

Вопросы проектирования систем и элементов защиты

тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок

Статья посвящена современным бесконтактным системам защиты (СЗ) силовых электронных устройств (СЭУ). Рассматривается комплекс задач, решаемых при проектировании СЗ для тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР) с учетом их характерных особенностей. Описаны методы бесконтактной защиты и непосредственно тиристорно-конденсаторные выключатели (КВК). Приводятся результаты моделирования в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink процессов аварийного и рабочего отключений ТПЧ с АИР удвоением частоты и закрытым входом.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Регина Камалетдинова

reg2073@yandex.ru

Несмотря на исключительно бурное развитие и широкое применение СЭУ с использованием современных полностью управляемых (IGBT, MOSFET) силовых полупроводниковых приборов (СПП), а также силовых гибридных модулей (СГМ) на их основе, интеллектуальных приборов и модулей (СИП, СИМ), дальнейшее развитие частично управляемых (SCR), запираемых (GTO, GCT, IGCT) и других видов тиристоров не прекращается. Их использование в современных СЭУ по-прежнему актуально [1–9]. Сравнительный анализ состояния, развития, реализации необходимых функциональных характеристик и экономических показателей современных СЭУ на основе различных СПП показывает целесообразность использования тиристоров в СЭУ средней и особенно большой мощности как по экономическим показателям, так и по простоте реализации ряда функциональных и технических показателей [5–7, 9, 10]. Таковыми СЭУ, в первую очередь, являются ТПЧ с АИР, широко используемые для питания современных энергоемких электротехнологических установок (ЭТУ) индукционного сквозного (или поверхностного) нагрева разнообразных металлических заготовок под штамповку, в том числе с использованием метода сверхпластичности, открытой и вакуумной плавки металлов и сплавов, литья алюминия в электромагнитный кристаллизатор, термической и электроэрозионной обработки деталей и изделий, микродугового оксидирования алюминиевых и титановых сплавов, высокочастотной сварки, пайки и др. Следует отметить, что прерывание некоторых технологических процессов даже на весьма короткое время ведет либо к необратимому браку и большим материальным потерям, либо к опасным ситуациям, таким как пожары и взрывы. В этой связи все вопросы, связанные с проектированием систем, элементов защиты и управления ТПЧ с АИР для питания ЭТУ, имеют первостепенное значение во всех случаях их использования [6, 8, 9–16].

Острота этой проблемы связана с высокой энергоемкостью, рядом особенностей отдельных современных прогрессивных технологических процессов (например, исключение перерыва питания по ходу технологического процесса), а также с использованием ТПЧ с АИР для широкого круга ЭТУ, что в свою очередь определяет большое число условий и режимов работы, параметров, функций и т. д. [9].

В общем случае ТПЧ с АИР, как источник питания ЭТУ, представляет собой сложную систему, где относительно «слабым» по надежности звеном является силовая часть АИР [6, 9, 10, 16]. При этом для успешного решения основных задач обеспечения (повышения) надежности СЭУ (ТПЧ с АИР) требуется комплексный подход к нормированию и контролю надежности и других эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ), реализованный в ГОСТ РВ 20.39.303-98 и ГОСТ РВ 20.57.304-98. Сущность такого подхода сводится к одновременному и взаимосвязанному заданию, реализации и проверке выполнения требований к надежности и ЭТХ, то есть к уровню нормируемых показателей безотказности, ремонтпригодности, живучести, безопасности, долговечности, а также параметров заданной (выбранной) системы технического обслуживания, ремонта и других характеристик модели эксплуатации. Требуемый уровень надежности СЭУ может быть достигнут только при решении комплекса задач с учетом требований к современным СЗ и регуляторам, полученных на всех этапах исследований, которые рассмотрены автором в [6, 8–10, 17–22]. Многолетний опыт эксплуатации ТПЧ с различными группами схем АИР, широко используемых для установок индукционного нагрева и других ЭТУ, показывает, что при проектировании СЗ для них должен быть решен комплекс следующих основных задач:

- повышение устойчивости работы ТПЧ с АИР во всех рабочих режимах (пуск, установившийся режим, отключение) и при изменениях величины

которого осуществляется от трехфазной промышленной сети 50 Гц с $U_c = 220/380$ В через резервный электромагнитный автоматический выключатель АВ, мостовой тиристорный выпрямитель ВПТ, входную индуктивность $L_{вх}$ с нулевым шунтирующим диодом VD0, при этом управление АИР и ВПТ осуществляется соответственно блоками БУИ и БУВ; бесконтактной СЗ, состоящей из КВК, блоков быстрогодействующих датчиков БДТ и защиты БЗ.

Неоспоримые преимущества КВК определяют большой интерес к ним и широкое использование их в СЗ разнообразных СЭУ, начиная со времени появления тиристорных [24–26]. По схемотехнической реализации тиристорные КВК можно разделить на следующие группы:

- с питающим тиристором (коммутационный элемент), с помощью которого и осуществляется подключение (отключение) источника постоянного тока СЭУ (например, АИР);
- с использованием тиристорных ВПТ в качестве коммутационного элемента;
- с использованием в качестве коммутационного элемента тиристорных АИР и ВПТ, которые будут рассмотрены в следующей работе.

Принцип действия и особенности различных вариантов КВК описаны в технической литературе [9, 11, 12, 24–30]. Анализ и опыт эксплуатации показывают, что СЗ (ТПЧ с АИР) с использованием одного КВК первой группы имеют узкие функциональные возможности из-за реализации защитного отключения ограниченного числа видов аварий, относительно низкие надежность и КПД при отказах питающего ти-

ристора, а также из-за необходимости включения последовательно с диодным выпрямителем питающего тиристора на полный ток ТПЧ. При прочих равных условиях и одинаковом быстродействии повышенными надежностью и КПД обладают КВК второй группы — благодаря исключению питающего тиристора, работающего в более тяжелом режиме, чем тиристоры ВПТ. Кроме того, они обладают расширенными функциональными возможностями: позволяют реализовать как отдельно, так и в сочетании несколько методов бесконтактной защиты; использовать ВПТ как коммутационный элемент при аварийных и рабочих отключениях, а также как регулятор (стабилизатор) входного (U_d) напряжения [9, 24, 25]. Возможны следующие методы бесконтактной защиты ТПЧ с АИР при аварийных режимах:

- блокирование работы БУВ тиристорного выпрямителя (ВПТ);
- перевод тиристорного выпрямителя (ВПТ) в инверторный режим с последующим блокированием работы БУВ при спаде тока выпрямителя до нуля;
- с одновременным блокированием работы БУВ и принудительным гашением аварийного тока ВПТ с помощью КВК;
- с одновременным блокированием работы БУВ, БУИ и принудительным гашением аварийного тока АИР с помощью КВК.

Приведенный на рис. 1а КВК состоит, кроме ВПТ (VS1–VS6), из коммутирующего устройства, состоящего из блока симистров BC (VS7–VS9), двух коммутирующих цепочек C1–L1–VD1 и C2–L2–VD2 и зарядного резистора R1 [27, 29].

Данный КВК обладает высоким быстродействием, эффективностью и широкими функциональными возможностями, то есть способен реализовать защитное отключение без повреждений СПП при характерных отказах в ТПЧ с АИР, рассмотренных в [10], а также позволяет реализовать первые три метода бесконтактной защиты, приведенные выше. Отличительным в КВК, показанном на рис. 1б, является то, что коммутирующее устройство состоит из диодного моста ДМ, двух коммутирующих цепочек C1–VS7–L1–VD7 и C2–VS8–L2–VD8. Наличие VD7, VD8 позволяет ограничить перенапряжения на тиристорах ВПТ в процессе аварийного запирания их. В настоящее время КВК составляют основу, а также определяют такие важные защитные показатели современных СЗ СЭУ, как быстродействие ($t_{сз}$, $t_{пв}$) и эффективность, которая, в свою очередь, во многом определяется коммутирующей способностью КВК. Под коммутирующей способностью КВК следует понимать совокупность обеспечения по крайней мере двух основных условий: быстрого, селективного и надежного прерывания аварийного тока и необходимого (достаточного) схемного времени восстановления управляемости питающего (или ВПТ) тиристора КВК. Указанные условия могут быть оценены следующими коэффициентами:

$$K_i^* = I_{мКВК}/I_{мАВ} > 1,5-1,8; \\ K_t^* = t_{вс}/t_{вык} > 1,7-2,0, \quad (1)$$

где $I_{мКВК}$, $I_{мАВ}$ — амплитудное значение токов соответственно через коммутирующий

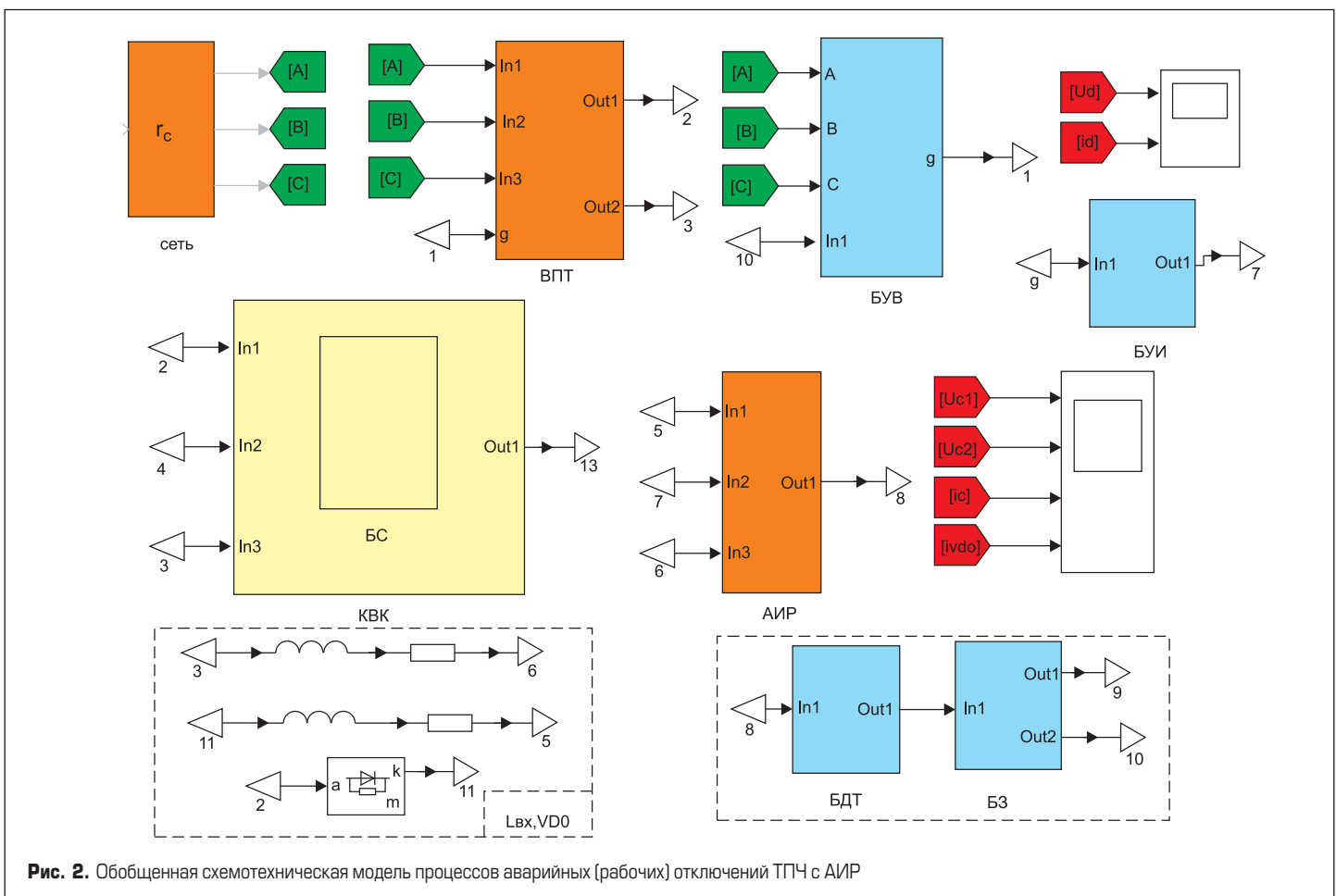


Рис. 2. Обобщенная схемотехническая модель процессов аварийных (рабочих) отключений ТПЧ с АИР

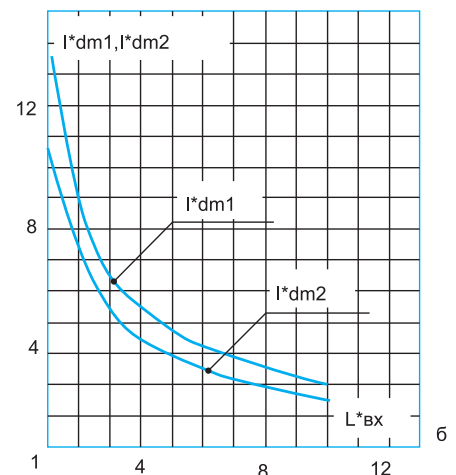
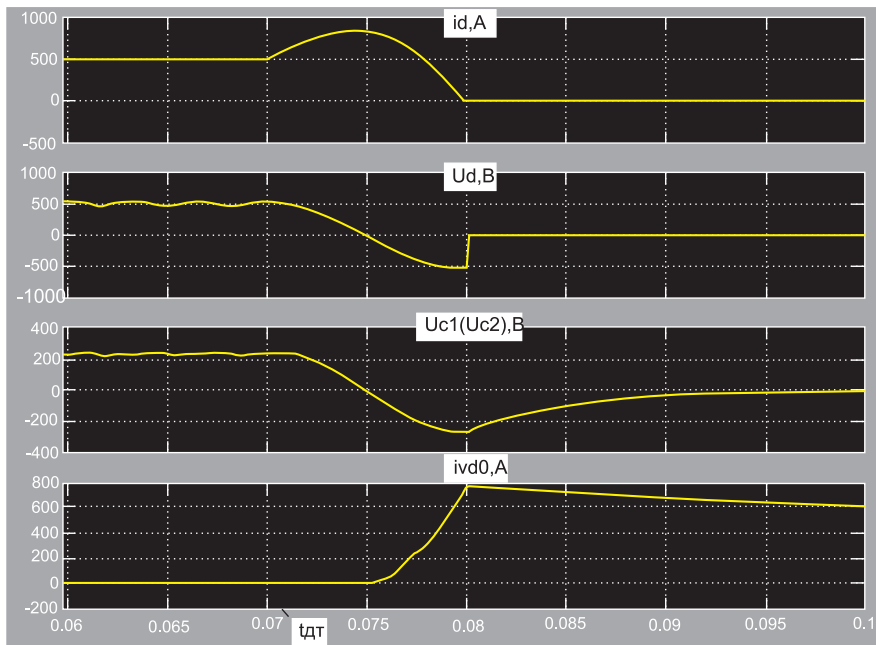


Рис. 3. Временные диаграммы: а) $i_d, U_d, U_{c1}(U_{c2}), i_{vd0}$ при аварийном отключении ТПЧ с АИР (метод блокирования работы БУВ) и $I_{d01} = 500 \text{ A}; L_{\text{вх}} = 4 \text{ мГн}$; б) зависимость $I_{dm1}^*, I_{dm2}^* = F(L_{\text{вх}}^*)$, при $I_{d01} = 500 \text{ A}, I_{d02} = 250 \text{ A}$

тиристор КВК и допустимой аварийной перегрузки питающего тиристора КВК (тиристора ВПТ), при длительности 10 мс и начальной температуре структуры +140 °С; $t_{\text{всс}}, t_{\text{вык}}$ — соответственно схемное и паспортное время восстановления (выключения) управляемости питающего тиристора КВК (тиристора ВПТ).

Для исследования процессов аварийного и рабочего отключений ТПЧ с АИР удвоением частоты, встречными диодами и закрытым входом (рис. 1а) была разработана обобщенная схемотехническая модель в системе MATLAB+Simulink, которая приведена на рис. 2, где обозначения блоков и элементов в модели идентичны обозначениям по рис. 1а.

В модели приведены также блоки управления (БУВ, БУИ, БЗ), контроля и измерений параметров (токов, напряжений, временных интервалов), приняты реальные значения параметров СПП, активных сопротивлений $L_{\text{вх}}, L_{1,2}$ питающей сети U_ϕ , а также нагрузки при входных мощностях $P_{\text{вх}1} = 255 \text{ кВт}$ и $P_{\text{вх}2} = 127,5 \text{ кВт}$, напряжении $U_d = 510 \text{ В}$ и частоте инвертирования АИР $f_{\text{и}} = 1000 \text{ Гц}$. Исследования проводились для характерного аварийного режима рассматриваемых АИР — сквозного срыва инвертирования при максимальных значениях входного тока $I_{d01} = 500 \text{ А}$ ($P_{\text{вх}1} = 255 \text{ кВт}$), $I_{d02} = 250 \text{ А}$ ($P_{\text{вх}2} = 127,5 \text{ кВт}$), при этом параметры ТПЧ и КВК менялись и имели следующие значения: $L_{\text{вх}} = 4; 2; 0,8; 0,4 \text{ мГн}$; $C_1 = C_2 = 200; 100; 50 \text{ мкФ}$; $L_{1,2} = 8 \text{ мкГн}$; $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $U_{c1} = U_{c2} = 250 \text{ В}$. При всех вариантах аварийного отключения принималось несколько завышенное время задержки срабатывания датчика аварии $t_{\text{дт}} = 35 \text{ мкс}$. Рассмотрим результаты моделирования процесса аварийного (рабочего) отключения по первому методу — блокированием работы БУВ ВПТ по сигналу БЗ ($t_{\text{дт}} = 35 \text{ мкс}$), полученные на модели по рис. 2. На рис. 3а приведены временные

диаграммы токов: входного (i_d), через VD0 (i_{vd0}); напряжений: входного (U_d), на конденсаторах $C_{1,2}$ (U_{c1}, U_{c2}) при аварийном отключении ТПЧ и $I_{d01} = 500 \text{ А}, L_{\text{вх}} = 4 \text{ мГн}$, где момент блокирования БУВ (после сквозного срыва инвертирования в АИР) обозначен $t_{\text{дт}}$. По результатам моделирования этого процесса получены зависимости (рис. 3б):

$$I_{dm1}^*, I_{dm2}^* = F(L_{\text{вх}}^*) \text{ при } I_{d01} = 500 \text{ А}, I_{d02} = 250 \text{ А}, \text{ где } I_{dm1}^* = I_{dm1}/I_{d02}; I_{dm2}^* = I_{dm2}/I_{d02}; L_{\text{вх}}^* = L_{\text{вх}}/L_{\text{вх}0} = 0,4 \text{ мГн}.$$

На рис. 4 приведены временные диаграммы указанных выше параметров (рис. 3а), где момент начала рабочего отключения обозначен $t_{\text{бк}}$.

Рассмотрим результаты моделирования процесса аварийного (рабочего) отключения по второму методу — переводом ВПТ в инверторный режим по сигналу БЗ ($t_{\text{дт}} = 35 \text{ мкс}$), полученные на модели по рис. 2. На рис. 5а приведены временные диаграммы: i_d, U_d, U_{c1}, U_{c2} (отключенном VD0) при $\beta = 130 \text{ град. эл}$, $I_{d01} = 500 \text{ А}, L_{\text{вх}} = 4 \text{ мГн}$. По результатам моделирования получена зависимость

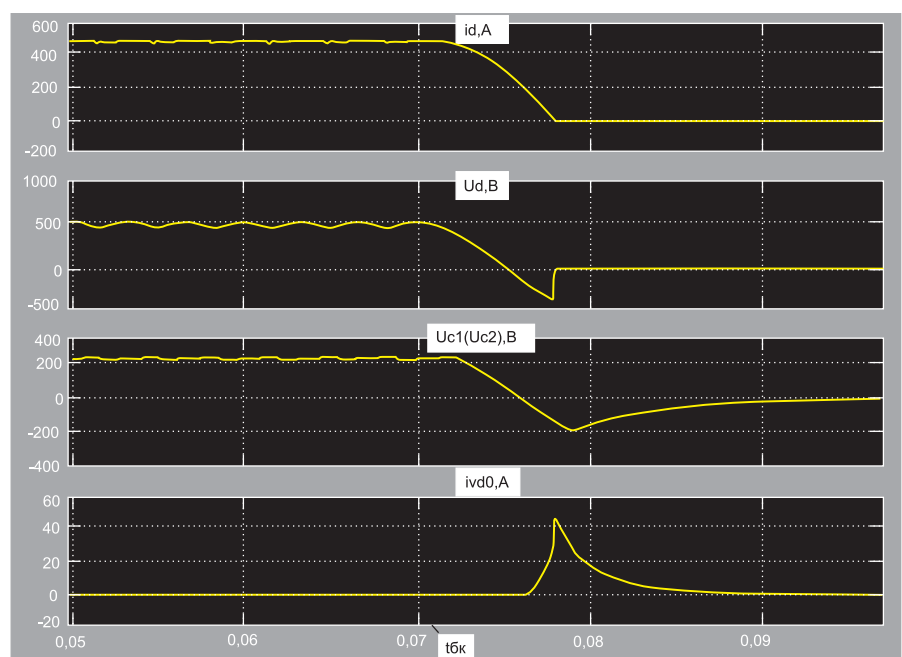


Рис. 4. Временные диаграммы: $i_d, U_d, U_{c1}(U_{c2}), i_{vd0}$ при рабочем отключении ТПЧ с АИР (метод блокирования работы БУВ) и $I_{d01} = 500 \text{ А}; L_{\text{вх}} = 4 \text{ мГн}$

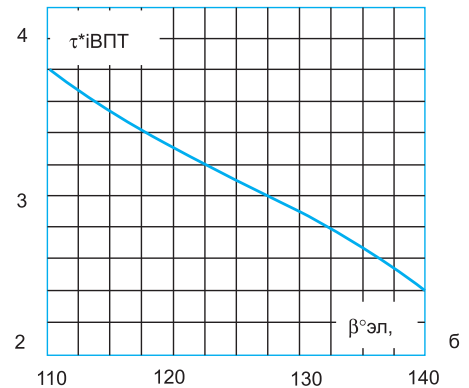
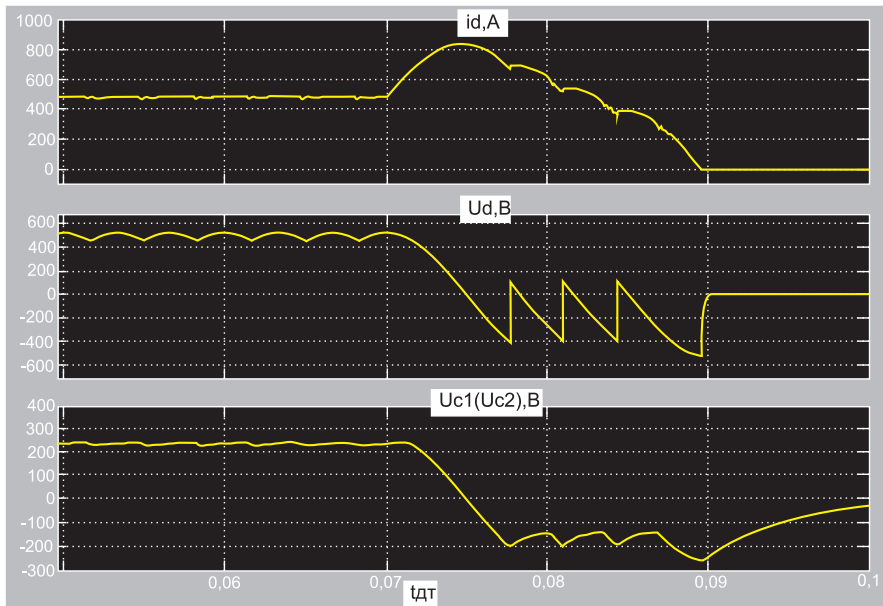


Рис. 5. Временные диаграммы: а) $i_d, U_d, U_{c1}(U_{c2})$ при аварийном отключении ТПЧ с АИР (перевод ВПТ в инверторный режим) и $\beta = 130$ град. эл, $I_{d01} = 500$ А; $L_{вх} = 4$ мГн; б) зависимость $\tau_{ВПТ}^* = F(\beta)$ при $I_{d01} = 500$ А, $L_{вх} = 4$ мГн

(рис. 5б) $\tau_{ВПТ}^* = F(\beta)$, где $\tau_{ВПТ}^*$ — длительность протекания аварийного тока ВПТ при $I_{d01} = 500$ А, $L_{вх} = 4$ мГн, $\tau_{ВПТ}^* = \tau_{ВПТ}/\tau_{РО}$; $\tau_{РО} = 6,5$ мс — длительность тока через ВПТ при рабочем отключении (путем блокирования СУВ), которая определена, по приведенным на рис. 4 временным диаграммам. На рис. 6 приведены временные диаграммы $i_d, U_d, U_{c1}(U_{c2})$ при рабочем отключении перевода ВПТ в инверторный режим, где момент рабочего отключения обозначен как $t_{ин}$.

Далее рассмотрим результаты моделирования процесса аварийного отключения по комбинированному методу — с одновременным

блокированием работы БУВ и принудительным гашением аварийного тока ВПТ с помощью КВК (рис. 1а), полученные на модели по рис. 2. На рис. 7а приведены временные диаграммы токов: $i_d, i_{vd0}, i_{сум}$ (через симисторы БС) и напряжения U_d при $I_{d01} = 500$ А; $L_{вх} = 0,8$ мГн, $C_1 = C_2 = 200$ мкФ, $L_{1,2} = 8$ мГн, $U_{c1} = U_{c2} = 250$ В. По результатам моделирования получена зависимость (рис. 7б)

$$t_{всск}^* = F(L_{вх}^*, C_{1,2}^*), \text{ где } t_{всск}^* = t_{всск}/t_{вык}^*; t_{вык}^* = 100 \text{ мкс}; C_{1,2}^* = C_{1,2}/C = 50 \text{ мкФ.}$$

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что использование комбинированного метода с применением рассмотренных КВК позволяет ликвидировать такие аварийные процессы в ТПЧ с АИР, как сквозной или частичный срывы инвертирования АИР, КЗ нагрузки или шин питания \pm ВПТ на «землю» и пробой VD0, обладает весьма высоким быстродействием (практически определяемым быстродействием датчика $t_{дт}$) и эффективностью. Кроме того, при относительно больших значениях $L_{вх}$, что характерно для ТПЧ с АИР закрытым входом повышенной (большой) мощности, эффективным, как показывают результаты моделирования, является использование метода перевода ВПТ в инверторный режим как при рабочих, так и при аварийных отключениях.

Выводы

Приведен комплекс задач, решаемых при проектировании современных бесконтактных СЗ для ТПЧ с АИР с учетом особенностей работы их в установках индукционного нагрева, рассмотрены методы и средства бесконтактной защиты, в том числе и с помощью тиристорных КВК.

Выполнено схемотехническое моделирование процессов аварийного, рабочего отключений ТПЧ с АИР закрытым входом при различных методах бесконтактной защиты, получены временные диаграммы и зависимости, позволяющие оценить влияние параметров ТПЧ с АИР и элементов СЗ на ее показатели. Отмечены высокое быстродействие и эффективность СЗ при использовании принудительного гашения аварийного тока ВПТ с помощью КВК, а также целесообразность использования метода перевода ВПТ в инверторный режим для ТПЧ с АИР закрытым входом повышенной мощности при рабочих и аварийных отключениях.

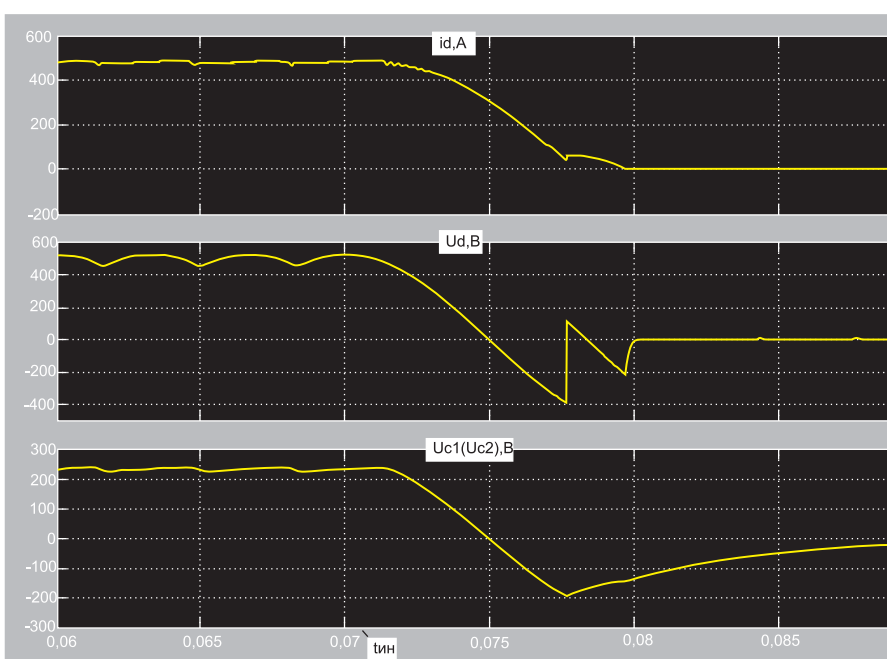


Рис. 6. Временные диаграммы: $i_d, U_d, U_{c1}(U_{c2})$ при рабочем отключении ТПЧ с АИР (перевод ВПТ в инверторный режим) и $\beta = 130$ град. эл, $I_{d01} = 500$ А; $L_{вх} = 4$ мГн

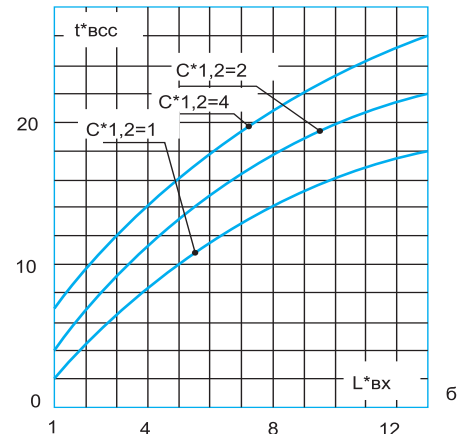
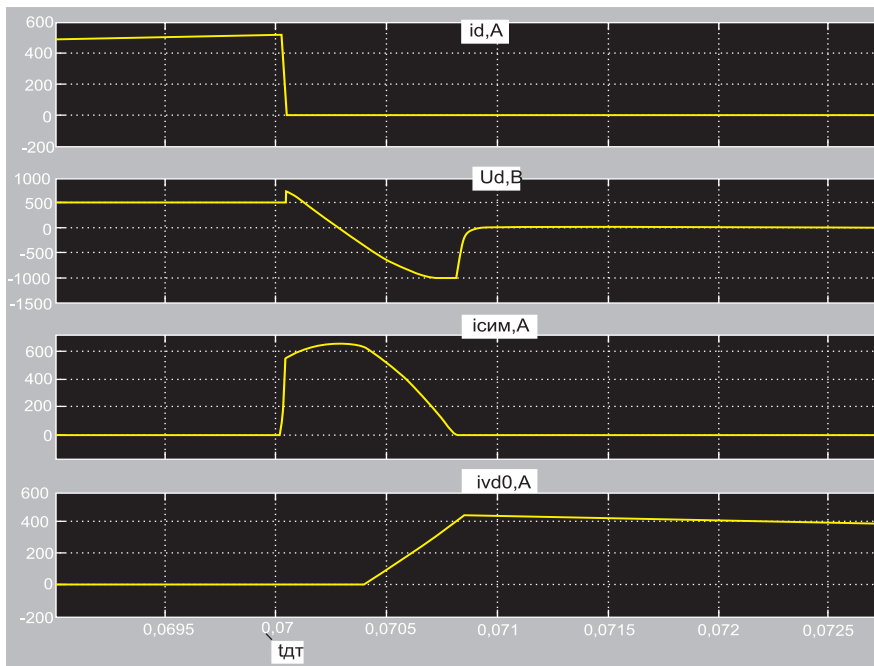


Рис. 7. Временные диаграммы: а) $i_d, U_d, i_{сим}, i_{vd0}$ при аварийном отключении ТПЧ с АИР (комбинированный метод), при $I_{d01} = 500$ А; $L_{вх} = 0,8$ мГн; б) зависимость $t_{всс}^* = F(L_{вх}^*, C_{1,2}^*)$ при $I_{d01} = 500$ А; $L_{вх} = 0,8$ мГн

Литература

1. Гришанин А., Мускатиньев В., Бормотов А. Силовые полупроводниковые ключи для преобразователей частоты систем индукционного нагрева // *Силовая электроника*. 2010. № 3.
2. Ланцов В., Эраносян С. Электронная компонентная база силовых устройств. Часть 1, 2 // *Силовая электроника*. 2009. № 5; 2010. № 1.
3. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Чибиркин В., Конюхов А., Веселова Н., Сурма А. Разработка мощных фототиристорных устройств с функциями самозащиты // *Силовая электроника*. 2009. № 5.
4. Пржибилла Дж., Келлер Р., Шульце Х.-Я., Нидерштхайде Ф.-Я., Пеппель Т. Тиристоры с оптическим управлением для импульсной энергетики // *Силовая электроника*. 2009. № 5.
5. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // *Силовая электроника*. 2008. № 3.
6. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // *Силовая электроника*. 2008. № 2.
7. Зинин Ю. Проектирование регулируемых тиристорных преобразователей повышенной частоты // *Силовая электроника*. 2008. № 4.
8. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Система гарантированного питания для электротехнологических установок // *Электричество*. 1988. № 4.
9. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства: Уч. пособие. Уфа: УГАТУ. 2009.
10. Аитов И. Вопросы построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 1 // *Силовая электроника*. 2010. № 1.
11. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Хомяков И. М. Вопросы управления резервированными

- системами питания повышенной частоты // *Электромеханика*. 1986. № 9.
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. Л., Кутдусов Ф. Х., Гайнанов Д. А. Оценка и пути повышения надежности тиристорных преобразователей частоты: Преобразовательная техника. Новосибирск: Изд-во НЭТИ. 1980.
17. Аитов И., Кушекова Э. Повышение надежности тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок // *Силовая электроника*. 2009. № 1.
18. Аитов И., Кушекова Э. Вопросы предпускового контроля резервированных тиристорных преобразователей частоты // *Силовая электроника*. 2009. № 3.
19. Пат. № 2365023 (РФ). Высоковольтный автономный инвертор / И. Л. Аитов, Р. И. Зиннатуллин // *Бюл.* 2009. № 23.
20. Аитов И. Ограничение аварийного тока в многомостовых тиристорных автономных инверторах с индуктивно-емкостным входом // *Электромеханика*. 1978. № 5.
21. Аитов И., Шалупова Г. Особенности построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты с ав-

- тономными резонансными инверторами. Часть 2 // *Силовая электроника*. 2010. № 2.
22. Аитов И., Шалупова Г. Система аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 3 // *Силовая электроника*. 2010. № 3.
23. Наметоков К. К., Ильина Н. А., Шкловский И. Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. М.: Энергоатомиздат. 1988.
24. Глух Е. М., Зеленев В. Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергия. 1970. Изд. второе. М.: Энергоиздат. 1982.
25. Аитов И. Л. Системы управления и защиты автономных преобразователей частоты. Учебное пособие. Уфа.: УАИ. 1979.
26. Могилевский Г. В., Райнин В. Е., Гребенник В. И. Полупроводниковые аппараты защиты. М.: Энергия. 1980.
27. А. с. № 520661 (СССР). Устройство защиты мостового тиристорного преобразователя от внешних и внутренних коротких замыканий / И. Л. Аитов // *Бюл.* 1976. № 25.
28. А. с. № 1261068 (СССР). Преобразователь частоты с защитой / И. Л. Аитов, Ф. Х. Кутдусов, Р. А. Габбасов // *Бюл.* 1986. № 36.
29. А. с. № 836719 (СССР). Устройство для защиты мостового тиристорного преобразователя / И. Л. Аитов // *Бюл.* 1981. № 21.
30. Пат. № 2394347 (РФ). Тиристорный преобразователь частоты / И. Л. Аитов, Э. Р. Кушекова // *Бюл.* 2010. № 19.
31. 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.