

Тиристорные источники питания

повышенной мощности для электротехнологических установок

В статье говорится о проблемах и задачах, возникающих при разработке высокочастотных источников питания (ВИП) повышенной мощности для электротехнологических установок (ЭТУ) индукционного нагрева и плавки металлов; рассматриваются вопросы выбора структуры ЭТУ, схемотехнические решения по реализации таких ВИП на основе тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с автономными резонансными инверторами (АИР) с удвоением частоты, встречными диодами, закрытым входом и умножением выходного напряжения; приводятся результаты моделирования процессов в АИР в среде Matlab с помощью инструментов пакета Simulink.

Иршат Аитов, к. т. н.

aitov-irshat@mail.ru

В настоящее время ЭТУ индукционного нагрева, плавки металлов являются наиболее энергоемкими, причем на установках с плавильными печами и для нагрева крупногабаритных деталей под пластическую деформацию приходится основная часть мощностей как по единичной мощности, так и по относительной массовости их использования. Для питания таких установок требуются ВИП повышенной мощности (0,5–4 МВт), при этом для наиболее крупных групп мощность может достигать 10–40 МВт при выходной частоте от 500 до 2400 Гц [1, 2, 3, 4].

Так, например, индукционные плавильные печи предназначены для открытой или вакуумной плавки сталей, особо чистых алюминиевых сплавов и других металлов. Емкость их может достигать 10 т при требуемой номинальной мощности ВИП до 4,2 МВт. В зависимости от емкости печей (требуемой мощности) питание таких ЭТУ осуществляется от промышленной сети с напряжением 6, 10 или 0,4 кВ через ВИП с частотой 500–1000 Гц или 2000–2400 Гц при относительно малой емкости печей. По надежности электроснабжения такие установки относятся к потребителям второй категории. Исключительно широкое применение нашли установки для индукционного нагрева кузнечных заготовок, различных по форме и размерам, перед обработкой их давлением (штамповка, ковка, штамповка методом сверхпластичности), для поверхностной закалки деталей, а также как вакуумные индукционные нагреватели. Выходная частота ВИП для таких ЭТУ лежит в пределах от 0,5 до 10 кГц, при этом верхнее значение их мощности составляет: 0,25–0,45 МВт — для закалочных установок; 1,0–1,5 МВт — для вакуумных нагревательных установок; 1,5–2,0 МВт и более — для кузнечных нагревателей [1, 2, 3, 4].

В данной работе выделены основные проблемы и задачи, возникающие при разработке ВИП боль-

шой мощности для ЭТУ индукционного нагрева крупногабаритных деталей, термообработки сварных швов труб, плавки металлов и др., рассмотрены схемотехнические решения и структуры построения таких ВИП на основе ТПЧ с АИР, удвоением частоты, встречными диодами, закрытым входом и умножением выходного напряжения, приведены результаты моделирования процессов в АИР в среде Matlab с помощью инструментов пакета Simulink.

Создание ВИП повышенной мощности для ЭТУ связано с решением ряда проблем и выполнением разнообразных требований, часто противоречащих друг другу. Они определяются как особенностями преобразования параметров электрической энергии большой мощности с получением высоких (требуемых) технико-экономических показателей, так и требованиями высокой надежности, регулируемости выходной мощности и устойчивости работы ВИП с учетом изменения характера и величины нагрузки современных ЭТУ, ограничений влияния на питающую сеть при различных режимах работы, требований экологических служб и др. Анализ основных проблем и требований, существующих методов и средств их реализации, а также особенностей развития современных ЭТУ показывает необходимость использования системного подхода при разработке ВИП повышенной мощности для ЭТУ с индукционным методом воздействия на металл. В результате, учитывая, что основные показатели ЭТУ во многом определяются ВИП, то одним из важных начальных этапов создания является выбор структуры технологической системы и схемной реализации ВИП повышенной мощности, отвечающих указанным выше требованиям. Определяющими требованиями к таким ВИП являются: устойчивая работа и стабилизация напряжения (тока) на элементах схемы, и в первую очередь на силовых полупроводниковых при-

борах (СПП), при изменениях характера и величины нагрузки в широких пределах; исключение аварийного состояния в режимах к. з. и х. х. нагрузки; высокий КПД; возможность регулирования напряжения (мощности) на нагрузке без снижения показателей ВИП в необходимых пределах (по наиболее рациональной реализации технологического процесса); возможность получения повышенного (необходимого) значения выходного напряжения без использования нагрузочного трансформатора; а также параллельной работы отдельных или групп мостов (ячеек) для увеличения мощности [4, 5, 6, 7].

Многочисленные теоретические, экспериментальные исследования, а также достаточно длительный опыт промышленной эксплуатации ТПЧ с различными группами схем АИР с удвоением частоты и встречными диодами показывают возможность и целесообразность использования группы с закрытым входом и умножением выходного напряжения для реализации мощных ВИП среднечастотного диапазона [4–7, 9–14, 17].

В настоящее время характерными особенностями развития и построения современных ЭТУ с индукционным и другими методами воздействия на материал являются: использование разнообразных прогрессивных технологических процессов как для получения металлов, сплавов и конструкционных материалов высокого качества с особыми свойствами, так и для формовки, обработки заготовок, деталей и изделий в таких важных отраслях промышленности, как авиационная, космическая, химическая и др.; использование в своей структуре измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), микропроцессоров (МП), микроконтроллеров (МК) и ЭВМ в системе управления, регулирования, контроля и диагностики ВИП и управляемого объекта (УО-нагрузки), представляющего собой нагрузочный колебательный контур [1, 3, 4, 6, 7, 14, 15].

В результате обобщенную структурную схему современных ЭТУ с управляемым ВИП (ТПЧ с АИР) и УО, согласно [15], можно представить в виде взаимодействия двух каналов (рис. 1): силового — ТПЧ (ВИП), УО и информационного — ИВК, которые через систему управления (СУ) связаны с верхним уровнем управления — (ЭВМ), где ОП — оператор, УОИ — устройство отображения информации, а УО представляет собой мощную индукционную тигельную печь для плавки металлов. Наличие в силовом канале ЭТУ управляемого ВИП и УО позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели, экологическую обстановку, расширить функциональные возможности и повысить надежность. Информационный канал служит для управления потоком энергии от ВИП к УО, а также для сбора и обработки сигналов о состоянии и функционировании системы контроля и диагностики. Информационный канал может взаимодействовать со всеми элементами силового канала, а также с оператором и системой верхнего уровня управления. Постоянный рост требований к ЭТУ с ВИП по таким показателям, как энергетическая эффективность, надежность, быстродействие

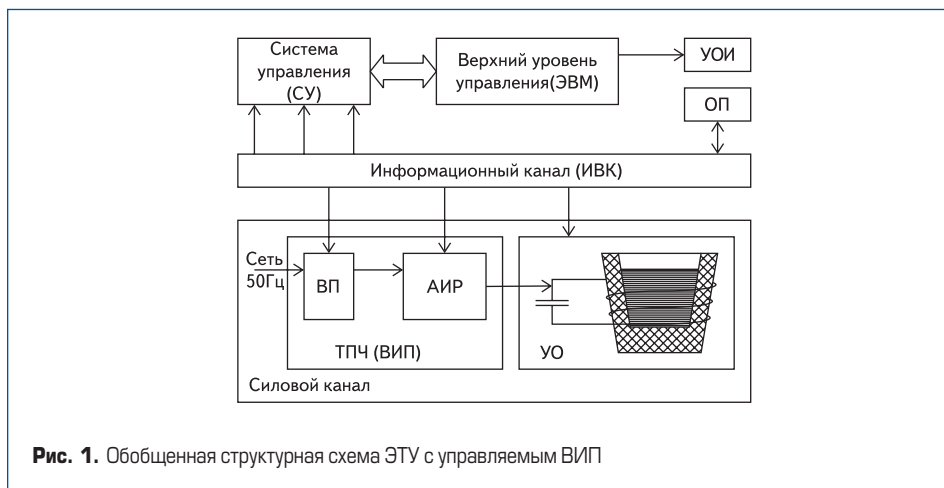


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ЭТУ с управляемым ВИП

и качество регулирования, ресурсоемкость и электромагнитная совместимость вызывает необходимость совершенствования всех элементов, входящих в общую технологическую схему. Следует отметить, что указанные выше показатели во многом определяются ВИП. В связи с этим необходимо также отметить, что увеличение единичной мощности и выходной частоты ВИП связано с решением ряда дополнительных проблем и задач по достижению необходимого уровня указанных выше показателей.

Рассмотрим этапы создания, особенности построения и характеристики схем АИР с удвоением частоты, встречными диодами и закрытым входом, работы по которым были начаты в уфимском авиационном институте под научным руководством С. М. Кацнельсона еще в 1969–1970 годах [6, 8, 9]. В дальнейшем результатами этих работ стали разработка группы схем АИР с закрытым входом с такими важными свойствами, как плавное глубокое регулирование мощности, умножение выходного напряжения и др., а также внедрение в промышленную эксплуатацию ТПЧ (ТПЧ–1500–1,0) мощностью 1,5 МВт и частотой 1 кГц для методического нагрева стальных заготовок квадратного сечения со сторонами 115 мм на заводе «Сельмаш» г. Кирова [6, 7, 10–14, 17].

При построении мощных ВИП весьма важным является, в первую очередь, выбор одного из основных его элементов — СПП, которые определяют как технико-экономические, так и схемотехнические и конструктивные показатели. Анализ параметров, характеристик и областей применения современных СПП показывает, что, несмотря на наличие новых, широко используемых, полностью управляемых СПП, таких как полевые (MOSFET), встроенные (IGBT) транзисторы и модули на их основе, современные не полностью управляемые (SCR) и запираемые (GTO, GCT, IGCT) тиристоры в настоящее время не имеют альтернативы при создании ВИП на большие и сверхбольшие мощности с частотами до нескольких единиц килогерц [16]. Следует отметить, что использование не полностью управляемых тиристоров в схемах мощных АИР с удвоением частоты, встречными диодами на частоты до 1,5–2 кГц является наиболее предпочтительным благодаря простоте за-

пираемыми их, как сравнительно малое падение напряжения, высокая перегрузочная способность, простота управления, относительно большие допустимые значения напряжений и токов, а также низкая стоимость. Важной проблемой при создании мощных ВИП является получение (или повышение) КПД уровня достигнутых значений на относительно малых мощностях при равной выходной частоте. В общем случае потери в ВИП определяются потерями во входной ВП (рис. 1) и выходной АИР частях ТПЧ. Как показал опыт промышленной эксплуатации, анализ параметров и характеристик схем АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами, при питании их от промышленной сети с напряжением 0,4 кВ, область их использования ограничивается мощностью 400–450 кВт и частотами от 2 кГц до 4–5 кГц [6, 7, 17]. На частотах ниже 1,5–2 кГц происходит снижение КПД и энергетической эффективности из-за значительного роста установленной мощности конденсаторного оборудования, потерь в них с увеличением мощности и снижением частоты, а также потерь в СПП, кабелях, шинпроводах и других элементах из-за относительно низкого значения напряжения питающей сети ($\sim U_c$) и выходного $U_{вых}(U_n)$ АИР [6, 7]. В связи с этим некоторое снижение потерь во входной части достигается за счет использования промышленной сети с напряжениями 0,66, 6, 10 кВ. Таким образом, основным решением этого вопроса при реализации АИР на частоты ниже 1,5 кГц и мощности более 500 кВт является снижение эффективности конденсаторного оборудования и повышение $U_{вых}$ [6].

Для сравнения рассматриваемых схем АИР по $U_{вых}$ используется коэффициент $K_{УН}$, определяемый по выражению:

$$K_{УН} = U_{вых}(U_n) / U_{вх}(U_d), \quad (1)$$

где $U_{вх}(U_d) = 520$ В — среднее значение постоянного напряжения на выходе (U_d) мостового ВП, т. е. на входе АИР ($U_{вх}$), при питании от трехфазной промышленной сети с напряжением 0,4 кВ, $U_{вых}(U_n)$ — действующее значение выходного напряжения АИР. Для схем АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами $K_{УН} = 0,5$. Необходимо отметить, что промышленные индукционные плавильные печи и нагревательные уста-

новки выполняются обычно на напряжения 375, 500, 750, 1000, 1600, 3000 В.

На начальном этапе решения рассмотренных выше проблем были разработаны, с сохранением всех достоинств АИР с открытым входом, удвоением частоты и встречными диодами, новые схемы, в которых значительно снижена установленная мощность разделительных (C_p) конденсаторов [8], либо полностью они исключены [9], а также выполняется удвоение выходного напряжения, т. е. $K_{UH} = 1,0$. АИР без C_p [9] классифицируется как однокаскадный с закрытым входом и удвоением выходного напряжения. Базовый вариант такой схемы состоит из двух инверторных мостов, при этом исключение C_p и удвоение выходного напряжения осуществляется благодаря каскадному (последовательному) соединению мостов по переменному (выходному) току, алгоритму поочередного управления тиристорами мостов со сдвигом в 180° эл. выходной частоты и включению нагрузки в цепь переменного тока между одноименными выводами питания двух мостов, питание которых постоянным током осуществляется параллельно от одного источника через входные дроссели. В результате переменный ток замыкается через нагрузку между коммутирующими контурами мостов, которые получают включенными последовательно, что обуславливает как исключение C_p , так и удвоение напряжения на нагрузке, так как к ней прикладывается суммарное напряжение коммутирующих конденсаторов двух мостов.

Одним из основных, отмеченных выше, требований, особенно к ВИП большой мощности, при реализации современных ЭТУ (рис. 1) является возможность глубокого и плавного регулирования мощности, отдаваемой в нагрузку. Это, в первую очередь, связано с реализацией технологического процесса по закону, обеспечивающему необходимые точность и надежность, а также с выполнением важного, особенно к мощным ВИП, требования — надежного, безударного пуска их, т. е. пуска при минимальной потребляемой мощности из сети с последующим плавным увеличением ее до необходимого значения, определяемого технологическим процессом [6]. Из известных способов регулирования мощности ВИП, как показывают исследования и опыт промышленной эксплуатации АИР с закрытым входом, удвоением частоты и встречными диодами, наиболее полно отвечает этим требованиям фазовый метод регулирования на стороне переменного тока путем геометрического суммирования токов мостов (ячеек) за счет изменения фазы импульсов управления, подаваемых на тиристоры этих мостов [5, 6, 7, 10, 12, 13].

На рис. 2а, б приведены варианты схем регулируемых АИР с закрытым входом, встречными диодами, удвоением частоты и выходного напряжения, в которых используется фазовый метод [10, 13]. Каждая из приведенных схем АИР содержит по четыре моста М1, 2, 3, 4, состоящих из тиристоров VS1, 2, 3, 4, встречных диодов VD1, 2, 3, 4, коммутирующих конденсаторов C_k и индуктивностей Lk. Питание мостов АИР осуществляется от источника постоянного то-

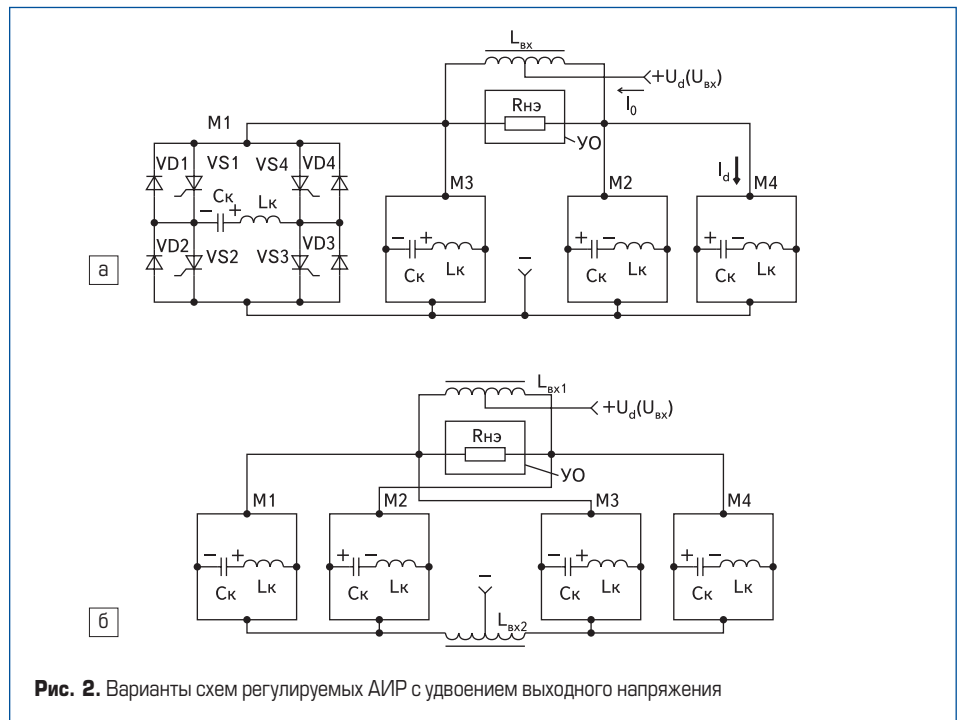


Рис. 2. Варианты схем регулируемых АИР с удвоением выходного напряжения

ка с напряжением $U_{\delta x}$ через один входной дроссель $L_{\delta x}$ (а) или через два L_{Bx1} и L_{Bx2} (б). Нагрузка (YO), представляющая собой скомпенсированный колебательный нагрузочный контур с эквивалентным активным сопротивлением $R_{H\delta}$, включена между положительными выводами питания мостов двух групп М1,2 и М3,4. Разделение по питанию указанных двух групп мостов в схеме АИР (б) с помощью L_{Bx2} , по сравнению со схемой АИР (а), позволяет ограничить до безопасной величины разрядные аварийные токи S_k одних мостов через тиристоры аварийного моста [18], исключить образование дополнительных контуров протекания циркуляционных токов между мостами и снизить потери при глубоком регулировании $P_H (U_H)$. Нашли применение и другие варианты выполнения АИР с закрытым входом, в которых достигается симметрия напряжения U_H на нагрузке относительно «земли», что необходимо, например, при вакуумной плавке (нагреве) металлов [6, 7, 12].

Рассмотрим процессы в АИР по рис. 2а, б, временные диаграммы работы которых приведены на рис. 3, для установившегося режима при максимальной $P_H (U_H)$ и естественного выключения встречных диодов. На рис. 3

приведены соответственно: импульсы управления $i_{y1,3}, i_{y2,4}$, подаваемые на тиристоры VS1,3 и VS2,4 соответствующих мостов М1,3 или М2,4; токи, протекающие через тиристоры $i_{VS1,3}, i_{VS2,4}$, встречные диоды $i_{VD1,3}, i_{VD2,4}$ и нагрузку $i_H (u_H)$, где γ — угол коммутации тиристоров; β — угол регулирования $P_H (U_H)$; $t_{BCC} = t_3 - t_4$ — схемное время восстановления тиристоров. Как видно из рис. 3, особенностью алгоритма управления таких АИР является то, что импульсы управления, подаваемые на тиристоры внутри каждой группы мостов М1,2 и М3,4, сдвинуты на постоянный угол на 180° эл. по частоте $\omega_y (\omega_B)$ выходного напряжения U_H , независимо от режима работы.

Согласно рис. 3 в момент t_0 включаются тиристоры VS1,3 М1,3, одновременно ток продолжают проводить VS1,3 М2,4. В результате в интервале угла γ происходит коммутация тока с VS1,3 М2,4 на VS1,3 М1,3 и далее включаются встречные диоды VD1,3 М2,4. Через тиристоры АИР, кроме колебательного тока, протекает и постоянная составляющая входного тока. В момент t_1 встречные диоды VD1,3 М2,4 выключаются и в интервале $t_1 - t_2$ через тиристоры VS1,3 М1,3 будет протекать ток, равный входному току АИР, т. е. I_0 , благода-

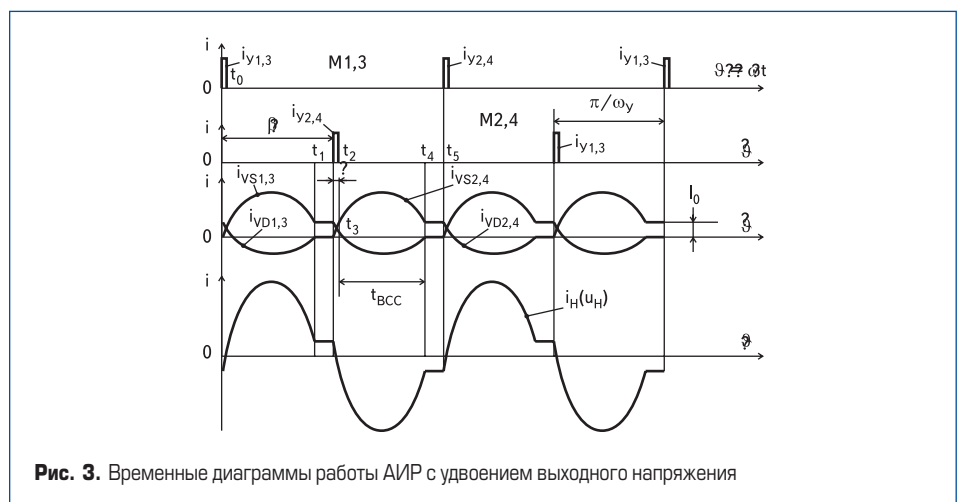


Рис. 3. Временные диаграммы работы АИР с удвоением выходного напряжения

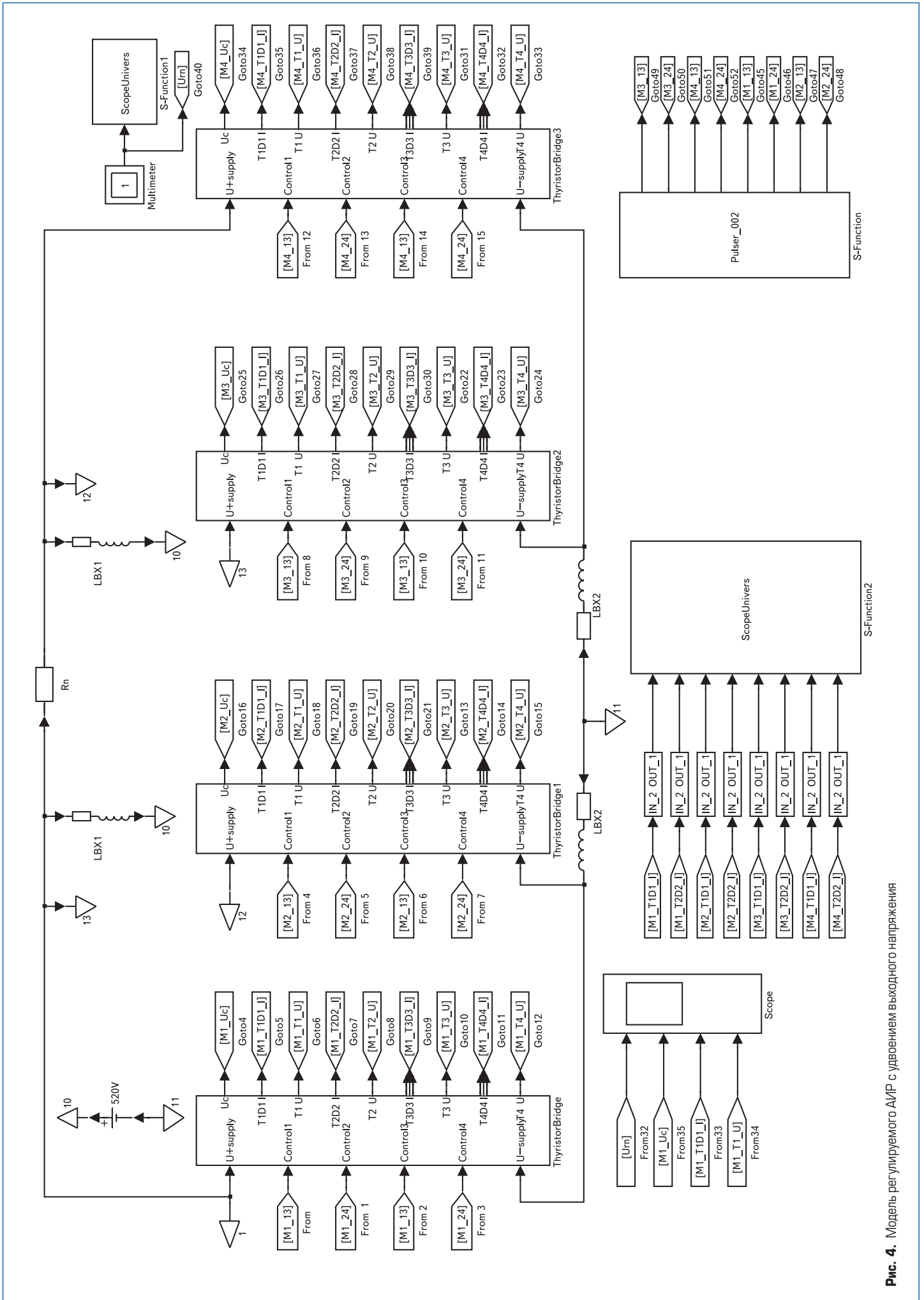
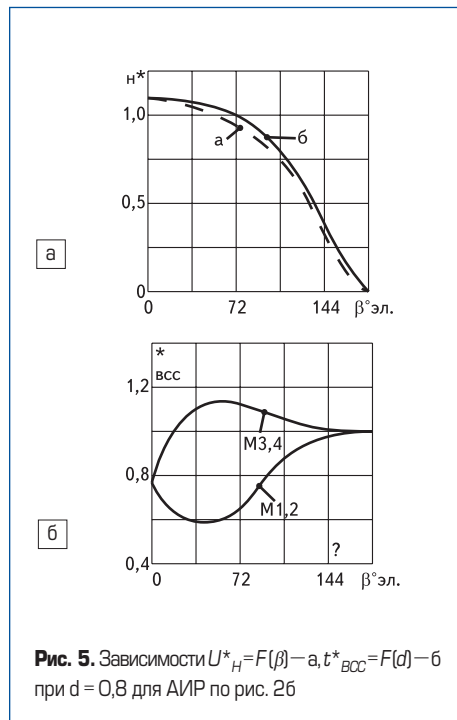


Рис. 4. Модель регулируемого АМР с удвоением выходного напряжения

ря относительно большой величине $L_{ВХ}$ ($L_{ВХ1}$, $L_{ВХ2}$). Далее в момент t_2 включаются тиристоры VS2, 4 M2, 4, и процесс повторяется. Таким образом, колебательные токи двух указанных групп мостов складываются в нагрузку (i_H), а напряжение на них будет определяться суммарным напряжением на C_K мостов каждой из групп, действующее значение которого $U_H \approx U_{ВХ}$ т. е. в рассматриваемых схемах АИР имеет место удвоение выходного напряжения. Схемное время восстановления тиристоров определяется интервалом проводимости встречных диодов $t_3 - t_4 = t_{BCC}$ который зависит от затухания колебательного контура данных АИР $d = R_{HЭ} / \rho$, где $\rho = \sqrt{L_K / C_K}$ — волновое сопротивление контура.

Регулирование $P_H (U_H)$ в данных схемах АИР осуществляется путем геометрического суммирования токов двух групп мостов M1,2 и M3,4 за счет фазового сдвига импульсов управления тиристорами одной группы относительно другой. Для исследования процесса фазового регулирования и получения регулировочных характеристик была разработана модель АИР с удвоением частоты и выходного напряжения (рис. 2а, б) в системе Matlab с помощью пакета Simulink, которая для АИР по рис. 2б приведена на рис. 4. Обозначения блоков и элементов в модели идентичны обозначениям по рис. 2б, для сокращения количества линий связи и упрощения соединительные точки с одинаковыми электрическими потенциалами в модели выполнены в виде треугольников с одинаковыми номерами. В модели приведены блоки для контроля, измерения параметров (токов, напряжения, времени) и блок управления. При моделировании приняты реальные значения параметров СПП, их защитных RC-цепочек, активных сопротивлений индуктивностей, а также следующие параметры АИР и нагрузки: $\rho = 0,312 \text{ Ом}$, $U_{ВХ} = 520 \text{ В}$, $P_{Hн} = 1 \text{ МВт}$, $f_B (\omega_B) = 1000 \text{ Гц}$ — выходная частота, $f_0 (\omega_0) = 1100 \text{ Гц}$ — собственная частота колебательного контура, $R_H = R_{HЭ} = 0,25 \text{ Ом}$, $d = 0,8$. Регулирование $U_H (P_H)$ осуществляется путем изменения фазы (β) отпирающих импульсов тиристоров мостов M3, 4 относительно M1, 2 в сторону отставания от 0 до 180° эл. (рис. 3). Для получения и анализа основных характеристик регулируемых АИР используются блоки контроля и измерения.

Основными характеристиками, определяющими применимость регулируемых АИР с удвоением выходного напряжения для реализации различных технологических процессов, являются: регулировочная характеристика и надежность работы в процессе регулирования. Регулировочная характеристика в относительных единицах представляет собой зависимость $U_H^* (P_H^*) = F(\beta)$ при $d = \text{const}$, где $U_H^* = U_H / U_{ВХ}$, $P_H^* = P_H / P_{Hн}$. Надежность работы регулируемых тиристорных АИР наиболее реально может быть оценена зависимостью $t_{BCC}^* = F(\beta)$ при максимально допустимом значении d , где $t_{BCC}^* = 2 t_{BCC} / T_0$, а $T_0 = 1/f_0$. На рис. 5а, б приведены эти зависимости при допустимом значении $d = 0,8$, для АИР по рис. 2 а, б, где пунктирной линией выполнена зависимость $U_H^* = F(\beta)$ для АИР



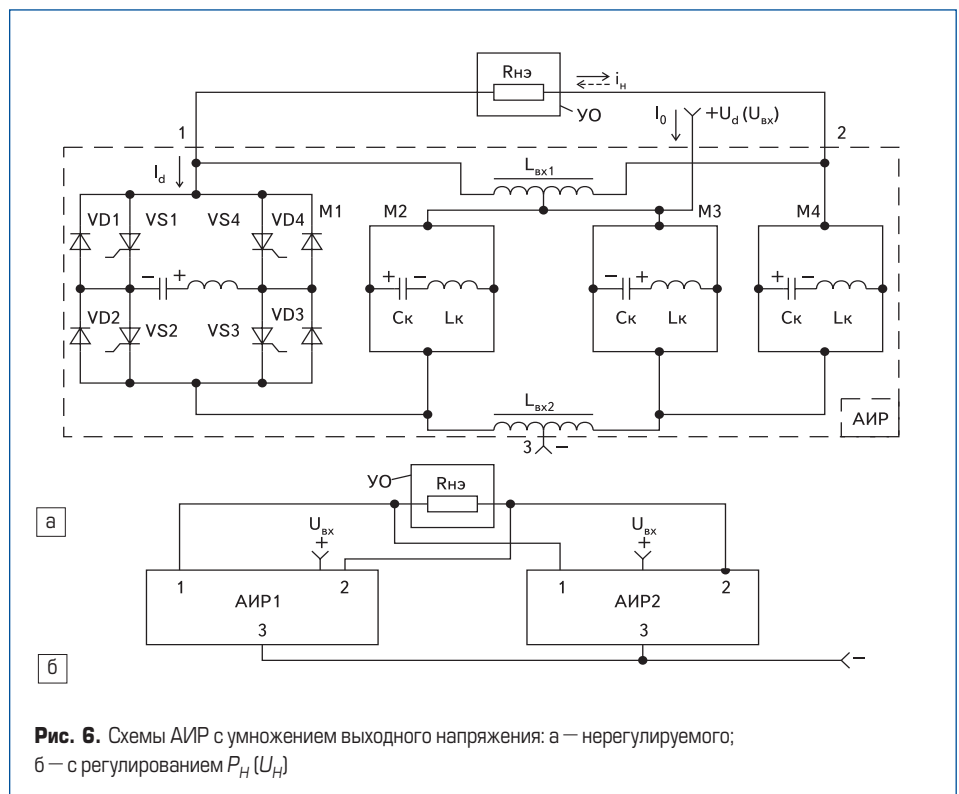
по рис. 2а. Как видно из характеристики (рис. 5б), в рассматриваемых АИР наблюдается некоторое снижение t_{BCC} тиристоров в опережающих мостах (M1, 2) при определенных значениях β , что связано с протеканием циркуляционных токов между мостами различных групп. Это снижение несколько больше в схеме АИР по рис. 2а. Однако на средних частотах 500–1500 Гц для схем регулируемых АИР с удвоением частоты и напряжения это снижение t_{BCC} не является существенным.

С ростом мощности ВИП возникают проблемы, связанные с процессами передачи энергии на определенные расстояния внутри цеха или между цехом и преобразовательной подстанцией, а также согласования ВИП с высоковольтной нагрузкой. Потери напряжения

и энергии в этих случаях и питание ВИП от промышленной сети с $U_c = 0,4 \text{ кВ}$ оказываются недопустимо большими, а согласование с нагрузкой невыполнимо. Рассмотренные выше АИР с удвоением $U_{ВХ}$ позволяют частично решить эти вопросы, однако при мощностях ВИП более 500–700 кВт этого недостаточно, а повышение U_c сети или $U_{ВХ}$ АИР с помощью промежуточных трансформаторов значительно усложняет ЭТУ, снижает КПД и другие показатели.

Получение необходимых высоких значений $U_{ВХ}$ ВИП при питании от сети с $U_c = 0,4 \text{ кВ}$ без применения дополнительных силовых устройств можно реализовать в АИР с удвоением частоты и закрытым входом с каскадным соединением мостов [7, 11, 12]. На рис. 6а приведена схема нерегулируемого двухкаскадного АИР с непосредственными связями между каскадами и умножением выходного напряжения, где каждый каскад, как показано выше, состоит из двух мостов, т. е. $K_{UH} = 2K$, где K — число каскадов. На рис. 6б приведена схема регулируемого двухкаскадного АИР, состоящего из двух (АИР1, АИР2) нерегулируемых (а) включенных параллельно на общую нагрузку $R_{HЭ}$. Работа данного АИР при регулировании $U_H (P_H)$ идентична описанной выше схеме регулируемого однокаскадного АИР.

Особенностями многокаскадных АИР с закрытым входом и встречными диодами являются непосредственные связи между каскадами и только четное число мостов. Как видно из рис. 6а, непосредственно соединяются между собой попарно и поочередно катодные и анодные группы тиристоров мостов, а нагрузка $R_{HЭ}$ включается между анодными группами тиристоров первого M1 и последнего M4 инверторного моста. Управление тиристорами осуществляется таким образом, что управляющие импульсы подаются на нечетные (M1, 3) и четные (M2, 4) мосты со сдвигом на полови-



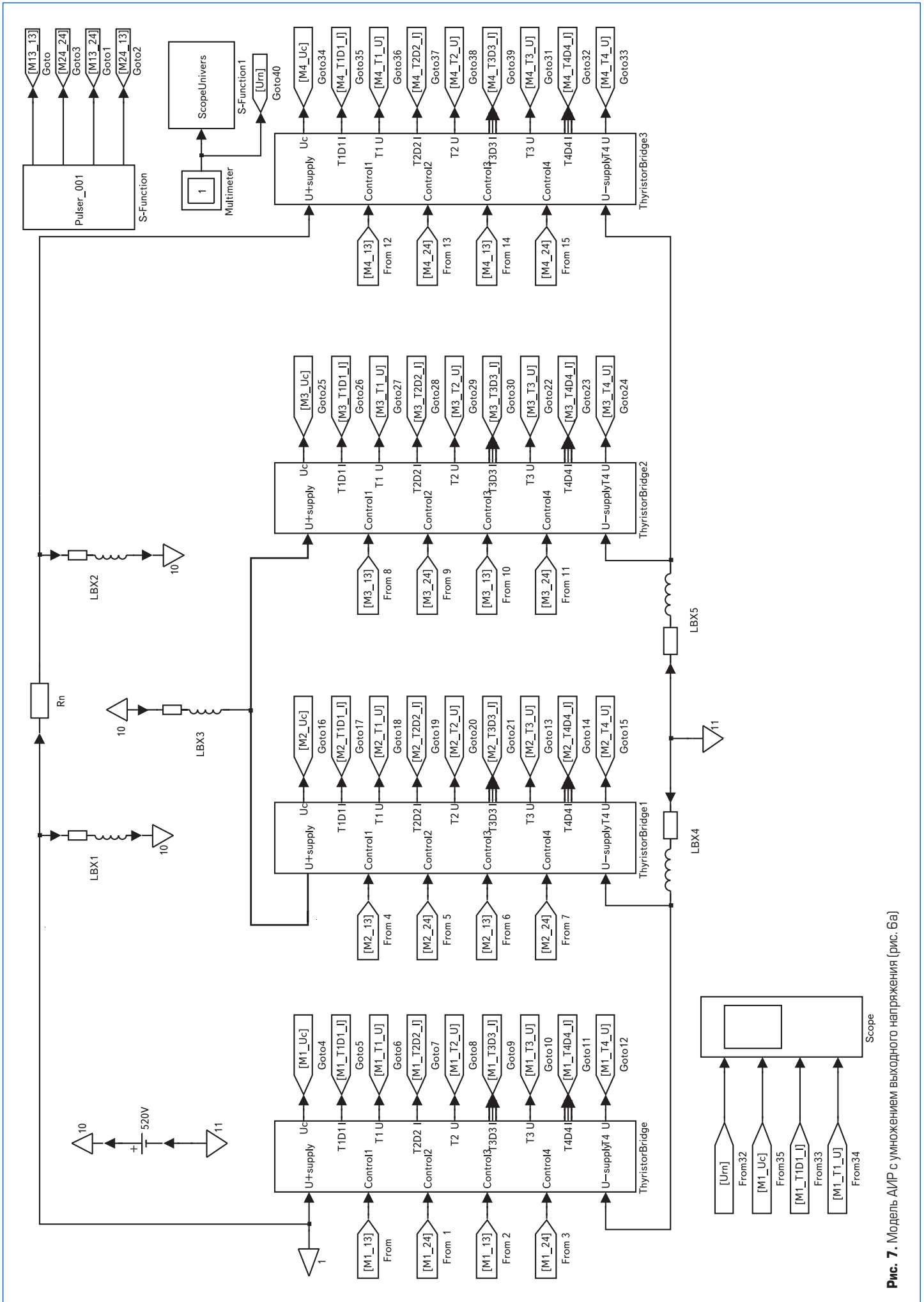
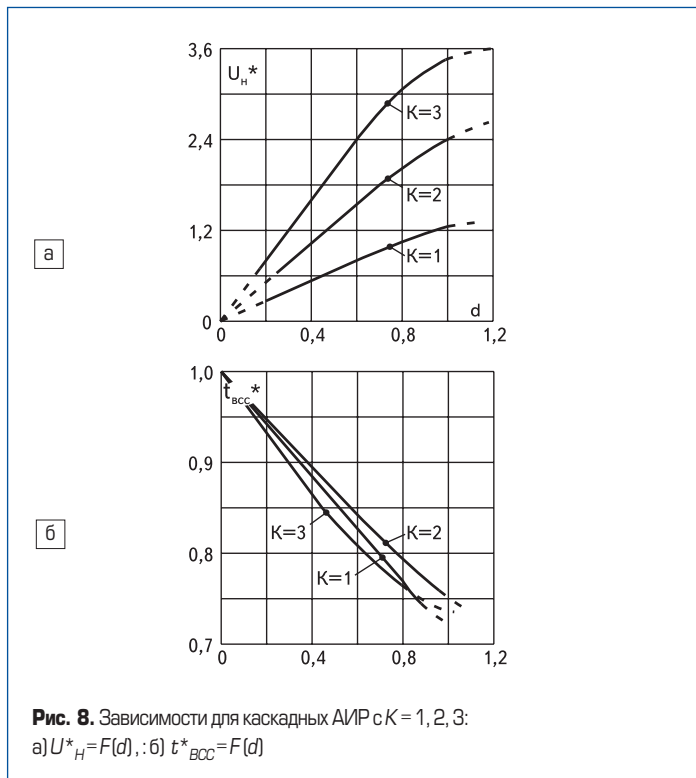


Рис. 7. Модель АИР с умножением выходного напряжения (рис. 6а)



ну периода выходного напряжения. Тогда во время работы тиристоров М1, 3 колебательный ток замыкается через встречные диоды М2, 4 и нагрузку. Напряжение на нагрузке $R_{HЭ}$ определяется суммарным напряжением на C_K всех мостов. В результате, в данной схеме $U_n^* = 2$, т. е. при питании от сети с $U_c = 0,4$ кВ действующее значение составляет $U_n = 1000$ В.

Исследование на моделях (на рис. 7 приведена модель только для двухкаскадного АИР по рис. 6 а) позволило получить основные зависимости (рис. 8а, б) $U_n^* = F(d)$ и $t_{BCC}^* = F(d)$ для АИР с числом каскадов $K = 1, 2, 3$, позволяющие судить о перспективности использования

таких АИР для питания ЭТУ мощностью более 1 МВт. При моделировании, независимо от числа каскадов, использовались основные параметры АИР, которые приведены выше для модели по рис. 4.

Выводы

1. Разработана группа схем регулируемых АИР с умножением выходного напряжения, позволяющих реализовать ВИП повышенной мощности среднечастотного диапазона с учетом основных требований современных ЭТУ.
2. Выполнено схемотехническое моделирование процессов в разработанных схемах АИР, получены основные характеристики, позволяющие установить диапазон и закон регулирования выходного напряжения (мощности), а также условия надежной работы.

Литература

1. Слухоцкий А. Е., Немков В. С., Павлов Н. А, Бамунэр А. В. Установки индукционного нагрева: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, 1981.
2. Миронов Ю. М., Миронова А. Н. Электрооборудование и электрооснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Евтюкова И. П., Кацевич Л. С., Некрасова Н. М., Свенчанский А. Д. Электротехнологические промышленные установки: Учеб. для вузов / Под ред. А. Д. Свенчанского М.: Энергоиздат, 1982.
4. 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.
5. Васильев А. С., Слухоцкий А. Е. Перспективы развития вентильных преобразователей частоты для питания установок индукционного нагрева // Электротехника. 1980. № 2.
6. Аитов И. Л. Исследование тиристорных многомостовых преобразователей повышенной частоты с фазовым регулированием мощности: Дис... канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1974.
7. И. Л. Аитов, С. М. Кацнельсон. Автономные преобразователи частоты: Учеб. пособие / Уфа: УАИ, 1978.
8. Автономный инвертор. А. С. № 286043 РФ. Кацнельсон С. М., Аитов И. Л., Пудровский Л. С. БИ. 1970. № 34.
9. Кацнельсон С. М., Аитов И. Л., Охотников В. А. Тиристорный преобразователь с нагрузкой, включенной между входными дросселями инверторных мостов // Труды УАИ, сб. 2: Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. Уфа: УАИ, 1972.
10. Способ регулирования выходного напряжения многомостового автономного 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).
11. Патент № 669459 РФ. Автономный инвертор. Аитов И. Л. БИ. 1979. № 23.
12. Патент № 18245 UA. Автономный инвертор. Лупкин Б. В., Аитов И. Л., Самигуллин Р. З. БИ. 2006. № 11.
13. Последовательный автономный инвертор. А. С. № 936297. Аитов И. Л. БИ. 1982. № 22.
14. Аитов И. Л., Зиннатуллин Р. И. Тиристорные источники питания для ответственных электротехнологических установок // Силовая электроника. 2008. № 2.
15. Бычков М., Ремизевич Т. Современные электронные компоненты для электропривода // Электронные компоненты (М.). 2002. № 6.
16. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // СТА (М.).
17. Воробьев Ю. В. Разработка и исследование тиристорного исполнительного элемента частотно-параметрической системы стабилизации мощности многопозиционной индукционной установки: Дис... канд. техн. наук. Уфа: УАИ, 1980.
18. 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.