

Вопросы предпускового контроля резервированных тиристорных преобразователей частоты

В статье говорится о методах и средствах по повышению и поддержанию высокой надежности тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) на этапе эксплуатации; рассматриваются вопросы построения систем предпускового контроля (диагностики) ПКД, выбора способа и алгоритма контроля силовой части ТПЧ с резервированными автономными резонансными инверторами (РАИР) с удвоением частоты и закрытым входом для ответственных электротехнологических установок (ЭТУ). Приведена обобщенная функциональная схема системы, а также результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink ПКД силовых мостов РАИР по алгоритму и способу с минимальным потреблением энергии от питающей сети.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Эльнара Кушекова

elnarakusheкова@mail.ru

Современные электротехнологические процессы (ЭТП) получения и обработки металлов и сплавов высокого качества и со специальными свойствами предъявляют весьма высокие требования к силовым источникам питания по надежности и управляемости. Питание ответственных ЭТУ с различными ЭТП в большинстве случаев осуществляется от источников повышенной или высокой частоты (ВИП), в качестве которых широкое применение находят ТПЧ с РАИР, что связано как с определяющими достоинствами АИР, требованиями надежности, так и с особенностями нагрузки многих ЭТУ, представляющей собой колебательный нагрузочный контур [1, 2, 3].

Как известно, высокого уровня надежности ВИП можно достичь, когда закладывается необходимый высокий уровень при разработке, который реализуется (сохраняется) при производстве (изготовлении) и на этапе эксплуатации. Применительно к ВИП для ответственных ЭТУ, не теряющих перерыва питания, в [1] выделены наиболее эффективные методы и средства повышения их надежности.

На этапе эксплуатации таковыми являются:

- выполнение предпускового контроля (диагностики) технического состояния блоков, узлов ТПЧ с РАИР (ТПЧ с АИР) с устранением выявленных отказов (замена блоков, узлов);
- поддержание необходимой квалификации обслуживающего персонала и строгое соблюдение правил эксплуатации;
- высокий уровень технической документации (описание, инструкции по эксплуатации, профилактическим работам и выполнению предпускового контроля).

Экспериментальные исследования, а также достаточно длительный опыт промышленной эксплуатации ТПЧ с различными группами схем АИР с удвоением частоты и встречными диодами показывает, что выполнение ПКД является важным фактором, позволяющим поддерживать расчетные значения единичных показателей надежности ВИП, а также получить повышенные значения таких важных для ТПЧ с РАИР для ответственных ЭТУ комплексных показателей, как коэффициент готовности ($K_{ГТ}$) и оперативной готовности ($K_{ОГ}$).

В данной работе выделены методы и средства по повышению и поддержанию высокой надежности резервированных ТПЧ на этапе эксплуатации; рассмотрены вопросы построения систем ПКД, выбора способа и алгоритма контроля силовой части ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом для ответственных ЭТУ; приведены обобщенная функциональная схема системы, а также результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink ПКД силовых мостов РАИР по алгоритму и способу с минимальным потреблением энергии от питающей сети.

Авторы в [4] сформулировали ряд требований, условий и режимов и привели результаты исследований предпускового контроля (диагностики) ТПЧ с РАИР удвоением частоты и открытым входом. Эти требования и условия при выполнении ПКД являются базовыми и для рассматриваемых далее ТПЧ с АИР (РАИР) удвоением частоты и закрытым входом, вопросы построения, области использования, основные характеристики и достоинства которых рассмотрены в [1, 2, 5–10]. Однако особенности построения, а также пусковых, установившихся и аварийных режимов последних накладывают ряд отличий в выполнении отмеченных основных требований и условий и делают возможным использование различных вариантов алгоритма контроля силовой части ТПЧ (силовых мостов АИР или РАИР), в основном определяющей надежность всей ЭТУ.

На рис. 1а приведена схема ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом, широко используемая для питания ответственных ЭТУ повышенной и большой мощности, которая состоит из инверторных мостов М1, М2, М3, тиристорного выпрямителя ВПТ, двухсекционного входного дросселя $L_{вх}$, электромеханических автоматических переключателей с дистанционным управлением SA1, SA2 и нагрузки $R_{н}$, представляющей собой индукционную плавильную печь. Эквивалентная схема печи приведена на рис. 1б, где $r_{нэ}$, $X_{нэ}$ — эквивалентные активное и индуктивное сопротивление нагрузки, а $C_{ком}$ — компенсирующий конденсатор, служащий для получения $\cos\varphi_{н} \approx 1$. Важные особенности рассматриваемой схемы ТПЧ: использование одного резервного моста М3 при любом числе мостов основного

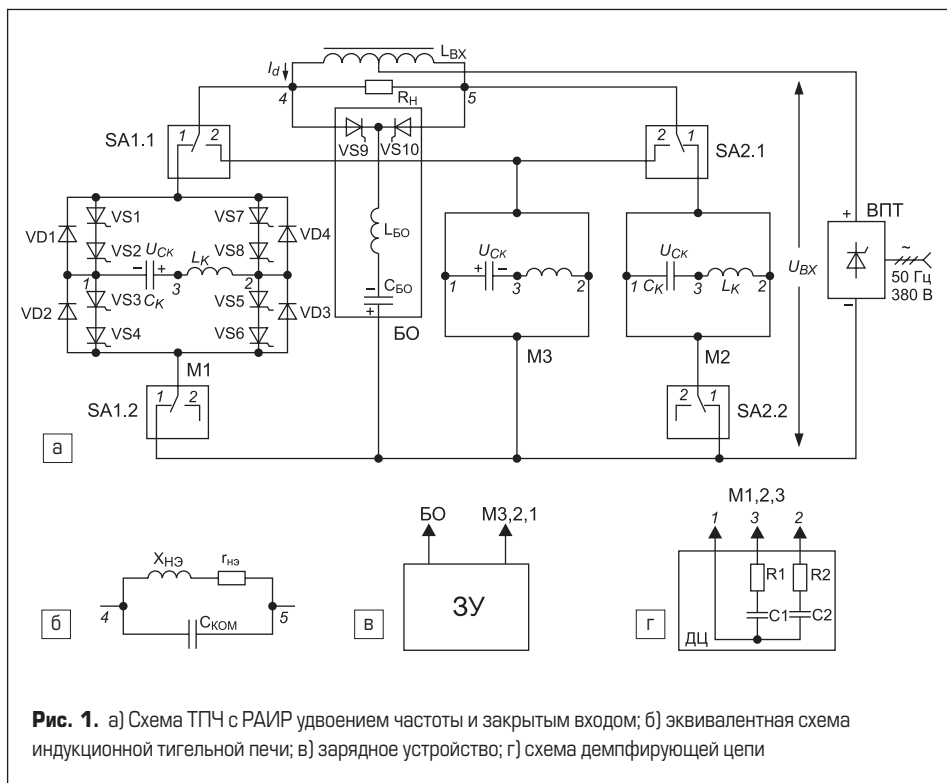


Рис. 1. а) Схема ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом; б) эквивалентная схема индукционной тигельной печи; в) зарядное устройство; г) схема демпфирующей цепи

АИР (в данном случае М1, М2); применение одного общего блока ограничения БО (VS9, VS10, C_{БО}, L_{БО}) аварийного тока мостов как АИР (М1, М2), так и резервного (М3); зарядного устройства ЗУ для заряда C_{БО} (рис. 1в), которое может быть использовано и для заряда C_К М1, М2, М3 при определенных вариантах алгоритма ПКД, а также применение демпфирующих цепочек ДЦ (рис. 1г), подключаемых к соответствующим точкам (1, 2, 3) коммутирующих диагоналей мостов М1, М2, М3 для эффективного снижения крутизны нарастания напряжения $du_{V\theta}/dt$ на тиристорах [4]. Построение и процесс аварийного переключения в данном ТПЧ с РАИР во многом идентичен рассмотренным в [1]. При этом его важные отличия (рис. 1а) таковы:

1. Упрощение ТПЧ с РАИР и достижение относительно высоких значений расчетных показателей надежности за счет использования одного резервного моста М3, возможности замещения им любого из мостов основного АИР, а также обратной замены резервного моста М3 одним из мостов (М1 или М2) после восстановления его работоспособности.
2. Использование одного БО для ограничения аварийного тока любого из мостов РАИР до безопасного уровня.
3. Поддержание в работоспособном состоянии М3 после выполнения ПКД за счет предварительного заряда C_К моста М3 до напряжения $u_{Cк} \approx U_{\theta\theta}$ с непрерывным контролем и подзарядом его в процессе работы основного АИР.

Применительно к рассматриваемой схеме (рис. 1а) выполнение ПКД основных блоков и узлов наряду с контролем и поддержанием в заряженном состоянии конденсаторов C_{БО}, C_К блока БО и М3, в процессе от начала ПКД и до окончания реализации рабочего ЭТП, позволяет исключить пуск ЭТУ в работу при неисправном состоянии или отклонении пара-

метров блоков и узлов ТПЧ и повысить значения коэффициентов K_{ГТ} и K_{ОГ}. Коэффициент готовности K_{ГТ} характеризует частично совокупность свойств безотказности и ремонтпригодности ТПЧ с РАИР и представляет собой вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, кроме интервалов (периодов), когда не предусматривается его использование. Для его определения практическое применение находит выражение:

$$K_{ГТ} = \bar{t}_0 / (\bar{t}_0 + \bar{t}_\theta), \quad (1)$$

где \bar{t}_0 , \bar{t}_θ — средняя продолжительность предстоящей безотказной работы и среднее время восстановления. Согласно [11] выражение (1) справедливо для любых законов наработки до отказа и времени восстановления. Кроме того, это выражение позволяет упростить практическое определение K_{ГТ}, которое статистически рассчитывается как

$$\bar{K}_{ГТ} = \sum_{i=1}^N t_{0\Sigma i} / (NT_3), \quad (2)$$

где $t_{0\Sigma i}$ — суммарное время пребывания i -го объекта в рабочем состоянии; N — количество одинаковых наблюдаемых объектов; T_3 — длительность эксплуатации, состоящая из последовательно чередующихся интервалов времени работы и аварийного восстановления.

Применение ПКД позволяет еще до пуска обнаружить отклонения параметров или отказ блоков и узлов, а принятие мер по устранению их — восстановить работоспособность ТПЧ с РАИР за некоторое допустимое время восстановления $\bar{t}_{\theta\theta}$ с вероятностью $P_\theta(t)$, при этом общее время восстановления \bar{t}_θ работоспособности составит:

$$\bar{t}_\theta = (\bar{t}_{ПКД} + \bar{t}_{\theta\theta}), \quad (3)$$

где $\bar{t}_{ПКД}$ — среднее время выполнения ПКД. При этом чем выше надежность, то есть безотказное состояние $P_\theta(t)$ ТПЧ с РАИР, тем меньше $\bar{t}_{\theta\theta}$ и выше K_{ГТ}. Вероятность $P_{кв}(t)$ безотказного состояния ТПЧ с РАИР, с учетом выполнения ПКД и восстановления, может быть определена по выражению:

$$P_{кв}(t) = P_\theta(t) + (1 - P_\theta(t)) \times P_\theta(t). \quad (4)$$

Например, вероятность безотказного состояния ТПЧ с АИР $P_\theta(t) = 0,92$, а $P_\theta(t) = 0,8$. Тогда вероятность $P_{кв}(t)$ безотказного состояния с учетом выполнения ПКД и восстановления согласно выражению (4) составит:

$$P_{кв}(t) = 0,92 + (1 - 0,92) \times 0,8 = 0,92 + 0,064 = 0,984.$$

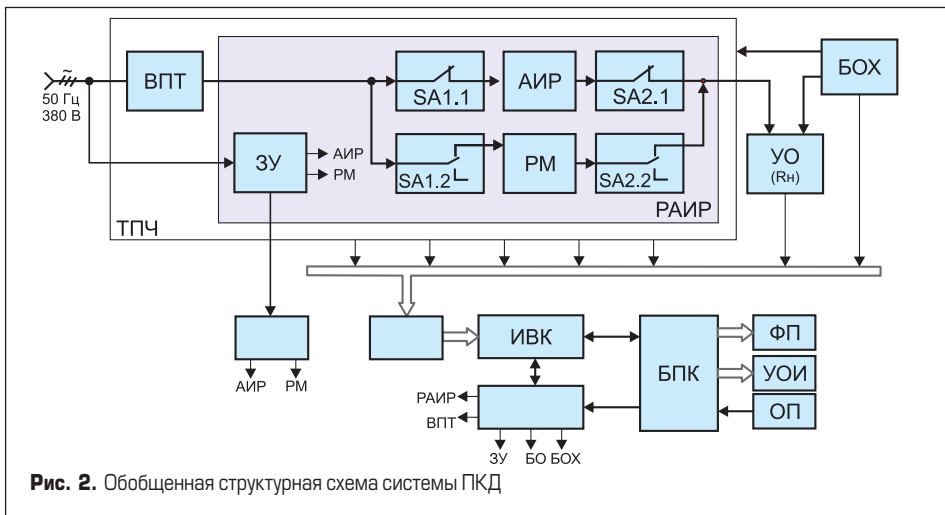
Для ТПЧ с РАИР важным показателем является K_{ОГ}, представляющий собой вероятность того, что объект, например, РМ М3 (рис. 1а), оказывается работоспособным в любой произвольный момент времени t , начиная с этого момента, работает безотказно в течение заданного интервала времени $t_{рб}$. Если вероятность $P(t_{рб})$ — безотказной работы М3 (объекта) в течение $t_{рб}$ — не зависит от момента t , то K_{ОГ} на интервале $t_{рб}$ после момента t определяется как

$$K_{ОГ} = K_{ГТ}(t) P(t_{рб}). \quad (5)$$

В уравнении (5) K_{ГТ}(t) определяется по выражению (1), при этом $\bar{t}_\theta = (\bar{t}_{ДТ} + \bar{t}_{ПК})$, где $\bar{t}_{ДТ}$, $\bar{t}_{ПК}$ — среднее время запаздывания датчика аварийного состояния АИР и переключения с аварийного моста (М1 или М2) на резервный М3. Практически время $\bar{t}_\theta = (\bar{t}_{ДТ} + \bar{t}_{ПК})$ может составлять от единиц до десятка миллисекунд, поэтому уже при $\bar{t}_0 = 1$ час K_{ГТ}(t) $\approx 1,0$, а K_{ОГ} $\approx P(t_{рб})$.

Таким образом, вопросы построения систем, выбора способа и алгоритма контроля блоков, узлов и их параметров, а также средств выполнения ПКД важны при реализации ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом, которые наиболее широко используются для питания ответственных ЭТУ с непрерывными ЭТП повышенной и большой мощности [1, 2, 5–10].

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема системы ПКД для ВИП на основе ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом (рис. 1а). Система ПКД состоит из блока датчиков БДТ; измерительно-вычислительного комплекса ИВК, связанного с БДТ и блоками предпускового контроля (диагностики) — БПК и управления БУ, формирующего управляющие сигналы тиристорным выпрямителем — ВПТ, РАИР (основной АИР, резервный мост РМ, переключатели SA1, SA2); блока охлаждения БОХ установки, зарядного устройства ЗУ и блока ограничения БО аварийного тока мостов АИР и РМ; флэш-памяти для записи контролируемых параметров в процессе выполнения ПКД, пуска ТПЧ в работу и при аварийных переключениях на РМ с привязкой по времени; устройства отображения информации УОИ. Контроль (управление) в процессе выполнения ЭТП осуществляет оператор ОП.



последовательно и отдельно всех синфазных плеч и колебательного заряда C_K мостов АИР (PM) с последующим переходом к контролю работы АИР на пониженной частоте без загрузки индуктора.

Таким образом, разработанный авторами способ ПКД ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом заключается в контроле силовых блоков и элементов (рис. 1, 2) в режиме их нарастающей загрузки вплоть до рабочих значений с последующим определением работоспособности ТПЧ при пониженной частоте без загрузки индуктора. Особенности этого режима являются: минимальная потребляемая энергия, определяемая в основном потерями в АИР и индукторе; максимальная нагрузка по току встречных диодов и близкая к максимальным для тиристорам; максимальное значение времени восстановления $t_{\text{вс}}$ для тиристорам и близкое к максимальному значению крутизны нарастания напряжения du_{VS}/dt на тиристорах. Особенности данного режима и описанный алгоритм контроля (диагностики) силовых блоков и элементов позволяют с высокой достоверностью и надежностью реализовать основные требования и условия выполнения ПКД применительно к рассматриваемым ТПЧ с РАИР.

Для исследования операций ПКД силовых блоков и элементов ТПЧ (рис. 1а-г) была разработана его схемотехническая модель в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink, которая приведена на рис. 3, где обозначения блоков и элементов соответствуют обозначениям на рис. 1, 2. Для сокращения лини связи и упрощения модели соединительные точки с равными потенциалами выполнены в виде треугольников с одинаковыми номе-

Рассмотрим особенности реализации основных требований и условий при выполнении ПКД для рассматриваемых ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом:

1. В процессе выполнения ПКД минимальное потребление энергии от источника питания (питающей сети) при максимальном $U_{\text{вх}} \approx 520$ В (рис. 1а) достигается снижением частоты инвертирования (управления) РАИР относительно резонансной частоты нагрузочного колебательного контура, то есть индуктора с $C_{\text{ком}}$ без загрузки, при этом в эквивалентной схеме (рис. 1б) вместо $r_{\text{нз}}$ следует принимать $r_{\text{и}}$ — активное сопротивление провода индуктора.
2. Выполнение ПКД осуществляется при токовых нагрузках и напряжениях на силовых вентилях и других элементах (тиристоры, встречные диоды, $C_K, L_K, L_{\text{вх}}, \text{ДЦ}$), максимально приближенных к рабочим, путем

контроля вначале тока утечки мостов АИР (PM), а затем однократной загрузки тиристорам отдельных синфазных плеч мостов с последующей работой мостов на пониженной частоте.

3. Максимально возможное исключение возникновения и развития аварийных режимов для источника питания в процессе выполнения ПКД достигается путем реализации алгоритма, по которому сначала осуществляется подготовка БО к работе, то есть заряд $C_{\text{БО}}$ до напряжения $U_{\text{БО}}$, что позволяет в любой момент времени ограничить аварийный ток мостов АИР (PM) путем включения VS9 или VS10 (рис. 1а); затем контролируется ток утечки мостов АИР (PM) при приложенном $U_{\text{вх}} \approx 520$ В (включается ВППТ) и отключенном блоке управления тиристорами РАИР; далее контролируется работа РАИР при $U_{\text{вх}} \approx 520$ В путем однократного включения

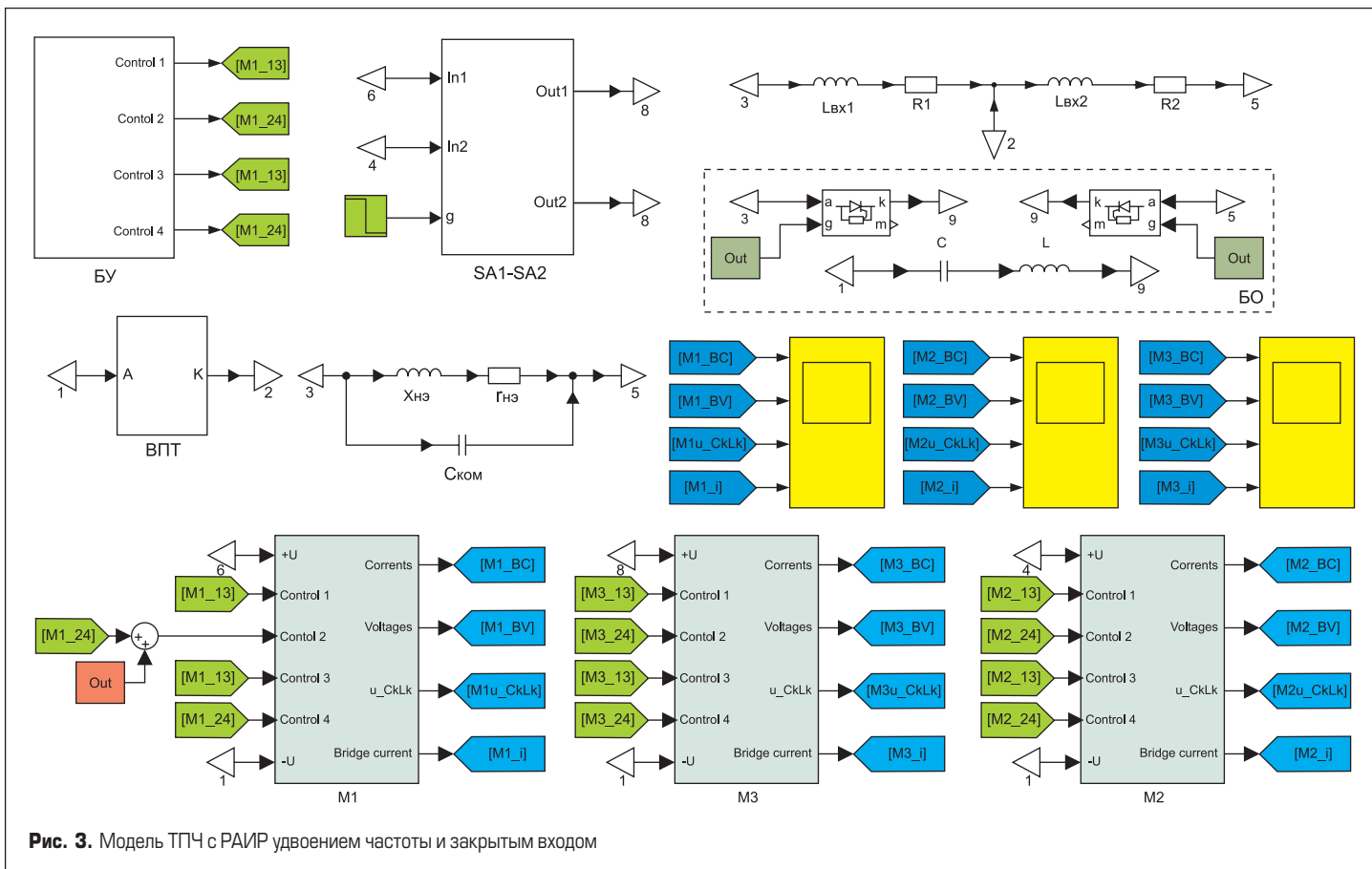


Рис. 3. Модель ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом

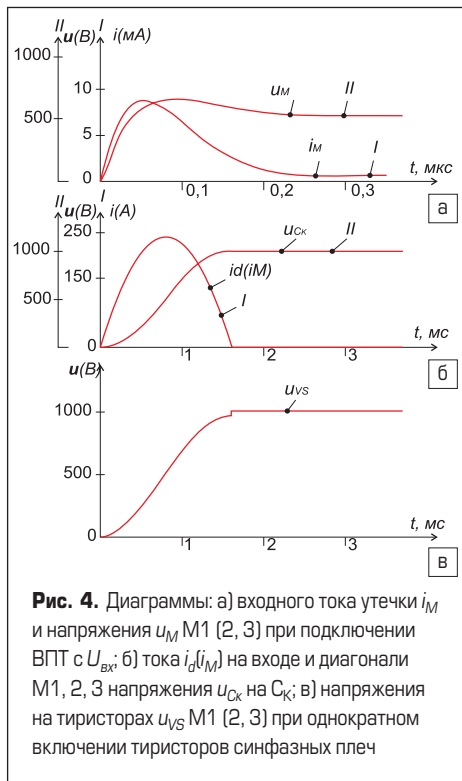


Рис. 4. Диаграммы: а) входного тока утки i_M и напряжения u_M М1 (2, 3) при подключении ВПТ с $U_{вх}$; б) тока $i_d(i_M)$ на входе и диагонали М1, 2, 3 напряжения u_{CK} на C_K ; в) напряжения на тиристорах u_{VS} М1 (2, 3) при однократном включении тиристоров синфазных плеч

рами. При моделировании приняты реальные значения параметров силовых полупроводниковых приборов (СПП); из защитных RC-цепочек и ДЦ; активных сопротивлений индуктивностей $L_K, L_{вх}$ и переключателей SA1, SA2; АИР: $U_{вх} \approx 520$ В, $P_{нм} = 250$ кВт, $f_0(\omega_0) = 1100$ Гц — собственная частота колебательного контура, $f_y = 1000$ Гц — частота управления, $\rho = 1,25$ Ом, $d = 0,75 \div 0,8$ — волновое сопротивление и добротность колебательного контура; нагрузки, представляющей собой нагрузочный колебательный контур (рис. 16): $X_{нз} = 30$ мкГн, $r_{нз} = 1$ Ом, $r_u = 0,0005$ Ом, $C_{ком} = 85 \div 90$ мкФ. В мостах М1, М2, М3 управляющие импульсы на соответствующие тиристоры подаются на входы Control1 (2, 3, 4), токи через СПП, а также напряжения на них контролируются с выходов Currents и Voltages, а напряжение и ток в диагонали моста — с выходов “ $u_{C_K L_K}$ ” и Bridge current. Контроль параметров других блоков и элементов выполняется идентично. Для исследования операций ПКД и получения необходимых параметров используются блоки измерения Score1 (2, 3).

На рис. 4–6 приведены результаты исследования на модели ПКД силовых блоков и элементов ТПЧ с РАИР по описанному алгоритму контроля. На рис. 4а–в приведены диаграммы: входного тока утки i_M и напряжения u_M мостов М1, М2, М3 при подключении ВПТ с $U_{вх}$; тока $i_d(i_M)$ на входе и диагонали мостов М1, М2, М3, напряжения u_{CK} на коммутирующем конденсаторе C_K , напряжения на тиристорах u_{VS} мостов М1, М2, М3 при однократном включении тиристоров синфазных плеч. На рис. 5а–д приведены диаграммы: токов на входе i_d в диагонали $i_{M1(2,3)}$ и в цепи ДЦ $i_{ДЦ}$ мостов М1, М2, М3; напряжений на тиристорах u_{VS} , а также диагонали $u_{1,2}$ мостов М1, М2, М3 при пониженной частоте управления. На рис. 6а–е приведены диаграммы: токов на входе i_d в диагонали $i_{M1(2,3)}$ и в цепи ДЦ $i_{ДЦ}$ мостов М1, М2, М3; напряжений на нагрузке u_H ; д) на тиристорах u_{VS} ; е) диагонали $u_{1,2}$ М1 (2, 3) при номинальной мощности

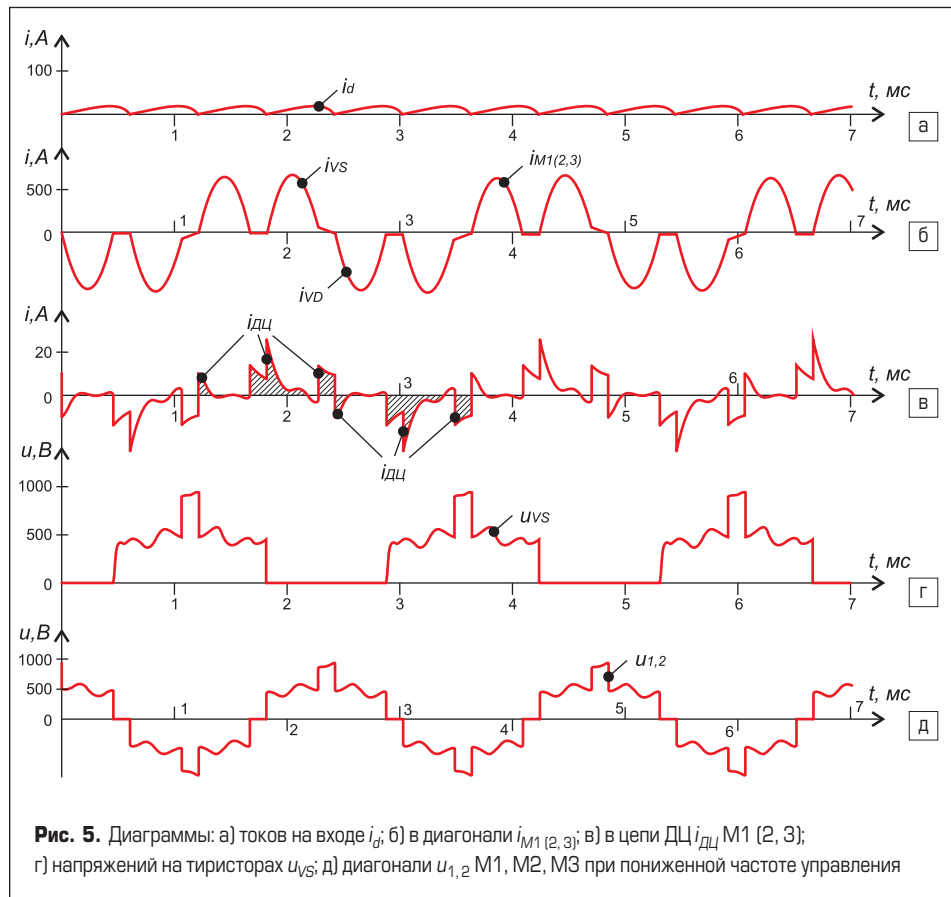


Рис. 5. Диаграммы: а) токов на входе i_d ; б) в диагонали $i_{M1(2,3)}$; в) в цепи ДЦ $i_{ДЦ}$ М1 (2, 3); г) напряжений на тиристорах u_{VS} ; д) диагонали $u_{1,2}$ М1, М2, М3 при пониженной частоте управления

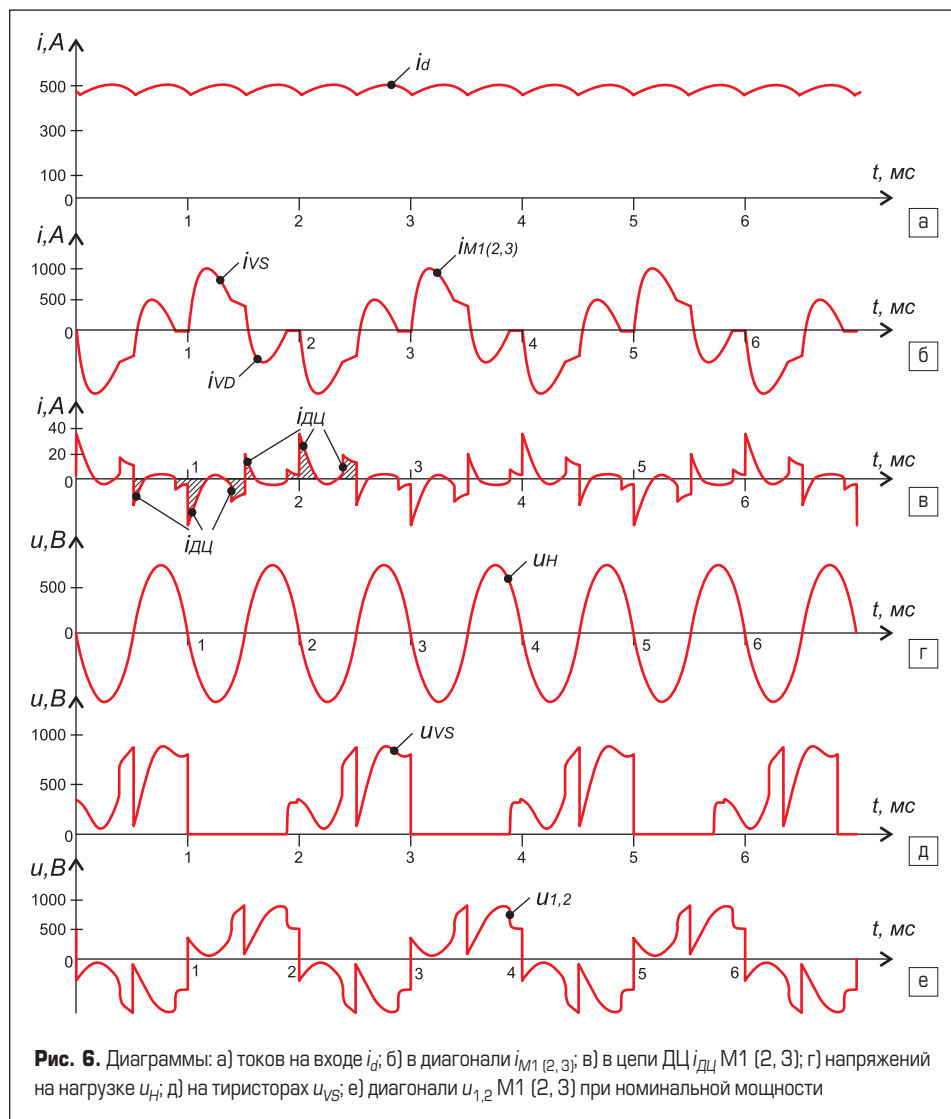


Рис. 6. Диаграммы: а) токов на входе i_d ; б) в диагонали $i_{M1(2,3)}$; в) в цепи ДЦ $i_{ДЦ}$ М1 (2, 3); г) напряжений на нагрузке u_H ; д) на тиристорах u_{VS} ; е) диагонали $u_{1,2}$ М1 (2, 3) при номинальной мощности

u_{T} на тиристорах u_{VS} и диагонали $i_{1,2}$ мостов М1, М2, М3 при номинальной мощности. Значения напряжений и токов на СПП, C_K , L_K мостов соответствуют рабочим. Как видно на рис. 5г и 6д, применение демпфирующих цепочек ДЦ (рис. 1г), подключаемых к соответствующим точкам (1, 2, 3) коммутирующих диагоналей мостов М1, М2, М3, позволяет эффективно ограничивать du_{VS}/dt на тиристорах.

Выводы

1. Выделены основные методы и средства по повышению и поддержанию высокой надежности ТПЧ на этапе эксплуатации, разработаны и исследованы схемотехнические решения, позволяющие упростить и повысить надежность ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом.

2. Сформулированы принципы, условия, алгоритм и режимы выполнения ПКД для ТПЧ, предложен и исследован метод, заключающийся в выполнении контроля и определении работоспособности силовой части

ТПЧ с РАИР удвоением частоты и закрытым входом в режимах их нарастающей нагрузки и при пониженной частоте инвертирования.

Литература

1. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
2. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 3.
3. Зинин Ю. Представление нагрузки при исследовании схемотехнических моделей тиристорных преобразователей частоты для индукционной плавки металлов // Силовая электроника. 2008. № 1.
4. Аитов И., Кушкова Э. Повышение надежности тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2009. № 1.
5. Аитов. И. Л. Исследование тиристорных многомостовых преобразователей повышенной частоты с фазовым регулированием мощности: Дис. канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1974.
6. Аитов И. Л., Кацнельсон С. М. Автономные преобразователи частоты: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1978.
7. Патент № 669459 РФ. Автономный инвертор / И. Л. Аитов // БИ. 1979. № 23.
8. Последовательный автономный инвертор. А. с. № 936297 РФ / И. Л. Аитов // БИ. 1982. № 22.
9. Патент № 18245 UA. Автономный инвертор / Б. В. Лупкин, И. Л. Аитов, Р. З. Самигуллин // БИ. 2006. № 11.
10. Воробьев Ю. В. Тиристорные преобразователи частоты для питания многопозиционных индукционных электротермических установок: Дис. канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1983.
11. Китушин В. Г. Надежность энергетических систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1984.