощностей, при напряжении питания свыше 0,5–1,0 кВ и токах более 100–200 А [1, 2, 6, 10–13].

Одним из энергоемких и важных направлений применения силовых электронных устройств (СЭУ) являются электро-технологические установки (ЭТУ) для получения и обработки материалов и деталей с разнообразными свойствами. В первую очередь к ним относятся установки индукционного нагрева

заготовок, открытой и вакуумной плавки металлов и сплавов, литья алюминия в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), а также ЭТУ электроэрозионной и термической обработки металлов, микродугового оксидирования алюминиевых и титановых сплавов и др. На основе теоретических и экспериментальных исследований, длительного опыта разработки, а также промышленной эксплуатации ТПЧ с различными группами схем АИР и с учетом проблем и требований индукционного метода воздействия на металл автором в [6, 9, 10, 17] показана эффективность и целесообразность использования схем АИР с удвоением частоты, закрытым входом, удвоением или умножением выходного напряжения для ЭТУ индукционного нагрева большой и сверхбольшой мощности. Следует также отметить, что схемы тиристорных АИР с успехом могут быть использованы для получения униполярных импульсов тока повышенной мощности в ЭТУ электроэрозионной обработки деталей и изделий из сверхтвердых металлов [12, 23–25]. Независимо от используемых силовых полупроводниковых приборов (СПП) и модулей для СЭУ (особенно большой мощности), в частности — указанных выше ТПЧ с АИР для ЭТУ индукционного нагрева металлов и других целей, в случае возникновения в них аварийных режимов и отказов возможны значительные экологические, экономические потери и другие опасные последствия [6, 14, 16]. Поэтому вопросы обеспечения, повышения надежности и КПД СЭУ имеют первостепенное значение во всех случаях их применения. В этой связи следует отметить необходимые и важные публикации на страницах журнала «Силовая электроника» по широкому спектру вопросов надежности силовых устройств [26]. Актуальность этой проблемы с годами не уменьшается, что связано, в первую очередь, с интенсивным развитием и обновлением СПП, СГМ, СИМ (IRM), схмотехники СЭУ, а также обусловлено широким использованием в них цифровой и вычислительной техники.

Начало промышленного применения тиристорных ТПЧ с АИР для индукционного нагрева металлов и других целей в 60-х годах прошлого столетия вызвало большое внимание к их надежности. В технической литературе появились многочисленные публикации, посвященные как отдельным свойствам, так и общим вопросам обеспечения и повышения надежности СЭУ. В решении этих вопросов непосредственное участие автор начал принимать еще со времен разработки и создания сначала опытно-промышленного образца ТПЧ с АИР с проектной мощностью 100 кВт, частотой 2400 Гц (всероссийная выставка «Сетунь-68», 1968 г.), а затем и первого промышленного образца ТПЧ (120 кВт, 2400 Гц), который по результатам испытаний (г. Тула, ТНИТИ, осень 1969 г.), в том числе и системы защиты его от аварийных режимов, был рекомендован для промышленного использования в установках индукционного нагрева и плавки металлов [33]. В данном промышленном образце, наряду с электромеханическим автоматом защиты, впервые в уфимских ТПЧ с АИР были использованы быстродействующий тиристорно-конденсаторный выключатель и дифференциальный датчик срыва инвертирования [27, 32]. В последующие годы вопросы оценки, повышения надежности, разработки систем и устройств защиты ТПЧ с АИР оставались предметом внимания автора [6, 14, 16, 19–21, 34–44, 46, 47]. С учетом характера, особенностей различных режимов работы ТПЧ с АИР и требований, предъявляемых к ним ответственным, не терпящим перерыва питания и другими ЭТУ, автором в [14] выделены наиболее эффективные методы и средства повышения (обеспечения) надежности, а в [6, 14, 48–50] некоторые из них рассмотрены более подробно. Одним из методов, определяющих совокупность таких свойств надежности ТПЧ с АИР, как живучесть и безопасность, безотказность и ремонтпригодность, является эффективное ограничение аварийных токов через СПП (СГМ) с использованием быстродействующих устройств отключения источника питания АИР при аварийных режимах. Попытка решения этого вопроса путем значительного снижения соответствующих нагрузок СПП (СГМ) приводит к неоправданным усложнениям, увеличению массо-габаритных показателей и удорожанию, к тому же не всегда позволяет реализовать необходимый уровень надежности. Обеспечить необходимый уровень надежности ТПЧ с АИР, особенно большой мощности, при возникновении аварийных режимов без значительного снижения нагрузок СПП (СГМ) возможно лишь с использованием системы быстродействующей защиты.

Причины, вызывающие аварийные режимы в СЭУ, весьма разнообразны и зависят как от условий и режимов работы СПП (СГМ) в них [6], так и от нарушений (отказов) работы СПП (СГМ), систем управления и регулирования, системы охлаждения (СОХ), защитных РС-цепочек (снабберов) СПП, воздействия сетевых перенапряжений и др. Для ТПЧ с АИР наиболее характерны так называемые «сквозные» и «частичные» срывы инвертирования, основными причи-

нами которых являются: снижение схемного времени восстановления тиристорных  $t_{вс}$  ниже допустимого значения; повышенное значение  $du_d/dt$  — крутизны нарастания прямого напряжения на тиристорах из-за обрыва или КЗ элементов снабберов; значительно реже из-за нарушения работы систем управления [6]. «Сквозные» срывы инвертирования представляют собой КЗ источника постоянного тока (выпрямителя) через тиристоры АИР, а «частичные» — нарушение работы отдельных, последовательно включенных тиристоров, что ведет к значительному снижению надежности дальнейшей работы ТПЧ. «Частичные» срывы характерны для высоковольтных АИР с последовательно включенными тиристорами и приводят, если не принять мер, к развиту сквозного срыва. Характерным также для ТПЧ с АИР для индукционных установок является КЗ элементов цепи нагрузки (индуктора, шин, конденсаторов и др.) на «землю», что непосредственно приводит к аварийному режиму выпрямителя, а также к нарушению работы и даже аварии в АИР. Многолетний опыт промышленной эксплуатации ТПЧ с АИР для индукционных установок показывает, что отмеченные выше аварийные режимы (отказы) составляют до 75–80% от всех отказов. В этой связи быстрое обнаружение и ликвидация аварийного режима без потери работоспособности ТПЧ с АИР (СЭУ) — главная задача системы защиты (СЗ). При этом для оценки перегрузочной способности СПП по току существуют четыре способа: рабочие перегрузочные характеристики (параметры), аварийные перегрузочные характеристики (параметры), ударный ток и параметр  $\int i^2 dt$ . Эти характеристики и параметры приводятся в справочниках, каталогах и используются при построении СЗ СЭУ [45]. Возможны и другие неисправности ТПЧ с АИР, однако в большинстве случаев важным является своевременное обнаружение и предотвращение их последствий.

С учетом главных задач, основные требования к СЗ ТПЧ с АИР (СЭУ) могут быть сформулированы следующим образом:

- максимально быстрое и надежное (достоверное) определение отказов (аварийных режимов) в самом начале их возникновения и установление их вида;
- контроль и своевременное обнаружение отклонения от допустимых значений тех параметров ТПЧ с АИР, которые могут приводить к отказам;
- максимально быстрое отключение, при отказах в АИР, источника постоянного тока ТПЧ (СЭУ) с ограничением амплитуды и длительности протекания его выходного тока, определяемыми допустимой рабочей или аварийной перегрузочной способностью и используемых СПП (СГМ);
- эффективное ограничение аварийных токов через СПП (СГМ) АИР по амплитуде и длительности значениями, определяемыми допустимой рабочей или аварийной перегрузочной способностью их;
- применение резервного отключающего устройства первичной сети с учетом селек-

тивности отключения и параметров аварийной перегрузочной способности СПП (СГМ) СЭУ;

- выполнение предпускового контроля СЗ и запись во флеш-память (ФП) основных параметров контроля работы СЗ, по переднему фронту сигналов соответствующих датчиков отказа и до ликвидации аварийного режима, с временной привязкой и в реальном масштабе времени;
- возможность повторного включения (автоматического или ручного) ТПЧ с АИР (СЭУ) с минимально возможной временной задержкой — при условии успешной ликвидации аварийного процесса.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема СЗ ТПЧ с АИР, которая состоит из следующих блоков и устройств: блок датчиков (БДТ), куда поступают сигналы со всех первичных датчиков (ДТ1÷ДТn) контроля параметров рабочего и аварийного состояний блоков ТПЧ, системы охлаждения (СОХ), управляемого объекта (УО) с эквивалентной нагрузкой  $R_{нэ}$  и резервного автоматического выключателя (АВ); измерительно-вычислительного устройства (ИВУ) или комплекса (ИВК); блока управления и защиты (БУЗ); быстродействующего конденсаторного выключателя (КВК); блока предпускового и текущего контроля (БКП) СЗ и ТПЧ с АИР; устройства отображения информации (УОИ); флеш-памяти (ФП).

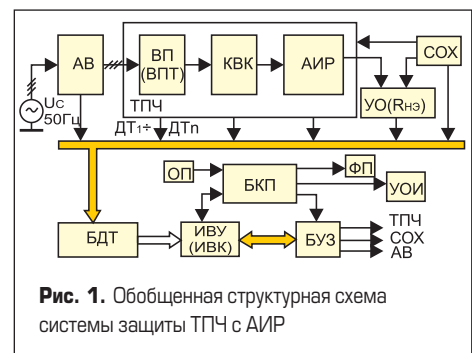


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы защиты ТПЧ с АИР

Начальный пуск ТПЧ с АИР осуществляется оператором (ОП). Питание ТПЧ, состоящего из диодного (ВП) или тиристорного (ВПТ) мостового выпрямителя и АИР, осуществляется от первичной 3-фазной промышленной сети 50 Гц,  $U_c = 220/380$  В. Следует отметить, что выключатель КВК может быть реализован как отдельный блок, так и в сочетании с ВПТ. Второй вариант выполнения КВК позволяет расширить функциональные возможности ТПЧ с АИР, например, регулировать (снижать) выходное напряжение АИР в процессе пуска, отключения, а также использовать в качестве отключающего устройства при аварийных и рабочих режимах [37]. Вопросы построения и особенности работы различных тиристорных КВК могут быть более подробно рассмотрены в следующей части. В общем случае работа СЗ (рис. 1) осуществляется следующим образом. По сигналу ОП, непосредственно перед пуском ЭТУ, с помощью БКП осуществляется полный предпусковой контроль и диагностика всех систем и блоков: ТПЧ с АИР, СЗ, СОХ, УО, АВ [48, 49]. Только после успешной диагностики всех ука-

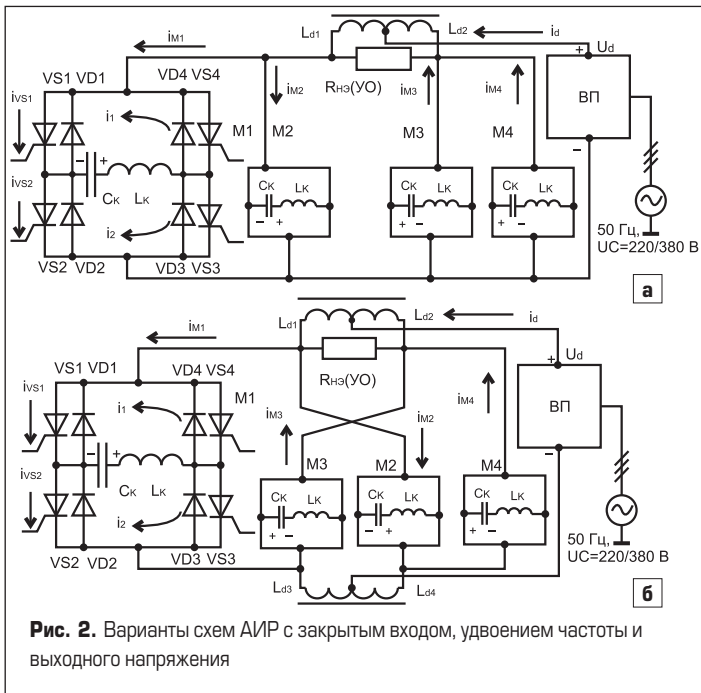


Рис. 2. Варианты схем АИР с закрытым входом, удвоением частоты и выходного напряжения

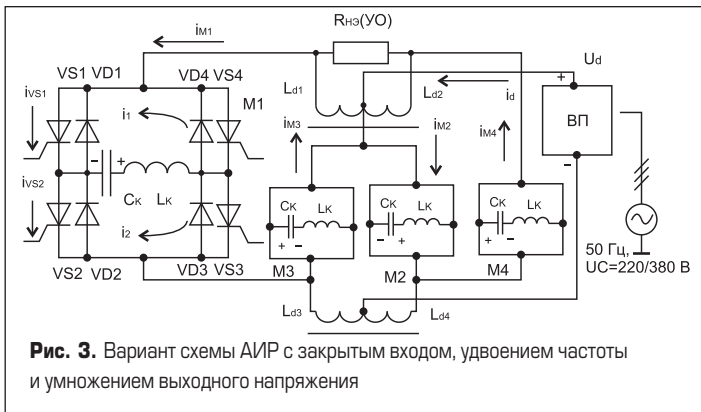


Рис. 3. Вариант схемы АИР с закрытым входом, удвоением частоты и умножением выходного напряжения

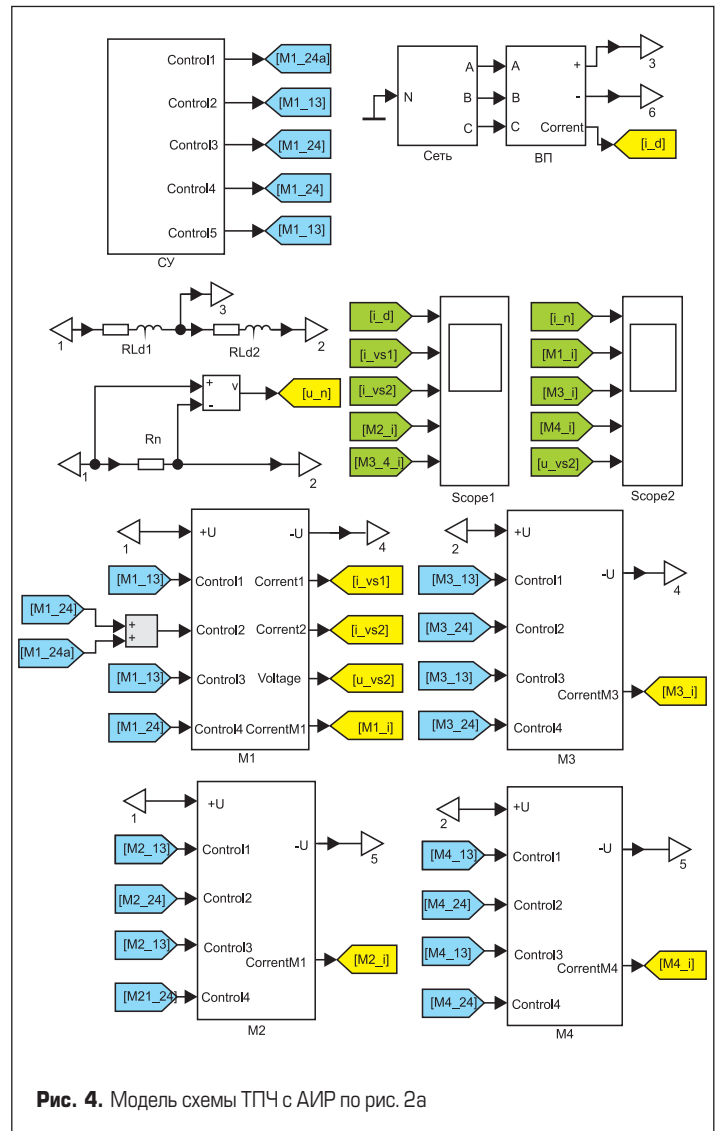


Рис. 4. Модель схемы ТПЧ с АИР по рис. 2а

занных систем и блоков осуществляется запуск ТПЧ. При возникновении аварийного режима соответствующий датчик, например ДТк, выдает сигнал на БДТ, где он (и все остальные сигналы с ДТ1–ДТn) обрабатывается, а также формируются следующие сигналы (команды): вида и места аварии, запуска и управления БУЗ, включения ФП, выбора и контроля требуемых параметров для записи на ФП и отображаемых на УОИ результатов аварийного отключения. Все сигналы с БДТ передаются в ИВУ (ИВК), где выполняется преобразование их в цифровую форму и осуществляются необходимые операции (вычисления). Далее все сигналы управления и контролируемые параметры в цифровой форме поступают в БУЗ и БКП, причем управление КВК и отключение блоков управления АИР (ВПТ) осуществляется БУЗ. В случае успешной ликвидации аварийной ситуации БКП формирует, если это предусмотрено программой, сигналы для выполнения однократного автоматического повторного включения (АПВ) ТПЧ с АИР без отключения ФП. При этом перед выполнением АПВ реализуется дополнительный (послеаварийный) контроль и диагностика СЗ, если перерыв, определяемый суммарным временем ликвидации аварийного режима, контроля СЗ и пуска ТПЧ, не является критичным для работы данной ЭТУ. С точки зрения

определения степени перегрузки СПП по току при различных отказах важными показателями СЗ ТПЧ с АИР являются:  $t_{C3}$  — собственное время срабатывания, определяемое от момента наступления отказа до отключения АИР от источника питания (ВП, ВПТ);  $t_{ПВ}$  — полное время успешной ликвидации аварийного процесса, определяемое от момента наступления отказа до снижения аварийного тока через СПП (СГМ) ВП (ВПТ) и АИР. Эти показатели определяются следующим образом:

$$t_{C3} = t_{ДТ} + t_{БКЗ} + t_{КВК}; t_{ПВ} = t_{C3} + t_{ПС} \quad (1)$$

где  $t_{ДТ}$ ,  $t_{БКЗ}$  — время запаздывания (задержки) соответственно ДТ1–ДТn и блоков СЗ (суммарное значение времени задержки БДТ, ИВУ, БКП и БУЗ);  $t_{КВК}$  — время отключения АИР от источника питания (ВП, ВПТ);  $t_{ПС}$  — время переходного процесса спада тока через СПП (СГМ) ТПЧ до нуля, определяемое с момента отключения АИР от источника питания.

Анализ составляющих  $t_{C3}$  показывает, что для эффективной защиты СПП (СГМ) важным является применение датчиков отказа с малыми значениями времени задержки, так как при современной элементной базе и схемотехнике

выполнения СЗ суммарное значение  $t_{БКЗ}$  и  $t_{КВК}$  может составлять единицы мкс. Хорошо зарекомендовали себя, например, дифференциальные датчики тока срыва инвертирования, КЗ элементов цепи нагрузки АИР на «землю», выполненные с использованием ферритовых колец. Реальная величина  $t_{ДТ}$  таких датчиков, например для определения начала сквозного срыва инвертирования, зависит от варианта схемы включения в плече мостового АИР, конструктивного исполнения обмоток, уровня высокочастотных помех и может составлять 5–20 мкс [34, 36].

Реализация в полной мере всех указанных требований к СЗ — достаточно сложная задача, требует всесторонних исследований широкого круга вопросов, связанных как со схемотехническим исполнением ТПЧ с АИР и режимами работы СПП, так и с видом, условиями возникновения отказов. В общем случае выбор методов, средств и разработка СЗ осуществляется на основе результатов выполнения следующих основных этапов:

- установление (определение) для ТПЧ с АИР (СЭУ) наиболее характерных (основных) видов и причин возникновения отказов, а также наиболее «ненадежных» элементов и их режимов работы;
- анализ основных аварийных процессов, выявление специфических особенностей

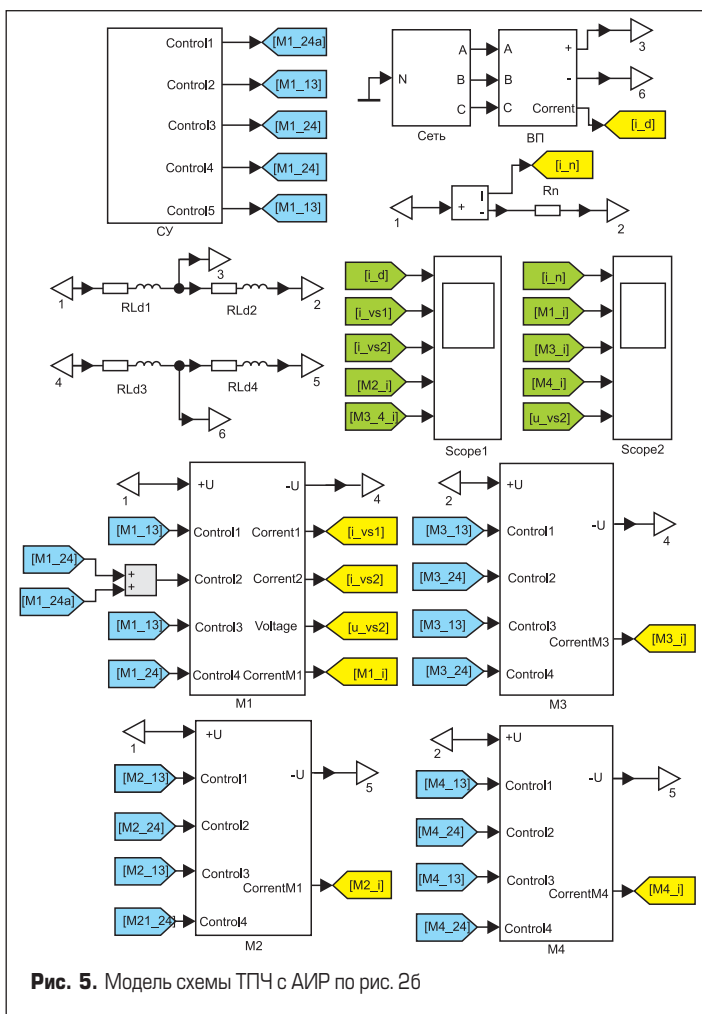


Рис. 5. Модель схемы ТПЧ с АИР по рис. 2б

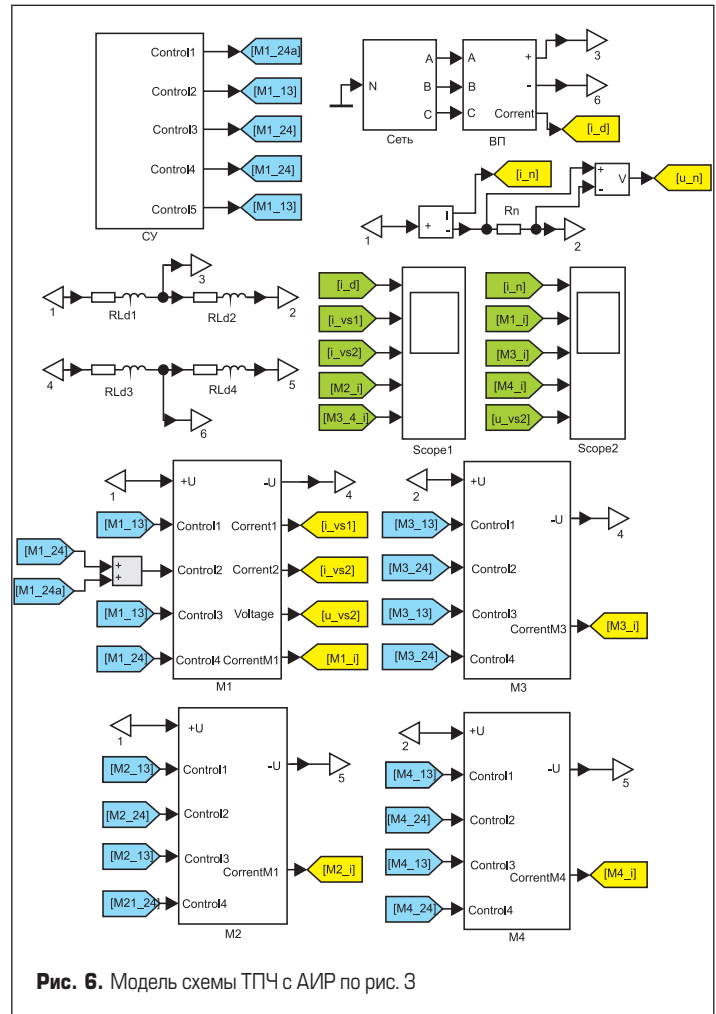


Рис. 6. Модель схемы ТПЧ с АИР по рис. 3

протекания их для ТПЧ с АИР, определенные временных зависимостей изменения аварийных токов через СПП (СГМ) выпрямителя и АИР;

- определение (расчет) по результатам анализа аварийных процессов требуемого быстродействия СЗ ( $t_{CЗ}$ ) с учетом параметров перегрузочной способности СПП (СГМ) выпрямителя и АИР.

Для сравнительной оценки рассмотрим выполнение второго этапа на примере ТПЧ с тремя вариантами схем АИР с удвоением частоты и закрытым входом, которые находят широкое применение в индукционных ЭТУ большой мощности. Построение, принцип работы, основные параметры и характеристики таких АИР рассмотрены в [6, 9, 10]. На рис. 2а,б и рис. 3 приведены схемы ТПЧ с тремя вариантами указанных выше схем АИР с удвоением и умножением выходного напряжения.

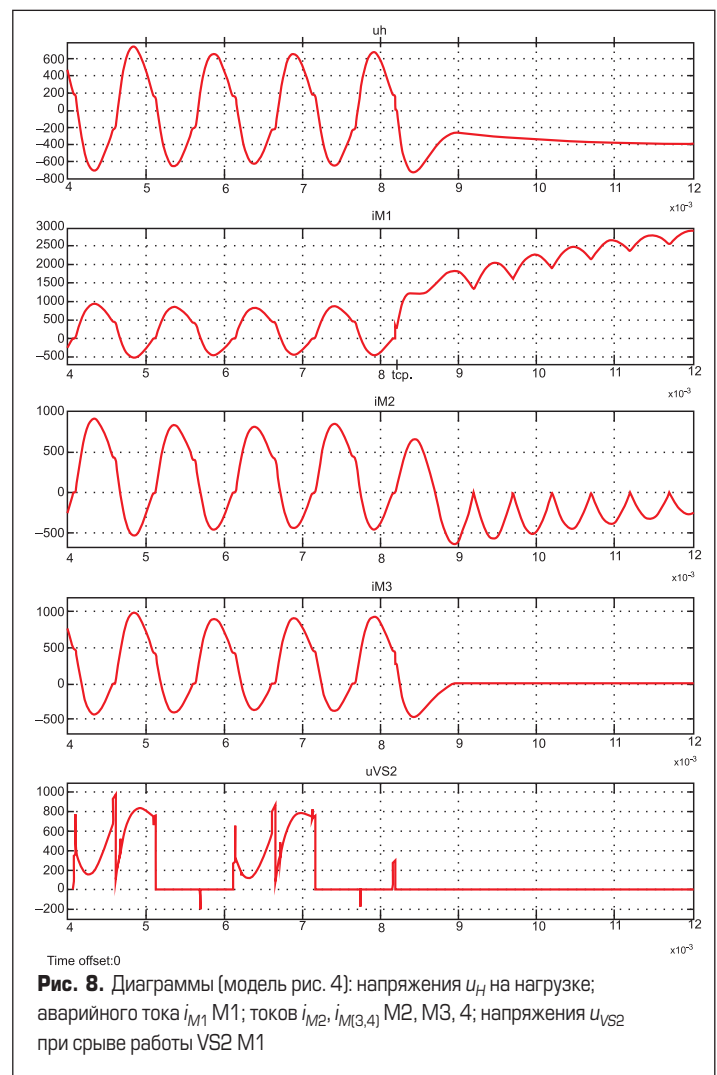
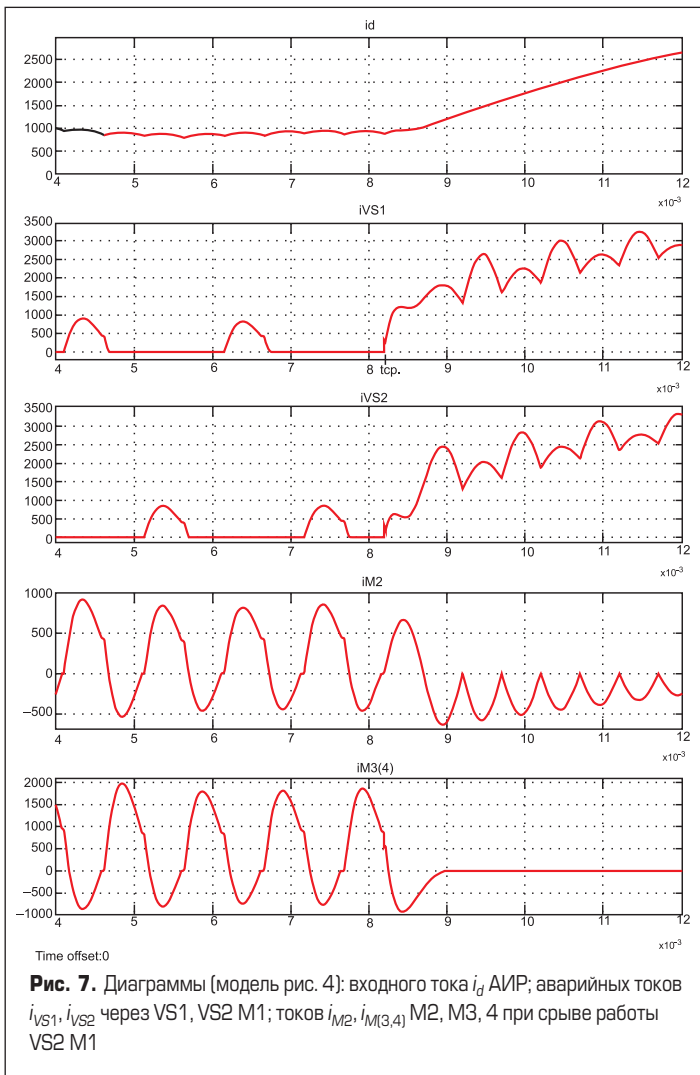
Каждая из приведенных схем АИР содержит по четыре моста М1–4, состоящих из тиристорных VS1–4, встречных диодов VD1–4, коммутирующих конденсатора  $C_k$  и индуктивности  $L_k$ . Питание мостов АИР осуществляется от выпрямителя ВП с напряжением  $U_d = 520$  В через входные дроссели  $Ld1, Ld2$  (рис. 2а),  $Ld1-Ld4$  (рис. 2б, рис. 3). Нагрузка (НО), представляющая собой скомпенсированный нагрузочный колебательный контур с эквивалентным активным сопротивлением  $R_{нэ}$ , включена соответственно между положительными выводами мостов М1,

2 и М3, 4 (рис. 2а, б), М1 и М4 (рис. 3). Для сравнительной оценки степени аварийной нагрузки тиристоров и анализа аварийного процесса при сквозном срыве инвертирования параметры всех элементов мостов ( $C_k, L_k, VS1-VS4$ ), а также напряжения питания ( $U_d$ ), выходной мощности ( $P_n$ ) и частоты ( $f_H$ ) выбраны одинаковыми для всех рассматриваемых АИР. Для исследования аварийного процесса срыва инвертирования и получения необходимых данных об аварийной нагрузке тиристоров по току были разработаны модели ТПЧ с АИР (рис. 2а,б; рис. 3) в системе Matlab с помощью пакета Simulink, которые соответственно приведены на рис. 4–6. Обозначения блоков и элементов в моделях идентичны обозначениям на соответствующих рис. 2а,б; рис. 3; для сокращения количества линий связи и упрощения соединительные точки с одинаковыми потенциалами выполнены в виде треугольников с одинаковыми номерами. В моделях также приведены блоки для контроля, измерения параметров (токов, напряжений, времени) и блока управления (СУ). В инверторных мостах М1–4 управляющие импульсы на каждый тиристор подаются на входы Control1–4. Срыв инвертирования М1 имитируется (рис. 4–6) однократной подачей импульса управления на тиристор VS2,4 в момент отпирания очередных VS1,3, когда  $du_d/dt$  на тиристорах VS2,4 имеет наиболее высокое значение и (или) время  $t_{бсс}$  является недостаточным [6, 37]. В моделях приняты реальные значения параметров СПП, активных сопротивлений

индуктивностей  $L_k, Ld1-4$ , а также нагрузок  $R_n = R_{нэ} = 1,13$  Ом (рис. 2а,б) и  $R_{нэ} = 2,3$  Ом (рис. 3) при  $P_n = 500$  кВт.

Остальные элементы и параметры АИР имеют следующие расчетные значения:  $L_k = 112,5$  мкГн,  $C_k = 225$  мкФ; собственная частота и волновое сопротивление колебательного контура  $f_0 = 1000$  Гц,  $\rho_0 = 1,42$  Ом (рис. 2а,б),  $\rho_0 = 2,83$  Ом (рис. 3); выходная частота  $f_H = 960$  Гц; входные дроссели  $Ld1 = Ld2 = 1,5$  мГн (рис. 2а),  $Ld1 = Ld2 = Ld3 = Ld4 = 0,75$  мГн (рис. 2б),  $Ld1 = Ld2 = Ld3 = Ld4 = 1,5$  мГн (рис. 3).

Рассмотрим результаты моделирования аварийного процесса при срыве работы VS2 М1, полученные по моделям, представленным соответственно на рис. 4–6. На рис. 7, 8 (модель рис. 4) приведены диаграммы: входного тока  $i_d$  АИР; аварийных токов  $i_{VS1}, i_{VS2}$  через VS1, VS2 М1; токов  $i_{M2}, i_{M(3,4)}$  М2, М3, 4; напряжения  $u_H$  на нагрузке; аварийного тока  $i_{M1}$  М1; токов  $i_{M2}, i_{M(3,4)}$  М2, М3, 4; напряжения  $u_{VS2}$  при срыве работы VS2 М1. На рис. 9, 10 (модель рис. 5) приведены диаграммы: входного тока  $i_d$  АИР; аварийных токов  $i_{VS1}, i_{VS2}$  через VS1, VS2 М1; токов  $i_{M2}, i_{M(3,4)}$  М2, М3, 4; тока  $i_H$  нагрузки; аварийного тока  $i_{M1}$  М1; токов  $i_{M3}, i_{M4}$  М3, М4; напряжения  $u_{VS2}$  при срыве работы VS2 М1. На рис. 11, 12 (модель рис. 6) приведены диаграммы: входного тока  $i_d$  АИР; напряжения  $u_H$  на нагрузке; аварийных токов  $i_{VS1}, i_{VS2}$  М1, тока  $i_{M2}$  М2; тока  $i_H$  нагрузки; аварийного тока  $i_{M1}$  М1; токов  $i_{M3}, i_{M4}$  М3, М4; напряжения  $u_{VS2}$  при срыве работы VS2 М1. Для всех



приведенных диаграмм момент срыва работы VS2 M1 выбран, как было показано выше, при включении очередных тиристоров VS1,3 M1 и обозначен  $t_{ср}$ . Как видно на диаграммах, для всех рассматриваемых схем АИР характерны: относительно медленное развитие аварийного процесса ( $i_{\phi}$ ,  $i_{M1}$  рис. 7–12), влияние токов других мостов на аварийный ток тиристоров VS1,2 M1 ( $i_{M2}$ ,  $i_{M(3,4)}$  рис. 7, 8;  $i_{M2}$ ,  $i_{M(3,4)}$  рис. 9, 10;  $i_{M2}$ ,  $i_{M(3,4)}$  рис. 11, 12), влияние токов  $i_1$ ,  $i_2$  перезаряда коммутирующего конденсатора Ск на аварийные токи  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$  моста M1, значительное отличие амплитуды и крутизны нарастания  $di_{ab}/dt$  аварийного тока через VS1, VS2 в начале развития аварийного процесса, исключение влияния срыва работы M1 на возникновение и развитие аварийного процесса в остальных мостах АИР ( $i_{M2}$ ,  $i_{M3}$ ,  $i_{M4}$  рис. 7–12).

Следует отметить, что амплитуда и крутизна аварийных токов  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$  M1 на начальном этапе  $\tau_{H3} = (0,25-0,3)T_H$ , где  $T_H = 1/f_H$  зависит и от схемы АИР. Так, отношения амплитудных значений ( $i_{VS1})_m$  к ( $i_{VS2})_m$  для схем по рис. 2а, б и рис. 3 составляют 2:1; 2,8:1; 4,3:1, а отношения отдельно токов ( $i_{VS1})_m$ , ( $i_{VS2})_m$  для указанных схем АИР составляют соответственно 1,42:1,14:1 и 3:1,7:1. Разница значений токов  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$  на этапе  $\tau_{H3}$  определяется значительным влиянием (вычитанием) тока  $i_2$  (рис. 2а, б; рис. 3) перезаряда Ск через VS3 M1 из аварийного тока VS2,

а ток перезаряда Ск через VD4 складывается с аварийным током  $i_{VS1}$ . Влияние токов других мостов, как видно из диаграмм, зависит от схем АИР, отражается на значениях аварийных токов  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$ , спадая до нуля по мере продолжения аварийного процесса. Анализ полученных результатов показывает, что относительно низкая скорость развития аварийного процесса в рассматриваемых АИР позволяет эффективно и надежно защитить СПП ВП и АИР при срывах инвертирования, что подтверждается опытом их эксплуатации. Наиболее предпочтительным, как видно из диаграмм (рис. 11, 12), является использование АИР (рис. 3) с умножением выходного напряжения. Так, даже при весьма низком быстродействии СЗ, например,  $t_{C3} = 0,5$  мс, амплитудные значения аварийных токов  $i_{VS1}$  и особенно  $i_{VS2}$  находятся ниже параметров допустимой рабочей перегрузки. Более детальный анализ полученных результатов применительно к каждой из схем может быть приведен в последующих работах.

**Выводы**

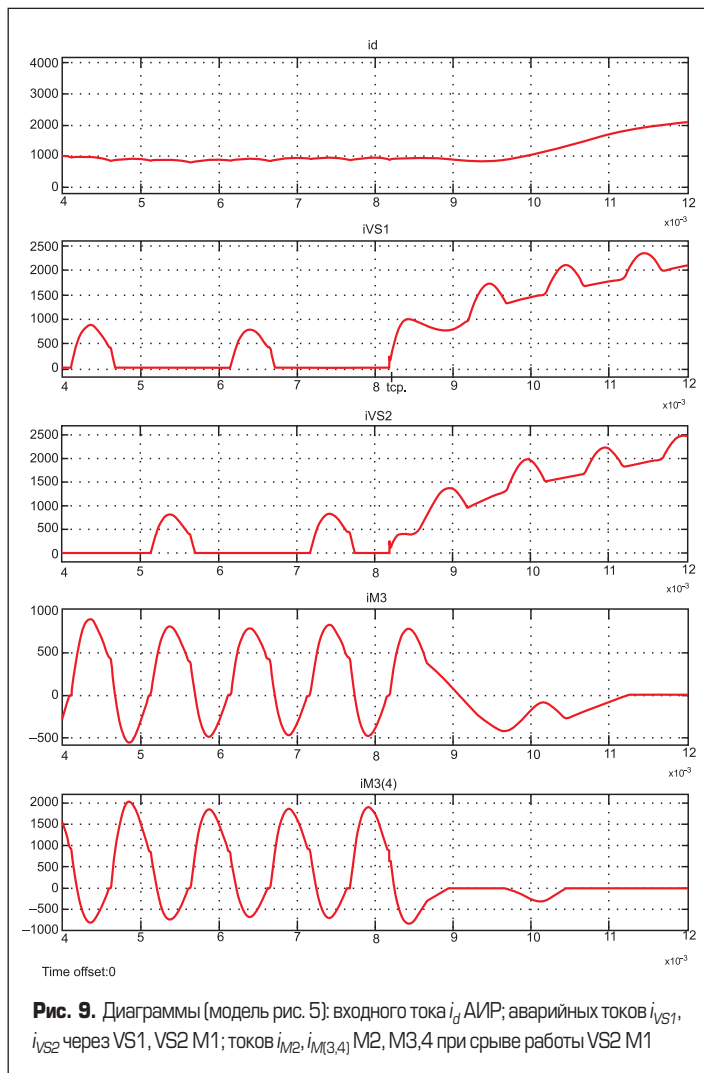
1. Рассмотрены характерные аварийные режимы для схем АИР большой мощности с закрытым входом, удвоением или умножением выходного напряжения; сформулированы главные требования к СЗ ТПЧ

с АИР; приведена обобщенная структурная схема СЗ; выделены этапы разработки СЗ; показано, что одним из важных моментов является анализ основных аварийных процессов.

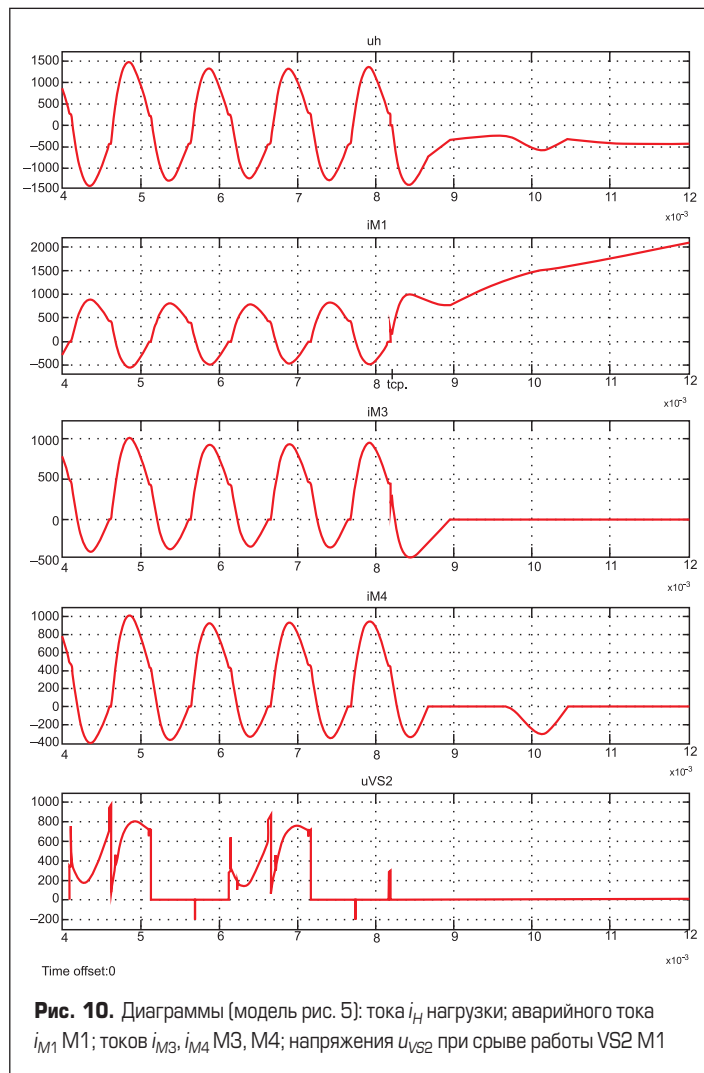
2. Выполнено схмотехническое моделирование аварийного процесса срыва инвертирования в АИР с закрытым входом, удвоением или умножением выходного напряжения; получены временные зависимости аварийных токов через тиристоры АИР и выпрямителя, на основе которых рассчитаны соотношения аварийных токов через тиристоры для различных схем АИР; показана устойчивость рассмотренных схем АИР к развитию аварийных процессов.

**Литература**

1. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // СТА. 2004. № 2.
2. Староверов К. Наследие IR: тиристоры // Новости электроники. 2008. № 12.
3. Винтрих А., Колпаков А. Trench4 — универсальная технология IGBT // Силовая электроника. 2009. № 3.
4. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Чибиркин В., Колюхов А., Веселова И., Сурма А. Разработка мощных фототири-



**Рис. 9.** Диаграммы (модель рис. 5): входного тока  $i_d$  АИП; аварийных токов  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$  через VS1, VS2 M1; токов  $i_{M2}$ ,  $i_{M3,4}$  M2, M3,4 при срыве работы VS2 M1



**Рис. 10.** Диаграммы (модель рис. 5): тока  $i_n$  нагрузки; аварийного тока  $i_{M1}$  M1; токов  $i_{M3}$ ,  $i_{M4}$  M3, M4; напряжения  $u_{VS2}$  при срыве работы VS2 M1

сторов с функциями защиты // Силовая электроника. 2009. № 5.

5. Пржибилла Дж., Келлер Р., Кельнер У., Шульце Х.-Я., Нидерностхайдере Ф.-Я., Пеппель Т. Тиристоры с оптическим управлением для импульсной энергетики / Пер. Бербенец А. // Силовая электроника. 2009. № 5.
6. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства. Уч. пособие. Уфа: УГАТУ. 2009.
7. Кацнельсон С. М. Тиристорные умножители частоты. Уч. пособие. Уфа: УАИ. 1978.
8. Кацнельсон С. М. Стабилизация напряжения и эффективность использования тиристоров в умножителях частоты. Уч. пособие. Уфа: УАИ. 1979.
9. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 3.
10. Пат. № 669459 (РФ) Автономный инвертор / И. Л. Аитов // Бюл. 1979. № 23.
11. А.с. № 936297 (СССР) Последовательный автономный инвертор / И. Л. Аитов // Бюл. 1982. № 22.
12. Пат. № 1568216 (РФ) Генератор импульсов для электроэрозионной обработки / И. Л. Аитов // Бюл. 1990. № 20.
13. Пат. № 18245 (UA) Автономный инвертор / Б. В. Лупкин, И. Л. Аитов, Р. З. Самигуллин // Бюл. 2006. № 11.
14. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
15. Слухоцкий А. Е., Немков В. С., Павлов Н. А., Бамунэр А. В. Установки индукционного нагрева. Уч. пособие для вузов. / Под ред. А. Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат. 1981.
16. Аитов И. Л. Исследование тиристорных многоместовых преобразователей повышенной частоты с фазовым регулированием мощности: Дис. канд. техн. наук. Уфа, 1974.
17. Аитов И. Л., Кацнельсон С. М. Автономные преобразователи частоты. Уч. Пособие. Уфа: УАИ. 1978.
18. Горбатков С. А., Аитов И. Л., Бадамшин Р. А. Автоматическое регулирование режима индукционного нагрева заготовок // Промышленная энергетика. 1978. № 2.
19. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Система гарантированного питания для электротехнологических установок // Электричество. 1988. № 4.
20. Кацнельсон С. М., Шилов А. К., Аитов И. Л. Исследование на АВМ переходных и установившихся процессов в тиристорном инверторе. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. Сб. трудов УАИ. Уфа: УАИ. 1972. Вып. 39.
21. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Вопросы управления агрегатами бесперебойного питания технологических установок. Методы и средства управления технологическими процессами / Сб. трудов 2-ой международной научной конференции. Саранск. 1977.
22. Аитов И. Л. Регулируемый многоместовой автономный инвертор с повышенным выходным напряжением. Разработка и промышленное применение полупроводниковых преобразователей частоты в машиностроении / Тезисы докладов на Всесоюзной научно-технической конференции. Уфа. 1977.
23. А.с. №1421232 (СССР) Тиристорный генератор импульсов для электроэрозионной обработки / И. Л. Аитов, Р. М. Нигматзянов // Госреестр изобретений, 10.11.1986.
24. А.с. №1552983 (СССР) Генератор импульсов / И. Л. Аитов // Госреестр изобретений, 01.06.1988.
25. А.с. №1173525 (СССР) Генератор униполярных импульсов тока / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов, Б. Б. Костенко, В. П. Рожнов // Бюл. 1985. № 30.
26. Ланцов В., Эраносян С. Надежность силовых устройств в России: мифы и реалии,

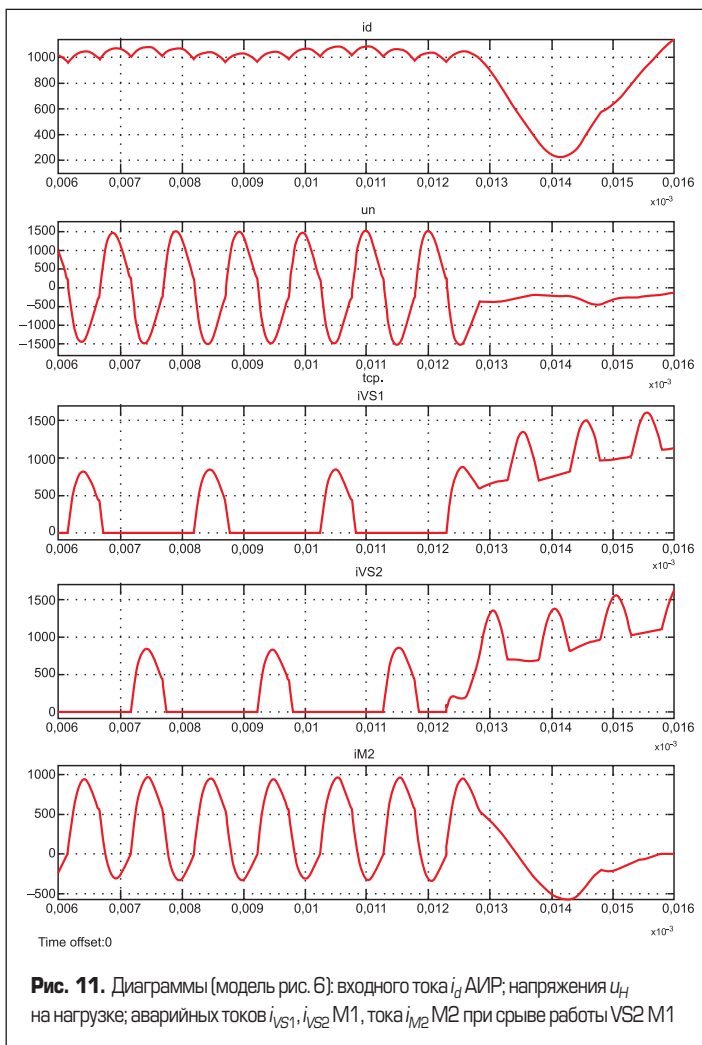


Рис. 11. Диаграммы (модель рис. 6): входного тока  $i_d$  АИР; напряжения  $u_H$  на нагрузке; аварийных токов  $i_{VS1}$ ,  $i_{VS2}$  M1, тока  $i_{M2}$  M2 при срыве работы VS2 M1

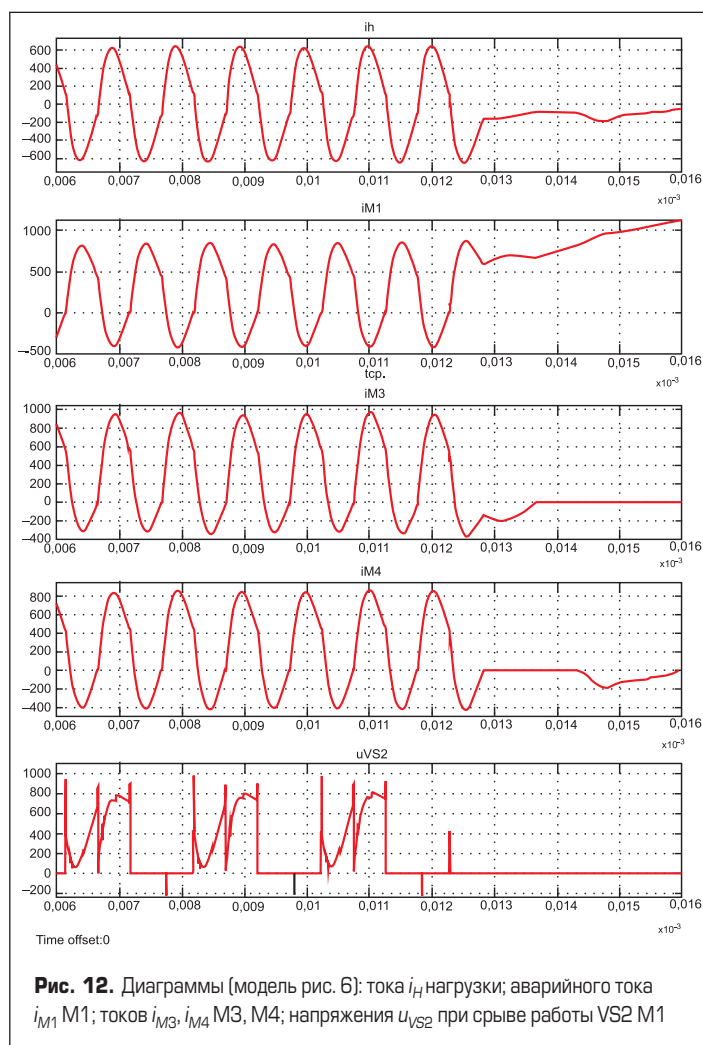


Рис. 12. Диаграммы (модель рис. 6): тока  $i_H$  нагрузки; аварийного тока  $i_{M1}$  M1; токов  $i_{M3}$ ,  $i_{M4}$  M3, M4; напряжения  $u_{VS2}$  при срыве работы VS2 M1

проблемы и пути решения. Часть 1,2,3 // Силовая электроника. 2008. № 3–4. 2009. № 1.

27. Глух Е. М., Зеленев В. Е., Шпиленок А. М. Емкостное гашение инвертора // Электротехника. 1969. № 6.

28. Минеев В. А. Исследование систем управления и защиты тиристорных преобразователей частоты: Дис. канд. техн. наук. Свердловск, 1969.

29. Глух Е. М., Зеленев В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергия. 1970; 2-ое изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат. 1982.

30. Могилевский Г. В., Райнин В. Е., Гребенник В. И. Полупроводниковые аппараты защиты. М.: Энергия. 1980.

31. Намиотков К. К., Ильина Н. А., Шкловский И. Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. М.: Энергоатомиздат. 1988.

32. А.с. №208094 (СССР) Устройство дифференциальной защиты преобразователей / Е. М. Глух, В. Е. Зеленев, М. Н. Канашев // Бюл. 1968. № 3.

33. А.с. №318130 (СССР) Высоковольтный автономный инвертор / С. М. Кацнельсон, И. Л. Аитов, Л. И. Гутин, В. В. Морозов, М. В. Перасов, В. М. Филатов, Л. С. Пудровский // Бюл. 1971. № 31.

34. Аитов И. Л. Защита тиристорного преобразователя частоты при аварийных режимах. Тиристорные преобразователи частоты

для индукционного нагрева металлов. Уфа: УАИ. 1972. Вып. 39.

35. А.с. №520661 (СССР) Устройство защиты мостового тиристорного преобразователя от внешних и внутренних коротких замыканий / И. Л. Аитов // Бюл. 1976. № 25.

36. Аитов И. Л., Воробьев Ю. В. Экспериментальное исследование быстродействующих датчиков сквозного срыва инвертирования и помех, возникающих в них. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. Уфа: УАИ. 1976. Вып. 91.

37. Аитов И. Л. Системы управления и защиты автономных преобразователей частоты. Уч. пособие. Уфа: УАИ. 1979.

38. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Гайнанов Д. А. Оценка и пути повышения надежности тиристорных преобразователей частоты. Преобразовательная техника. Новосибирск: НЭТИ. 1980.

39. А.с. №836719 (СССР) Устройство для защиты мостового тиристорного преобразователя / И. Л. Аитов // Бюл. 1981. № 21.

40. А.с. №879698 (СССР) Устройство для защиты тиристорного преобразователя / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов // Бюл. 1981. № 41.

41. А.с. №936199 (СССР) Способ защиты инвертора / И. Л. Аитов // Бюл. 1982. № 22.

42. Пат. № 974523 (РФ) Преобразователь частоты / И. Л. Аитов // Бюл. 1982. № 42.

43. А.с. №1261068 (СССР) Преобразователь частоты с защитой / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов, Р. А. Габбасов // Бюл. 1986. № 36.

44. А.с. №877709 (СССР) Источник бесперебойного питания / И. Л. Аитов, Д. А. Гайнанов, Ф. Х. Кутдусов // Бюл. 1991. № 40.

45. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Сахаров Ю. В. Силовые полупроводниковые приборы (справочник). М.: Энергия. 1975.

46. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Анализ аварийного процесса при срыве режима инвертирования в многомостовых резонансных инверторах с индуктивным входом // Электромеханика. 1984. № 5.

47. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Хомяков И. М. Вопросы управления резервированными системами питания повышенной частоты // Электромеханика. 1986. № 9.

48. Аитов И., Кушекова Э. Повышение надежности тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2009. № 1.

49. Аитов И., Кушекова Э. Вопросы предпускового контроля резервированных тиристорных преобразователей частоты // Силовая электроника. 2009. № 3.

50. Пат. № 2365023 (РФ) Высоковольтный автономный инвертор / И. Л. Аитов, Р. И. Зиннатуллин // Бюл. 2009. № 23.