

Продолжение. Начало в СЭ №1'2010

# Вопросы проектирования систем и элементов защиты

## тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 5

**В статье рассказывается о современных бесконтактных системах защиты (СЗ) для тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР) с использованием метода, основанного на принудительном запираии тиристоров АИР при аварийных режимах с помощью тиристорно-конденсаторного выключателя (КВК) с одновременным блокированием работы блоков управления БУВ тиристорного выпрямителя (ВПТ) и БУИ АИР. Рассматриваются особенности и примеры построения, а также алгоритмы работы таких СЗ по данному методу. Приводятся результаты моделирования процессов аварийного отключения ТПЧ с различными схемами АИР с открытым входом.**

**Иршат Аитов, к. т. н.**

aitov-irshat@mail.ru

**Регина Камалетдинова**

reg2073@yandex.ru

Применительно к ТПЧ с АИР в работе [1] рассмотрены наиболее характерные виды аварийных режимов и причины, вызывающие их; сформулированы с учетом главных задач основные требования и этапы исследовательских работ, на основе результатов выполнения которых осуществляется выбор методов, средств и разработки современных СЗ. В этой связи следует отметить, что анализ аварийных процессов и выявление специфических особенностей протекания их в ТПЧ с различными схемами АИР позволяет установить временные зависимости изменения аварийных токов через силовые полупроводниковые приборы (СПП) выпрямителя и АИР. С учетом их перегрузочной способности затем можно определить быстрдействие СЗ ( $t_{СЗ}$ ) и выбрать метод и средства защиты. Анализ аварийных процессов для различных мостовых схем двух групп АИР с удвоением частоты и встречными диодами приведен в [1–3], где по результатам моделирования получены обобщенные выражения для аварийных токов через СПП выпрямителя и АИР. Анализ временных диаграмм соответственно и полученных выражений аварийных токов, а также экспериментальные исследования и опыт промышленной эксплуатации показывают, что наиболее нагруженными (уязвимыми) при срыве инвертирования являются тиристоры групп схем АИР с открытым входом повышенной мощности при непосредственной параллельной работе нескольких мостов на общую нагрузку. В таких схемах, если не принять дополнительных мер, срыв инвертирования приводит к выходу из строя тиристоров АИР, несмотря на быстрое отключение выпрямителя, из-за большой крутизны нарастания

амплитуды и длительности протекания аварийного тока (см.  $i_{vs1}(t), i_{vs2}(t)$ ) через тиристоры [3]. Ряд схемотехнических решений по ограничению аварийного тока для определенного круга схем и выходных параметров таких АИР рассмотрен в [2–6]. Однако вопросы эффективного надежного ограничения аварийного тока через тиристоры, особенно АИР с открытым входом, остаются актуальными.

В данной работе рассматривается, применительно к мостовым схемам АИР с открытым входом, метод бесконтактной защиты, позволяющий эффективно ограничить аварийные токи как через тиристоры ВПТ, так и через тиристоры АИР. Метод был сформулирован авторами в [7, 8], применен и рассмотрен для ограничения аварийных токов в СЗ схем АИР с закрытым входом [8–10] и заключается в принудительном ограничении аварийного тока и запираии тиристоров АИР с помощью КВК с одновременным блокированием работы БУВ и БУИ. По данному методу коммутационными элементами в СЗ ТПЧ с АИР являются непосредственно тиристоры ВПТ и АИР, через которые протекают аварийные токи. В зависимости от схем АИР, например числа и схем подключения параллельно работающих мостов (ячеек), возможны различные варианты выполнения и алгоритмы работы СЗ, некоторые из которых будут рассмотрены далее. Применительно к ТПЧ с АИР с открытым входом, широко используемыми в установках индукционного нагрева металлов, рассмотрим два варианта схемотехнической реализации их, а также структуру и алгоритмы работы бесконтактной СЗ по данному методу. На рис. 1 для ТПЧ с двумя вариантами выполнения АИР и бесконтактными СЗ приведены их обобщенные функциональ-

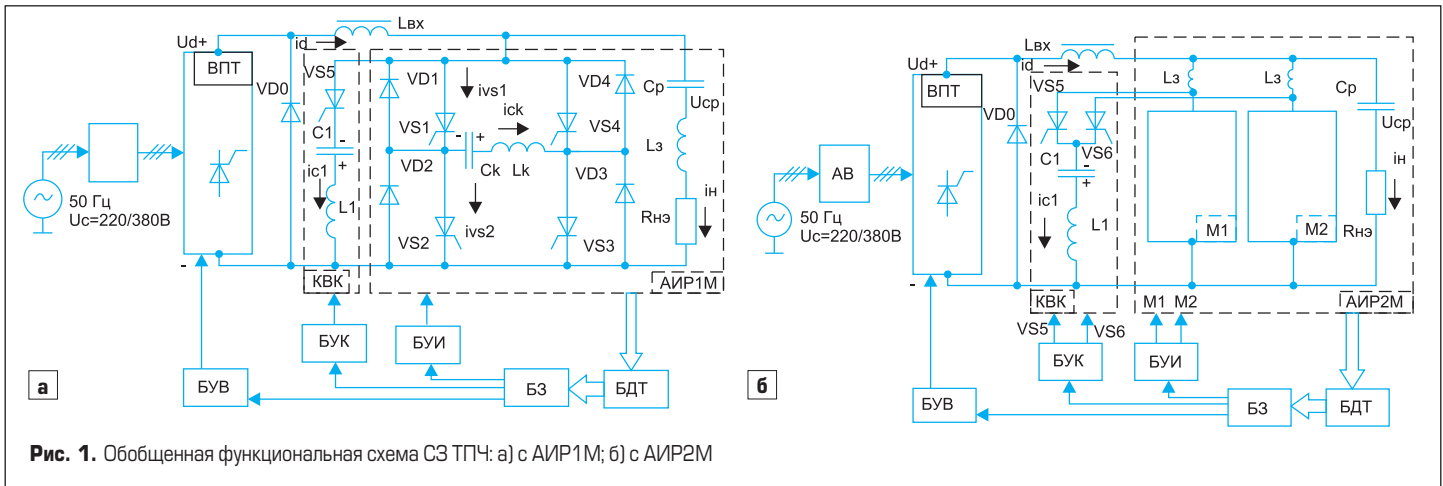


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема СЗ ТПЧ: а) с АИР1М; б) с АИР2М

ные схемы, которые состоят из одноставового АИР1М (рис. 1а) и двух-ставового АИР2М (рис. 1б), питание которых осуществляется от трех-фазной промышленной сети 50 Гц с  $U_C = 220/380$  В через резервный автоматический выключатель АВ, мостовой тиристорный выпрямитель ВПТ с шунтирующим диодом VD0, входную индуктивность  $L_{вх}$ , при этом нагрузка  $R_{нэ}$  включена в цепь разделительного конденсатора  $C_p$  ( $C_p \gg C_k$ ), а управление АИР и ВПТ осуществляется соответственно блоками БУИ и БУВ; бесконтактной СЗ, состоящей из КВК, блоков быстродействующих датчиков БДТ, защиты БЗ и управления КВК БУК. В одноставовых АИР (например таких, как на рис. 1а) индуктивность  $L_3$ , которая является частью общей коммутирующей индуктивности  $L_0$ , включается в цепь  $C_p$  и выбирается из условия:  $L_k \geq 0,7L_0$ ;  $L_3 \leq 0,3L_0$ , а  $L_0 = L_3 + L_k$  [11].

Это позволяет ограничить как крутизну нарастания и амплитуду аварийного разрядного тока  $C_p$  через тиристоры, так и крутизну нарастания напряжения ( $dU_a/dt$ ) на тиристорах при рабочих режимах работы АИР [6, 11]. Однако при параллельном включении и работе нескольких мостов АИР на одну нагрузку с общим  $C_p$  и  $L_3$ , величина  $L_3$  будет весьма малой, так как в этом случае, при числе мостов  $n$ , получим:  $L_3 \leq 0,3(L_0/n)$ , где  $L_0$  — общая коммутирующая индуктивность каждого моста. Поэтому авторами предложено подключать каждый из мостов к ВПТ ( $L_{вх}$ ) и цепи нагрузки ( $C_p, R_{нэ}$ ) через индивидуальные  $L_3$ , а к КВК через индивидуальные коммутирующие тиристоры (VS5, VS6), как это показано на рис. 1б [6, 8]. При этом величина  $L_3$  не зависит от числа мостов и определяется по величине  $L_0$  одного отдельного моста, что позволяет более эффективно ограничивать скорость развития аварийного процесса и амплитуду аварийного тока через тиристоры любого моста.

Основные схемы, режимы и принципы работы, основные параметры и характеристики мостовых АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами описаны в [2, 3, 6, 8, 11–13]. Рассмотрим подробнее возможные алгоритмы и принципы работы СЗ (рис. 1) применительно к ТПЧ с одноставовым (рис. 1а) и двухставовым (рис. 1б) АИР с открытыми входами. Работа СЗ осуществляется следующим образом: перед пуском АИР1М конденсатор  $C_1$  КВК заряжен с указанной полярностью до напряжения  $U_{c1}$ , которое поддерживается на этом уровне в процессе всего этапа работы ТПЧ, что является одним из важных условий надежной работы всей СЗ; когда на рабочем этапе происходит срыв инвертирования, например одновременно открыты тиристоры VS1, VS2, через которые начинают протекать аварийные токи  $i_{vs1}$  и  $i_{vs2}$  [3], далее блок БЗ выдает сигнал  $u_{бз}$  с некоторой задержкой  $t_{дт}$ , определяемой, в основном, быстродействием блока БДТ, который одновременно блокирует работу БУВ, БУИ и включает БУК, т. е. VS5 КВК. В результате конденсатор  $C_1$  колебательно разряжается через  $L_1$  током  $i_{c1}$  встречно аварийным токам  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ , и при  $i_{c1} \geq i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$  выключаются аварийные тиристоры VS1, VS2. Далее конденсатор  $C_1$  продолжает перезаряжаться на обратную полярность, и при  $i_{c1} = 0$  запирается VS5, к которому прикладывается обратное напряжение, равное  $u_{vs5} = u_{c1} - u_{cp}$ . При этом токи  $i_{\phi}$ ,  $i_{ck}$  замыкаются по цепи, состоящей из  $C_p, L_3$  и  $R_{нэ}$  ( $i_{нэ}$ ) и, по мере заряда  $C_p$ , спадают до нуля, а тиристоры ВПТ и АИР1М выключаются. Отличием в работе СЗ ТПЧ с много-

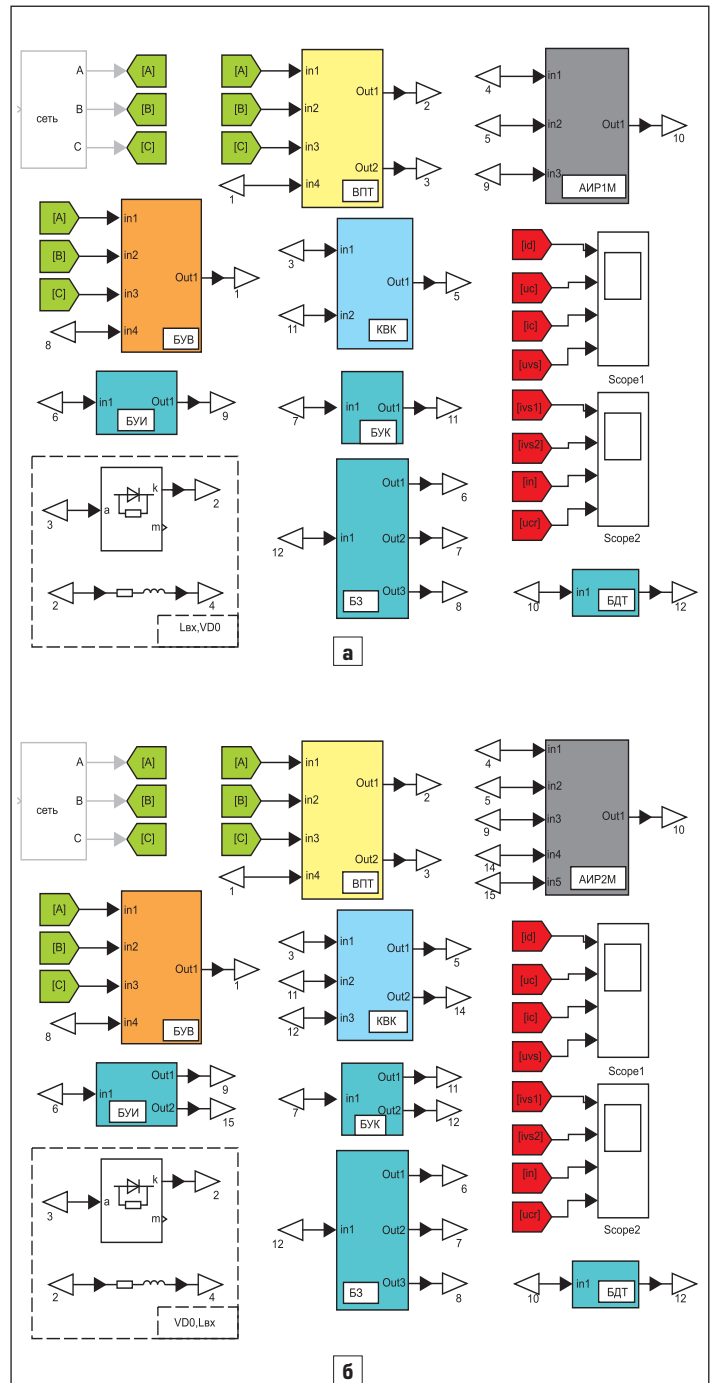


Рис. 2. Обобщенная схематическая модель процесса аварийного отключения ТПЧ: а) с АИР1М; б) с АИР2М

стовым АИР (в данном случае АИР2М, рис. 16) является возможность реализации двух алгоритмов аварийного отключения:

- как и в ТПЧ с однофазным АИР1М, путем принудительного запитания тиристоров аварийного моста, например М1 (рис. 16), с помощью КВК (включается VS5) и одновременным блокированием работы БУВ и БУИ обоих мостов, т. е. М1 и М2;
- путем запитания тиристоров аварийного моста М1 с помощью КВК, одновременным блокированием работы БУВ и БУИ аварийного моста М1, с последующим блокированием работы БУИ моста М2 (или (n-1) мостов) при достижении тока  $i_d = 0$ .

Для исследования по описанному выше методу процессов аварийного отключения ТПЧ с АИР1М, ТПЧ с АИР2М были разработаны обобщенные схемотехнические модели в системе MATLAB+Simulink, которые приведены соответственно на рис. 2, где обозначения блоков и элементов идентичны обозначениям на рис. 1. При этом датчики тока включены в соответствующие плечи мостов (рис. 1) и позволяют одновременно контролировать токи  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$  через тиристоры VS1, VS2 и встречные диоды VD1, VD2.

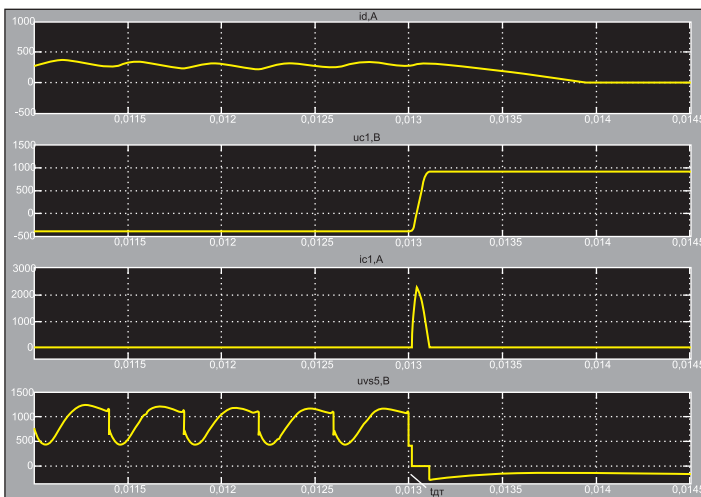
В модели приняты реальные значения параметров всех СПП, активных сопротивлений индуктивностей  $L_{вх}$ ,  $L_k$ ,  $L_3$ ,  $L_1$ , питающей сети  $U_e$ , а также нагрузки  $R_{нз}$  при входных мощностях  $P_{вх1} = 130$  кВт (АИР1М),  $P_{вх2} = 265$  кВт (АИР2М), напряжении  $U_d = 520$  В, частоте инвертирования  $f_n = 2500$  Гц. Исследования проводились для характерного аварийного режима рассматриваемых АИР — сквозного срыва инвертирования при максимальных значениях входного тока (мощности)  $I_{d1} = 250$  А ( $P_{вх1} = 130$  кВт),  $I_{d2} = 510$  А ( $P_{вх2} = 265$  кВт), при двух алгоритмах аварийного отключения для АИР2М (рис. 16, модель рис. 26). Для обеих схем при исследованиях аварийного отключения принимались

завышенные значения времени  $t_{дт}$  задержки срабатывания СЗ  $t_{дт} = 25(35)$  мкс при реальных значениях 12–15 мкс. Рассмотрим результаты моделирования процесса аварийного отключения по данному методу (первый алгоритм) для ТПЧ с АИР1М, полученные на модели рис. 2а, при следующих параметрах ТПЧ и КВК:

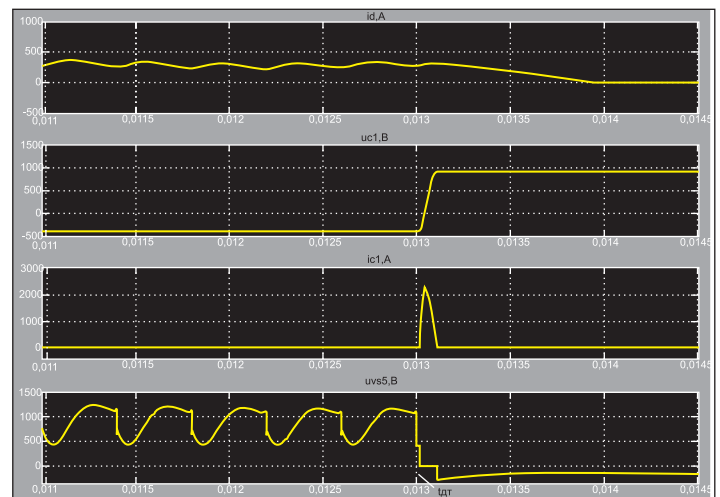
- $L_{вх} = 600$  мкГн;
- $C_p = 500$  мкФ;
- $R_{нз} = 0,5$  Ом;
- $L_k = 28,7$  мкГн;
- $L_3 = 12,3$  мкГн;
- $C_k = 101,9$  мкФ;
- $C_1 = 100$  мкФ;
- $L_1 = 3$  мкГн;
- $U_{c1} = 400$  В.

На рис. 3 и 4 соответственно приведены временные диаграммы токов и напряжений:  $i_d$ ,  $u_{c1}$ ,  $i_{c1}$ ,  $u_{vs5}$  (рис. 3а, 4а);  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_n$ ,  $u_{cp}$  (рис. 3б, 4б) при аварийном отключении ТПЧ с АИР1М, значениях  $I_{d1} = 250$  А ( $P_{вх1} = 130$  кВт);  $t_{дт} = 15$  мкс (рис. 3) и  $t_{дт} = 25$  мкс (рис. 4).

Анализ результатов по рис. 3 и 4 показывает весьма высокую эффективность аварийного отключения ТПЧ с АИР1М по данному методу: амплитуда и длительность аварийных токов  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$  через тиристоры VS1, VS2 значительно ниже, чем при установившемся рабочем режиме, что определяется  $t_{дт}$  и параметрами КВК; выключение ВПТ осуществляется также без перегрузки тиристоров, и ток  $i_d$  спадает плавно; после выключения тиристоров АИР1М и VS5 КВК к нему прикладывается обратное напряжение  $u_{vs5} = u_{c1} - u_{cp}$ , а конденсатор  $C_p$  заряжается по мере плавного спада токов  $i_d$ ,  $i_n$ ,  $i_{ck}$  до нуля, что позволяет осуществить и сократить время повторного



**Рис. 3.** Временные диаграммы при аварийном отключении ТПЧ с АИР1М при  $t_{дт} = 15$  мкс: а)  $i_d$ ,  $u_{c1}$ ,  $i_{c1}$ ,  $u_{vs5}$ ; б)  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_n$ ,  $u_{cp}$



**Рис. 4.** Временные диаграммы при аварийном отключении ТПЧ с АИР1М при  $t_{дт} = 25$  мкс: а)  $i_d$ ,  $u_{c1}$ ,  $i_{c1}$ ,  $u_{vs5}$ ; б)  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_n$ ,  $u_{cp}$

пуска АИР1М после предварительного перезаряда С1 КВК с исходной полярностью. Выбор параметров КВК осуществляется следующим образом: по формулам (1–5), приведенным в [3], определяются аварийные токи через тиристоры при  $t = t_{дт}$ , т. е.  $i_{vs1}(t_{дт})$ ,  $i_{vs2}(t_{дт})$  с учетом  $P_{вхmax}$ , амплитуды  $I_{арм}$  и частоты  $\omega_p$  аварийного разрядного тока  $C_p$ ; затем рассчитываются параметры колебательного контура С1, L1 КВК и напряжение  $U_{c1}$  согласно приведенным ниже условиям и выражениям:

$$\begin{aligned} \omega_{КВК} &\geq (2,5 \dots 4) \omega_p; \\ I_{КВК} &\geq (1,5 \dots 2,5) I_{арм}; \\ \omega_{КВК} &= 1/\sqrt{L_1 C_1}; \\ \omega_p &= 1/\sqrt{C_p L_3}; \\ I_{КВК} &= U_{c1}/\rho_{КВК}; \\ I_{арм} &= U_{cp}/\rho_{ар}; \\ \rho_{КВК} &= \sqrt{L_1/\sqrt{C_1}}; \\ \rho_{ар} &= \sqrt{L_3/\sqrt{C_p}}. \end{aligned}$$

Рассмотрим результаты моделирования аварийного отключения ТПЧ с АИР2М (рис. 1б) по двум указанным выше алгоритмам при следующих параметрах ТПЧ и КВК: параметры М1 и М2 идентичны параметрам моста по рис. 1а:

$$\begin{aligned} L_{вх} &= 1,2 \text{ мГн}; \\ C_p &= 1200 \text{ мкФ}; \\ R_{нз} &= 0,25 \text{ Ом}; \\ L_3 &= 12,3 \text{ мГн}; \\ L_1 &= 3 \text{ мГн}; \\ C_1 &= 200 \text{ мкФ}; \\ U_{c1} &= 400 \text{ В}. \end{aligned}$$

На рис. 5 и 6 приведены временные диаграммы:  $i_d$ ,  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_{c1}$  (рис. 5а, 6а);  $i_H$ ,  $i_{ck}$ ,  $u_{c1}$ ,  $u_{cp}$  (рис. 5б, 6б) при аварийном отключении

ТПЧ с АИР2М по первому алгоритму соответственно при  $t_{дт} = 15$  мкс (рис. 5) и  $t_{дт} = 35$  мкс (рис. 6). Анализ полученных результатов, как и в первом случае, показывает высокую эффективность защиты, возможность успешного использования данного метода аварийного отключения и для ТПЧ с многомостовыми АИР2М (рис. 1б) при указанной схеме выполнения и включения М1, М2,  $L_3$  и КВК. На рис. 7 приведены временные диаграммы:  $i_d$ ,  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_{c1}$  (рис. 7а);  $i_H$ ,  $i_{ck}$ ,  $u_{c1}$  (рис. 7б) при аварийном отключении ТПЧ с АИР2М по второму алгоритму при  $t_{дт} = 25$  мкс. Как показывают результаты моделирования, использование второго алгоритма позволяет более плавно, без коммутационных перенапряжений отключать аварийный мост М1 и продолжать безаварийную работу М2 до выключения ВПТ ( $i_d = 0$ ), что может быть использовано при разработке схем резервированных ТПЧ с АИР с открытым входом. Эти вопросы могут быть предметом отдельной работы.

### Выводы

Рассмотрены: метод аварийного отключения ТПЧ с одно- и многомостовыми АИР с открытым входом путем запираания тиристоров АИР с помощью КВК и одновременного блокирования работы БУВ и БУИ; варианты выполнения и включения КВК и защитных индуктивностей  $L_3$  в многомостовых схемах; возможные алгоритмы работы СЗ по данному методу. Выполнено схемотехническое моделирование в среде MATLAB+Simulink процессов аварийного отключения ТПЧ с одно- и многомостовыми АИР по данному методу при различных алгоритмах работы. Получены временные зависимости аварийных токов через тиристоры АИР и ВПТ, отмечена высокая эффективность

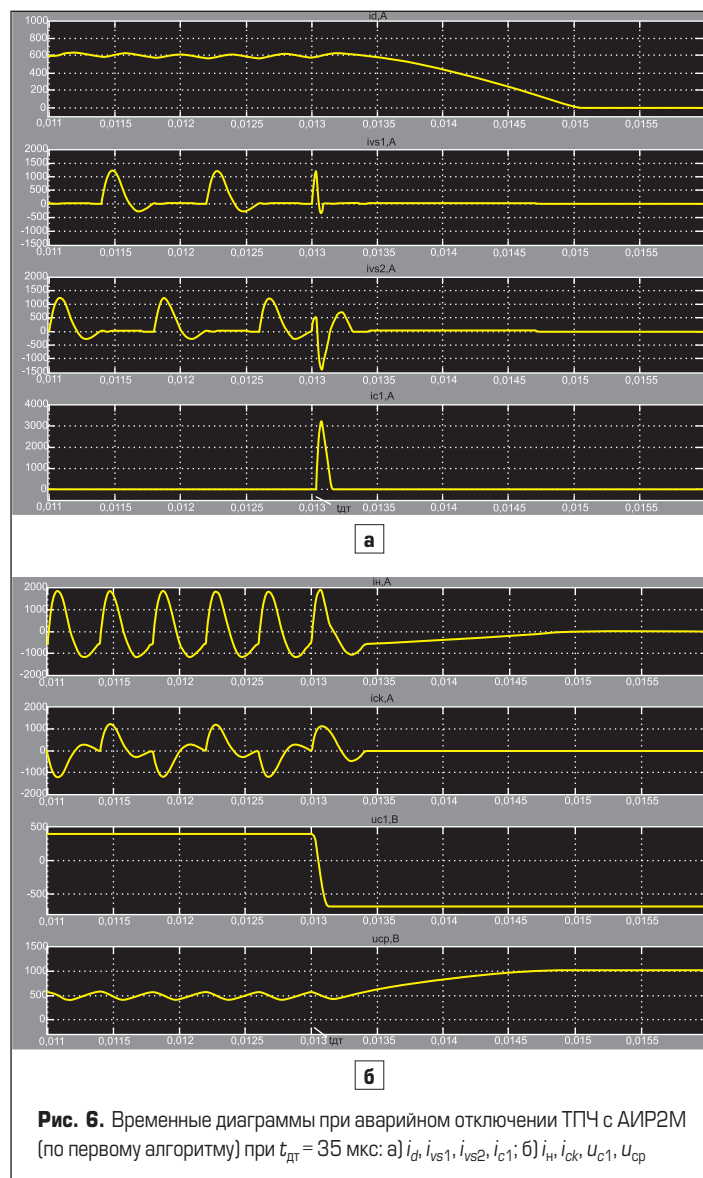
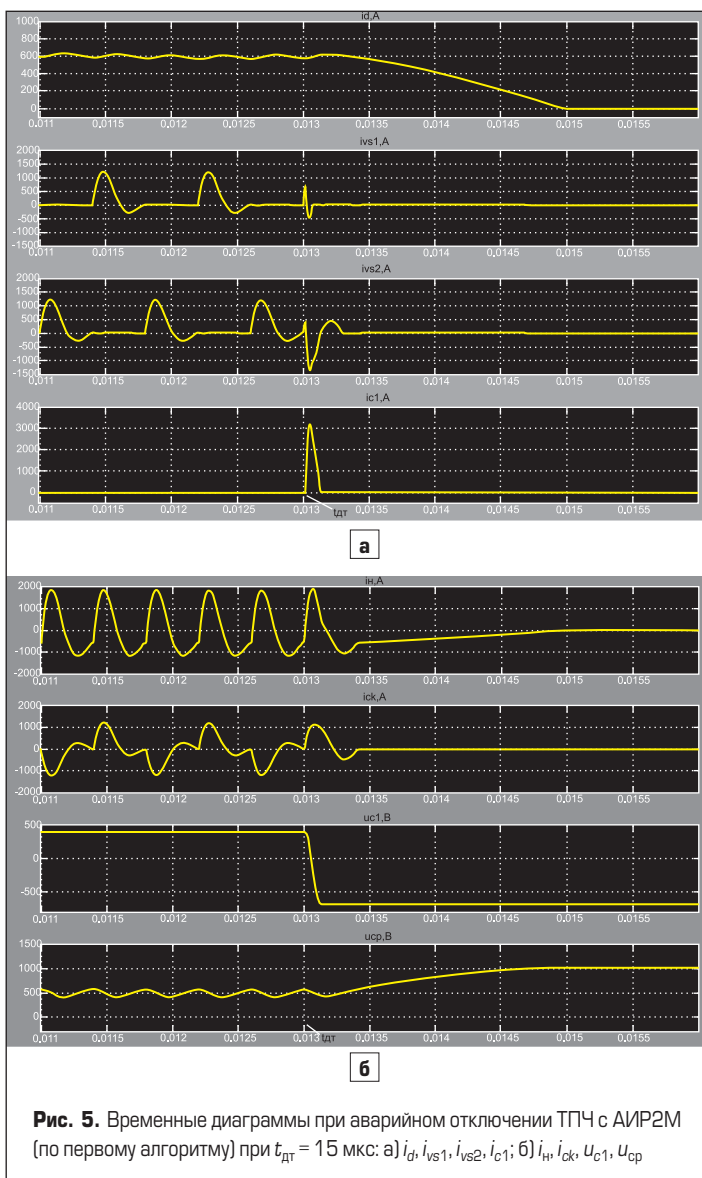
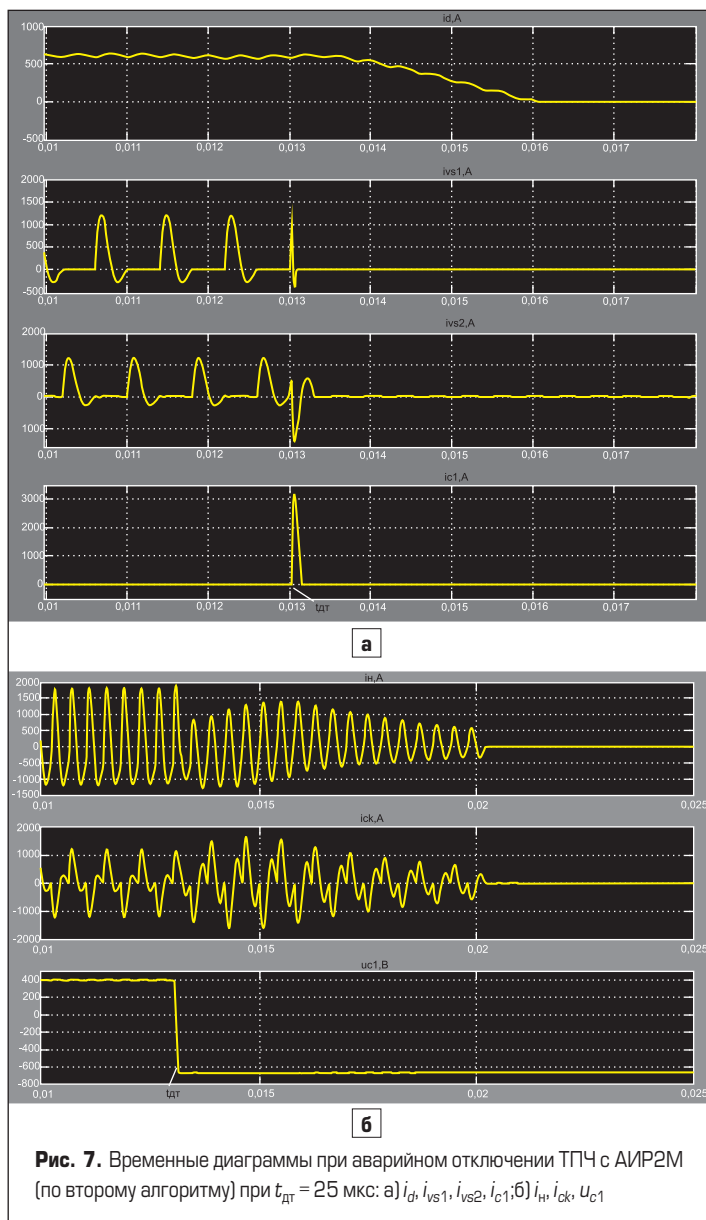


Рис. 5. Временные диаграммы при аварийном отключении ТПЧ с АИР2М (по первому алгоритму) при  $t_{дт} = 15$  мкс: а)  $i_d$ ,  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_{c1}$ ; б)  $i_H$ ,  $i_{ck}$ ,  $u_{c1}$ ,  $u_{cp}$

Рис. 6. Временные диаграммы при аварийном отключении ТПЧ с АИР2М (по первому алгоритму) при  $t_{дт} = 35$  мкс: а)  $i_d$ ,  $i_{vs1}$ ,  $i_{vs2}$ ,  $i_{c1}$ ; б)  $i_H$ ,  $i_{ck}$ ,  $u_{c1}$ ,  $u_{cp}$



защиты, показана возможность надежного, независимого отключения аварийного моста в многомостовых АИР, что может быть использовано при разработке резервированных ТПЧ с АИР с открытым входом.

**Литература**

1. Аитов И. Вопросы построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 1.
2. Аитов И., Шалупова Г. Особенности построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты с автономными резонансными инверторами. Часть 2 // Силовая электроника. 2010. № 2.
3. Аитов И., Шалупова Г. Система аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 3 // Силовая электроника. 2010. № 3.
4. Аитов И. Ограничение аварийного тока в многомостовых тиристорных автономных инверторах с индуктивно-емкостным входом // Электромеханика. 1978. № 5.
5. А.с. №515228 (СССР). Автономный инвертор / И. Л. Аитов, Ю. В. Воробьев // Бюл. 1976. № 19.
6. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства: Уч. пособие. Уфа: УГАТУ. 2009.
7. Аитов И., Камалетдинова Р. Вопросы проектирования систем и элементов защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 4 // Силовая электроника. 2011. № 1.
8. Пат. № 2394347 (РФ). Тиристорный преобразователь частоты / И. Л. Аитов, Э. Р. Кушекова // Бюл. 2010. № 19.
9. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
10. Аитов И., Кушекова Э. Вопросы предпускового контроля резервированных тиристорных преобразователей частоты // Силовая электроника. 2009. № 3.
11. Кацнельсон С.М. Тиристорные инверторы с встречно-параллельными диодами и удвоением частоты // Электричество. 1971. № 1.
12. Аитов И. Л., Кацнельсон С. М. Автономные преобразователи частоты: Уч. пособие. Уфа: УАИ. 1978.
13. Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С. Источники питания электротехнических установок. М.: Энергоатомиздат. 1985.