

Продолжение. Начало в №1'2010

Особенности построения систем аварийной защиты

тиристорных преобразователей частоты с автономными резонансными инверторами. Часть 2

В статье рассказывается о классификационных группах схем автономных резонансных инверторов (АИР) с удвоением частоты, встречными диодами, закрытым и открытым входами, широко используемых для электротехнологических установок (ЭТУ). Рассматриваются особенности протекания аварийного процесса при срыве инвертирования в различных схемах АИР с открытым входом и ограничением аварийного разрядного тока конденсатора фильтра. Приводятся результаты моделирования в среде MATLAB с помощью инструментов пакета Simulink аварийного процесса срыва инвертирования в тиристорных преобразователях частоты (ТПЧ) с различными схемами АИР с удвоением частоты, встречными диодами и открытым входом.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

Галина Шалупова

gshalupova@yandex.ru

В настоящее время для ЭТУ индукционного нагрева заготовок, открытой и вакуумной плавки металлов и сплавов, литья алюминия в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК), термической и электроэрозионной обработки деталей и изделий, а также других целей широкое применение нашли ТПЧ с различными группами схем АИР, обладающими рядом известных достоинств и преимуществ [1–6]. К таким группам следует отнести:

- схемы АИР с закрытым входом, встречными диодами, удвоением частоты и выходного напряжения;
- схемы АИР с закрытым входом, встречными диодами, удвоением частоты и умножением выходного напряжения;
- схемы АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами;
- схемы АИР с открытым входом, удвоением частоты и отсекающими диодами;

- схемы АИР с открытым входом, отсекающими диодами и умножением частоты.

В каждой из указанных групп схемы АИР классифицируются как по типу силовой ячейки (например, с нулевым выводом, полумостовая, мостовая и т. д.), так и по схеме соединения нескольких ячеек между собой (параллельное, мостовое, каскадное и др.). Такая более подробная классификация схем АИР рассмотрена в [1]. Как показали исследования (в том числе и экспериментальные) аварийных процессов при срыве инвертирования в различных схемах АИР, на требования быстродействия защиты и аварийную нагрузку тиристорных (диодных) значительное влияние в первую очередь оказывает режим работы источника питания АИР (с закрытым, открытым входом), а затем схемы выполнения ячеек и соединения их между собой. Так, в [7] приведены результаты исследования аварийных процессов при срыве инвертирования для схем первых двух классификационных групп АИР с закрытым входом, когда источник питания (например, ВП или тиристорный ВПТ) выполнен с индуктивным фильтром $L_d \gg L_{к0}$, где $L_{к0}$ — эквивалентное значение коммутационной индуктивности АИР. Полученные результаты являются основой при разработке систем (устройств) защиты (СЗ) ТПЧ с указанными группами схем АИР и позволяют судить о возможности практически исключить выход из строя тиристорных (диодных) при срывах инвертирования.

Отличительным для схем АИР с открытым входом является выполнение ВП (ВПТ) с индуктивно-емкостным $L_d C_\phi$ фильтром, при этом $C_\phi(C_p) \gg C_{к0}$, где $C_{к0}$ — эквивалентное значение емкости коммути-

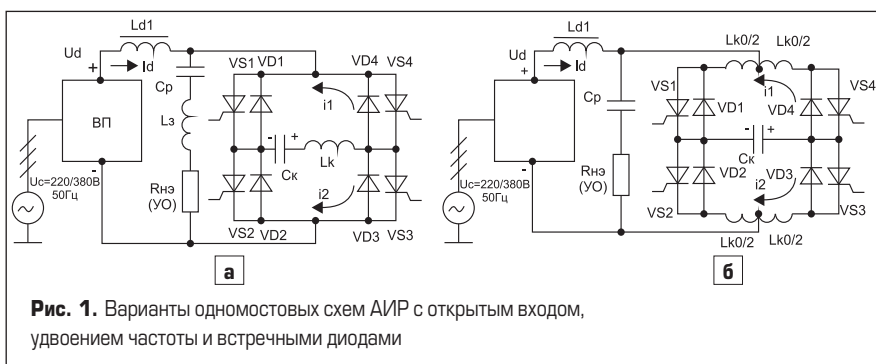


Рис. 1. Варианты однофазных схем АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами

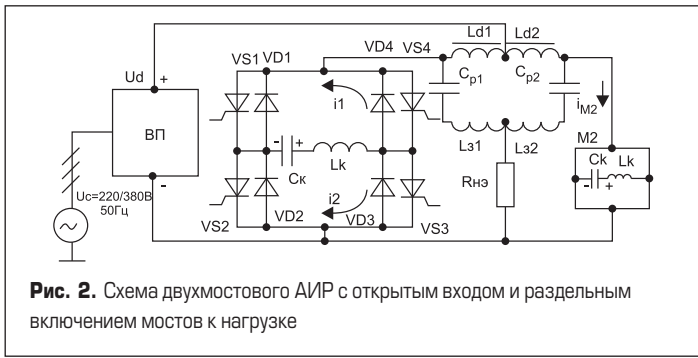


Рис. 2. Схема двухмостового АИР с открытым входом и разделным включением мостов к нагрузке

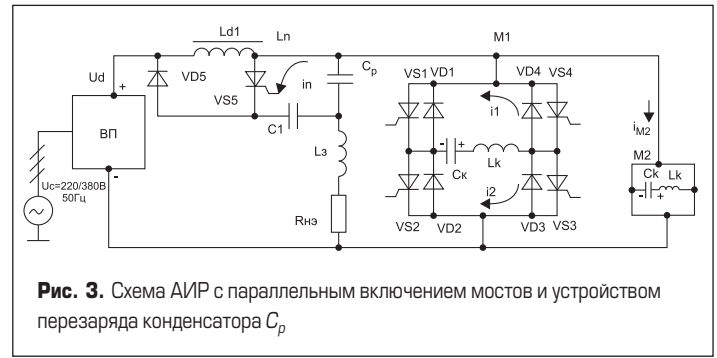


Рис. 3. Схема АИР с параллельным включением мостов и устройством перезаряда конденсатора Cp

рующего конденсатора АИР. Наличие на входе АИР индуктивно-емкостного фильтра приводит при срыве инвертирования, несмотря на быстрое отключение ВП (ВПТ), к протеканию через тиристоры АИР аварийного разрядного тока i_{ap} , величина и крутизна нарастания которого (особенно в мощных многомостовых АИР), если не принять мер, могут быть недопустимо большими. В этой связи в используемых мостовых схемах АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами используются различные схемные решения, направленные на ограничение тока i_{ap} разделительного (фильтрового) C_p конденсатора, например, путем включения части (частей) коммутующей индуктивности в цепи C_p или тиристоров, а также и другие решения [1, 2, 5, 8, 9]. Для сравнительной оценки аварийной нагрузки тиристоров (диодов), выбора метода и средств при разработке СЗ, рассмотрим анализ аварийного процесса при срыве инвертирования в ТПЧ с АИР с открытым входом, удвоением частоты, встречными диодами и различными схемами ограничения i_{ap} , которые находят широкое применение в индукционных ЭТУ мощностью 50–250 кВт, частотой 2–5 кГц. Построение, принцип работы, основные параметры и характеристики таких АИР подробно рассмотрены в [1, 2, 5, 8]. На рис. 1а, б приведены схемы ТПЧ с двумя вариантами одномостовых АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами. Каждая из приведенных схем АИР состоит из тиристоров VS1–4, встречных диодов VD1–4, коммутующих конденсатора C_k и индуктивности $L_{к0} = L_k + L_z$, где L_z — защитная индуктивность.

Питание ТПЧ, состоящего из мостового выпрямителя ВП (ВПТ) и АИР, осуществляется от первичной 3-фазной промышленной сети 50 Гц, $U_c = 220/380$ В. При этом выходное напряжение ВП составляет $U_d = 520$ В и подается на вход АИР через входные дроссели L_{d1} . Нагрузка (управляемый объект УО), представляющая собой в индукционных ЭТУ скомпенсированный нагрузочный колебательный контур с эквивалентным активным сопротивлением $R_{нз}$, включена в цепь разделительного конденсатора C_p . Для ограничения тока i_{ap} через тиристоры АИР (рис. 1а) при срыве инвертирования в цепь C_p включена L_z , которая составляет определенную часть $L_{к0}$. Во избежание циркуляции колебательного тока внутри инверторного моста, защитная индуктивность выбирается из условия:

$$L_z \leq (0,25 - 0,3) L_{к0} \quad (1)$$

Кроме ограничения аварийного тока i_{ap} , включение L_z позволяет также снизить крутизну нарастания du_{vs}/dt прямого напряжения на тиристорах при рабочих режимах работы АИР [4, 5, 8]. При срыве инвертирования в АИР (рис. 1б) ограничение аварийного тока i_{ap} в C_p осуществляется $L_{к0}$, что более эффективно. Однако такое выполнение и включение $L_{к0}$ значительно усложняет конструкцию и увеличивает потери в АИР. В схемах АИР (рис. 1а, б) величина C_p практически выбирается из условия: $C_p = 5C_{к0}$, тогда $C_k = C_p/4$, где $C_{к0}$ — эквивалентное значение коммутующего конденсатора АИР [4, 8]. На рис. 2, 3 приведены схемы ТПЧ с вариантами много- (двух-) мостовых АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами. В схеме на рис. 2 отличительным является то, что инверторные мосты M1 и M2 работают параллельно и подключены к ВП и нагрузке через отдельные L_{d1} , C_{p1} , L_{z1} и L_{d2} , C_{p2} , L_{z2} . В результате такого включения относительная величина C_{p1} , C_{p2} уменьшается, а L_{z1} , L_{z2} увеличивается, а также появляется возможность фазового

регулирования выходной мощности (напряжения на нагрузке) методом геометрического суммирования токов мостов M1, M2 [1, 4].

В схеме на рис. 3 инверторные мосты соединены параллельно, что ведет к относительному увеличению емкости конденсатора C_p и уменьшению L_z . В результате амплитуда и крутизна нарастания аварийного разрядного тока i_{ap} в мощных мостовых АИР могут достигать опасных величин и приводить к выходу из строя тиристоров при срыве инвертирования, особенно при малых значениях L_z .

При таком включении инверторных мостов одним из решений является ограничение тока i_{ap} с помощью специального устройства, путем ускоренного колебательного перезаряда конденсатора C_p через индуктивность L_n , которая составляет часть L_z [9]. Устройство перезаряда (УП) состоит из тиристора VS5, диода VD5 и конденсатора C_1 (рис. 3). В общем случае работа УП осуществляется следующим образом. При возникновении срыва инвертирования в M1 аварийный разрядный ток i_{ap} начинает протекать, например, через тиристоры VS1, 2; далее по сигналу датчика срыва инвертирования блокируются импульсы управления тиристорами M1, M2 АИР,

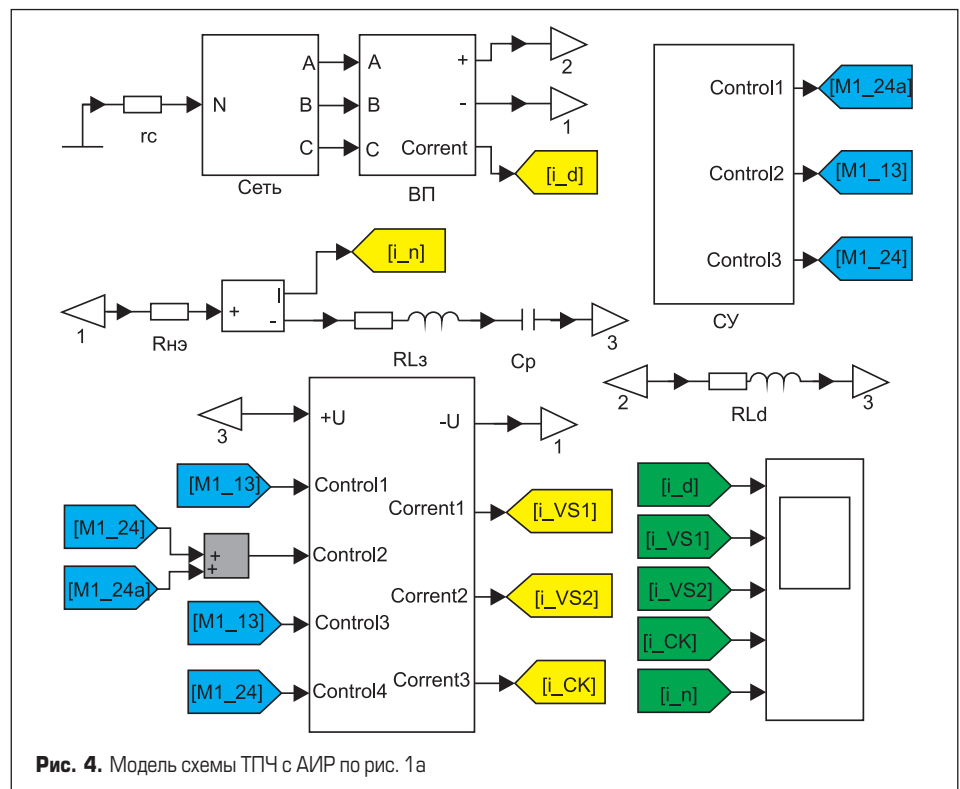


Рис. 4. Модель схемы ТПЧ с АИР по рис. 1а

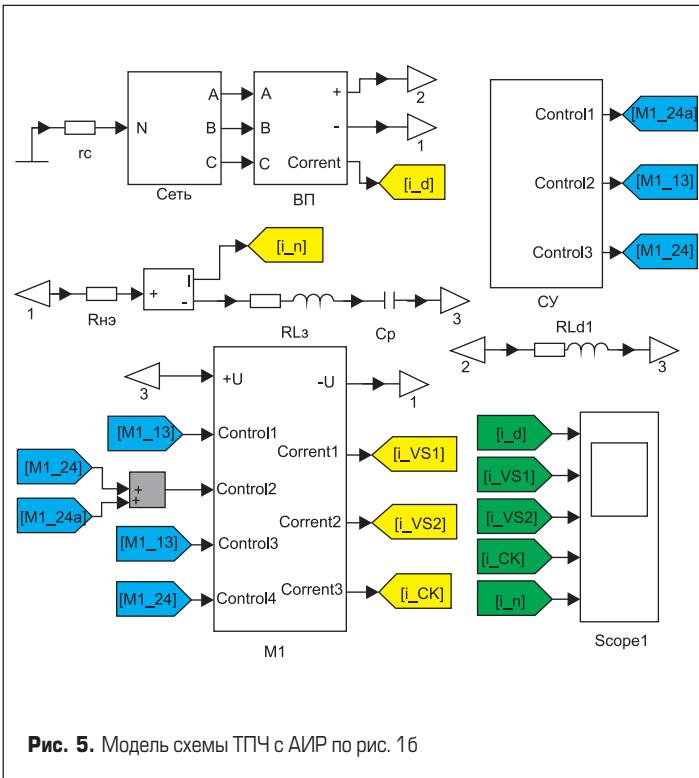


Рис. 5. Модель схемы ТПЧ с АИП по рис. 16

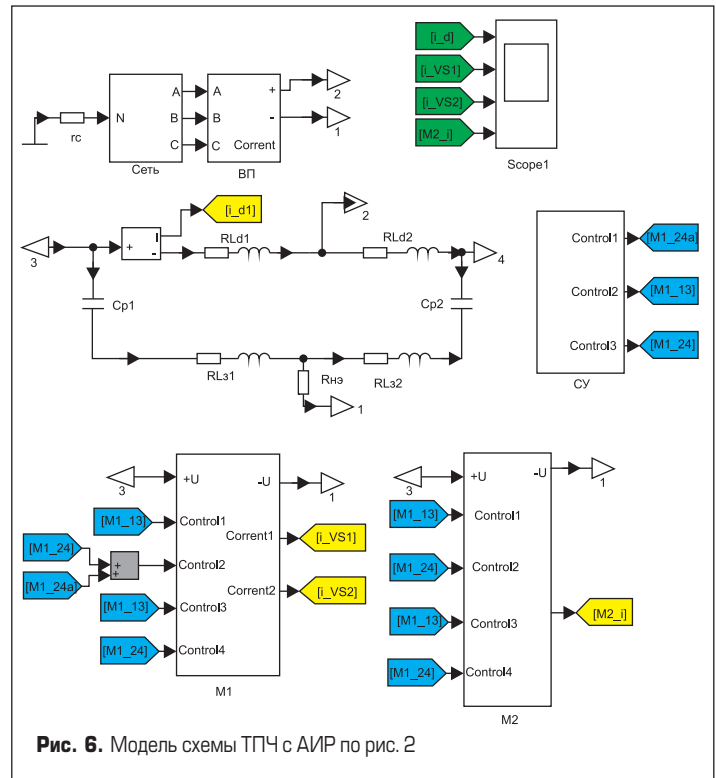


Рис. 6. Модель схемы ТПЧ с АИП по рис. 2

включается VS5 УП и начинается процесс ускоренного перезаряда C_p током перезаряда i_n через VS5, C_1 и L_n . Условиями перехвата и ограничения тока i_{ap} являются: $f_n > f_p$, $I_{nm} > I_{pm}$, что достигается соответствующим выбором

параметров L_n и C_1 , где f_p , f_p и I_{nm} , I_{pm} — частота и амплитудное значение соответственно токов i_n , i_{ap} . После перезаряда конденсаторов C_p , C_1 на обратную полярность происходит запираание тиристоров VS1, 2 M1 и VS5 УП.

Для сравнительной оценки степени аварийной нагрузки тиристоров и выявления особенностей при сквозном срыве инвертирования напряжение питания U_d , выходящая мощность P_H и частота инверти-

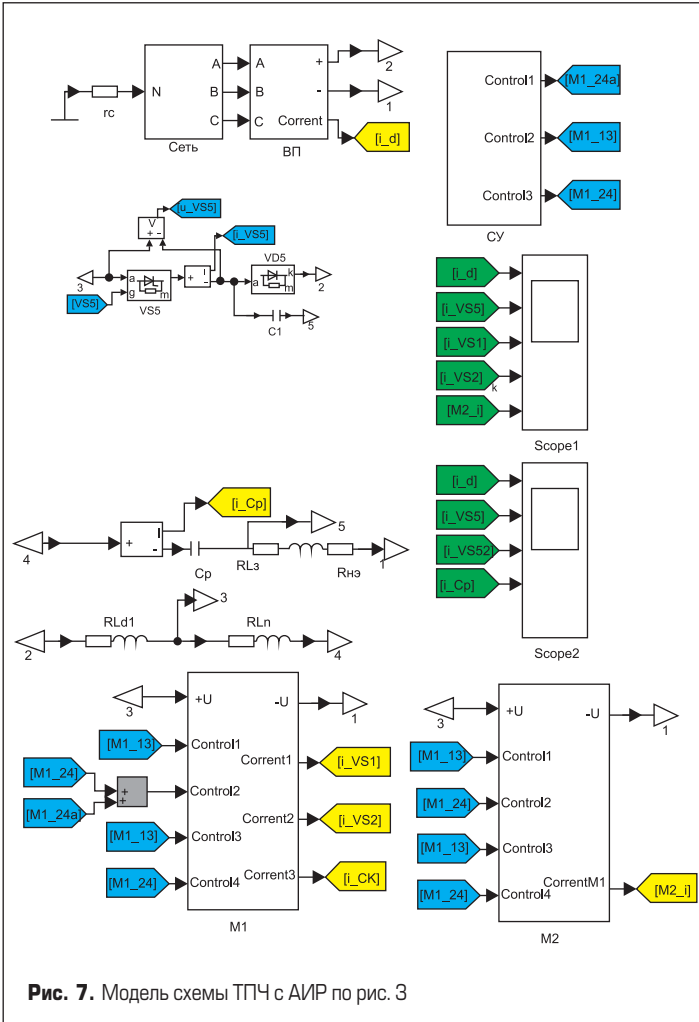


Рис. 7. Модель схемы ТПЧ с АИП по рис. 3

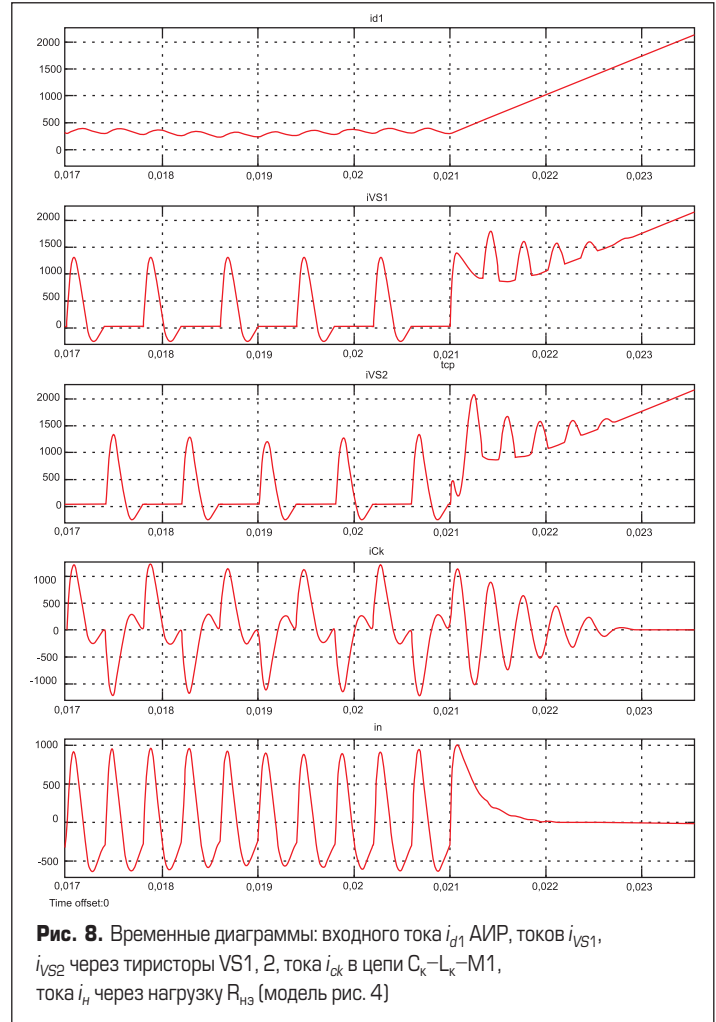
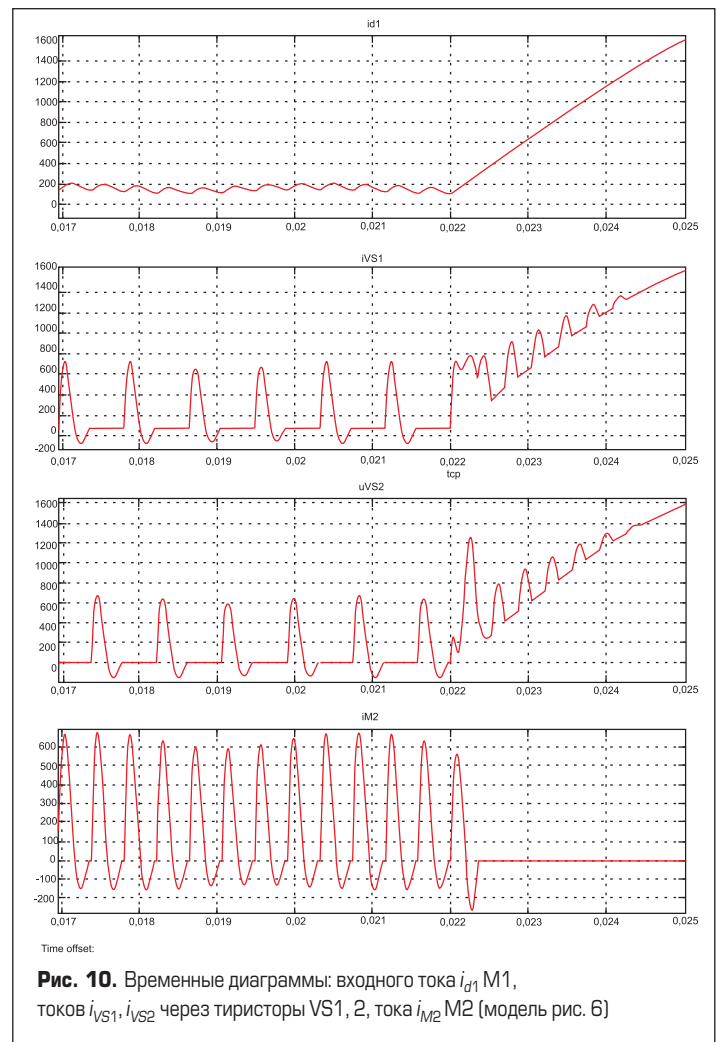
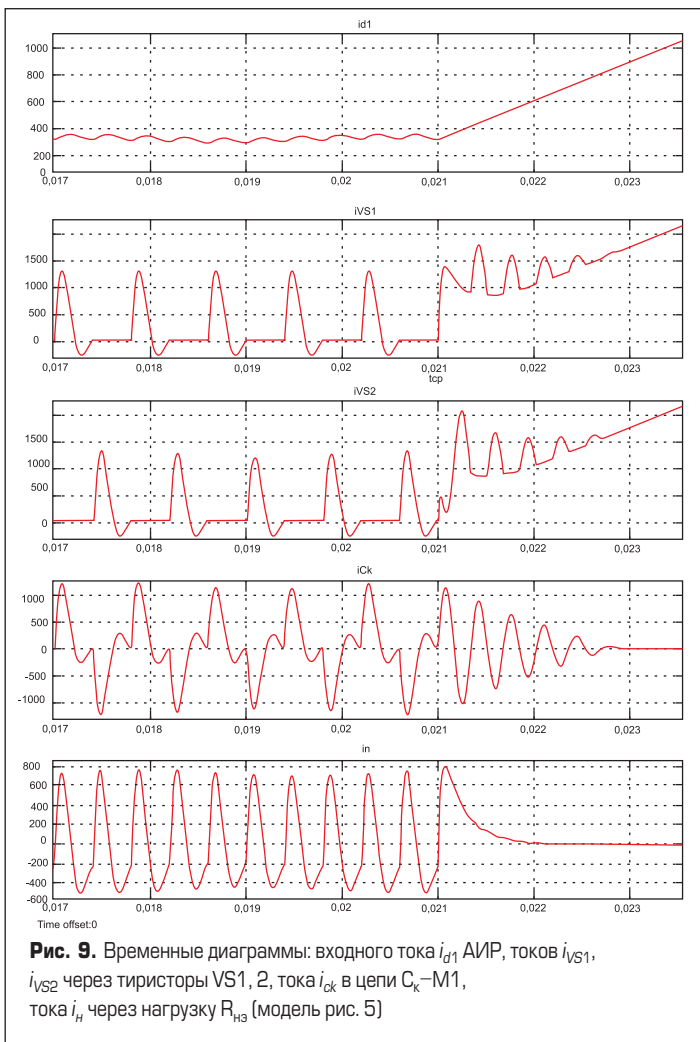


Рис. 8. Временные диаграммы: входного тока i_{d1} АИП, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2, тока i_{Ck} в цепи C_k-L_k-M1 , тока i_n через нагрузку R_{H3} (модель рис. 4)



рования f_n были выбраны одинаковыми для всех рассматриваемых схем АИР. Для исследования аварийного процесса срыва инвертирования, получения необходимых данных об аварийной нагрузке тиристоров и диодов, а также выявления особенностей различных схем ограничения аварийного тока i_{ap} конденсатора C_p для рассматриваемых схем ТПЧ с АИР с помощью пакета Simulink в системе MATLAB были разработаны модели, которые продемонстрированы на рис. 4–7. Обозначения блоков и элементов в моделях идентичны обозначениям на соответствующих рис. 1а, б; рис. 2, 3. Для сокращения количества линий связи и упрощения соединительные точки с одинаковыми потенциалами выполнены в виде треугольников с одинаковыми номерами. В моделях приведены также блоки управления (СУ), контроля и измерения параметров (токов, напряжений, времени). В инверторных мостах M1, M2 управляющие импульсы на каждый тиристор подаются соответственно на входы Control 1, 2, 3, 4. Срыв инвертирования в M1 (рис. 1а, б; рис. 2, 3) имитируется однократной подачей импульса управления на тиристор VS2 в момент отпирания очередных VS1, 3, когда крутизна нарастания напряжения du_u/dt на тиристорах VS2, 4 имеет наиболее высокое значение и (или) схемное время восстановления тиристоров $t_{вс}$ является недостаточным [1]. В моделях при-

няты реальные значения параметров силовых полупроводниковых приборов (СПП), активных сопротивлений индуктивностей $L_{к0}$, $L_к$, $L_з$, L_n , $L_{d1,2}$ питающей сети, а также нагрузок $R_n = R_{H3} = 0,5$ Ом (рис. 1а, б; рис. 2, 3) при $P_n = 125$ кВт и $f_n = 2500$ Гц. Остальные элементы и параметры АИР по рис. 1а, б имеют следующие расчетные значения: $L_{к0} = 41$ мкГн, $L_к = 28,7$ мкГн, $L_з = 12,3$ мкГн (рис. 1а), $C_к = 101,9$ мкФ, $C_{к0} = 84,7$ мкФ, при $C_p = 500$ мкФ; собственная частота и волновое сопротивление колебательного контура $f_0 = 2700$ Гц, $\rho_0 = 0,7$ Ом; входные дроссели $L_{d1} = 900$ мкГн. Для АИР по рис. 2, 3 параметры элементов мостов, соответственно, имеют следующие значения:

- $L_{к0} = 82$ мкГн, $L_к = 57,4$ мкГн, $L_{з1} = L_{з2} = 24,6$ мкГн, $C_{к0} = 42,35$ мкФ, $C_к = 52,9$ мкФ при $C_{p1} = C_{p2} = 211,75$ мкФ, $f_0 = 2700$ Гц, ρ_0 (M1, 2) = 1,4 Ом, $L_{d1} = L_{d2} = 900$ мкГн;
- $L_{к0} = 82$ мкГн, $L_к = 57,4$ мкГн, $L_з = 24,6$ мкГн, $C_{к0} = 42,35$ мкФ, $C_к = 52,9$ мкФ при $C_p = 500$ мкФ, $f_0 = 2700$ Гц, ρ_0 (M1, 2) = 1,4 Ом, $L_{d1} = 900$ мкГн и $C_1 = 300$ мкФ, $L_n = 6$ мкГн.

Моделирование аварийного процесса в схеме по рис. 3 выполнено для двух вариантов исполнения ТПЧ с АИР: без использования и с использованием УП ограничения разрядного аварийного тока C_p . Рассмотрим далее результаты моделирования аварийного про-

цесса при срыве работы VS2 в M1, полученные по моделям, показанным на рис. 4–7. На рис. 8 (модель рис. 4) приведены диаграммы: входного тока i_{d1} АИР, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2, тока i_{CK} в цепи C_K -L_K-M1, тока i_n через нагрузку R_{H3} . На рис. 9 (модель рис. 5) — входного тока i_{d1} АИР, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2, тока i_{CK} в цепи C_K -M1, тока i_n через нагрузку R_{H3} . На рис. 10 (модель рис. 6) — входного тока i_{d1} M1 АИР, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2, тока i_{M2} M2. На рис. 11 (модель рис. 7 без УП) — входного тока i_{d1} АИР, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1, 2 M1, тока i_{CK} в цепи C_K -L_K-M1, тока i_{M2} M2. На рис. 12, 13 (модель рис. 7 с УП) соответственно — входного тока i_{d1} АИР, тока i_{VS5} через VS5, токов i_{VS1} , i_{VS2} через тиристоры VS1,2 M1, тока i_{M2} M2, а также (рис. 13) тока i_{VS5} , напряжений u_{VS5} на тиристоре VS5 и u_{C1} на конденсаторе C_1 , тока i_{Cp} через конденсатор C_p и тока i_{VD5} через диод VD5. Во всех приведенных диаграммах момент срыва работы VS2 M1 обозначен как t_{cp} . Анализ результатов моделирования (рис. 8, 9) показывает, что включение $L_з = (0,25-0,3)L_{к0}$ в цепь C_p или $L_{к0}/2$ в цепи тиристоров АИР (рис. 1а, б) позволяет достаточно эффективно ограничить аварийный разрядный ток i_{ap} . В результате на начальном этапе $\tau_{H3} \leq 0,5 T_H$ где $T_H = 1/f_H$ развития аварийного процесса, амплитудные значения аварийных токов i_{VS1} и особенно i_{VS2} находятся в пределах допустим-

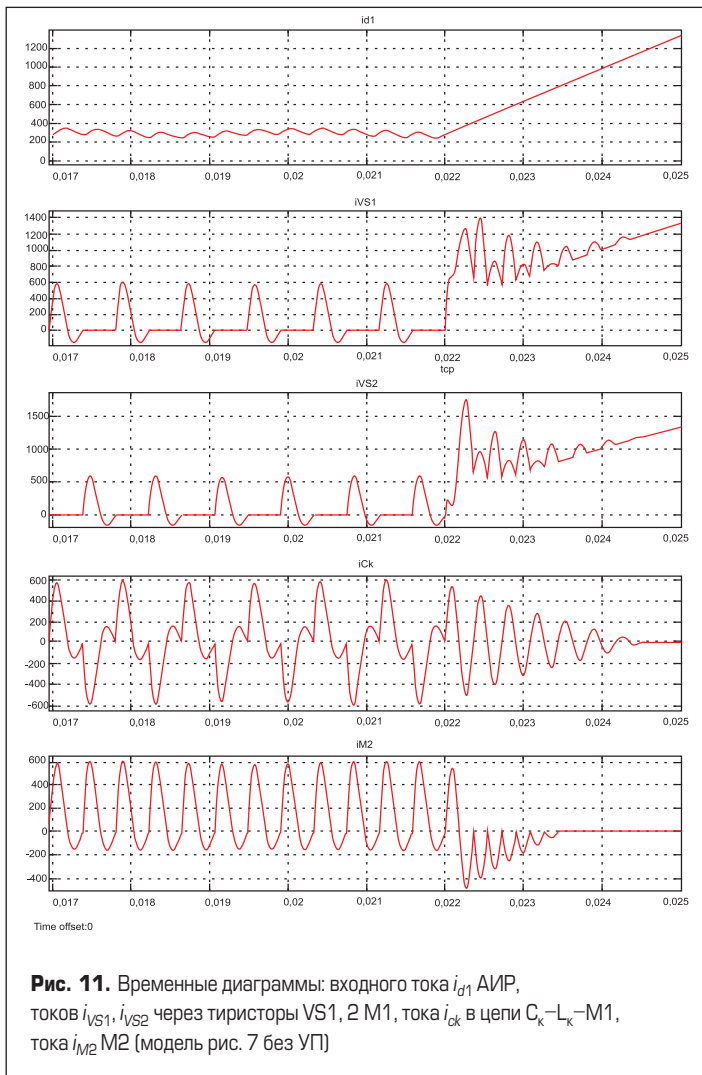


Рис. 11. Временные диаграммы: входного тока i_{d1} АИР, токов i_{VS1}, i_{VS2} через тиристоры VS1, 2 M1, тока i_{CK} в цепи C_K-L_K-M1 , тока i_{M2} M2 (модель рис. 7 без УП)

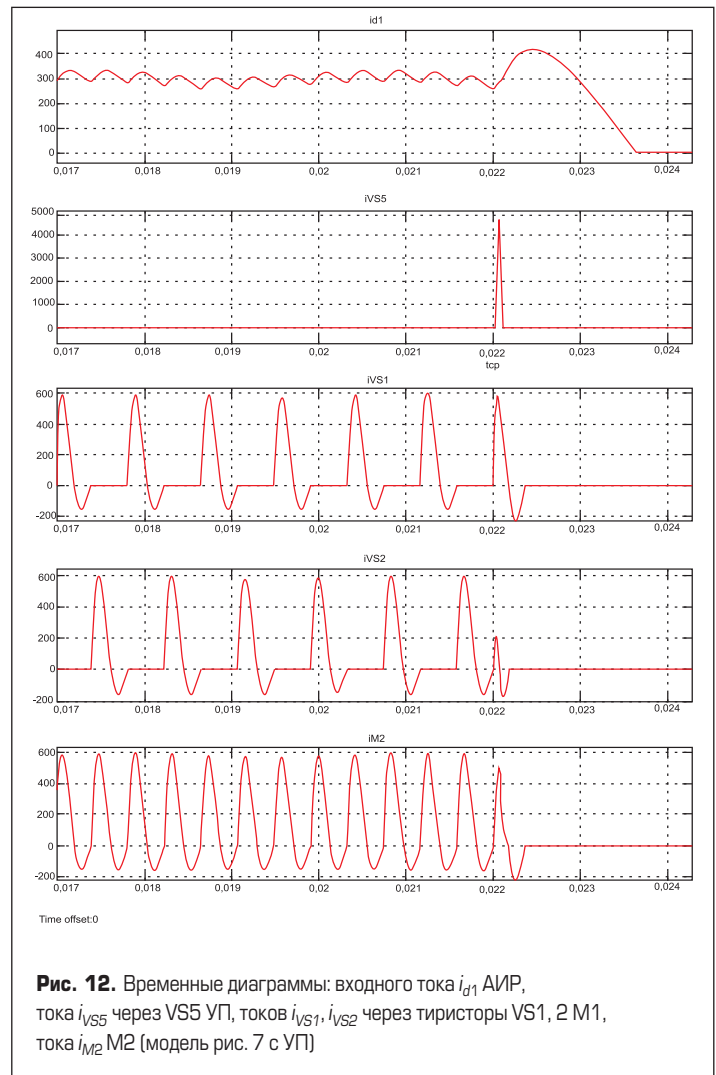


Рис. 12. Временные диаграммы: входного тока i_{d1} АИР, тока i_{VS5} через VS5 УП, токов i_{VS1}, i_{VS2} через тиристоры VS1, 2 M1, тока i_{M2} M2 (модель рис. 7 с УП)

мой рабочей перегрузки (рис. 8, 9). Разница амплитудных значений аварийных токов i_{VS1} и i_{VS2} на этапе $\tau_{HЭ}$ определяется возникновением в колебательном контуре аварийного моста M1 затухающих синусоидальных колебаний (i_{CK} , рис. 8, 9; i_1, i_2 , рис. 1а, б), причем ток i_{CK} (рис. 8, 9) вычитается из тока i_{VS2} , что характерно и для мостовых АИР с закрытым входом, удвоением частоты и встречными диодами [7]. При $t > \tau_{HЭ}$ ток i_{CK} через половину периода собственных колебаний поочередно суммируется с i_{VS1} или i_{VS2} (рис. 8, 9) и далее, по мере развития аварийного процесса, затухает, что определяется в основном активным сопротивлением L_K, L_{K0} (рис. 1а, б). Для АИР по рис. 1а, б частота затухающих колебаний f_a, f_b , волновое сопротивление ρ_a, ρ_b колебательного контура и амплитудные значения тока $I_{cm(a)}, I_{cm(b)}$ определяются, соответственно, из выражений:

$$\begin{aligned} f_a &= 1/(2\pi\sqrt{L_K C_K}); \rho_a = \sqrt{L_K/C_K}; f_b = \\ &= 1/(2\pi\sqrt{L_{K0} C_K}); \rho_b = \sqrt{L_{K0}/C_K}; I_{cm(a)} = \\ &= U_{Ck(tcp+t)}/\rho_a; I_{cm(b)} = U_{Ck(tcp+t)}/\rho_b \end{aligned} \quad (2)$$

Раздельное включение мостов M1, 2 (рис. 2) позволяет достаточно эффективно ограничить аварийный ток i_{ap} и влияние параллельно работающего моста (мостов) на аварийный процесс в M1 (рис. 10). При параллельном включении мостов M1, 2 (рис. 3) без УП зна-

чения аварийных токов i_{VS1}, i_{VS2} VS1, 2 M1, при $t > T_H/2$, будет определяться (рис. 11) суммарным значением входного тока i_{d1} , амплитудными значениями колебательного тока i_{CK} и тока i_{M2} моста M2. Таким образом, тиристоры VS1, 2 M1 (рис. 3) по отношению к своим рабочим значениям токов будут более загружены, чем в остальных рассматриваемых схемах АИР. Применение УП (рис. 3) позволяет ограничить аварийные токи i_{VS1}, i_{VS2} по амплитуде и длительности протекания, а также ликвидировать аварийный режим в ТПЧ без отключения источника питания (рис. 12, 13). Однако этот метод предъявляет более высокие требования к быстродействию датчика аварии $t_{дТ}$ (рис. 12, 13 — $t_{дТ} = 20$ мкс), к динамическим (di_{VS}/dt) и временным параметрам ($t_{\theta K}$) тиристора VS5 УП, а также требует защиты VS5 от коммутационных перенапряжений (рис. 13). Полученные результаты позволяют установить все составляющие и получить общие выражения для аварийных токов через тиристоры, диоды ВП (ВПТ) и мостового АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами. Рассмотрим это для одномостовых АИР по рис. 1а, б.

При срыве инвертирования в АИР (рис. 1а, б) через диоды (тиристоры) ВП (ВПТ) будет протекать аварийный ток

$$i_{\theta n}(t) = i_{d0} + i_3 \quad (3)$$

состоящий из входного тока i_{d0} и тока i_3 экспоненциальной формы, нарастающего со скоростью, которая, если пренебречь индуктивностью питающей сети, ограничена постоянной времени $L_{d1}/r_{кз}$ где $r_{кз}$ — активное сопротивление цепи короткого замыкания. Величина $r_{кз} = r_c + r_{Ld} + r_{СПП}$ где соответственно сопротивление питающей сети, входного дросселя и суммарное значение сопротивлений силовых диодов (тириستоров) ВП (ВПТ) и тиристоров АИР (M1), через которые протекает аварийный ток. В результате получим, что

$$\begin{aligned} i_{ВТ}(t) &= I_{d0} \times e^{-(r_{кз}/L_{d1})t} + \\ &+ \frac{U_d}{r_{кз}} (1 - e^{-(r_{кз}/L_{d1})t}) \end{aligned} \quad (4)$$

При этом через тиристоры VS1, 2 на этапе $\tau_{HЭ}$ протекают токи i_{VS1} и i_{VS2} , определяемые выражениями:

$$\begin{aligned} i_{VS1}(t) &= i_{\theta n}(t) + i_{ap}(t) + i_{CK}(t), \\ i_{VS2}(t) &= i_{\theta n}(t) + i_{ap}(t) - i_{CK}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Выводы

1. Приведены классификационные группы широко используемых в ЭТУ тиристорных АИР с закрытым и открытым входами. Отмечены особенности протекания аварийного процесса при срыве (пробое)

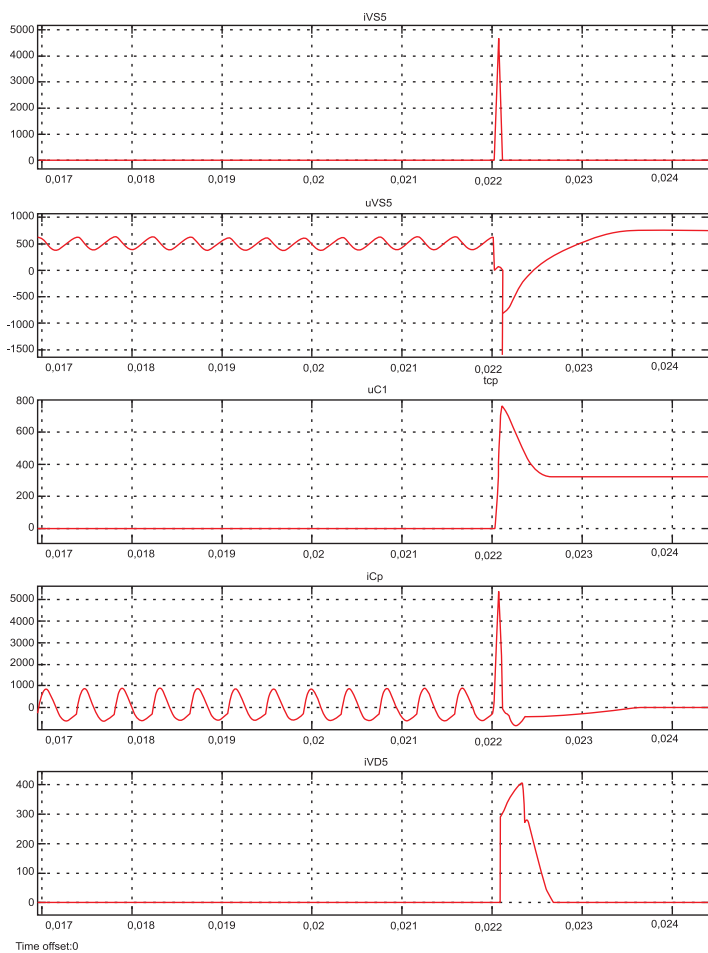


Рис. 13. Временные диаграммы тока i_{VS5} и напряжения u_{VS5} на тиристоре VS5, напряжения u_{C1} на конденсаторе C_1 , тока i_{Cp} через конденсатор C_p и тока i_{VD5} через диод VD5 (модель рис. 7 с УП)

работы тиристоры в АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами. Показана необходимость ограничения аварийного разрядного тока разделительного (фильтрового) конденсатора C_p через тиристоры при срыве (пробое) их работы.

2. Выполнено схемотехническое моделирование аварийного процесса при срыве инвертирования в мостовых АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами при использовании различных схем по ограничению аварийного разрядного тока C_p . Получены временные зависимости аварийных токов через тиристоры (диоды) АИР и выпрямителя, на основе которых построены аналитические выражения для определения аварийных токов через них. Показана возможность самоликвидации срыва инвертирования при использовании устройства ускоренного перезаряда разделительного конденсатора.

Литература

1. Аитов И. Л. Силовые электронные устройства: Уч. пособие. Уфа: УГАТУ, 2009.
2. Беркович Е. И., Ивенский Г. И., Иоффе Ю. С., Матчак А. Т., Моргун В. В. Тиристорные

преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1983.

3. Аитов И. Тиристорные источники питания повышенной мощности для электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 3.
4. Аитов И. Л., Кацнельсон С. М. Автономные преобразователи частоты: Уч. пособие. Уфа: УАИ, 1978.
5. Кацнельсон С. М. Тиристорные умножители частоты: Уч. пособие. Уфа: УАИ, 1978.
6. Кацнельсон С. М. Стабилизация напряжения и эффективность использования тиристоры в умножителях частоты: Уч. пособие. Уфа: УАИ, 1979.
7. Аитов И. Вопросы построения систем аварийной защиты тиристорных преобразователей частоты для электротехнологических установок. Часть 1 // Силовая электроника. 2010. № 1.
8. Кацнельсон С. М. Тиристорные инверторы со встречно-параллельными диодами и удвоением частоты // Электричество. 1971. № 1.
9. А.С. № 515228 (СССР). Автономный инвертор / И. Л. Аитов // Бюл. 1976. № 19.
10. Аитов И. Л. Ограничение аварийного тока в многостовых автономных инверторах с индуктивно-емкостным входом // Электромеханика. 1978. № 5.