

Тиристорные источники питания

для ответственных электротехнологических установок

В статье говорится о наиболее эффективных методах и средствах повышения надежности, рассматриваются вопросы выбора структуры и разработки тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ) с резервированными автономными резонансными инверторами (АИР) для электротехнологических установок (ЭТУ) литья алюминия в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), приводятся результаты моделирования процесса переключения в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Рустэм Зиннатуллин

В настоящее время для получения металлов, сплавов и конструкционных материалов высокого качества с особыми свойствами, а также для изготовления, обработки деталей и изделий в авиационной, электронной, космической, химической промышленности и многих других отраслях широко используются современные ЭТУ, в которых реализуются такие прогрессивные процессы получения, обработки материалов и деталей, как открытая, вакуумная и порционная плавка металлов; вакуумная и диффузионная сварка и пайка, литье алюминия в ЭМК; термическая и электроэрозионная обработка металлов, микродуговое оксидирование алюминиевых и титановых изделий; обработка металлов под штамповку методом сверхпластичности; выращивание монокристаллов и спекание порошковых материалов и др. В большинстве случаев питание таких ЭТУ осуществляется от источников повышенной или высокой частоты, что связано как с широким использованием метода индукционного нагрева металлов, так и других электрофизических, электрохимических методов обработки материалов. Особенностью некоторых из них является то, что прерывание рабочего процесса даже на короткое время может приводить к большим материальным затратам, а в отдельных случаях — к опасным ситуациям и загрязнению окружающей среды. В связи с этим к высокочастотным источникам питания (ВИП) предъявляются весьма жесткие требования по надежности. Поэтому для реализации ответственных технологических процессов, не терпящих прерыва, первостепенными являются вопросы разработки и исследования высоконадежных ВИП.

В качестве ВИП для ЭТУ с использованием индукционного нагрева и ряда других электрофизических, электрохимических процессов широкое применение в настоящее время нашли ТПЧ со звеном постоянного тока на основе АИР с встречными (обратными) диодами и удвоением частоты. Важными определяющими достоинствами таких АИР являются: близкая к синусоидальной форма выходного тока; удвоение выходной частоты относительно частоты работы тиристорных и встречных диодов без повышения

числа коммутаций и крутизны нарастания тока di/dt через тиристоры; возможность и устойчивость работы при изменениях нагрузки в широких пределах, включая короткое замыкание нагрузки; мгновенная готовность к пуску и относительно большое схемное время восстановления тиристорных (t_{BCC}). В создании и промышленном внедрении таких ТПЧ для различных целей неоспоримую роль сыграла и уфимская школа, созданная под научным руководством С. М. Кацнельсона. Рождение школы следует отнести к 1968 году, когда на Всесоюзной выставке «Сетунь-68» был продемонстрирован действующий опытно-промышленный образец ТПЧ [1] с проектной мощностью 100 кВт, частотой 2400 Гц для индукционного нагрева кузнечных заготовок, выставочный образец которого совместно с индукционным нагревателем приведен на рис. 12 в статье З. Валиуллиной, Ю. Зинина «Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов» (Силовая электроника. 2007. № 4 [2]). Выставочный вариант ТПЧ с индукционным нагревателем был разработан и изготовлен Уфимским авиационным институтом (УАИ) и Тульским научно-исследовательским технологическим институтом (ТНИТИ) по совместному договору под научным руководством С. М. Кацнельсона и с непосредственным участием в этих разработках одного из авторов данной статьи. По результатам выставки «Сетунь-68» постановлением Совета Министров СССР в УАИ была организована отраслевая лаборатория полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ). В рамках лаборатории ППЧ по результатам дальнейших исследований был создан первый промышленный образец ТПЧ мощностью 120 кВт, частотой 2400 Гц [3], который прошел всесторонние испытания в г. Туле (ТНИТИ) осенью 1969 года. По результатам испытаний этот образец был рекомендован для промышленного использования в установках индукционного нагрева и плавки металлов, также была разработана методика наладки и согласования таких ТПЧ с нагрузкой.

В настоящее время предложено большое количество схематехнических вариантов АИР, в которых

решены как частные задачи, так и задачи, определяющие образование отдельных классификационных групп. К таким группам относятся: схемы АИР с удвоением частоты, встречными диодами и закрытым (индуктивным) входом; с удвоением частоты и отсекающими диодами; с отсекающими диодами и умножением частоты; с удвоением частоты и умножением выходного напряжения [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Среди задач, решаемых при использовании ТПЧ с АИР, важными во всех случаях остаются вопросы повышения надежности, что подтверждается и результатом анализа целей и вопросов, решаемых в изобретениях по данной тематике [2].

Анализ требований, предъявляемых к надежности ТПЧ с АИР для ответственных ЭТУ, не терпящих перерыва питания, показывает, что необходимый ее уровень может быть достигнут только принятием комплексных мер и при обязательном введении резервирования [10]. Исследования и опыт эксплуатации показывают, что уровень надежности ТПЧ с АИР в основном определяется надежностью силовых полупроводниковых приборов (СПП) и зависит от динамической и стационарной нагрузки, количества и схемы их включения [3, 11]. При этом основным аварийным режимом является срыв инвертирования АИР, составляющий до 78–85% от общего числа аварийных режимов [12, 13]. С учетом характера, особенностей различных режимов работы АИР и требований, предъявляемых к ним ответственными ЭТУ, выделим следующие наиболее эффективные методы и средства повышения их надежности:

- 1) применение схем резервирования как отдельных блоков и устройств ТПЧ с АИР, так и источника в целом;
- 2) применение схем АИР, характеристики и параметры элементов которых мало зависят от изменений характера, величины нагрузки и других условий;
- 3) использование высоконадежных комплектующих элементов (изделий) с обязательным выполнением входного контроля и приработке СПП для выявления скрытых дефектов;
- 4) выполнение предпускового контроля и диагностики технического состояния блоков и узлов ТПЧ с АИР;
- 5) применение в ТПЧ с АИР быстродействующих систем защиты и датчиков для выявления, предупреждения, а также ликвидации аварийных режимов;
- 6) введение в состав ТПЧ с АИР контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей быстро, достоверно определять техническое состояние узлов и блоков и формировать необходимые сигналы для управления;
- 7) применение конструкторских решений, обеспечивающих быстрое устранение неисправностей, а также обеспечивающих необходимый тепловой режим силовых элементов;
- 8) поддержание необходимой квалификации обслуживающего персонала.

Одним из примеров непрерывного электротехнологического процесса является процесс получения высококачественных слитков алюминия определенных типоразмеров с однородной кристаллической структурой и ровной поверхностью, не требующей дополни-

тельной механической обработки, путем литья расплавленного алюминия в ЭМК. Сущность метода заключается в электромагнитном воздействии на непрерывно подаваемый в ЭМК расплавленный алюминий, который удерживается от растекания электромагнитными силами индуктора и одновременно охлаждается водой. В результате происходит непрерывное наращивание цилиндрического слитка до определенных размеров. Особенностью получения таких слитков является то, что вынужденное прерывание рабочего процесса, например, при отказе ВИП более чем на 100 мс, приводит к растеканию и разливу расплавленного алюминия, и тем самым к браку, большим материальным потерям, выходу из строя оборудования, а в отдельных случаях и к более тяжелым последствиям. Используемые для этих целей ВИП с резервированными машинными преобразователями обладают такими недостатками, как: предельное значение времени переключения (до 100 мс) и относительно низкая надежность; низкий КПД; высокий уровень шума и вибрации; повышенные затраты на обслуживание и достаточно большой объем занимаемой рабочей площади [14].

Результаты исследования надежности методом малого числа испытаний различных видов и схем резервирования АИР с удвоением частоты и встречными диодами, прошедших приработку, без учета надежности устройств переключения и управления, приведены в [11]. Анализ результатов показывает, что среднее время безотказной работы при резервировании замещением инвертора инвертором и поблочном (инверторные мосты, ячейки) резервировании замещением с использованием общих, наиболее надежных блоков и элементов (блоки управления, контроля, трансформаторы, дроссели, конденсаторы и др.) повышается по сравнению с нерезервированным в 4–6 раз.

В общем случае выбор вида и структуры ВИП для ответственных ЭТУ определяется показателями надежности, допустимым временем перерыва питания с учетом вида и особенностей требований нагрузки, энергетическими и массо-габаритными показателями. Таким образом, результаты исследований аварийных, пусковых режимов, надежности различных видов схем резервирования и опыт эксплуатации АИР с удвоением частоты позволяют сформулировать следующие требования и рекомендации при выборе структуры и разработке ВИП для ЭТУ литья алюминия в ЭМК:

- 1) В качестве ВИП необходимо использовать ТПЧ с резервированными АИР удвоением частоты, встречными диодами и с закрытым (индуктивным) входом.
- 2) Целесообразно применять следующие схемы резервирования: замещением инвертора инвертором или замещением инверторных мостов (ячеек) с использованием общих наиболее надежных блоков и элементов — устройств управления, контроля, индуктивностей, трансформаторов и др.
- 3) Следует применять схемы резервированных АИР без коммутации цепи нагрузки.
- 4) Предпочтение надо отдавать таким алгоритмам управления, которые позволяют сократить время перерыва, а также дают возможность в процессе переключения полезно использовать накопительную энергию реактивных элементов основного АИР.
- 5) В структуру ТПЧ с резервированными АИР необходимо вводить аппаратуру (устройства) для предпускового и рабочего контроля блоков и устройств основного и резервного АИР.

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема ЭТУ для получения алюминиевых слитков, которая в общем случае состоит из ВИП и управляющей части. Питание ВИП осуществляется от первичной сети (ввод В1), а в случае резервирования первичной сети — еще и от ввода В2, и представляет собой ТПЧ, который состоит из неуправляемого выпрямителя ВП1 (ВП2) и резервированного резонансного инвертора повышенной частоты (РАИР). Выход РАИР через согласующий (понижающий) трансформатор ТС подключен к индуктору ИН кристаллизатора ЭМК, в котором и формируется цилиндрический алюминиевый слиток СЛ определенного диаметра за счет воздействия электромагнитного поля ИН при непрерывной подаче расплавленного алюминия АЛ на перемещающийся поддон ПД и охлаждении АЛ (СЛ) водой, подаваемой из водяного коллектора ВК. Компенсирующий конденсатор КК подключается параллельно первичной обмотке ТС. В рассматриваемом РАИР выполнено резервирование замещением инверторных мостов основного инвертора АИР с помощью резервных мостов РМ, а переключение при отказе АИР на РМ осуществляется по цепи питания быстродействующим тиристорно-конденсаторным переключателем [15]. Для устранения отказов (замены блоков, элементов) в АИР в цепь питания мостов АИР включен электромеханический автоматический выключатель SA, который отклю-

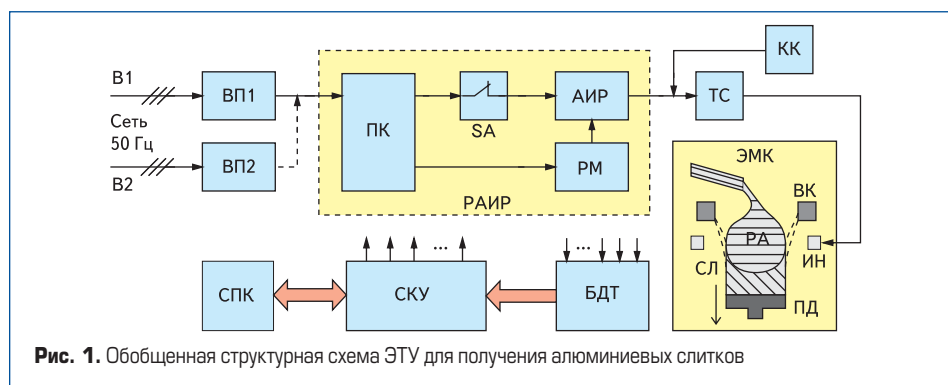


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ЭТУ для получения алюминиевых слитков

чает шины питания АИР при пуске РМ. Управляющая часть ЭТУ состоит из блока датчиков БДТ, системы управления и контроля СКУ и системы предпускового контроля и диагностики СПК.

На рис. 2 приведена принципиальная схема ТПЧ с резервированным АИР для литья алюминия в ЭМК с расчетной мощностью 120 кВт, частотой 1200 Гц, особенностями построения и работы которого являются: резервирование замещением мостов М1, 2 основного АИР резервными М3, 4 с использованием таких общих блоков и элементов, как неуправляемый выпрямитель ВП1, БДТ, СКУ, трансформатор ТС1, компенсирующий конденсатор $C_{ком}$, входные индуктивности L_{d1}, L_{d2} ; исключение коммутации цепи нагрузки в процессе переключения на РМ; использование энергии, накопленной в L_{d1}, L_{d2} , для заряда коммутирующих конденсаторов C_k мостов М3, 4 в процессе переключения; введение в схему РАИР специального конденсаторного выключателя КВ1, состоящего из тиристоров VS1, 2, индуктивности L1 и конденсатора C1, заряженного с полярностью, указанной на рис. 2 до Uс1 и позволяющего эффективно и быстро ограничить аварийные токи через тиристоры мостов М1, 2 при срывах инвертирования с последующим отключением их с помощью SA1 при $i_{M1}(i_{M2}) \approx 0$. Питание АИР (М1, 2) и РМ (М3, 4) осуществляется от выпрямителя ВП1 с выходным напряжением $U_d = 520$ В, при этом переключение питания (при срыве инвертирования в АИР) на РМ осуществляется с помощью быстродействующего переключателя ПК со следующими расчетными параметрами: $C_2 = 100$ мкФ, $L_2 = 1$ мкГн, $U_{c2} = 310$ В. Работа резервированного АИР (М1,2 или М3,4) осуществляется на скомпенсированную ($C_{ком}$) нагрузку ($\cos\phi_H = 1,0$), в результате приведенное к первичной обмотке ТС1 активное сопротивление нагрузки составляет $R'_H = 1,763$ Ом.

Остальные элементы и параметры резервированного АИР имеют следующие расчетные значения: собственная частота и волновое сопротивление колебательного контура М1, 2 (М3,4) $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_{k0}C_{k0}} = 1450$ Гц ($T_0 = 690$ мкс), $\rho = \sqrt{L_{k0}/C_{k0}}$, где $L_{k0} = 2L_k$, $C_{k0} = C_k / 2$ и $\rho = R'_H / d = 2,2$ Ом при принятом значении затухания колебательного инверторного контура $d = 0,8$; коммутирующие индуктивности и конденсаторы инверторных мостов (М1, 2, 3, 4) $L_k = 121$ мкГн, $C_k = 99,5$ мкФ; входные индуктивности $L_{d1} = L_{d2} \geq (10-15)L_{k0} = 3,63$ мГн; конденсатор и индуктивность КВ1 $C_1 = 100$ мкФ ($U_{c1} = 310$ В), $L_1 = 10$ мкГн.

Разработка и практическая реализация ТПЧ с резервированными АИР требуют решения основных задач, связанных с повышением быстродействия и надежности переключения. В связи с этим первоочередным является исследование процесса переключения при различных аварийных ситуациях и алгоритмах управления. В настоящее время для решения этих задач наряду с традиционными методами [10] исключительно широкое применение находит схемотехническое моделирование с использованием программ Spice, Micro-Cap9, Psim Parus ParGraph, Simulink/MATLAB,

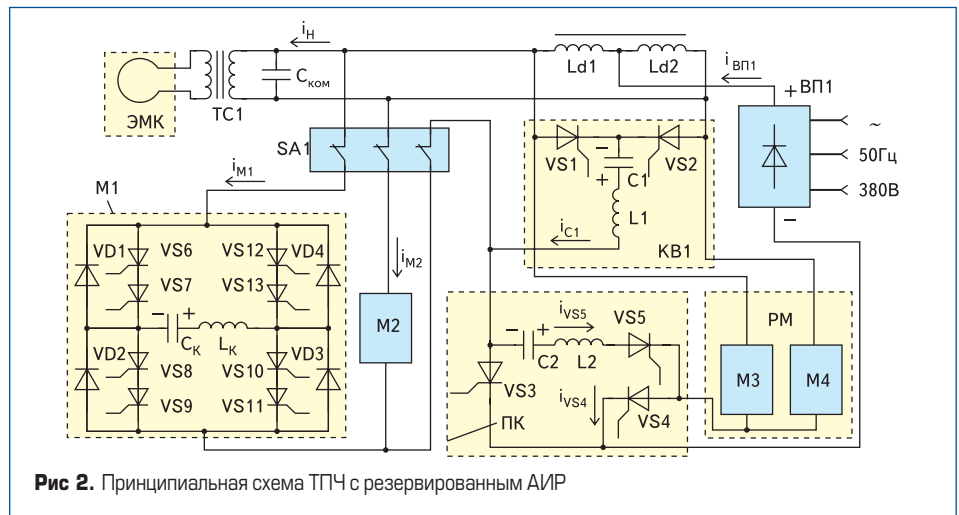


Рис. 2. Принципиальная схема ТПЧ с резервированным АИР

позволяющих значительно сократить время, повысить точность, информативность и гибкость учета всех основных параметров элементов модели.

На рис. 3 приведена модель ТПЧ с РАИР (см. рис. 2), выполненная в системе MATLAB с помощью пакета Simulink. Обозначения блоков и элементов в модели идентичны обозначениям на исходной схеме по рис. 2. Для сокращения количества линий связи и упрощения в модели соединительные точки с одинаковыми электрическими потенциалами выполнены в виде треугольников с одинаковыми номерами. Все источники, формирующие управляющие сигналы с уровнями «1» или «0», закрашены зеленым цветом, а блоки, служащие для контроля и измерения параметров (токов и напряжений), закрашены красным, причем блоки-осциллографы, контролирующие эти параметры, на рис. 3 отсутствуют. В модели приняты реальные значения параметров СПП, их защитных RC-цепочек, активных сопротивлений индуктивностей, а также нагрузки $R_n = R'_H = 1,76$ Ом. В инверторных мостах (М1, 2, 3, 4) управляющие импульсы на каждый тиристор подаются на входы Control1, 2, 3, 4, токи через тиристоры, встречные диоды, а также напряжения на них контролируются с выходов Currents and Voltages, а напряжения на C_k и токи мостов с выходов Uс и In current. Обозначения и контроль параметров остальных блоков (ПК, КВ1, ВП1, SA1) выполнены идентично. Срыв инвертирования (М1) выполняется однократной подачей импульса управления на тиристоры VS8, 9 (рис. 2) в момент отпирания очередных (рабочих) тиристоров VS6, 7 и VS10, 11, когда крутизна нарастания напряжения du_n / dt на тиристорах VS8, 9 имеет наиболее высокое значение [12, 13]. Для реализации этого введен источник управляющих сигналов (обозначен розовым цветом), который через сумматор подает сигнал на вход Control2 моста М1. Для получения и анализа основных характеристик переключения ТПЧ с РАИР используются блоки измерения.

Таковыми характеристиками, определяющими применимость ТПЧ с РАИР для реализации конкретного технологического процесса, являются непрерывность энергоснабжения и надежность переключения при аварийных ситуациях. Эти характеристики могут быть оценены соответственно коэффициентами

непрерывности энергоснабжения $K_{HЭ}$ и надежности переключения $K_{HП}$:

$$K_{HЭ} = t_{ПК} / t_{ДП}, K_{HП} = t^*_{BCC} / (t^*_{BCC})_{ДП}, t^*_{BCC} = t_{BCC} / (0,5T_0),$$

где $t_{ПК}$ — время переключения питания нагрузки с основного АИР на РМ, $t_{ДП}$ — допустимое время перерыва питания, t_{BCC} — схемное время восстановления тиристоров РМ. В результате условиями возможности использования и надежного функционирования ТПЧ с РАИР являются: $K_{HЭ} \leq 1, K_{HП} \geq 1$.

Значения коэффициентов $K_{HЭ}, K_{HП}$ в общем случае зависят как от быстродействия датчиков, ПК, так и от алгоритма переключения, режима (способа) пуска РМ, а также схемотехнического исполнения РАИР [10, 16]. Особенностью реализации алгоритма переключения в рассматриваемом ТПЧ с РАИР (рис. 2) является наличие этапа быстрой ликвидации с помощью КВ1 аварийного процесса в АИР до начала переключения на РМ. Это позволяет без отключения и перегрузки ВП1 исключить выход из строя СПП основного АИР, использовать энергию, накопленную в L_{d1}, L_{d2} , в цепи нагрузки и для заряда коммутирующих конденсаторов (C_k) РМ перед пуском. Рассмотрим результаты процесса переключения по данному алгоритму в рассматриваемом ТПЧ с РАИР (рис. 4а, б), полученные по модели рис. 3, где показаны осциллограммы $i^*_{M1}(i^*_{C1}), i^*_{M2}, i^*_{VS4}, i^*_{VS5}, i^*_{H1,2}, i^*_{HП}, i^*_{H3,4}, i^*_{ВП1}, u^*_{C1}, u^*_{VS3}$ соответственно токов М1, С1, М2, VS4, VS5, $R_n (R'_H)$, напряжений на C1 и VS3 при работе М1, 2, срыве работы М1 и работе М3, 4. Токи и напряжения приведены в относительных единицах, полученных по выражениям:

$$i^* = i / (U_d / \rho), u^* = u / U_d, U_d = 520 \text{ В}, \rho = 2,2 \text{ Ом}.$$

В момент времени t_1 (рис. 4а) происходит срыв инвертирования в М1, и в интервале $t_1 \dots t_2$ происходит нарастание аварийного тока i^*_{M1} через тиристоры данного моста. Этот интервал определяется быстродействием датчика аварии, и в модели принято несколько завышенное значение $t_1 \dots t_2 = t_{ДТ} = 50$ мкс. По сигналу датчика в момент t_2 осуществляется блокировка импульсов управления М1, 2 и одновременно подается отпирательный

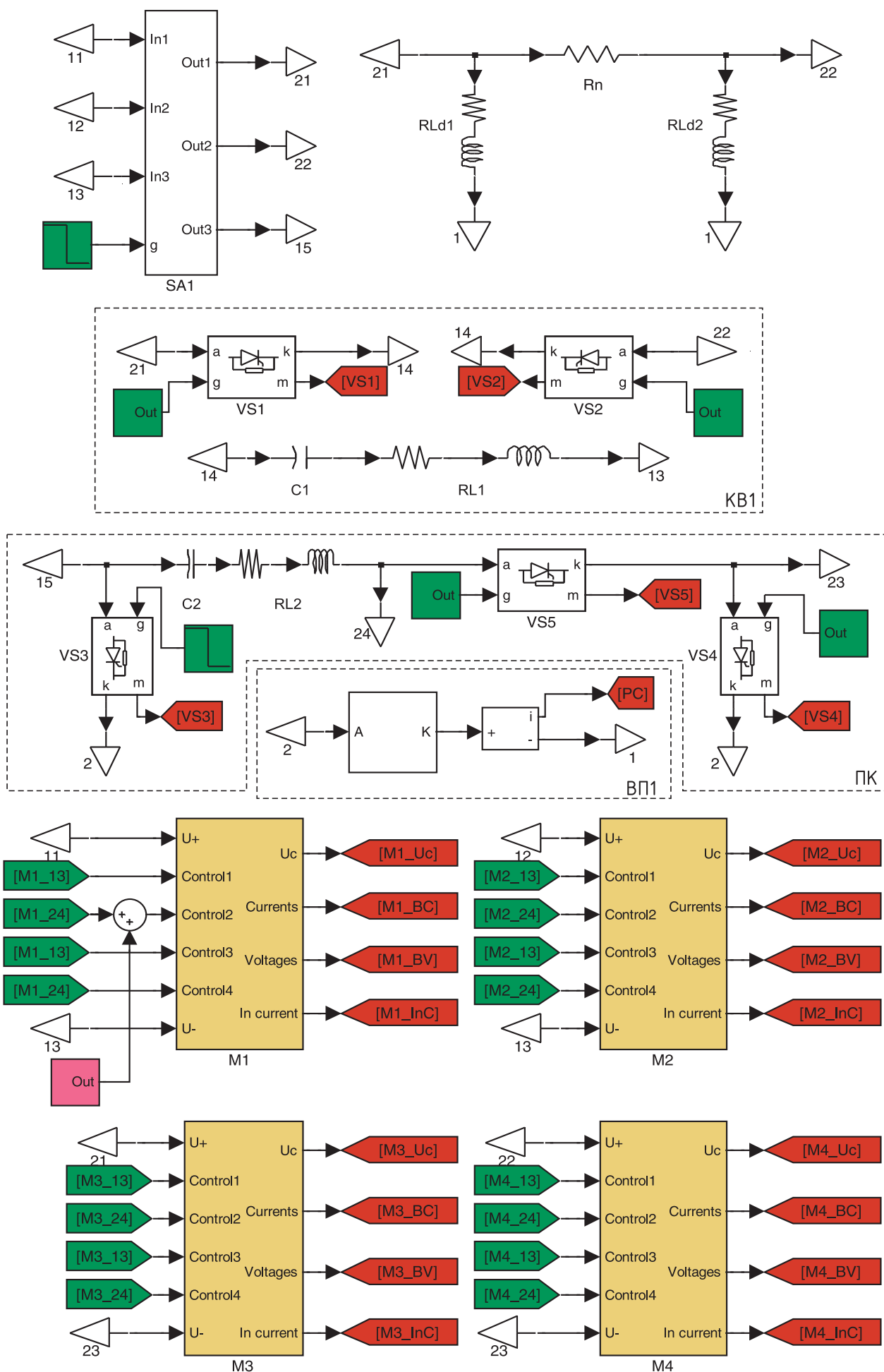


Рис. 3. Модель ТПЧ с резервированным АИР

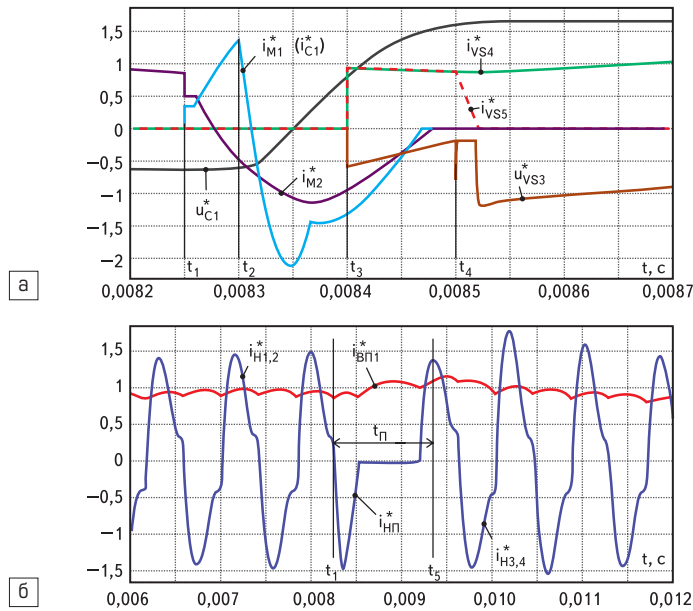


Рис. 4. Осциллограммы токов i_{M1}^* , i_{M2}^* , i_{VS4}^* , i_{VS5}^* и напряжений u_{C1}^* , u_{VS3}^* (а), токов $i_{H1,2}^*$, $i_{HП}^*$, $i_{H3,4}^*$, $i_{ВП}^*$ (б) в процессе переключения с основного АИР на РМ

импульс управления на VS1 KB1. В результате происходит колебательный разряд C1 током i_{C1}^* встречно аварийному току и быстрое отключение тиристоров M1 с последующим включением их встречных диодов. Далее в процессе перезаряда C1 на обратную полярность ($+u_{C1}^*$) в момент t_3 включаются VS4, VS5 переключателя ПК, происходит быстрое запираание VS3 и тем самым отключение M1, 2 от ВП1. Этот интервал $t_2...t_3 = t_{KB}$ определяется собственной частотой колебательного контура KB1 и значением $+u_{C1}^*$, которое определяется током i_{C1}^* и по результатам моделирования выбирается из условия $+u_{C1}^* > 0,6$, в модели принято $u_{C1}^* = 0,85$. После отключения VS3 (M1,2) токи i_{M2}^* , i_{C1}^* и $i_{ВП1}^*$ протекают через Rn, VS5, VS4 и L2, C2, при этом ток $i_{ВП1}^*$ несколько снижается. В момент t_4 с помощью SA1 отключаются M1,2 и включаются одновременно тиристоры двух синфазных плеч M3, 4, и начинается колебательный заряд их коммутирующих конденсаторов. Интервал $t_3...t_4 = t_{СП}$ определяется временем спада токов i_{C1}^* , i_{M2}^* , протекающих через цепь нагрузки ($i_{HП}^*$ рис. 4б), до нуля. В момент времени t_5 (рис. 4б) на тиристоры M3,4 подаются рабочие импульсы управления, в результате питание нагрузки осуществляется от РМ. Интервал $t_4...t_5 = t_{ПП}$ определяется в основном временем заряда Cк M3,4 до напряжения $U_{Cк}^*$ определяемого необходимым значением t_{BCC}^* в процессе пуска. Таким образом, время $t_{ПК}$ (рис. 4а, б) в рассматриваемом ТПЧ с РАИР по данному алгоритму определяется из следующего выражения:

$$t_{ПК} = t_{ДТ} + t_{KB} + t_{СП} + t_{ПП}$$

где $t_{ДТ}$, t_{KB} , $t_{СП}$, $t_{ПП}$ — время, соответственно, запаздывания датчика, перезаряда конденсатора KB1, спада токов C1 и M2, переходного процесса пуска РМ.

Следовательно, время $t_{ПК}$, определяемое по рис. 4а, б, от начала срыва инвертирования (t_1) до момента (t_5) достижения тока (мощнос-

ти) нагрузки своего установившегося значения после переключения на РМ, в основном зависит от $t_{ПП}$ и $t_{СП}$. Время $t_{ПК}$ составило 1,1 мс, в результате для процесса литья алюминия в ЭМК коэффициент $K_{HЭ} = 0,011$, а $K_{HП} = 2...2,5$ при паспортных значениях времени выключения тиристоров $t_{BЫК} = 50$ мкс. Следует также отметить, что перегрузка выпрямителя по току ВП1 составляет не более 12% в интервале 1,5 мс.

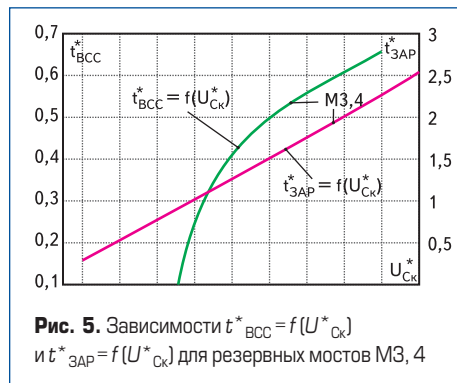


Рис. 5. Зависимости $t_{BCC}^* = f(U_{Cк}^*)$ и $t_{ZAP}^* = f(U_{Cк}^*)$ для резервных мостов M3, 4

По результатам моделирования получены основные характеристики (рис. 5) переключения ТПЧ с РАИР: $t_{BCC}^* = f(U_{Cк}^*)$ — зависимости схемного времени восстановления тиристоров от напряжения $U_{Cк}^*$ на Cк и $t_{ZAP}^* = f(U_{Cк}^*)$ — времени заряда Cк от $U_{Cк}^*$ мостов M3, 4 перед пуском, позволяющие установить условия надежного переключения.

Выводы

1. Разработана новая система резервированного питания ответственных ЭТУ на основе ТПЧ с РАИР, позволяющая повысить надежность и сократить время переключения при эффективном ограничении аварийных токов.
2. Выполнено схемотехническое моделирование процесса переключения в ТПЧ с РАИР в среде MATLAB/Simulink, определены составляющие времени переключения, скорректирован алгоритм переключения.

3. В результате моделирования получены основные характеристики, позволяющие установить условия надежного переключения: $t_{BCC}^* = 0,5...0,61$; $U_{Cк}^* = 1,2...1,6$; $t_{ZAP}^* = 2...2,5$.

Литература

1. Независимый инвертор. А. С. № 235177. Кацнельсон С. М., Ухов В. С. БИ № 5, 1969.
2. Валиуллина З., Зинин Ю. Тиристорные инверторы с обратными диодами для преобразователей частоты в установках индукционного нагрева металлов // Силовая электроника. 2007. № 4.
3. Высоковольтный инвертор. А. С. № 318130. Кацнельсон С. М., Морозов В. В., Пудровский Л. С., Аитов И. Л., Гутин Л. И., Филатов В. Н., Пегасов М. А. БИ № 31, 1971 (приоритет от 8.10.1969 г.).
4. Тиристорные умножители частоты: Учебное пособие / С. М. Кацнельсон. Уфа: УАИ, 1978.
5. Стабилизация напряжения и эффективность использования тиристоров в умножителях частоты: Учебное пособие / С. М. Кацнельсон. Уфа: УАИ, 1979.
6. Кацнельсон С. М., Аитов И. Л., Охотников В. А. Тиристорный преобразователь частоты с нагрузкой, включенной между входными дросселями инверторных мостов // Труды УАИ, выпуск зд. Сб. 2: Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. Уфа: УАИ, 1972.
7. Способ регулирования выходного напряжения многомостового автономного инвертора. А. С. № 399038. Кацнельсон С. М., Аитов И. Л., Гутин Л. Н., Малкин Б. Н., Охотников В. А. БИ. 1973. № 38 (приоритет от 03.11.1971 г.).
8. Патент № 669459 РФ. Автономный инвертор. Аитов И. Л. БИ № 23, 1979.
9. Патент № 18245 UA. Автономный инвертор. Лупкин Б. В., Аитов И. Л., Самигуллин Р. З. БИ № 11, 2006.
10. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Система гарантированного питания для электротехнологических установок // Электричество. 1988. № 4.
11. Аитов И. Л., Гайнанов Д. А., Кутдусов Ф. Х. Оценка и пути повышения надежности тиристорных преобразователей частоты // Преобразовательная техника: сб. статей. Новосибирск: НЭТИ, 1980.
12. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Анализ аварийного процесса при срыве режима инвертирования в многомостовых резонансных инверторах с индуктивным входом // Электромеханика. Известия вузов. 1984. № 5.
13. Аитов И. Л. Ограничение аварийного тока в многомостовых тиристорных инверторах с индуктивно-емкостным входом. Электромеханика. 1978. № 5.
14. Белкин А. К., Костюкова Т. П., Рогинская Л. Э., Шуляк А. А. Тиристорные преобразователи частоты. М.: Энергоатомиздат, 2000.
15. Источник бесперебойного питания. А. С. № 877709. Аитов И. Л., Гайнанов Д. А., Кутдусов Ф. Х. БИ № 40, 1981.
16. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х., Хомяков И. М. Вопросы управления резервированными системами питания повышенной частоты // Электромеханика. Известия вузов. 1986. № 9.