

Продолжение. Начало в №1/2010

Система аварийной защиты

тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 3

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Галина Шалупова

gshalupova@yandex.ru

В статье изложены результаты анализа и характерные особенности аварийных процессов, приводятся общие выражения для аварийных токов в тиристорных преобразователях частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР) для электротехнологических установок (ЭТУ), сформулированы требования к датчикам аварийного состояния и рассмотрены вопросы использования быстродействующих дифференциальных датчиков тока. Описано моделирование в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink процесса ликвидации аварийного режима с использованием тиристорно-конденсаторного выключателя (ТКВ) в ТПЧ с АИР удвоением частоты и открытым входом.

В настоящее время широкое применение ТПЧ с АИР, особенно большой мощности, для питания современных ЭТУ, в том числе с использованием прогрессивных технологических процессов (ТП), не терпящих перерыва питания, связано как с экономическими показателями, так и с реализуемыми функциональными и техническими возможностями [1–3]. Промышленное применение ТПЧ с АИР для питания указанных ЭТУ требует обеспечения повышенной надежности в случаях возникновения в них аварийных режимов и отказов, так как они ведут к значительным экономическим, экологическим потерям и даже к опасным ситуациям. Авторами в [3–8] определены и рассмотрены методы и средства повышения (обеспечения) надежности, определяющие совокупность таких свойств, как: безотказность, живучесть, безопасность и ремонтпригодность ТПЧ с АИР. Следует отметить, что при возникновении аварийных режимов в ТПЧ с АИР для питания современных ЭТУ важными требованиями и основными методами и средствами обеспечения указанных свойств надежности являются:

- эффективное ограничение аварийных токов через силовые полупроводниковые приборы (СПП) ТПЧ и коммутационных перенапряжений наряду с использованием быстродействующих датчиков и устройств отключения источника питания АИР;
- применение резервирования силовых ячеек (мостов) АИР наряду с использованием быстродействующих датчиков и устройств отключения аварийного моста, а также переключения работы АИР на резервный.

Вопросы построения резервированных ТПЧ с АИР для питания различных ЭТУ, а также алгоритмы и си-

стемы управления ими рассмотрены авторами в [2, 3, 6, 9–15]. Одним из условий практической реализации требований, выбора методов и средств обеспечения надежности ТПЧ с АИР является анализ аварийных процессов, позволяющий выявить специфические особенности и характер протекания их в ТПЧ с различными группами схем АИР, получить необходимые временные зависимости изменения амплитуды и длительности протекания аварийных токов через СПП выпрямителя и АИР. На основе полученных результатов осуществляется выбор методов и средств ограничения аварийных токов через СПП, разработка системы быстродействующей защиты и алгоритма ее работы.

Результаты исследований аварийного процесса срыва инвертирования в ТПЧ с различными схемами двух групп АИР (закрытым и открытым входами) приведены в [16, 17]. Анализ результатов показывает, что для данных групп мостовых АИР с удвоением частоты и встречными диодами при срыве инвертирования наиболее характерны:

- возникновение в колебательном контуре аварийного моста (для всех рассмотренных схем обеих групп АИР) затухающих синусоидальных колебаний, например, $i_{СК}$ — рис. 8, 9, 11 из [17];
- протекание через тиристоры аварийного моста (для обеих групп АИР) затухающего колебательного (выпрямленного) тока другого синфазного управляемого моста, подключенного к аварийному непосредственно и параллельно, например, i_{M2} — рис. 7 из [16]; i_{M2} — рис. 11 из [17];
- протекание (на начальном этапе аварии) через тиристоры аварийного моста (в схемах АИР с открытым входом, непосредственно — с параллельным соединением синфазно управляемых мостов) суммарного значения тока, определяемого входным током АИР, затухающими колебательными токами (выпрямленными) других мостов и разрядного тока разделительного конденсатора;
- возможность без перегрузки тиристоров по току и при допустимой рабочей перегрузке по току диодов (тиристоров) выпрямителя отключения АИР с открытым входом при использовании устройства ускоренного перезаряда (УП) разделительного конденсатора, например, $i_d, i_{VS1}, i_{VS2}, u_{VSS}$ — рис. 12, 13 из [17];
- относительное снижение на начальном этапе аварийного процесса скорости нарастания и величина

ны токов через выпрямитель и тиристоры аварийного моста в схемах АИР с закрытым входом и раздельным включением через входные дроссели двух групп мостов, работающих синфазно, например, $i_{\phi}, i_{VS1}, i_{VS2}, i_{M1}$ — рис. 9, 10 из [16];

- значительный спад тока через выпрямитель и относительно низкая скорость нарастания тока через аварийный мост на начальном этапе развития аварийного процесса в схемах АИР с закрытым входом и умножением выходного напряжения, например, i_{ϕ}, i_{M1} — рис. 11, 12 из [16].

Следует отметить, что две последние из приведенных особенностей характерны только для группы схем АИР с закрытым входом и раздельным (через входные дроссели) включением групп мостов. В таких АИР на начальном этапе аварийного процесса образуются контуры сброса энергии колебательных контуров через соответствующие входные дроссели и встречные диоды других мостов, как это видно на приведенных в [16] рис. 26 и 3; 9 и 10 ($i_{M2}, i_{M(3,4)}$); 11 и 12 (i_{M2}, i_{M3}, i_{M4}).

Результаты, полученные в [16, 17], и установленные характерные особенности протекания аварийного процесса срыва инвертирования позволяют определить все составляющие и записать общие выражения для аварийных токов через тиристоры для рассмотренных схем обеих групп АИР. Частично эти вопросы были затронуты в [17]. Так, при срыве инвертирования в АИР через силовые вентили выпрямителя протекает аварийный ток:

$$i_{BII}(t) = i_{d0} + i_{\phi} = I_{d0} \times e^{-(r_{K3}/L_d)t} + \frac{U_d}{r_{K3}} (1 - e^{-(r_{K3}/L_d)t}), \quad (1)$$

где I_{d0} , U_d — входной ток и входное напряжение АИР в момент наступления аварийного процесса; L_d — индуктивность цепи короткого замыкания (КЗ), определяемая в основном индуктивностью входного дросселя; r_{K3} — активное сопротивление цепи КЗ, определяемое как $r_{K3} = r_c + r_{Ld} + r_{СПП}$, причем r_c — сопротивление питающей сети, r_{Ld} — входного дросселя, $r_{СПП}$ — суммарное значение сопротивлений силовых вентилях выпрямителя и АИР, через которые протекает $i_{BII}(t)$. При этом через тиристоры (VS1, VS2) однофазного АИР с открытым входом будут протекать соответственно токи $i_{VS1}(t)$, $i_{VS2}(t)$, определяемые по выражениям:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t) \pm i_{CK}(t); \\ i_{VS2}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t) \mp i_{CK}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $i_{ap}(t)$ и $i_{CK}(t)$ — токи аварийного разряда разделительного конденсатора C_p и затухающих колебаний, возникающих в цепи коммутирующего контура моста АИР соответственно, причем ток $i_{CK}(t)$ в первый и далее в нечетные полупериоды после срыва инвертирования замыкается через VS1 и суммируется в $i_{VS1}(t)$, а в четные — через VS2 и суммируется в $i_{VS2}(t)$, что видно из временных диа-

грамм $i_{\phi}, i_{VS1}, i_{VS2}, i_{CK}, i_n$ (рис. 8, 9 [17]). Знак « \pm » в выражениях (2) для $i_{VS1}(t)$ и $i_{VS2}(t)$ означает, что в определенные полупериоды колебаний ток $i_{CK}(t)$ через данный тиристор не протекает, т. е. $i_{CK}(t) = 0$. Наибольшее влияние i_{ap} оказывает при малых значениях нагрузки. Так, при $R_n \approx 0$ для $i_{ap}(t)$ получим:

$$\begin{aligned} i_{ap}(t) &= \frac{U_d}{\omega_p L_3} \sin \omega_p t - I_{d0} \cos \omega_p t; \\ I_{apm} &= U_d / \rho_p; \\ \rho_p &= \sqrt{L_3 / C_p}; \rho_p = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_p}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_p , ρ_p , I_{apm} — частота, волновое сопротивление и амплитуда тока колебательного контура разряда конденсатора C_p . Для АИР с открытым входом и непосредственным параллельным подключением мостов общие выражения для аварийных токов с момента t_{cp} (срыва инвертирования) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t) \pm i_{CK}(t) + \\ &+ (n-1) \times i_M(t-T/2); \\ i_{VS2}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t) \mp i_{CK}(t) + \\ &+ (n-1) \times i_M(t-T/2), \end{aligned} \quad (4)$$

где T , n — соответственно период собственных колебаний и общее число мостов АИР, что видно из временных диаграмм $i_{M2}, i_{\phi}, i_{VS1}, i_{VS2}, i_{CK}$ (рис. 11 [17]). В результате на начальном этапе (τ_{H3} , первый полупериод) развития аварийного процесса выражение (4) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t) + i_{CK}(t); \\ i_{VS2}(t) &= i_{BII}(t) + i_{ap}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Раздельное включение мостов с использованием индивидуальных входных дросселей L_{d1} , L_{d2} , защитных индуктивностей L_{31} , L_{32} и разделительных конденсаторов C_{p1} , C_{p2} позволяет ограничить составляющую $i_{ap}(t)$, а также исключить из аварийного тока тиристоров составляющую $i_M(t-T/2)$, за исключением однократного протекания ее через VS2 при включении встречных диодов моста M2, что видно на диаграммах i_{VS2}, i_{M2}, i_{VS1} (рис. 10 [17]). Схемное ограничение аварийного тока через тиристоры с использованием устройства УП ускоренного перезаряда C_p позволяет — при относительно высоком быстродействии датчиков ($t_{ДТ}$) срыва инвертирования — исключить повреждение тиристоров АИР и ВП с медленным спадом тока i_d до нуля, что видно из диаграмм $i_{VS1}, i_{VS2}, i_{M2}, i_d$ и др. (рис. 12, 13 [17]). Эффективность действия УП в схемах АИР с открытым входом определяется временами задержки датчика $t_{ДТ}$ и перехвата $t_{П}$ аварийного тока, частотой $\omega_{УП}$ и волновым сопротивлением $r_{УП}$ контура ускоренного перезаряда [18]. Включение в УП дополнительного конденсатора C_1 позволяет облегчить выбор требуемых параметров контура перезаряда, исключить образование цепи КЗ выпрямителя

при повреждениях тиристора VS5 и тем самым повысить надежность ТПЧ с АИР (рис. 3, 13 [17]).

Для схемы АИР с закрытым входом (рис. 2а, рис. 7 [16]) для аварийных токов через тиристоры получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} \pm i_{CK}(t) + i_{M2}(t-T/2); \\ i_{VS2}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} \mp i_{CK}(t) + i_{M2}(t-T/2), \end{aligned} \quad (6)$$

где T , i_{M2} — период собственных колебаний коммутирующего контура и ток через встречные диоды моста M2. При общем четном числе мостов АИР, равном $n > 2$, выражение (6) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{n/2-1} \pm i_{CK}(t) + \\ &+ (n/2-1) \times i_{M2}(t-T/2); \\ i_{VS2}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{n/2-1} \mp i_{CK}(t) + \\ &+ (n/2-1) \times i_{M2}(t-T/2). \end{aligned} \quad (7)$$

Для схем АИР с закрытым входом (рис. 2б, рис. 9, 10 [16]) выражения для аварийных токов через тиристоры имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} \pm i_{CK}(t); \\ i_{VS2}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} \mp i_{CK}(t). \end{aligned} \quad (8)$$

В схемах АИР с закрытым входом и умножением выходного напряжения (рис. 3, рис. 11, 12 [16]) аварийные токи через тиристоры в первый полупериод после срыва инвертирования не превышают расчетного амплитудного значения, а образование контуров протекания колебательного тока через соответствующие мосты и входные дроссели позволяет значительно снизить ток через выпрямитель. При этом получим, что

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} \pm i_{CK}(t); \\ i_{VS2}(t) &= \frac{i_{BII}(t)}{2} - i_{VD}(t) \mp i_{CK}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $i_{VD}(t)$ — ток через встречные диоды моста АИР (M2).

Анализ аварийных процессов, а также опыт эксплуатации ТПЧ с АИР для питания различных ЭТУ, особенно не терпящих перерыва питания, показывает, что реализация систем, обеспечивающих отключение (переключение на резервное питание) ТПЧ при аварийных режимах без повреждений СПП, предъявляет высокие требования к таким основным элементам этих систем, как датчики (ДТ) аварийного режима и тиристорно-конденсаторные выключатели (ТКВ). К ДТ аварийного состояния предъявляются следующие требования: высокое быстродействие и простота, селективность и помехоустойчивость, универсальность, потенциальная развязка цепей ДТ от силовой цепи ТПЧ, отсутствие дополни-

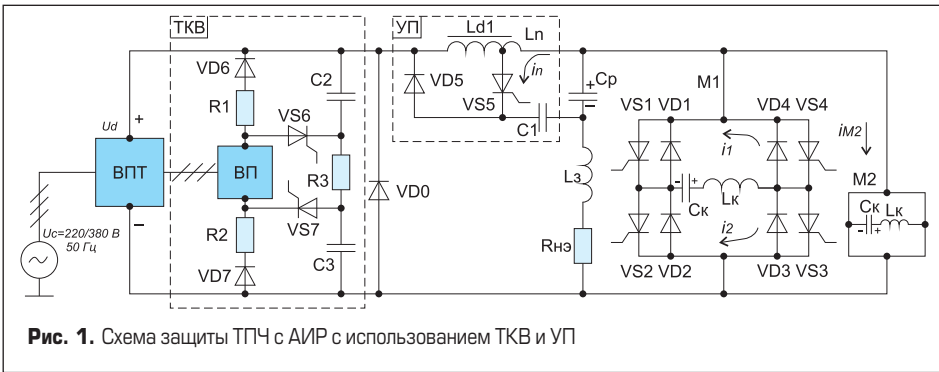


Рис. 1. Схема защиты ТПЧ с АИР с использованием ТКВ и УП

тельных источников питания и др. Наиболее полно удовлетворяют всем этим требованиям дифференциальные датчики тока (ДТТ), выполненные на тороидальных сердечниках и позволяющие получить сигнал практически в самом начале аварийного процесса. Результаты экспериментальных исследований таких ДТТ различных конструкций показали неоспоримые их преимущества — высокое быстродействие ($\tau_s \leq 15$ мкс), универсальность (определение срыва инвертирования, пробоя тиристоров, встречных диодов, КЗ шин «+» или «-» на землю, пробоя нулевого диода,

неравномерности загрузки мостов АИР при параллельном их соединении и др.), потенциальная развязка от силовой цепи и отсутствие дополнительных источников питания [19]. Тиристорно-конденсаторные выключатели (ТКВ) являются наиболее быстродействующими, широко используются в системах защиты различных силовых электронных устройств, в том числе в ТПЧ с АИР [2, 3, 8, 20, 21]. Рассмотрим процесс отключения в ТПЧ с АИР открытым входом с использованием ТКВ и УП (рис. 1) при срыве инвертирования, где: ВПТ — тиристорный выпрямитель для

питания АИР, состоящего из инверторных мостов М1,2, разделительного конденсатора C_p , защитной индуктивности L_3 и эквивалентной нагрузки $R_{HЭ}$; ВП — выпрямитель диодный для предварительного заряда коммутующих конденсаторов C_2, C_3 ТКВ и C_p . Кроме того, ТКВ состоит из тиристоров VS6,7, зарядных резисторов R1,2,3 и диодов VD6,7 для исключения разряда $C_2 (C_3)$ при запаривании ВПТ.

Схема УП состоит из тиристора VS5, подключенного к отпайке L_n входного дросселя L_{d1} , диода VD5 и дополнительного конденсатора C_1 . Рассматриваемая схема ТКВ позволяет практически мгновенно по сигналам ДТ аварийного состояния отключить ВПТ при срыве инвертирования, пробое тиристоров (диодов) в М1,2, пробое VD0 и КЗ шин питания (+), (-) или нагрузки на землю. При этом заряд конденсаторов $C_{2,3}$ осуществляется до напряжения $U_{C1} = U_{C2} = U_{d/2}$. Возможны варианты выполнения схем ТКВ с зарядом коммутующих конденсаторов от основного источника питания до $U_{C1,2} = U_d$ или $U_{C1,2} = 2U_d$. Для исследования процессов в ТПЧ с АИР (рис. 1) при ликвидации аварийного режима срыва инвертирования с использованием ТКВ (УП) в системе MATLAB с помощью пакета Simulink была разработана обобщенная модель, которая приведена на рис. 2, где обозначения блоков и элементов в модели идентичны обозначениям на рис. 1. В модели приведены также блоки управления (СУ), контроля и измерения параметров (токов, напряжений, времени), приняты реальные значения СПП, активных сопротивлений L_k, L_s, L_n, L_{d1} , питающей сети, а также нагрузки $R_{HЭ} = 0,5$ Ом при $P_n = 125$ кВт, $f_n = 2500$ Гц. Параметры элементов ТПЧ и мостов АИР имеют следующие значения: $L_{d1} = 1,2$ мГн, $L_n = 6$ мкГн, $C_1 = 300$ мкФ, $L_{k0} = 82$ мкГн, $L_k = 57,4$ мкГн, $L_3 = 24,6$ мкГн, $C_{k0} = 42,35$ мкФ, $C_k = 52,9$ мкФ, $C_p = 500$ мкФ, $\rho_0(M1,2) = 1,4$ Ом, $f_0 = 2700$ Гц.

Применение УП без использования КВК VD0 позволяет ограничить аварийные токи через тиристоры АИР, а также ликвидировать аварийный режим в ТПЧ без отключения источника питания (рис. 12, 13, i_{VS1}, i_{VS2}, i_d и др. из [17]). Однако это приводит к перегрузке СПП ВП, а в случаях пробоя тиристоров (диодов) АИР и к повторному развитию аварийного процесса. В этой связи на модели (рис. 2) был исследован процесс ликвидации аварийного режима срыва инвертирования в ТПЧ с АИР (рис. 1) для двух вариантов выполнения защиты при $t_{DT} = 20$ мкс:

- путем запаривания ВПТ с помощью ТКВ при наличии VD0 и без блокировки импульсов управления M2;
- путем запаривания ВПТ с помощью ТКВ при наличии VD0, с одновременным использованием УП и без блокировки импульсов управления M2.

Рассмотрим далее результаты моделирования процесса ликвидации срыва инвертирования, полученные по соответствующим вариантам на модели по рис. 2. На рис. 3 и 4 (первый вариант) приведены временные диа-

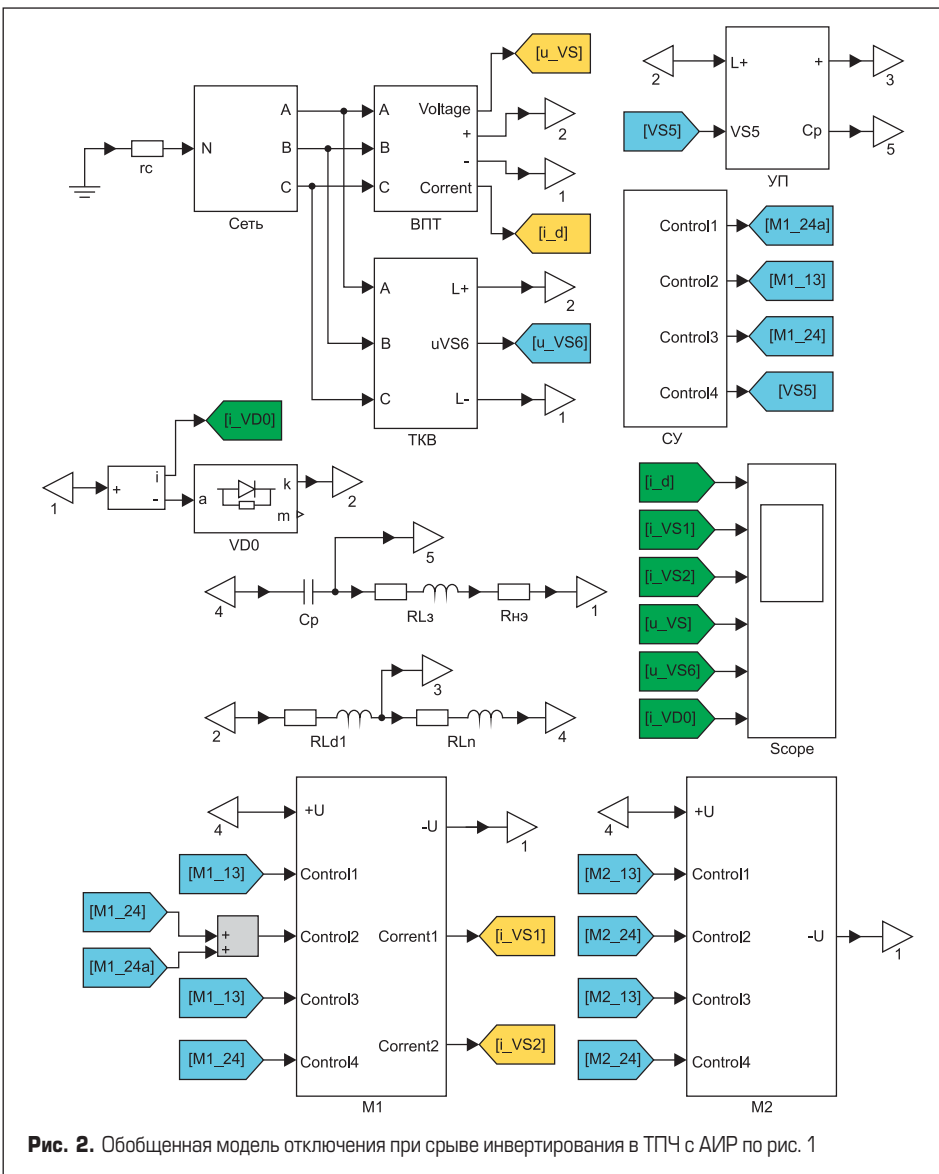


Рис. 2. Обобщенная модель отключения при срыве инвертирования в ТПЧ с АИР по рис. 1

граммы соответственно: входного тока i_d АИР, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2 моста M1; напряжений $u_{VS(BIT)}$ на тиристорах ВПТ и $u_{VS6(TKB)}$ на тиристоре VS6 ТКВ, тока i_{VD0} через диод VD0. На рис. 5 и 6 (второй вариант) приведены соответственно временные диаграммы: тока i_d АИР и токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры M1; напряжений $u_{VS(BIT)}$ на тиристорах ВПТ и $u_{VS6(TKB)}$ на тиристоре VS6 ТКВ; тока i_{VD0} через диод VD0; напряжения $u_{VS5(УП)}$ на тиристоре VS5 УП.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что использование второго варианта отключения позволяет полностью исключить перегрузку тиристоров ВПТ и АИР по току.

Выводы

1. Приведены результаты анализа и характерные особенности аварийного процесса срыва инвертирования в ТПЧ с АИР удвоением частоты, встречными диодами, закрытым и открытым входами, получены общие выражения для аварийных токов через тиристоры АИР и ВПТ.
2. Сформулированы требования к датчикам аварийных режимов, отмечена целесообразность и эффективность использования дифференциальных датчиков тока для

определения начала аварийных процессов в ТПЧ с АИР.

3. Выполнено схемотехническое моделирование процесса отключения ТПЧ с АИР открытым входом при срыве инвертирования, получены временные зависимости аварийных токов через тиристоры АИР и ВПТ при различных вариантах отключения; отмечена высокая эффективность варианта, при котором осуществляется быстрое отключение ВПТ с помощью ТКВ с одновременным ограничением токов через тиристоры АИР с помощью УП без отключения импульсов управления мостов, подключенных параллельно аварийному (M2).

Литература

1. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 3.
2. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ. 2009.
3. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
4. Аитов И., Кушкова Э. Повышение надежности тиристорных преобразователей

- частоты для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2009. № 1.
5. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Гайнанов Д. А. Оценка и пути повышения надежности тиристорных преобразователей частоты. Преобразовательная техника. Новосибирск: Изд-во НЭТИ. 1980.
 6. Аитов И., Кушкова Э. Вопросы предпускового контроля резервированных тиристорных преобразователей частоты // Силовая электроника. 2009. № 3.
 7. Пат. № 2365023 (РФ). Высоковольтный автономный инвертор / И. Л. Аитов, Р. И. Зиннатуллин // Бюл. 2009. № 23.
 8. Аитов И. Л. Системы управления и защиты автономных преобразователей частоты: Учеб. пособие. Уфа: УАИ. 1979.
 9. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Система гарантированного питания для электротехнологических установок // Электричество. 1988. № 4.
 10. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Хомяков И. М. Вопросы управления резервированными системами питания повышенной частоты // Электромеханика. 1986. № 9.
 11. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Вопросы управления агрегатами бесперебойного питания технологических установок: Методы и средства управления технологическими процессами: Сб. трудов 2-й международной научной конференции. Саранск. 1977.

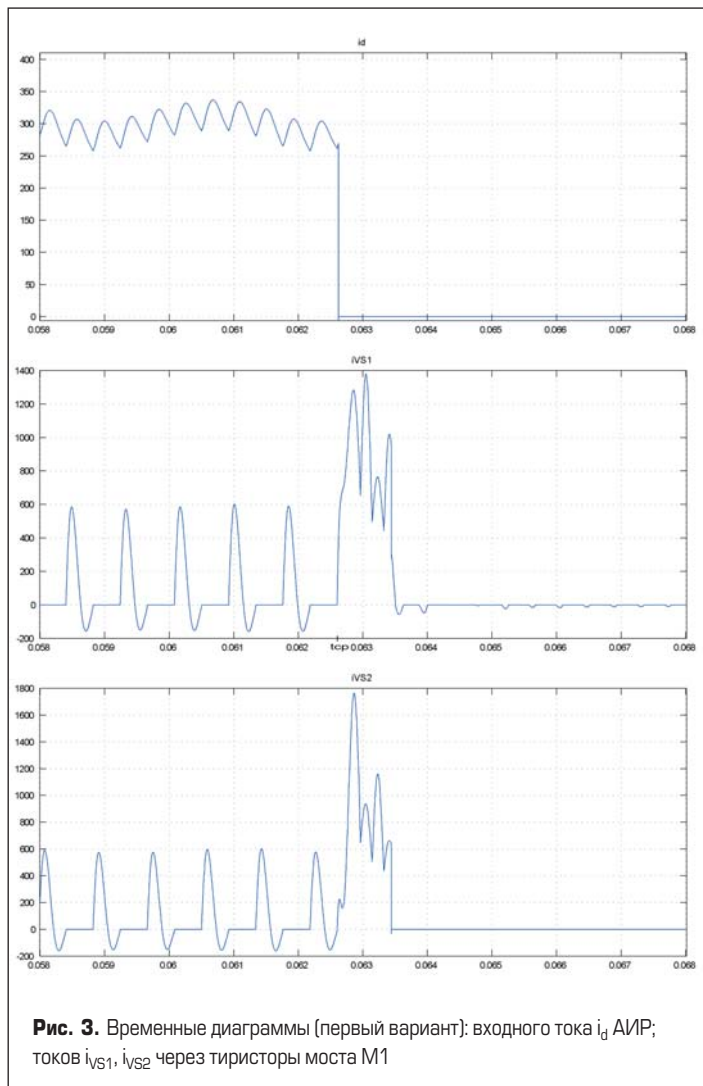


Рис. 3. Временные диаграммы (первый вариант): входного тока i_d АИР; токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры моста M1

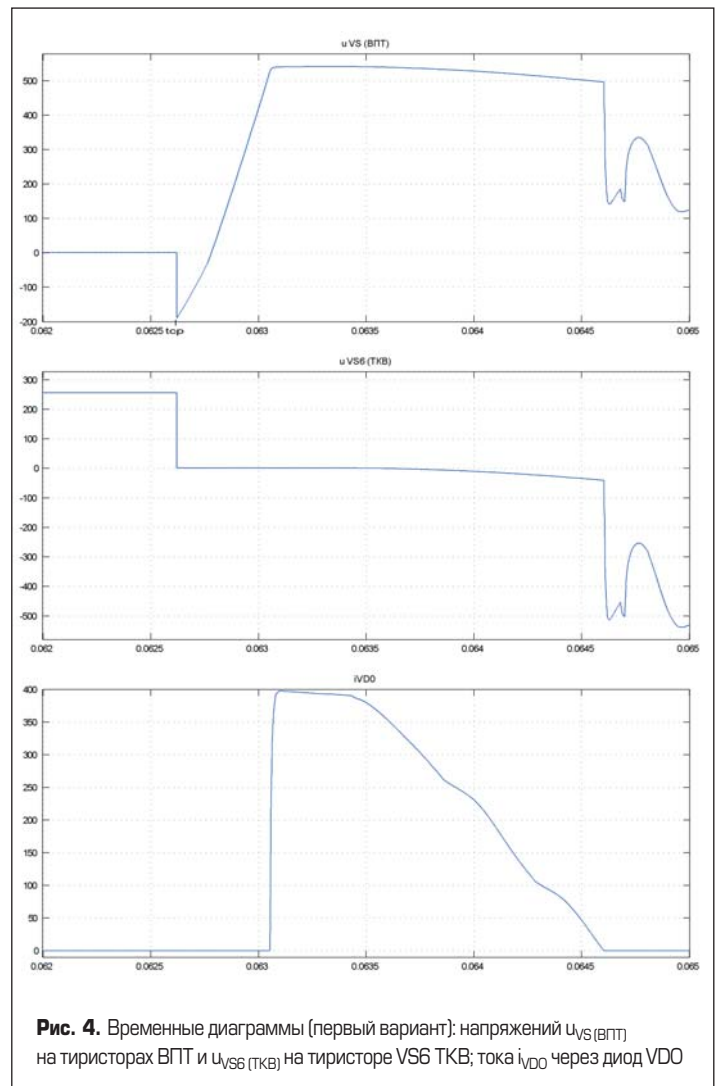
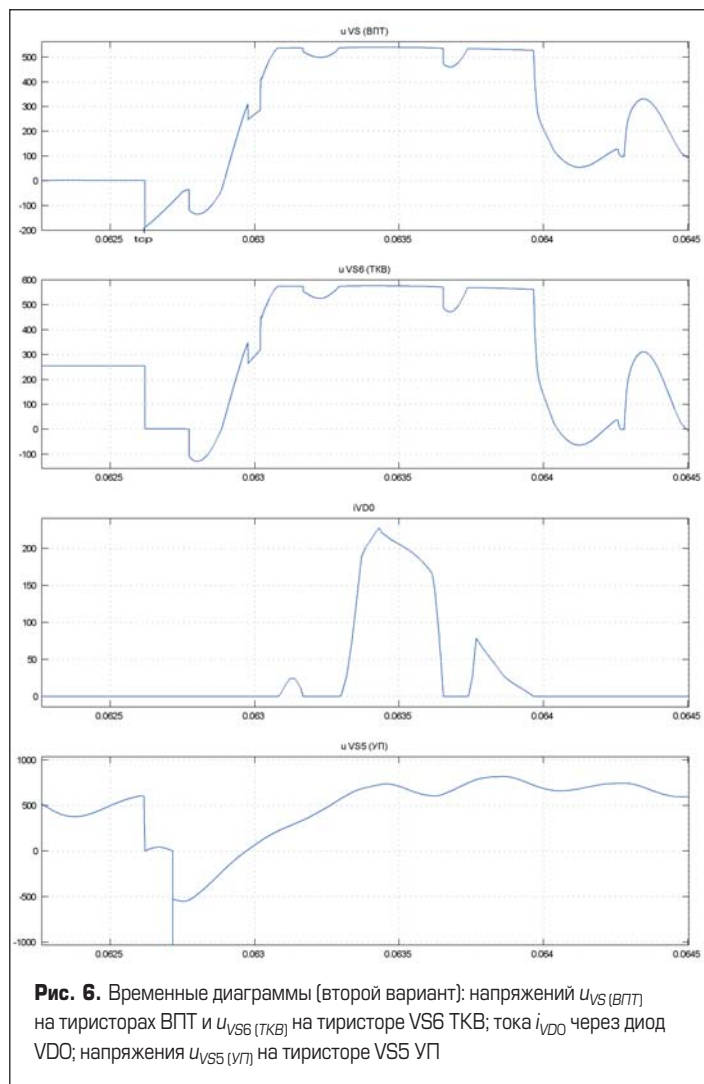
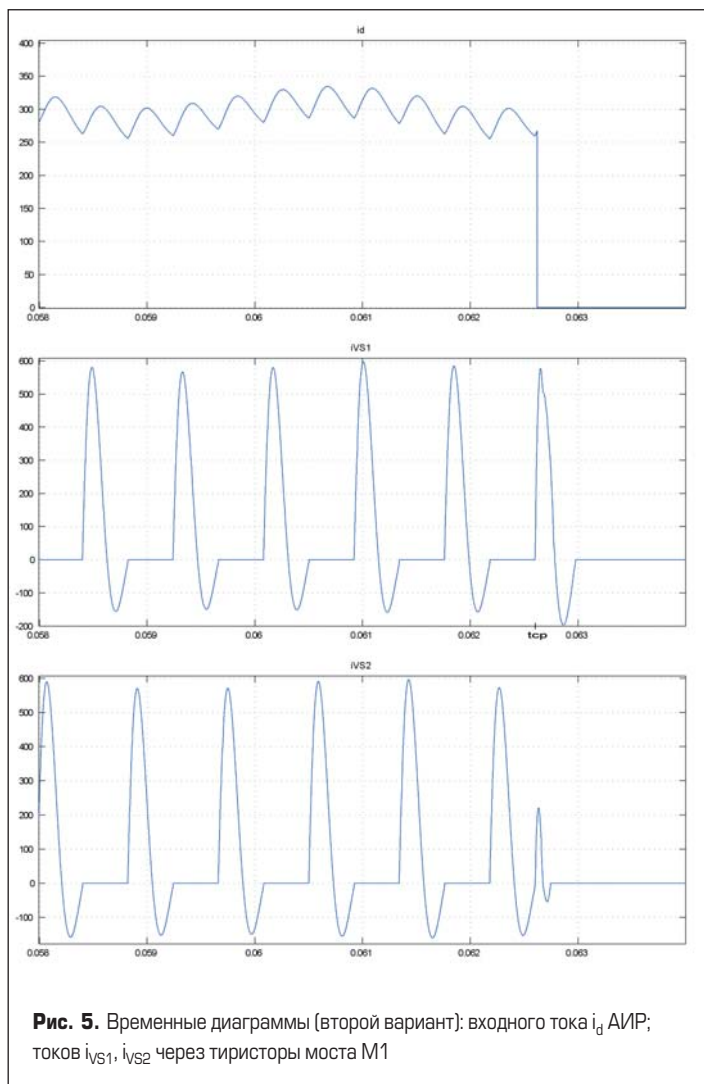


Рис. 4. Временные диаграммы (первый вариант): напряжений $u_{VS(BIT)}$ на тиристорах ВПТ и $u_{VS6(TKB)}$ на тиристоре VS6 ТКВ; тока i_{VD0} через диод VDO



12. А. с. № 877709 (СССР). Источник бесперебойного питания / И. Л. Аитов, Д. А. Гайнанов, Ф. Х. Кутдусов // Бюл. 1991. № 40.
13. А. с. № 1327228 (СССР). Способ управления резервированным резонансным инвертором / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов // Бюл. 1987. № 28.
14. А. с. № 856362 (СССР). Резервированный преобразователь частоты / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов // Зарегистр. в Госреестре изобр. СССР 14.04.1981.
15. А. с. № 1304154 (СССР). Способ управления резервированным резонансным инвертором / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов // Бюл. 1987. № 14.
16. Аитов И. Вопросы построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 1.
17. Аитов И., Шалупова Г. Особенности построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты с автономными резонансными инверторами. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 2.
18. Аитов И. Л. Ограничение аварийного тока в многомостовых тиристорных автономных инверторах с индуктивно-емкостным входом // Электромеханика. 1978. № 5.
19. 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: Изд-во УАИ. 1976. Вып. 91.
20. А. с. № 836719 (СССР). Устройство для защиты мостового тиристорного преобразователя / И. Л. Аитов // Бюлл. 1981. № 21.
21. А. с. № 879698 (СССР). Устройство для защиты тиристорного преобразователя / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов // Бюлл. 1981. № 41.

Бесколлекторный двигатель постоянного тока ЕС 8