

Повышение надежности

тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок

В статье говорится о комплексных мерах по повышению надежности тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР); выделены основные причины, снижающие надежность работы АИР с встречными диодами; приведены схемотехнические решения по повышению надежности и результаты моделирования таких АИР в среде MATLAB (Simulink); рассматриваются вопросы построения и реализации системы предпускового контроля (диагностики) технического состояния блоков и узлов ТПЧ с АИР для ответственных электротехнологических установок (ЭТУ); приведены обобщенная структурная схема, ее алгоритм, способы и средства выполнения контроля на примере резервированного АИР с удвоением частоты, встречными диодами и открытым входом.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Эльнара Кушекова

elnarakushekova@mail.ru

В настоящее время получение металлов и сплавов высокого качества с приданием им особых свойств, таких как жаростойкость, износостойкость, сверхтвердость, коррозионная стойкость и др., а также изготовление, обработка деталей и изделий из них в космической, авиационной, химической, электронной промышленности и других отраслях характеризуется такими процессами, как:

- интенсивное совершенствование и использование известных технологических процессов (ТП), разработка и освоение новых ТП, основанных на электрофизических (ЭФМ), электрохимических (ЭХМ) и других методах получения, формообразования и обработки материалов;
- исключительно широкое использование в ЭТУ в качестве основных источников питания силовых полупроводниковых электронных устройств (СЭУ) с необходимыми параметрами и характеристиками, разработка так называемых управляемых СЭУ, позволяющих улучшить технико-экономические показатели, экологическую обстановку, расширить функциональные возможности и повысить надежность;
- широкое использование вычислительной техники (ЭВМ), микропроцессорных систем (МПС), а также измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) в системах управления, контроля и защиты ЭТУ.

Следует обратить особое внимание на то, что ряд современных ТП для указанных целей, а также процессы в химической промышленности, где широко используются высокочастотные источники питания (ВИП), являются непрерывными, то есть не терпящими перерыва в электропитании, и предъявляют к системам электроснабжения весьма высокие требования по надежности [1, 4].

В качестве ВИП для ЭТУ, использующих индукционный метод нагрева (плавки), формовки и обработки металлов, базовыми схемами, прошедшими определенный этап теоретических, экспериментальных исследований, а также промышленной эксплуатации, являются тиристорные АИР с удвоением час-

тоты с открытым или закрытым входами и встречными диодами. Схемы АИР по сравнению с инверторами тока и напряжения являются «молодыми», они многочисленны и разнообразны, причем основная часть из них была предложена в последние 30–40 лет, уже после изобретения тиристора. Из многочисленных схемотехнических вариантов АИР следует выделить следующие классификационные группы:

- схемы АИР с удвоением частоты, встречными диодами и открытым входом;
- схемы АИР с удвоением частоты, встречными диодами, закрытым входом и удвоением выходного напряжения;
- схемы АИР с удвоением частоты, встречными диодами, закрытым входом, умножением (> 2) выходного напряжения и с непосредственными связями между ячейками;
- схемы АИР с удвоением частоты, встречными диодами, закрытым (открытым) входом и симметричным выходным напряжением.

Схемы АИР приведенных групп нашли широкое применение в различных ЭТУ и наиболее перспективны для реализации мощных источников питания среднечастотного диапазона [1, 4–18]. Это связано с рядом важных их преимуществ и характеристик, таких как простота запитания и относительно большое схемное время восстановления тиристорных $t_{\text{вс}}$; синусоидальная форма тока через тиристоры, а значит, относительно небольшая крутизна нарастания тока di_d/dt через них; стабилизация напряжения на силовых вентилях и других элементах АИР при изменении величины и характера нагрузки в широких пределах, вплоть до короткого замыкания (КЗ) нагрузки; возможность реализации как частотного, так и фазового регулирования выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (мощности P_n) без применения дополнительных силовых устройств; возможность повышения (умножения) $U_{\text{вых}}$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$, а также получение симметричного $U_{\text{вых}}$ относительно «земли» при питании АИР от трехфазной промышленной сети 50 Гц через мостовой выпрямитель.

Однако для АИР с встречными диодами характерны также высокая крутизна нарастания прямого напряжения du_d/dt на тиристорах и наличие коммутационных перенапряжений на вентилях большой амплитуды и крутизны нарастания, возникающих в моменты выключения, то есть обрыва обратного тока диодов (U_{m1}), и при включении очередных противофазных тиристоров (U_{m2}). Это приводит, если не принять мер, к снижению надежности АИР из-за высокой вероятности самопроизвольного включения тиристоров, пробоя и выхода их из строя [6, 9, 17]. В [1] авторы выделили наиболее эффективные методы и средства повышения надежности АИР для ответственных, не терпящих перерыва электротехнологических процессов. Было отмечено обязательное введение резервирования, но при условии принятия дополнительных (комплексных) мер, позволяющих получить высокую вероятность безотказной работы как основного АИР, так и резервного. Таким образом, для рассматриваемых случаев применения АИР резервирование является необходимым, но недостаточным.

На рис. 1а приведена базовая схема мостового АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами, питание которого осуществляется от трехфазной промышленной сети 50 Гц, напряжением $U_n = 380$ В через мостовой выпрямитель ВП и тиристорно-конденсаторный выключатель КВ, при этом $U_{\delta x} \approx 510 \div 520$ В. Нагрузка, обычно представляющая собой колебательный нагрузочный контур с эквивалентным активным сопротивлением R_{H3} , включена в цепь разделительного конденсатора, при этом $C_p \gg C_k$. Включение встречных диодов параллельно тиристорам в схемах АИР с открытым и закрытым входами позволило решить весьма важные вопросы по повышению устойчивости их работы как за счет относительного увеличения и получения схемного времени восстановления тиристоров $t_{\delta cc} \approx T_0/2 \sim const$, где T_0 — период собственных колебаний контура $C_k L_k$, так и ограничения прямого напряжения на них на определенном, относительно низком уровне, при изменениях нагрузки от максимального допустимого уровня до КЗ. При этом возникают, как было показано выше, задачи, связанные с необходимостью ограничения и равномерного распределения крутизны нарастания du_d/dt прямого напряжения и коммутационных перенапряжений на тиристорах, возникающих в моменты обрыва обратного тока встречных диодов и включения противофазных тиристоров. Это особенно важно при последовательном соединении тиристоров (диодов) в высоковольтных, мощных АИР [1, 9, 17]. С точки зрения устойчивости и надежности работы АИР наиболее «опасны» перенапряжения, возникающие в моменты обрыва обратного тока (i_{ob}) встречных диодов, которые имеют высокую амплитуду (U_{m1}) и крутизну нарастания, являются прямыми и прикладываются к запираемому тиристорам как раз в момент окончания $t_{\delta cc}$. Величина U_{m1} зависит от крутизны спада di_{ob}/dt , которая, в свою очередь, увеличивается со снижением нагрузки и максимальна при

КЗ нагрузки. Кроме того, U_{m1} зависит от величины L_k , времени выключения $t_{\delta_{вык}}$ и его составляющих — восстановления обратного сопротивления t_{δ_0} и t_{cn} — быстрого спада обратного тока встречных диодов. При расчете демпфирующих RC-цепей, а также коммутационных потерь в [19, 20] показано, что t_{δ_0} , t_{cn} в достаточно широком диапазоне связаны со временем выключения $t_{\delta_{вык}}$ линейной зависимостью, и поэтому могут быть использованы следующие соотношения: $t_{\delta_0} \approx 0,15 t_{\delta_{вык}}$, $t_{cn} \approx 0,04 t_{\delta_{вык}}$. В результате, учитывая, что $t_{\delta_{вык}}$ измеряется по методике и в режимах, установленных в ГОСТе, амплитуда коммутационных перенапряжений U_{m1} может быть определена по выражению:

$$U_{m1} = \frac{di_{ob}/dt \times t_{\delta_0} \times L_k}{t_{cn}}$$

Высокая крутизна нарастания du_d/dt и относительно большая амплитуда U_{m1} , а также U_{m2} являются одной из основных причин срыва инвертирования и пробоя тиристоров, тем более

что напряжение U_{m1} прикладывается к тиристорам сразу после окончания схемного времени $t_{\delta_{cc}}$. Величина U_{m1} увеличивается с ростом собственной частоты колебательного контура $C_k L_k$ и со снижением величины R_{H3} нагрузки АИР и будет максимальной при КЗ, когда di_{ob}/dt максимальна. В результате при построении особенно мощных, высоковольтных АИР с удвоением частоты и встречными диодами используют последовательное соединение тиристоров и встречных диодов [6, 9, 17]. При этом для равномерного распределения du_d/dt и величины напряжения по тиристорам и диодам применяются демпфирующие, выравнивающие RC-цепочки, защитные диоды и др. Следует отметить, что использование защитных диодов не позволяет снизить du_d/dt , ограничивает только амплитуду и является относительно дорогостоящим. Определенное снижение крутизны нарастания и амплитуды U_{m1} , U_{m2} достигается выполнением L_k (рис. 1а) из двух отдельных частей, то есть $L_k = L_{k0} + L_3$, при этом L_{k0} выбирают из условия $L_{k0}/(L_{k0} + L_3) \geq 0,7$ и включают в диагональ моста, а защитную ин-

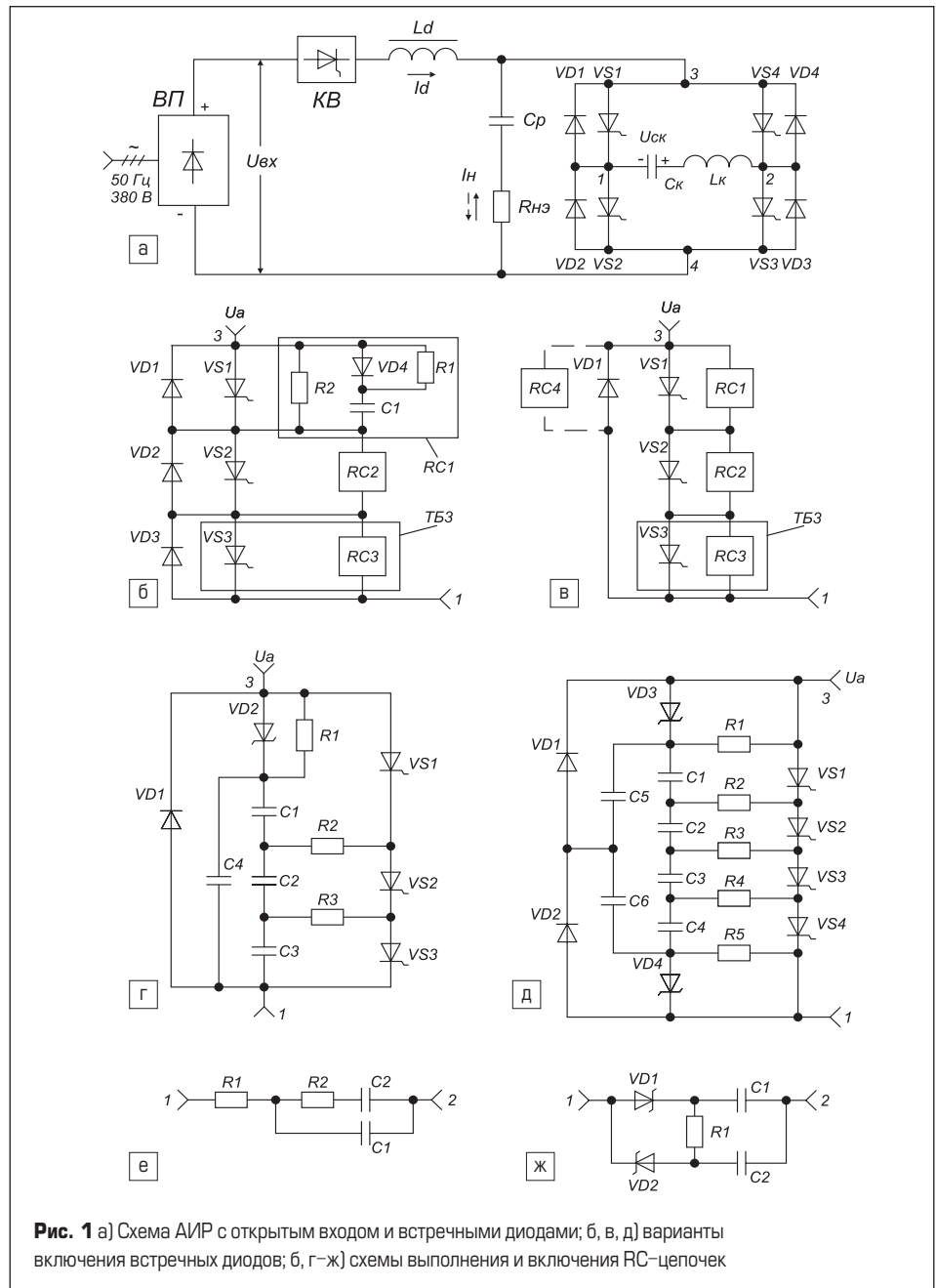


Рис. 1 а) Схема АИР с открытым входом и встречными диодами; б, в, д) варианты включения встречных диодов; е, г–ж) схемы выполнения и включения RC-цепочек

дуктивность L_3 — последовательно в цепь R_{m3} и C_p [5]. Включение L_3 в цепь C_p позволяет также реализовать эффективное ограничение аварийного разрядного тока C_p через тиристоры при срывах инвертирования в схемах АИР с открытым входом путем ускоренного перезаряда C_p через дополнительный тиристор [21, 22]. Для решения основной задачи, то есть снижения и равномерного распределения du_a/dt и U_{m1} (U_{m2}) по вентилям, практически во всех АИР используются демпфирующие RC-цепочки, которые подключаются параллельно силовому вентилю.

Как показали исследования на эффективность ограничения и равномерное распределение крутизны нарастания и амплитуды U_{m1} , U_{m2} , а значит, на устойчивую, надежную работу АИР со встречными диодами, определяющее влияние оказывает схема включения встречных диодов, а также выполнение и место включения RC-цепочек. На рис. 16—ж приведены варианты схем включения и выполнение демпфирующих RC-цепочек (RC1÷RC4) и встречных диодов (VD1÷VD3, VD1, VD1÷VD2) в мостовом АИР (рис. 1а). Такие цепочки позволяют снизить du_a/dt и равномерно распределять напряжение по тиристорам как в переходных, так и в установившемся режимах. Рассмотрим вариант (рис. 16), где параллельно каждому тиристорному VS1÷VS3 соответственно подключены встречные диоды VD1÷VD3 и RC-цепочки. Ввиду того, что встречные диоды VD1÷VD3 обычно имеют разброс по времени $t_{\text{вык}}$, то при обрыве тока через это плечо диод с меньшим значением $t_{\text{вык}}$ воспринимает наибольшую крутизну du_a/dt и величину обратного для встречных диодов и прямого для тиристоров напряжений U_{m1} и U_{m2} . При таком варианте последовательного соединения тиристоров и встречных диодов, несмотря на наличие демпфирующих цепочек, имеет место неравномерное распределение du_a/dt и величины напряжения U_{m1} (U_{m2}) как по синфазным плечам, так и по тиристорам. Кроме того, наличие в RC-цепочках диодов (VD4) с определенным разбросом времени их включения ($t_{\text{вк}}$) также способствует неравномерному распределению U_{m1} по тиристорам. Все это усложняет схему и практически реализовать не позволяет добиться надежной, устойчивой работы особенно мощных высоковольтных АИР, тем более на повышенных частотах [6, 8, 9].

Авторы приводят результаты исследований ряда схемотехнических решений указанных задач и практически реализовать мощные, высоковольтные АИР с открытым и закрытым входами и встречными диодами повышенной надежности. На рис. 1в приведен первый вариант схемотехнической реализации плеч мостовых высоковольтных АИР. Каждое из них состоит из двух встречно-параллельно включенных ветвей: одна содержит только последовательно соединенные тиристоры, а другая один или несколько последовательно соединенных диодов [17].

В этом случае к тиристорам VS1÷VS3 прикладывается напряжение, возникающее при выключении диода VD1 (рис. 1в) или суммарное при выключении диодов VD1, VD2 (рис. 1д). В результате выравнивание крутизны du_a/dt и величины напряжения U_{m1} по тиристорам

надежно обеспечивают на повышенных частотах RC-цепочки, так как тиристоры за время проводимости встречного диода (диодов) успевают восстановить запирающие свойства. Параллельно встречным диодам подключаются также дополнительные RC-цепочки, позволяющие выравнивать du_a/dt и U_{m1} (U_{m2}) как по синфазным плечам мостового АИР, так и по диодам VD1, VD2 (рис. 1д), даже при разбросе времени $t_{\text{вык}}$ встречных диодов до 10–15%. Так как число последовательно соединенных тиристоров в АИР со встречными диодами определяется не только величиной напряжения, но и, главным образом, допустимым значением du_a/dt , которое не зависит от класса тиристоров по прямому напряжению, то данное схемное решение позволяет использовать минимальное число тиристоров с учетом класса их по прямому напряжению и du_a/dt . Число же встречных диодов выбирают независимо от тиристоров и определяют только по обратному рабочему напряжению с учетом необходимого запаса из-за неравномерности распределения, и это количество практически значительно меньше числа тиристоров. Класс современных силовых диодов по обратному напряжению достигает 5 кВ и более, поэтому число встречных диодов обычно не превышает двух, чаще используют один. Широкое применение в настоящее время находят силовые диоды с малым $t_{\text{вык}}$ и мягким выключением. Все это позволяет упростить работу высоковольтных АИР на повышенных частотах, повысить ее надежность и устойчивость.

Для более полной оценки рассмотренных вариантов схем, приведенных на рис. 16—в, выполнен сравнительный анализ их показателей надежности при следующих допущениях: все элементы используются в период нормальной эксплуатации, когда имеют место внезапные отказы, обусловленные нерасчетными внешними воздействиями. Отказы тиристоров и диодов характеризуются коротким замыканием. При анализе надежности следует исходить из принципа работы мостового АИР (рис. 1а), плечи которого выполнены по двум приведенным вариантам схем. Таким образом, имеем, что в каждое плечо моста АИР включены три тиристорных блока ТБ1÷ТБ3,

встречные диоды VD1÷VD3 или только VD1, а также цепочки RC1÷RC3. Рассмотрим работу данных схем при отказах составляющих их элементов. При выходе из строя любого ТБ, к которому ведет отказ любого элемента ТБ, напряжение распределяется между оставшимися блоками. В схеме по рис. 16 отказ одного из встречных диодов ведет к отказу связанного с ним ТБ и перераспределению напряжения между другими блоками. С учетом допущения о равномерном распределении напряжения между ТБ составим упрощенную логическую схему расчета надежности (ЛСН), рассматривая каждый из трех соединенных ТБ как систему, резервированную другой, состоящей из двух ТБ, причем каждая из указанных систем имеет одинаковую интенсивность отказов, но разные коэффициенты нагрузки.

В схеме на рис. 1в отказ встречного диода ведет к отказу всей системы. В результате, логические схемы расчета надежности будут иметь вид, приведенный соответственно на рис. 2а, б. При этом распределение напряжения (нагрузки) между ТБ имеет следующую зависимость:

$$K_{hi} = \frac{N}{N-i+1} \times K_N, \quad (1)$$

где K_{hi} — коэффициент нагрузки при работе $(N-i+1)$ ТБ или отказе $(i-1)$ ТБ, N — общее количество ТБ, K_N — коэффициент нагрузки при работе N ТБ.

Полученные ЛСН для рассматриваемых вариантов (рис. 2а, б) схем включения ТБ и встречных диодов представляют собой соответственно параллельную и смешанную модели, поэтому для варианта схемы (рис. 2а):

$$P_{ca}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_i(t)] = 1 - [1 - P_{1a}(t)][1 - P_{2a}(t)][1 - P_{3a}(t)], \quad (2)$$

где $P_{ca}(t)$, $P_{1a}(t)$, $P_{2a}(t)$, $P_{3a}(t)$ — вероятности безотказной работы соответственно: системы с тремя ТБ и встречными диодами; системы с тремя ТБ и встречными диодами, с коэффициентом нагрузки $K_{H0} = K_N$; системы при отказе одного ТБ или соединенного с ним диода с $K_{H1} = 1,5K_N$; системы при отказе двух ТБ или соединенных с ними диодов с $K_{H2} = 3K_N$.

Для схемы (рис. 2б):

$$P_{cb}(t) = P_V(t) \{1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_i(t)]\} = P_V(t) \{1 - [1 - P_{1b}(t)][1 - P_{2b}(t)][1 - P_{3b}(t)]\}, \quad (3)$$

где $P_{cb}(t)$, $P_V(t)$, $P_{1b}(t)$, $P_{2b}(t)$, $P_{3b}(t)$ — вероятности безотказной работы соответственно: системы с тремя ТБ и одним встречным диодом; встречного диода; системы с тремя ТБ и одним диодом, с $K_{H0} = K_N$; системы при отказе одного ТБ, с $K_{H1} = 1,5K_N$; системы при отказе двух ТБ, с $K_{H2} = 3K_N$. Согласно принятым допущениям видов отказов, характерных для СПП, что и имеет место в условиях эксплуатации АИР, вероятность безотказной работы данных систем подчиняется экспоненциаль-

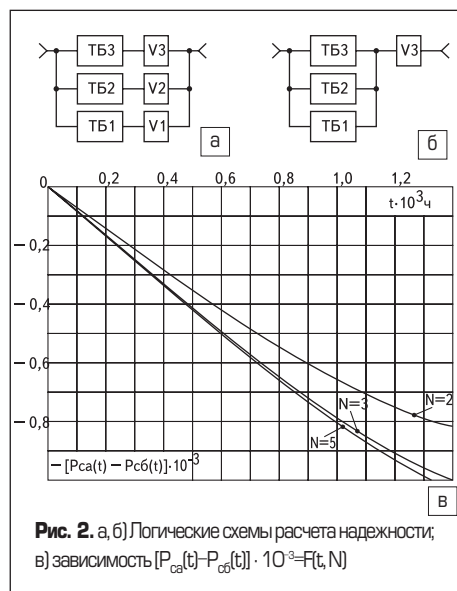


Рис. 2. а, б) Логические схемы расчета надежности, в) зависимость $[P_{ca}(t) - P_{cb}(t)] \cdot 10^3 = F(t, N)$

ному закону и определяется интенсивностью λ отказов элементов. Как было показано ранее, λ — величина, зависящая от условий, режимов работы элементов. Наиболее существенное влияние на λ , а значит, и на надежность системы, оказывают электрические нагрузки и температурные условия, которые учитываются с помощью поправочных коэффициентов. В данном случае, для сравнения надежности рассматриваемых систем, примем пропорциональную зависимость поправочного коэффициента нагрузки (K_{H0}), то есть имеем, что

$$\lambda_I = K_{H0} \lambda_p, \quad (4)$$

где λ_I, λ_p — интенсивность отказа соответственно: начального состояния системы, системы при отказе ($i-1$) ТБ. Далее для конкретного случая, когда $N = 3$, примем коэффициент нагрузки в начальном состоянии системы $K_{H0} = K_N = 1$. В результате для рассматриваемых систем (рис. 2а, б) получим:

$$\begin{aligned} \lambda_{2a} &= K_{H1} \lambda_1' = 1,5 \lambda_1', \lambda_{3a} = K_{H2} \lambda_1' = 3 \lambda_1', \\ \lambda_{2b} &= K_{H1} \lambda_1 = 1,5 \lambda_1, \lambda_{3b} = K_{H2} \lambda_1 = 3 \lambda_1, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_1', \lambda_{2a}, \lambda_{3a}, \lambda_1, \lambda_{2b}, \lambda_{3b}$ — интенсивности отказов соответственно: системы из трех ТБ с тремя встречными диодами; системы при отказе одного ТБ или соединенного с ним встречного диода; системы при отказе двух ТБ или их встречных диодов; системы из трех ТБ с одним диодом; системы из двух ТБ с одним диодом, при отказе одного ТБ; системы из одного ТБ с одним диодом, при отказе двух ТБ. Обозначив через λ_V интенсивность отказа диодного блока, получим, что λ_1' в способе соединения по варианту на рис. 2а отличается от варианта на рис. 2б на величину λ_V , так как в способе соединения на рис. 2а каждый ТБ (ТБ1÷ТБ3) и диодный блок (V1÷V3) представляет собой последовательное логическое соединение, то есть

$$\lambda_1' = \lambda_I + \lambda_V, \quad (6)$$

где λ_V — интенсивность отказа трех диодных блоков.

При одинаковой надежности диодных блоков в обоих вариантах имеем: $\lambda_V \times K_N' = \lambda_V \times K_N$, где K_N' — коэффициент нагрузки по напряжению на один диод в схеме «б» и равен K_N/N . Отсюда следует, что при $K_N = 1$:

$$\lambda_V' = \lambda_V / K_N' = \lambda_V / 3. \quad (7)$$

Определив конкретные значения λ_I, λ_V , можно получить показатели надежности для обеих схем (рис. 2а, б) соединения тиристоров и встречных диодов. Определение конкретного значения λ_I представляет собой сложную задачу, требующую учета многих факторов и видов отказа. Однако можно установить ее верхнюю границу. Учитывая, что интенсивность отказа системы из трех ТБ не более интенсивности отказа одного ТБ, для сравнительного анализа достаточно значения интенсивности отказа одного ТБ, приняв его за верхнюю границу системы из трех ТБ, а для диодного блока (рис. 2б) λ_V примем равным интенсив-

ности отказа одного диода при $K_N=1$. В результате выражения (1) и (2), с учетом интенсивностей отказов, примут следующий вид:

$$\begin{aligned} P_{ca}(t) &= 1 - (1 - e^{-\lambda_1' t}) \times \\ &\times (1 - e^{-\lambda_{2a} t})(1 - e^{-\lambda_{3a} t}), \\ P_{cb}(t) &= e^{-\lambda_V' t} [1 - (1 - e^{-\lambda_1 t}) \times \\ &\times (1 - e^{-\lambda_{2b} t})(1 - e^{-\lambda_{3b} t})], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\lambda_1' = \lambda_I + \lambda_V, \lambda_V' = \lambda_V / 3$. По выражению (8) и с учетом (5) можно определить значения $P_{ca}(t)$ и $P_{cb}(t)$ при принятых значениях λ_I и λ_V . На рис. 2в приведены зависимости $[P_{ca}(t) - P_{cb}(t) = F(t, N)]$ при $\lambda_I = 80 \times 10^{-6} 1/ч$ и $\lambda_V = 0,7 \times 10^{-6} 1/ч$, позволяющие судить о более высокой надежности схемы по рис. 1в. По выражению (8) и с учетом (5) определяются значения $P_{ca}(t)$ и $P_{cb}(t)$ при принятых значениях λ_I и λ_V . Расчеты, выполненные при различных сочетаниях λ_I и λ_V , показывают, что увеличение числа последовательно включенных тиристорных блоков $N > (3...5)$ не дает заметного повышения надежности, одновременно усложняя реализацию АИР.

На рис. 1г–д приведены новые варианты схем RC-цепочек повышенной надежности, в которых значительно сокращено число диодов и частично резисторов, и в едином устройстве одновременно совмещены RC-цепочки тиристоров и встречных диодов. Эффективное ограничение и более точное выравнивание du_d/dt и $U_{m1} (U_{m2})$ осуществляет-

ся как по тиристорам, так и по синфазным плечам моста АИР. Кроме того, такая реализация позволяет достаточно просто осуществить контроль работы RC-цепочек каждого плеча или одновременно двух синфазных плеч моста АИР, например с помощью одного датчика тока [25]. Когда в каждом плече моста включен только один встречный диод VD1 (рис. 1г), в RC-цепочке используется только один общий диод (VD2), например диод Шоттки, независимо от числа последовательно включенных тиристоров. При числе встречных диодов в каждом плече моста более одного (рис. 1д) в RC-цепочке применяется только два диода (VD3, VD4) независимо от числа тиристоров. Кроме того, в схемах (рис. 1г, д) для ограничения du_d/dt и амплитуды $U_{m1} (U_{m2})$ по плечам используются обе параллельно включенные цепочки конденсаторов C1–C3, C4 (рис. 1г) и C1–C4, C5–C6 (рис. 1д). Исследования показали высокую эффективность рассмотренных RC-цепочек.

В общем случае один из путей необходимого снижения и улучшения равномерности распределения коммутационных перенапряжений — это увеличение емкости RC-цепочек. Однако это ведет к возрастанию потерь в них, а также крутизны нарастания тока di_d/dt через тиристоры, при их включении, из-за разрядного тока конденсаторов демпфирующих цепочек. Наиболее эффективным решением этой задачи является включение основной RC-цепочки (рис. 1е, ж) параллельно I_k или коммутирующей диагонали моста: точки 1, 2 на рис. 1а [18, 23]. В мостовых АИР со встреч-

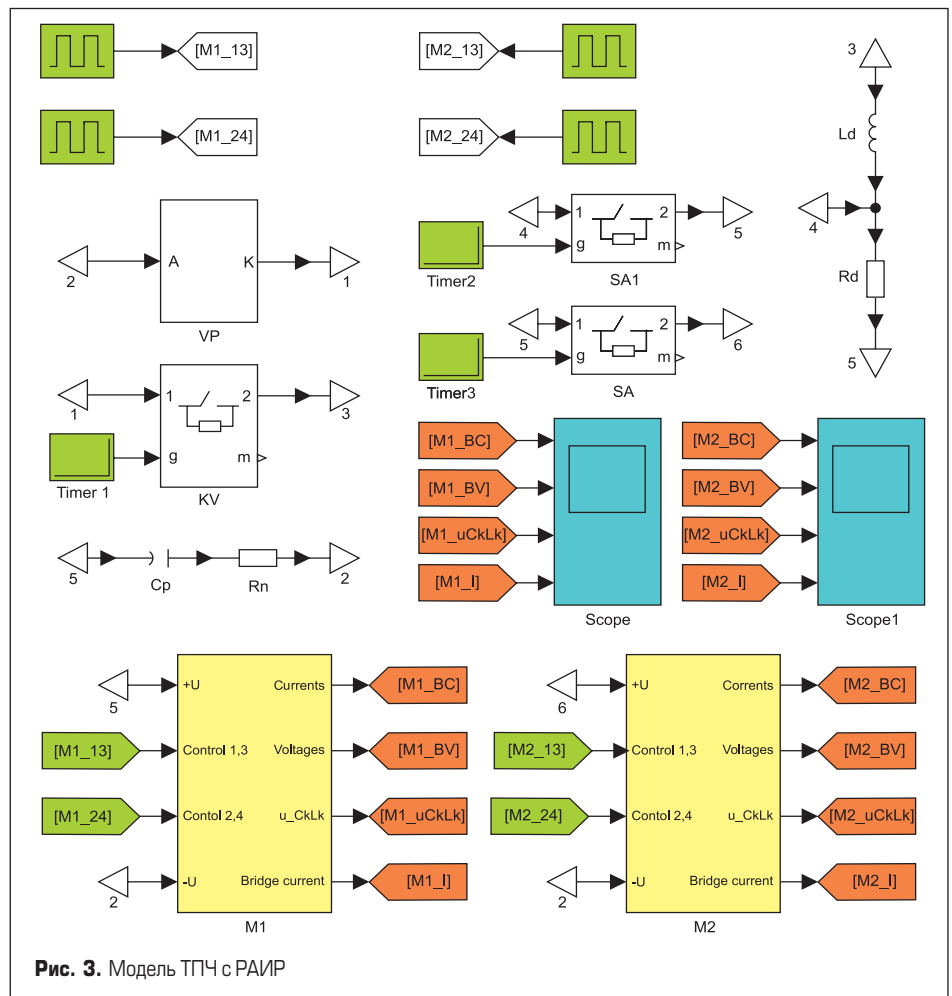


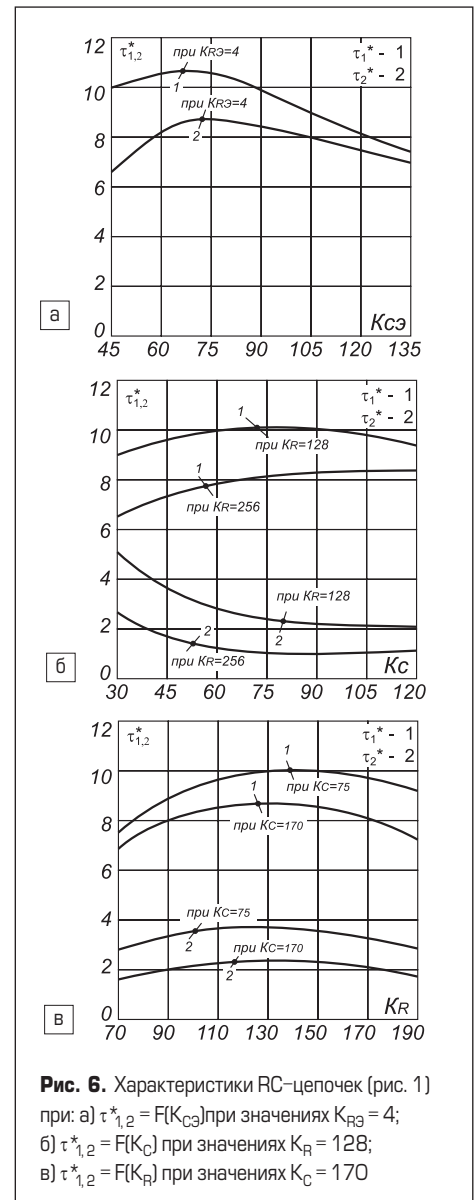
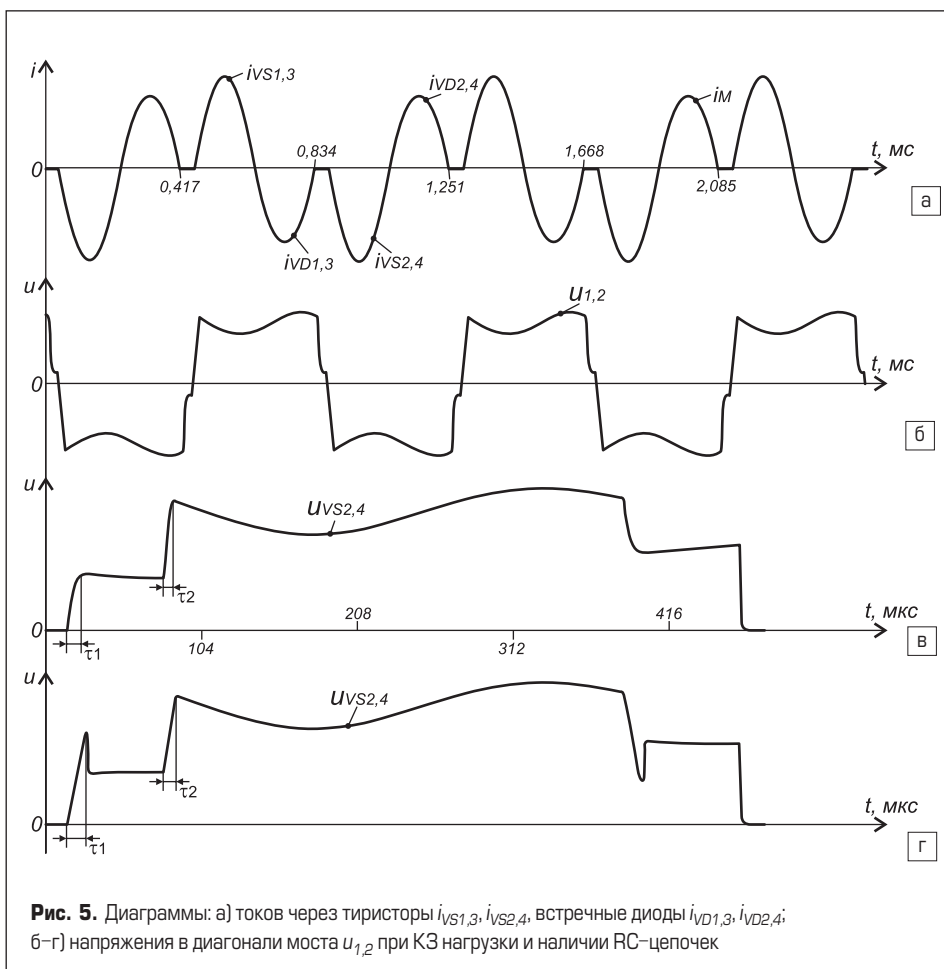
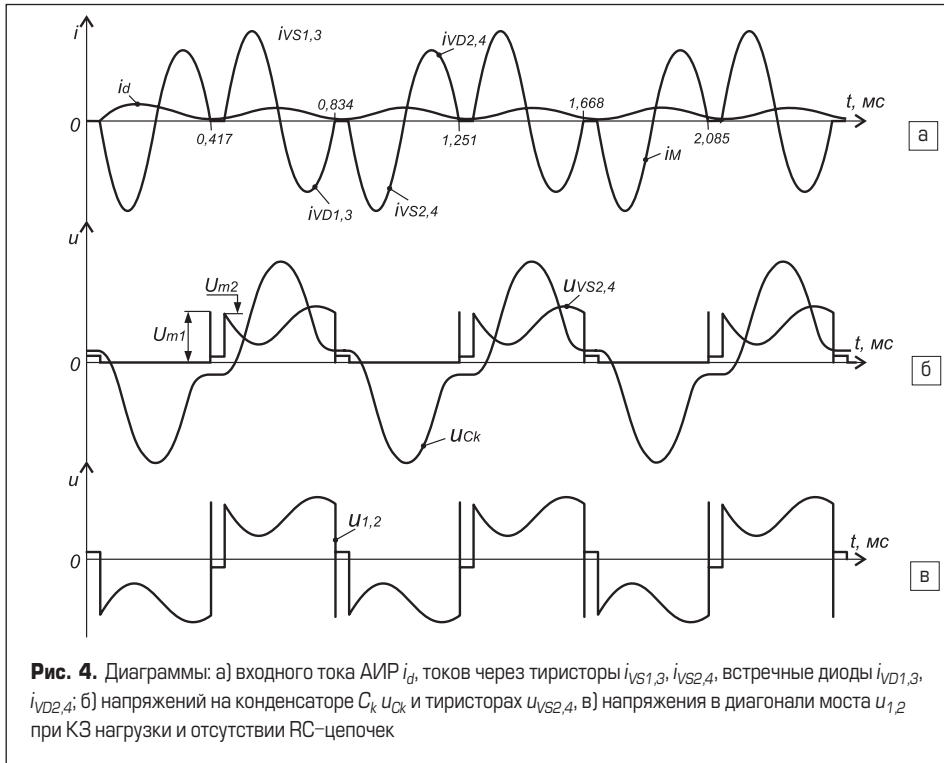
Рис. 3. Модель ТПЧ с РАИР

ными диодами целесообразно подключать указанные RC-цепочки параллельно коммутирующей диагонали, так как форма напряжения близка к прямоугольной при относительно низкой частоте, и поэтому потери в них будут меньше. Другой важной особенностью предложенного устройства является то, что ток разряда конденсаторов RC-цепочек (рис. 1е, ж) не протекает через тиристоры АИР. Кроме то-

го, значительно снижается необходимая емкость конденсаторов RC-цепочек, подключенных непосредственно к вентилям (рис. 1г, д), а значит, снижаются потери в них и крутизна нарастания тока через тиристоры.

Для оценки эффективности RC-цепочек (рис. 1е, ж), а также исследования операций предупредительного контроля ТПЧ с резервированным АИР (РАИР) с открытым входом, удвое-

нием частоты и встречными диодами [24] была разработана его модель в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink, которая приведена на рис. 3. Обозначения блоков и элементов в модели идентичны обозначениям на схеме по рис. 1а. 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», окрашены зеленым цветом, а блоки, служащие для контроля и измерения параметров (токов и напряжений), — оранжевым, блоки-осциллографы, контролирующие эти параметры, на рис. 3 синего цвета. При моделировании приняты реальные значения параметров СПП, их защитных RC-цепочек, активных сопротивлений индуктивностей, а также следующие параметры АИР и нагрузки: $\rho = 0,39 \text{ Ом}$, $U_{\text{бх}} = 520 \text{ В}$, $P_{\text{нм}} = 200 \text{ кВт}$, $f_0(\omega_0) = 2400 \text{ Гц}$ — собственная частота колебательного контура, $R_{\text{нз}} = 0,31 \text{ Ом}$, $d = 0,8$. В основном (M1) и резервированном (M2) мостах АИР управляющие импульсы на каждый тиристор подаются на входы Control1–4, токи через тиристоры, встречные диоды, а также напряжения



на них контролируются с выходов Currents и Voltages, а напряжение в диагонали моста и ток моста — с выходов "u_CkLk" и Bridge current. Контроль параметров остальных блоков — выпрямителя ВП, конденсаторного выключателя КВ, RC-цепочек и других — выполнен идентично. Для получения необходимых параметров, построения характеристик исследуемых RC-цепочек (рис. 1е, ж), а также исследований операций предпускового контроля используются блоки измерения.

Исследование характеристик RC-цепочек (рис. 1е, ж) выполнено в режиме КЗ нагрузки и при отсутствии RC-цепочек на тиристорах и встречных диодах АИР, когда du_u/dt и U_{m1} (U_{m2}) имеют максимальные значения. На рис. 4а–в для этого режима и без включения RC-цепочек приведены диаграммы токов на входе АИР i_{ϕ} в диагонали моста i_M и через тиристоры $i_{VS1,3}$, $i_{VS2,4}$, встречные диоды $i_{VD1,3}$, $i_{VD2,4}$, напряжений на коммутирующем конденсаторе (C_k) u_{Ck} и на тиристорах синфазных плеч $u_{VS2,4}$, а также диагонали моста $u_{1,2}$. При этом длительность переднего фронта U_{m1} (U_{m2}) τ_{ϕ} составляет не более 1,5 мкс, а du_u/dt — 400±450 В/мкс. Для сравнения на рис. 5а–г для режима КЗ нагрузки и при включении RC-цепочек (рис. 1е, ж) приведены диаграммы токов в диагонали моста i_M и через тиристоры и встречные диоды $i_{VS1,3}$, $i_{VS2,4}$, $i_{VD1,3}$, $i_{VD2,4}$ напряжений на диагонали моста $u_{1,2}$ и на тиристорах $u_{VS2,4}$ для случаев включения RC-цепочки (рис. 1е) (ось в) и (рис. 1ж) (ось г). Как показано на рис. 4 и 5, включение рассматриваемых RC-цепочек параллельно цепи, состоящей из L_k и C_k , позволяет эффективно и с меньшими потерями ограничивать du_u/dt и величину U_{m1} (U_{m2}). Для оценки влияния на длительность переднего фронта $\tau_1 U_{m1}$ и $\tau_2 U_{m2}$ параметров элементов рассматриваемых RC-цепочек были получены следующие характеристики: для схемы рис. 1е $\tau_{1,2}' = F(K_{C\Omega})$ при значениях $K_{R\Omega} = 4$; для схемы рис. 1ж $\tau_{1,2}' = F(K_C)$ при значениях $K_R = 128$ и 256, а также $\tau_{1,2}' = F(K_R)$ при значениях $K_C = 170$, которые соответственно приведены на рис. 6а–в. При этом $\tau_{1,2}' = \tau_{1,2}/\tau_{\phi}$, где $\tau_{\phi} = \tau_{\phi} = 1,5$ мкс, $K_C = C_k/C_1$ при $C_1 = C_2$, $K_R = R_1/\rho$; $K_{C\Omega} = C_k/C_{\Omega}$ при $C_{\Omega} = C_1 + C_2$ и $C_1 = 2C_2$; $K_{R\Omega} = R_{\Omega}/\rho$, где $R_{\Omega} = (R_1 + R_2) \parallel R_1$ и $R_1 = 2R_2$.

Наряду с рассмотренными средствами повышения надежности АИР с открытым или закрытым входами и встречными диодами особое место занимает отмеченное в [1] выполнение предпускового контроля и диагностики систем, блоков и узлов ТПЧ с указанными АИР. Это весьма важно и необходимо при использовании их для питания ЭТУ с непрерывными технологическими процессами, не терпящими перерыва питания. Это позволяет выявить или предотвратить возможные отказы и, в общем случае, оценить состояние надежности ТПЧ с АИР, то есть вероятность безотказной работы его как равной расчетному значению. Эта оценка будет тем вернее, чем меньше время перерыва $t_{пер}$ между окончанием контроля и рабочим пуском, а также если в процессе предпускового контроля не выявлены отказы или отклонения контролируемых параметров.

На рис. 7 приведена обобщенная структурная схема системы предпускового контроля

и диагностики для ВИП на основе ТПЧ с РАИР с открытым входом и встречными диодами [24], состоящая из следующих элементов: выпрямителя ВП, конденсаторно-тиристорного переключателя КПК, резервного моста РМ, выключателя SA, управляемого объекта (нагрузки) УО ($R_{H\Omega}$), системы охлаждения силовых блоков СОХ, блока датчиков БДТ, измерительно-вычислительного комплекса ИВК, системы управления и защиты СУЗ, системы предпускового контроля (диагностики) СПК, устройства отображения информации УОИ, флэш-памяти ФП. Управление и контроль осуществляет оператор ОП.

Авторы на основе анализа особенностей работы, характерных отказов, опыта наладки и промышленной эксплуатации АИР с открытым, закрытым входами и встречными диодами сформулировали условия и режимы выполнения предпускового контроля (диагно-

тики), позволяющие достаточно просто и достоверно, с минимальными затратами энергии выполнить предпусковой контроль (диагностику) силовой части ВИП, представляющий, как известно, особую сложность.

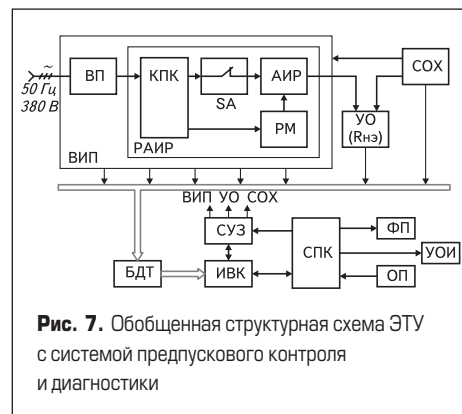


Рис. 7. Обобщенная структурная схема ЭТУ с системой предпускового контроля и диагностики

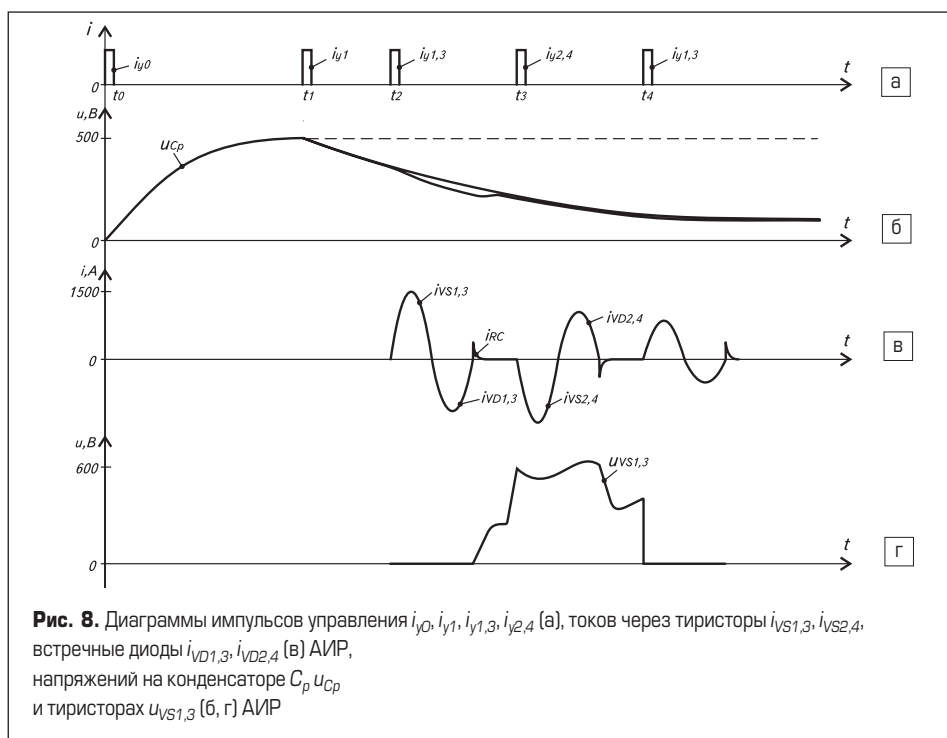


Рис. 8. Диаграммы импульсов управления $i_{y0}, i_{y1}, i_{y1,3}, i_{y2,4}$ (а), токов через тиристоры $i_{VS1,3}, i_{VS2,4}$, встречные диоды $i_{VD1,3}, i_{VD2,4}$ (в) АИР, напряжений на конденсаторе C_p u_{Cp} и тиристорах $u_{VS1,3}$ (б, г) АИР

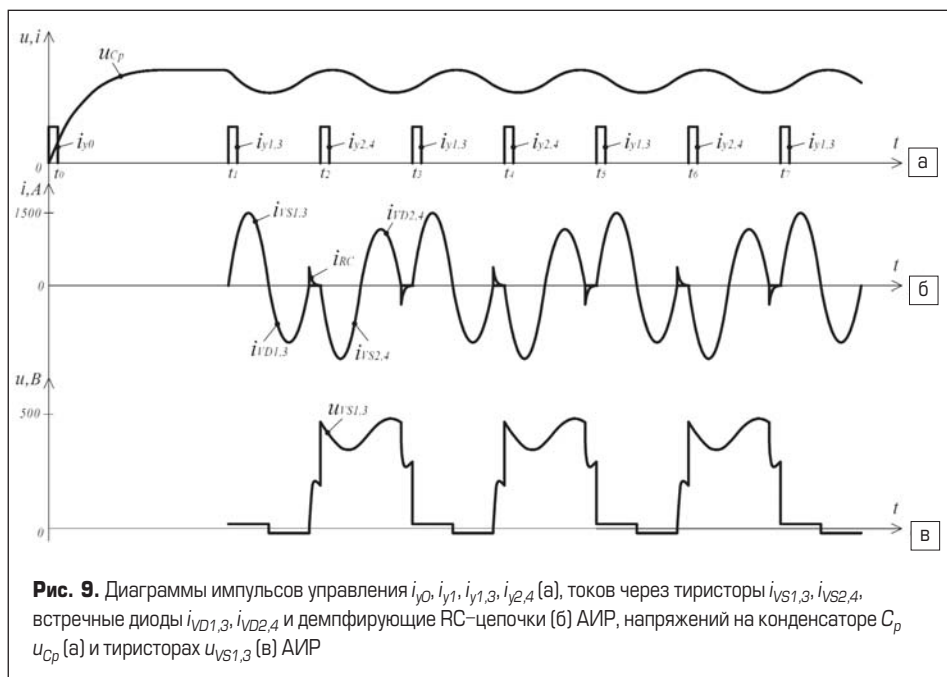


Рис. 9. Диаграммы импульсов управления $i_{y0}, i_{y1}, i_{y1,3}, i_{y2,4}$ (а), токов через тиристоры $i_{VS1,3}, i_{VS2,4}$, встречные диоды $i_{VD1,3}, i_{VD2,4}$ и демпфирующие RC-цепочки (б) АИР, напряжений на конденсаторе C_p u_{Cp} (а) и тиристорах $u_{VS1,3}$ (в) АИР

Основными требованиями и условиями при выполнении предпускового контроля являются:

- выполнение контроля при токовых нагрузках и напряжений на силовых вентилях (тиристоры, встречные диоды, RC-цепочки), максимально приближенных к рабочим;
- выполнение контроля в режиме минимального потребления энергии от источника питания (питающей сети);
- максимально возможное исключение возникновения и развития аварийных режимов для источника питания;
- рабочий пуск АИР на реальную нагрузку следует выполнять сразу после окончания предпускового контроля, то есть при $t_{пер} \rightarrow 0$;
- обязательное протоколирование, с записью во флэш-память, всего процесса предпускового контроля и рабочего пуска АИР.

В этой связи авторы предлагают способ предпускового контроля (диагностики) силовых блоков, а именно АИР и РМ (рис. 7), заключающийся в выполнении контроля и определении работоспособности их в режиме КЗ нагрузки с некоторыми особенностями реализации для АИР с открытым и закрытым входами. Выбор этого режима обусловлен его особенностями для АИР со встречными диодами, совпадающими с приведенными выше требуемыми условиями и режимами. Отметим особенности этого режима для АИР: минимальная потребляемая мощность, определяемая в основном потерями в АИР; максимальная нагрузка по току встречных диодов и близкая к рабочим значениям для тиристоры; максимальные значения du_a/dt и U_{mi} (U_{m2}) для тиристоры и встречных диодов; максимальное значение времени $t_{всц}$ для тиристоры. Все эти особенности и позволяют реализовать пункты 1–3 приведенных основных требований и условий выполнения предпускового контроля.

Выбор алгоритма контроля определяется глубиной, полнотой охвата и требуемой последовательностью пуска систем и блоков ВИП. Применительно к рассматриваемому ТПЧ с РАИР (рис. 7) в общем случае состоит из следующих этапов и операций:

1. Контроль (диагностика) СУЗ: заключается в контроле алгоритмов работы и определении основных параметров.
2. Контроль (диагностика) СОХ: особенности контроля заключаются в проверке входных и выходных параметров охлаждающей среды; включение СОХ осуществляется по сигналу окончания контроля СУЗ.
3. Контроль (диагностика) ВП и КПК: вначале определяется работоспособность ВП на холостом ходу, затем по сигналам соответствующих датчиков включается КПК, ВП подключается к АИР и контролируются заряд C_p , работа ВП и КПК. Этот процесс повторяется с переключением питания на РМ.
4. Контроль (диагностика) основного АИР: особенности контроля заключаются в определении работоспособности и контроле основных параметров в режиме КЗ нагрузки (токов, напряжений, $t_{всц}$), а также работоспособности RC-цепочек. Вначале это выполняется с предварительным зарядом C_p

до напряжения источника питания, но при отключенном источнике питания и пониженной частоте работы АИР, затем этот процесс повторяется при рабочей частоте работы АИР. Диаграммы контролируемых параметров в этих режимах приведены на рис. 8, 9, где соответственно i_{y0} , i_{y1} , $i_{y1,3}$, $i_{y2,4}$ — импульсы управления, u_{Cp} , $u_{VS1,3}$, $u_{VS2,4}$ — напряжения на C_p и тиристорах VS1–VS3, VS2–VS4 АИР, $i_{VS1,3}$, $i_{VS2,4}$, $i_{VD1,3}$, $i_{VD2,4}$ и i_{RC} — токи через тиристоры, встречные диоды АИР и ток через демпфирующие RC-цепочки (рис. 1е).

5. Контроль (диагностика РМ): особенность заключается в выполнении пункта 4 после переключения с помощью КПК питания с основного АИР на РМ.

Решение о рабочем пуске ТПЧ с РАИР принимается по результатам предпускового контроля, запись которых производится во флэш-память в процессе контроля, а также рабочего пуска. Если в процессе предпускового контроля не выявлены отклонения параметров, определяющие работоспособность ВИП, рабочий пуск ЭТУ должен быть осуществлен сразу ($t_{пер} \rightarrow 0$) после окончания контроля и выдачи СПК разрешающего сигнала. При выявлении отклонений устраняются недостатки и повторно выполняется весь процесс предпускового контроля (диагностики).

Выводы

1. Выделены основные причины, снижающие надежность работы АИР со встречными диодами; разработаны и исследованы схемотехнические решения, позволяющие реализовать мощные высоковольтные АИР повышенной надежности.
2. Сформулированы условия и режимы выполнения предпускового контроля (диагностики) как нерезервированных, так и резервированных АИР со встречными диодами, предложен метод, заключающийся в выполнении контроля и определении работоспособности АИР в режиме КЗ нагрузки.

Литература

1. Аитов И., Зиннатуллин Р. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
2. Миронов Ю. М., Миронова А. Н. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок / Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Евтюкова И. М., Кацевич Л. С., Некрасова Н. М., Свенчанский А. Д. Электротехнологические промышленные установки / Учеб. для вузов. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 3.
5. Кацнельсон С. М. Тиристорный инвертор со встречно-параллельными диодами и удвоением частоты // Электричество. 1971. № 1.

6. Аитов. И. Л. Исследование тиристорных многоместовых преобразователей повышенной частоты с фазовым регулированием мощности / Дис. на звание канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1974.
7. Кацнельсон С. М. Тиристорные умножители частоты / Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1978.
8. Кацнельсон С. М. Стабилизация напряжения и эффективность использования тиристоры в умножителях частоты / Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1979.
9. Аитов И. Л., Кацнельсон С. М. Автономные преобразователи частоты / Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1978.
10. Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С. Источники питания электротермических установок. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Беркович Е. И., Ивенский Г. В., Иоффе Ю. С., Матчин А. Т., Моргунов В. В. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
12. Способ регулирования выходного напряжения многоместового инвертора. А.С. № 399038 РФ. Кацнельсон С. М., Аитов И. Л., Гутин Л. И., Малкин Б. Н., Охотников В. А. БИ. 1973. № 38 (приоритет от 03.11.1971).
13. Патент № 974523 РФ. Преобразователь частоты. Аитов И. Л. БИ. 1982. № 42.
14. Патент № 669459 РФ. Автономный инвертор. Аитов И. Л. БИ. 1979. № 23.
15. Последовательный автономный инвертор. А.С. № 936297 РФ. Аитов И. Л. БИ. 1982. № 22.
16. Патент № 18245 UA. Автономный инвертор. Лупкин Б. В., Аитов И. Л., Самигуллин Р. З. БИ 2006. № 11.
17. Высоковольтный инвертор. А.С. № 318130 РФ. Кацнельсон С. М., Морозов В. В., Пудровский Л. С., Аитов И. Л., Гутин Л. И., Филатов В. Н., Пегасов М. А. БИ 1971. № 31 (приоритет от 08.10.1969).
18. Воробьев Ю. В. Тиристорные преобразователи частоты для питания многопозиционных индукционных электротермических установок / Дис. на звание канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1983.
19. Рабинерсон А. А., Ашкинази Г. А. Режимы нагрузки силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1976.
20. Магетто Г. Тиристор в электротехнике / Пер. с франц. М.: Энергия, 1977.
21. Автономный инвертор. А.С. № 515228 РФ. Аитов И. Л., Воробьев Ю. В. БИ. 1976. № 19.
22. Аитов И. Л. Ограничение аварийного тока в многоместовых тиристорных автономных инверторах с индуктивно-емкостным входом // Электромеханика. 1978. № 5.
23. Автономный инвертор. А.С. № 705627 РФ. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. БИ. 1979. № 47.
24. Аитов И. Л., Кутдусов Ф. Х. Система гарантированного питания для электротехнологических установок // Электричество. 1988. № 4.
25. Аитов И. Л. Системы управления и защиты автономных преобразователей частоты / Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1979.