УДК 314.615.58+621

к.т.н., вед.н.с. Глебин А.Г.,
к.т.н., с.н.с. Саратовский Р.Н.,
к.т.н., с.н.с. Ушаков В.И.,
к.т.н., доц. Кобец Д.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

РЕГУЛИРУЕМЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Розглядаються принципи частотного регулювання величин, що визначають живлення навантаження резонансного інвертора подвоєння частоти з діодами зустрічного струму при самозбудженні.

Автоматизация электротермических установок, предназначенных для индукционного нагрева металлов и сплавов токами повышенной частоты, часто диктует жёсткие условия, предъявляемые к системам управления полупроводниковых преобразователей электрической энергии - источников питания таких установок. В первую очередь это связано с необходимостью регулирования, стабилизации мощности, передаваемой источником питания в нагрузку за период нагрева, тока или напряжения индуктора, что обеспечивает условия технологии, повторяемость результатов нагрева, качество электротермической обработки. Диапазон регулирования генерируемой преобразователем мощности зависит от требований электротехнологии и может достигать 1:20, точность поддержания требуемых параметров (например температуры – до 10^{-3}), быстродействие – от 10^{-3} до 10^{-2} с [1]). Несмотря на сравнительно высокий к.п.д. полупроводниковых преобразователей повышенной частоты, актуальным остаётся использование их установленной (номинальной) мощности, стоимость пуско-наладочных работ, что определяет капитальные и эксплуатационные затраты при внедрении преобразователей повышенной частоты в электротермическое оборудование для индукционного нагрева.

В качестве полупроводниковых преобразователей повышенной частоты для питания установок индукционного нагрева нашли широкое применение тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), построенные по схемам параллельных и резонансных инверторов тока [1-3]. Система управления ТПЧ осуществляет независимое или самовозбуждение, отличающиеся способом формирования импульсов управления тиристоров инвертора. При самовозбуждении формирование импульсов управления производится в зависимости от электромагнитных процессов, происходящих в инверторе, периодичность которых зависит от пара-

метров реактивных элементов инвертора и его нагрузки [2, 4, 5]. По сравнению с независимым возбуждением самовозбуждение повышает быстродействие системы управления за счёт устранения инерционности задающего генератора импульсов управления тиристоров инвертора. Самовозбуждение также позволяет изменять период следования импульсов управления путём внешнего управляющего воздействия на длительность периода следования импульсов, а, следовательно, регулировать частоту выходного напряжения инвертора. Благодаря резонансным свойствам нагрузочного контура инвертора, представляющего обычно параллельное соединение индукционной нагрузки и компенсирующей емкости, изменение частоты инвертора приводит к изменению мощности, передаваемой инвертором в нагрузку, тока, напряжения.

В статье рассматриваются принципы частотного регулирования величин, определяющих питание нагрузки резонансного инвертора удвоения частоты с диодами встречного тока при самовозбуждении.

Самовозбуждение резонансного инвертора осуществляется путём предварительного поочередного фиксирования, при каждом включении тиристора, длительности полуволны прохождения через него тока в одной из диагоналей моста инвертора и, с учётом сигнала управления, прогнозирования момента времени подачи импульса управления на тиристор следующей диагонали [5].

На рисунке 1 представлен фрагмент схемы построения замкнутой системы управления инвертора с самовозбуждением.

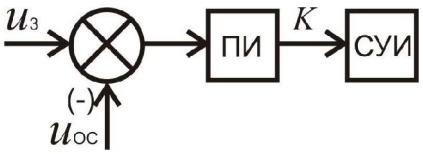


Рисунок 1 - Фрагмент схемы построения замкнутой системы управления инвертора с самовозбуждением

Задающий сигнал контролируемой величины $u_З$ поступает на вход устройства сравнения вместе с сигналом отрицательной обратной связи $u_{ОС}$ контролируемой величины (тока, напряжения на нагрузке, фазового сдвига между ними и т.п.). Сигнал обратной связи должен соответствовать уровню задающего сигнала $u_З$. Разность между этими сигналами подаётся на вход ПИ-регулятора, на выходе которого формируется сигнал, соответствующий значению коэффициента управления k, устанавливающего зависимость между интервалом времени прохождения полуволны тока через тиристор и периодом следования импульсов управления тиристорами.

Благодаря свойствам ПИ-регулятора, в установившемся режиме работы разность между сигналами задания и контролируемой величины равна нулю, что соответствует определённому сигналу на выходе ПИ-регулятора, подаваемого на вход системы управления инвертором (СУИ), устанавливающего соответствующую частоту его выходного напряжения. При изменении параметров нагрузки инвертора или напряжения его питания, происходит изменение контролируемых величин, а, следовательно, разность между сигналами задания и контролируемой величины становиться отличной от нуля, что приводит к соответствующему изменения сигнала на выходе ПИ-регулятора (изменению коэффициента k в необходимую сторону) до тех пор, пока разность между сигналом задания и контролируемой величиной не станет равной нулю. Таким образом, система производит автоматическую настройку на устанавливаемый режим работы.

По вышеописанному принципу была построена система управления резонансного инвертора с регулированием контролируемых величин: тока, напряжения на нагрузке, фазового сдвига между первыми гармоническими составляющими тока и напряжения нагрузочного контура инвертора. На рисунке 2 показана схема инвертора с нагрузкой и датчиками контролируемых величин.

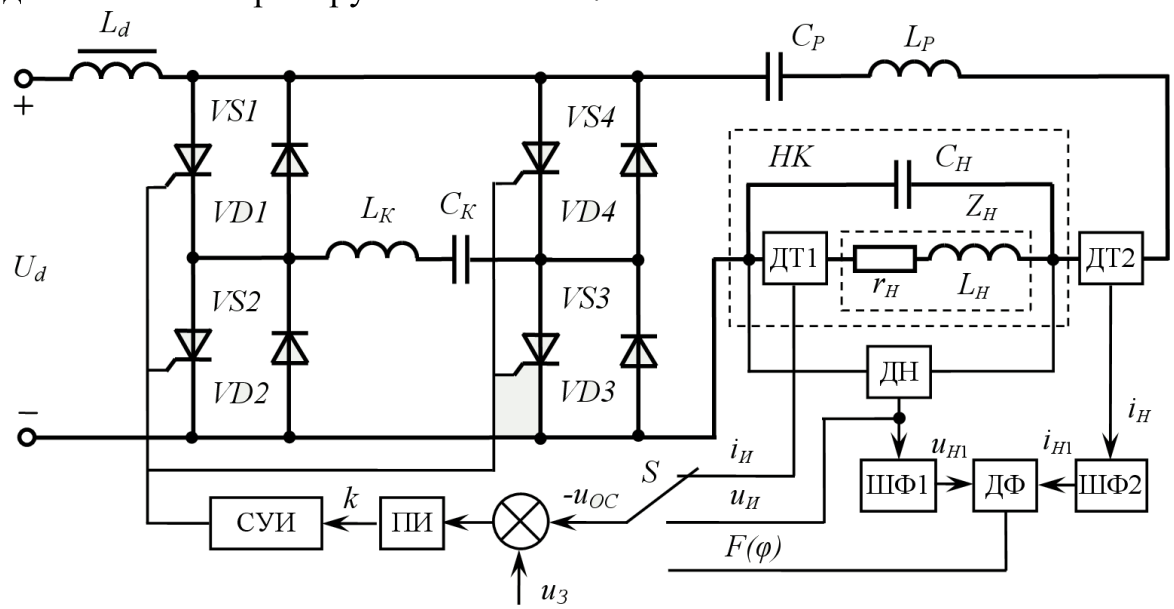
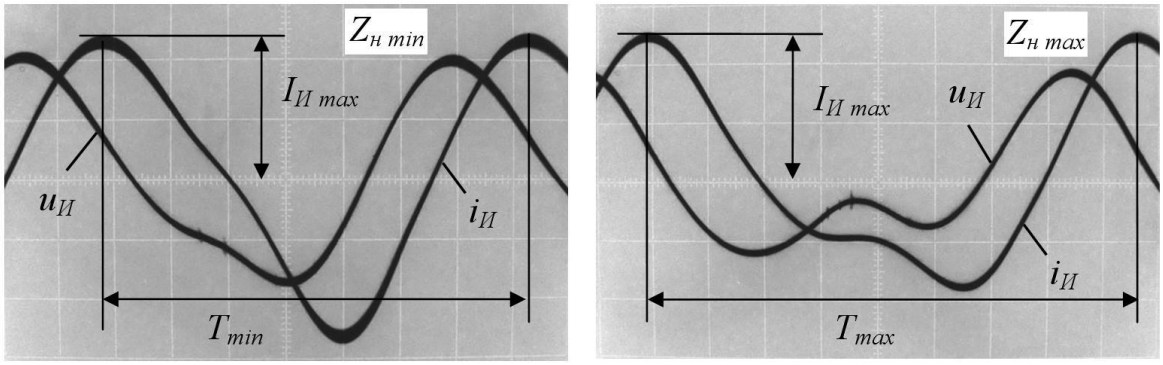


Рисунок 2 - Схема инвертора с нагрузкой и датчиками контролируемых величин:

НК – нагрузочный контур; ДТ1 - датчик тока нагрузки; ДТ2 - датчик тока НК; ДН – датчик напряжения; ШФ1, ШФ2 - широкополосные фильтры; ДФ – датчик фазы; ПИ – ПИ-регулятор; СУИ - система управления инвертором.

Исследование работы системы управления с регулированием контролируемых величин осуществлялось на физической модели резонансного инвертора номинальной мощностью $P_{d\ ном}$= 0.5 кВт и номинальной выходной частотой $f_{ном}$= 8 кГц [6]. В качестве датчиков тока и напряжения использовались измерительные трансформаторы тока и напряжения, позволяющие осуществить гальваническую развязку между силовыми и измерительными цепями. В рассматриваемых в статье режимах работы изменение эквивалентных параметров соответствует изменению параметров индукционной плавильной печи при плавке ферромагнитных материалов, характеризующихся наибольшим диапазоном [2].

Стабилизация тока индуктора. На рисунке 3 приведены осциллограммы сигнала стабилизируемого тока индуктора ($i_И$) при изменении его полного сопротивления для двух крайних значений ($Z_{н\ max}$ *и* $Z_{н\ min}$). Одновременно, для наглядности, приведены соответствующие осциллограммы сигнала напряжения на индукторе $u_И$. При этом контролировалось амплитудное значение тока индуктора $I_{И\ max}$.

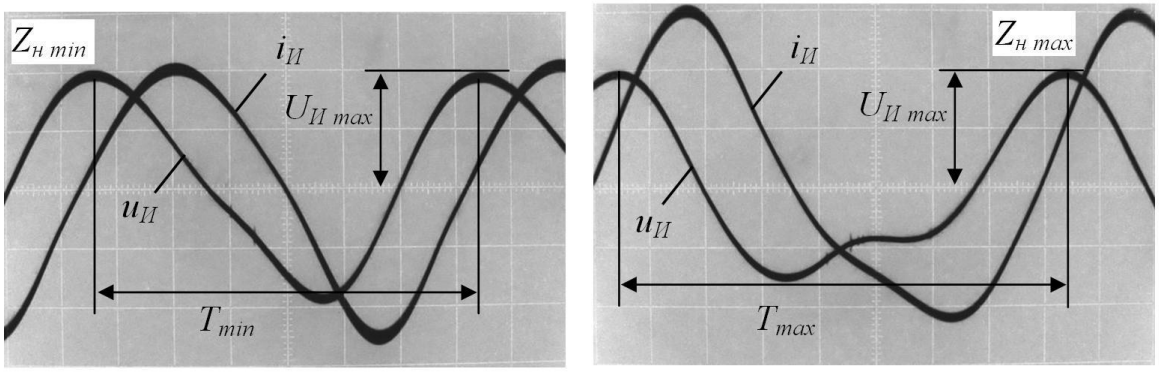


P_d = 0.21кВт, f = 6.67кГц P_d = 0.13кВт, f = 5.75кГц

Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов стабилизированного тока $i_И$ и напряжения на индукторе $u_И$ при изменении его параметров

Как видно из рисунка 3 при изменении параметров индуктора амплитуда тока в нём остаётся неизменной, а изменяются частота и напряжение на индукторе.

Стабилизация напряжения на индукторе. На рисунке 4 приведены осциллограммы сигнала стабилизируемого напряжения на индукторе $u_И$ при изменении его полного сопротивления для двух крайних значений ($Z_{н\ max}$ *и* $Z_{н\ min}$). Одновременно приведены соответствующие осциллограммы сигнала тока в индукторе $i_И$. При этом контролировалось амплитудное значение напряжения индуктора $U_{И\ max}$.



P_d=0.2кВт, f = 7.35кГц P_d=0.17кВт, f = 6.33кГц

Рисунок 4 – Осциллограммы сигналов стабилизируемого напряжения на индукторе $u_И$ и его тока $i_И$ при изменении параметров индуктора

Как видно из рисунка 4 при изменении параметров индуктора амплитуда напряжения на нём остаётся неизменной, изменяются частота и ток в индукторе.

Самонастройка инвертора на резонансную частоту нагрузочного контура. При пуске инвертора, при изменении параметров его нагрузки часто возникает необходимость в настройке его на резонансную частоту нагрузочного контура. В этом случае полное сопротивление нагрузочного контура для первой гармонической составляющей тока имеет активный характер, инвертор не загружается реактивной составляющей тока, напряжение на индукторе становится практически синусоидальным, а инвертор генерирует в нагрузку максимальную мощность, зависящую от величины эквивалентного сопротивления нагрузочного контура [7]. Возникает необходимость в непрерывном фиксировании фазового сдвига между первыми гармоническими составляющими и соответствующими сигналами напряжения u_{H1}, тока i_{H1}нагрузочного контура и формировании соответствующего сигнала, пропорционального фазовому сдвигу. Первые гармонические составляющие сигналов в достаточно широком диапазоне изменения частоты удаётся получить с помощью простейших широкополосных фильтров этих гармоник [6], рисунок 2. Фильтры напряжения и тока принимаются одинаковыми. Хотя между первыми гармоническими сигналов этих гармоник на выходе фильтров, используемых для последующего формирования сигнала фазового сдвига, существует частотная зависимость, полученные разности между сигналами сводит частотную погрешность к нулю.

На рисунке 5 показаны кривые, поясняющие рассматриваемый и реализованный принцип формирования сигнала, пропорционального разности фаз между первыми гармоническими составляющими сигналов напряжения и тока нагрузочного контура для случаев опережения первой гармоники напряжения u_{H1} от первой гармоники тока i_{H1} ($\varphi>0$) и отставания ($\varphi<0$).

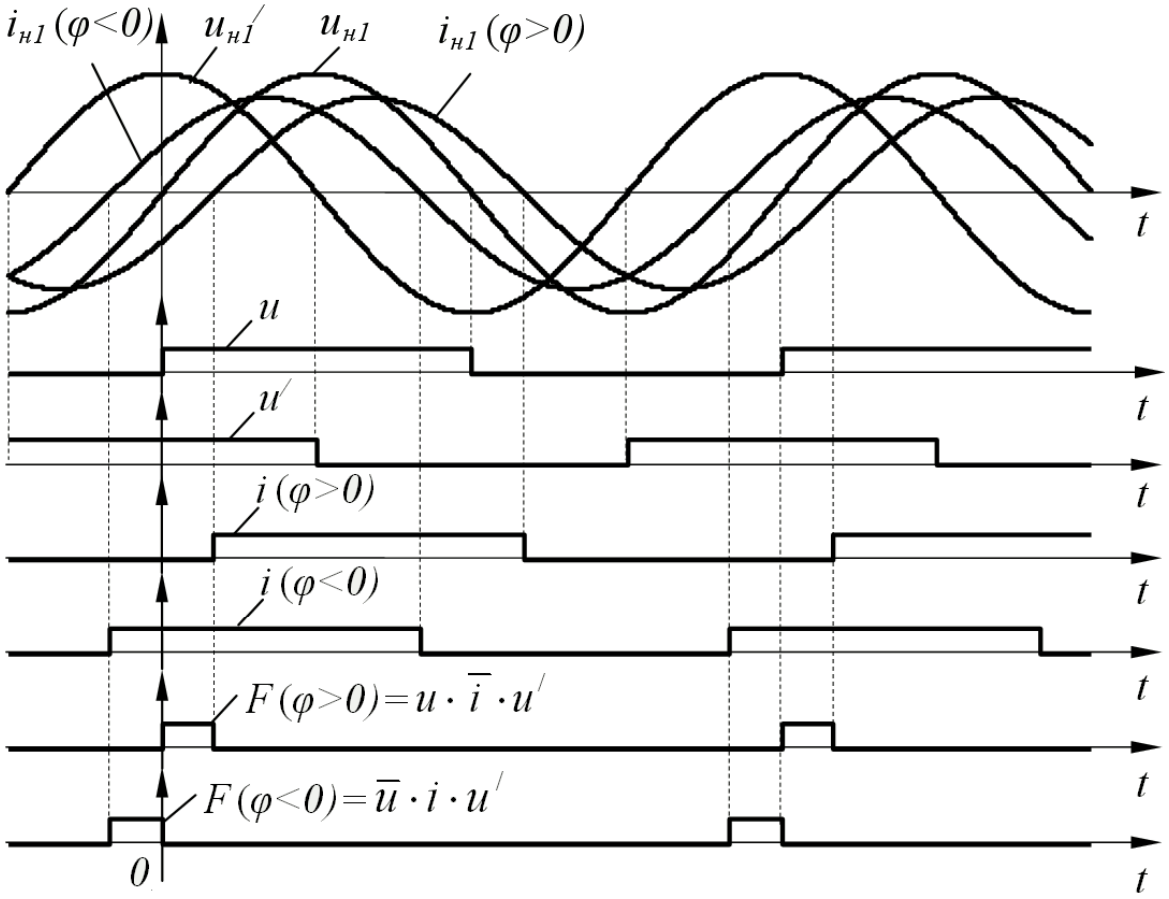


Рисунок 5 – Кривые, поясняющие принцип формирования сигнала, пропорционального разности фаз между первыми гармоническими составляющими напряжения и тока нагрузочного контура

Для установления знака угла сдвига фаз, а, следовательно, формирования полярности напряжения сигнала сдвига фаз, с помощью дифференцирующего или интегрирующего усилителя формируется синусоидальный сигнал $u_{H1}^{/}$, сдвинутый по фазе относительно сигнала первой гармоники напряжения на угол 90 эл.град. Этот сигнал можно также получить из тока компенсирующей ёмкости нагрузки. С помощью однополярных компараторов по полученным синусоидальным сигналам u_{H1}, i_{H1}, $u_{H1}^{/}$ формируются прямоугольные импульсы, являющиеся логическими переменными для последующей обработки, соответственно u, i, $u^{/}$. Если с имеющихся логических переменных сформировать логические функции $F(\varphi>0)= u\cdot\overline{i}\cdot u^{/}$ и $F(\varphi<0)= \overline{u}\cdot i\cdot u^{/}$, то во времени будет формироваться соответствующие импульсы, длительность которых пропорциональна фазовому сдвигу в пределах $\varphi= -90 \div 0 \div +90$ эл.град. Среднее значение стабилизированного по амплитуде этого импульсного напряжения $F(\varphi)$ пропорционально значению фазового сдвига и не за-

висит от частоты напряжения инвертора. Если импульсы $F(\varphi>0)$ и $F(\varphi<0)$ формировать разнополярными, то среднее значение будет знакопеременным, имеющим нулевое значение при резонансе $F(\varphi)=0$. Таким образом, при задающем сигнале для СУИ $u_З=0$, инвертор будет генерировать напряжение с резонансной частотой нагрузочного контура, которая будет автоматически изменяться при изменении параметров индукционной нагрузки.

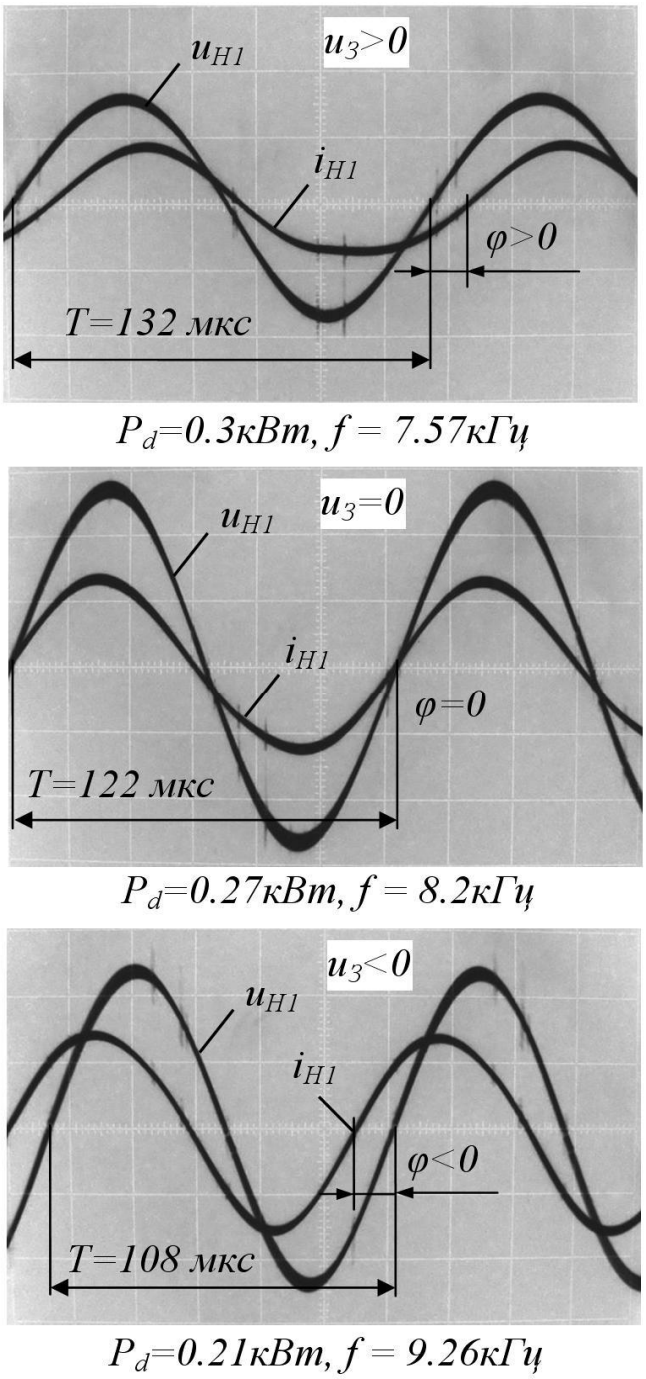


Рисунок 6 – Осциллограммы кривых сигналов первых гармоник тока i_{H1} и напряжения нагрузочного контура u_{H1} при разных заданиях угла фазового сдвига

На рисунке 6 представлены осциллограммы сигналов первых гармоник тока i_{H1} и напряжения нагрузочного контура u_{H1} для трёх значений задающего сигнала $u_З<0$, $u_З=0$ и $u_З>0$.

Обычно при частотном регулировании используется одна из ветвей резонансной кривой нагрузочного контура. При переходе фазового сдвига значения $\varphi=0$ появляется неоднозначность в регулировании. В этом случае изменение полярности сигнала угла сдвига фаз используется для ограничения изменения частоты инвертора, как предельного значения, ограничивающего дальнейшее изменение частоты.

ВЫВОДЫ.

Экспериментально подтверждена возможность регулирования напряжения, тока, фазового сдвига между первыми гармоническими составляющими тока и напряжения нагрузочного контура резонансного инвертора удвоения частоты с самовозбуждением.

Рассматриваются принципы частотного регулирования величин, определяющих питание нагрузки резонансного инвертора удвоения частоты с диодами встречного тока при самовозбуждении.

Principles of the frequency adjusting of sizes, determining the feed of loading of the resonance inverting of doubling of frequency with the diodes of meeting current at independent excitation are examined.

Библиографический список

1. Шапиро С.В. и др. Системы управления с тиристорными преобразователями частоты дляэлектротехнологии / С.В. Шапиро, Ю.М. Зинин, А.В. Иванов; Под ред. С.В. Шапиро – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 68 с.

2. Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Иоффе Ю.С., Моргун В.В. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1983. 208с.

3. Васильев А.С., Гуревич С.Г. Иоффе Ю.С. Источники питания электротермических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1985. 248с.

4. Саратовский Р.Н., Глебин А.Г., Ушаков В.И., Прончатова Т.И.. Частотно-независимое фазосдвигающее устройство.// Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2003. – №6 (64).- С.9-15.

5. Глебин А.Г. Принцип построения системы управления резонансным инвертором тока тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева металлов // Електротехніка та електроенергетика. – Запорізький нац. техн. ун-т. – 2007. – №2. – С. 15 – 18.

6. Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Глебин А.Г. Результаты экспериментальных исследований резонансного инвертора удвоения частоты с устройством согласования с нагрузкой / Сб. науч. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. – 2007. – Вып. 23. – С. 379 – 388.

7. Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Баранов А.Н., Глебин А.Г. / Система управления устройством согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной плавильной печью // Технічна електродинаміка. – 2006. – №4. – С. 51 – 58.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Зеленовым А.Б.