

*к.т.н. Саратовский Р.Н.,  
Прончатова Т.И.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ**

*Розглянуто особливості побудови високочастотного перетворювача на базі інвертора напруги для забезпечення багатостадійного процесу індукційного наплавлення твердих сплавів.*

***Ключові слова:** високочастотний перетворювач, інвертор напруги, індукційне наплавлення, багатостадійний процес.*

*Рассмотрены особенности построения высокочастотного преобразователя на базе инвертора напряжения для обеспечения многостадийного процесса индукционной наплавки твердых сплавов.*

***Ключевые слова:** высокочастотный преобразователь, инвертор напряжения, индукционная наплавка, многостадийный процесс.*

**Введение.** В промышленных технологиях электротермической обработки металлов и металлопродукции все шире используются электротехнологические системы высокочастотной индукционной термообработки металлов на основе транзисторных источников питания, из-за их существенных энергетических и технологических преимуществ. Транзисторные источники обеспечивают электропитание индукционных установок токами частотой десятки – сотни кГц и комплексов мощностью десятки - сотни киловатт, реализуя при этом быстродействующее регулирование режимов электротермической обработки.

В последние годы активно разрабатываются специализированные индукционные технологии для реализации процессов, в которых необходимо регулирование питающего тока и его стабильность при изменении параметров нагрузки в широких пределах. К таким процессам можно отнести индукционную наплавку. Следует отметить, что в настоящее время в производстве автомобилей и тракторов, почвообрабатывающих механизмов, деталей железнодорожной транспортной техники и других отраслях машиностроения 93% всех наплавочных работ выполняются с помощью индукционной наплавки.

Для индукционной наплавки рекомендуется применять высокочастотные установки с мощностью, потребляемой индуктором, не ниже

30 кВт, колебательной мощностью не ниже 60 кВт и частотой тока 0,066-0,44 МГц.

Сущность индукционной наплавки заключается в нагреве наплавляемой поверхности с помощью индуктора, локализации энергии в поверхностном слое и расплавлении его вместе с порошковым наплавочным материалом, нанесенным на восстанавливаемую поверхность. Индукционная наплавка позволяет значительно снизить стоимость деталей при замене высоколегированных сталей среднеуглеродистыми и низколегированными, при этом повышается износостойкость, ударная прочность, коррозионная стойкость и поверхностная твердость деталей.

**Анализ исследований и публикаций.** Для решения задач, связанных с построением источников питания для индукционной наплавки, всё чаще находят применение схемы со структурой построения в виде неуправляемого выпрямителя и регулируемого инвертора напряжения с высокоточным алгоритмом регулирования. Инвертор обычно собран на транзисторах типа IGBT или MOSFET и нагружен через согласующий трансформатор на последовательно соединенные конденсатор и индуктор. Данная структура построения преобразователя отличается простой силовой части, но в тоже время сложной системой управления. Нормальная работа такого преобразователя обеспечивается при условии, что выходной ток и мощность потерь силовых элементов не превышают допустимого значения. Для обеспечения технологических режимов, связанных с индукционной наплавкой, как правило, необходимо осуществлять регулирование и стабилизацию выходного тока при изменении параметров нагрузки, а следовательно и выходного напряжения и мощности преобразователя. Существуют различные способы регулирования выходного тока высокочастотного преобразователя на базе мостового инвертора напряжения, работающего в частотном диапазоне десятки – сотни кГц [1 - 3].

Одним из таких способов регулирования выходного тока (мощности) является частотное регулирование, которое основано на изменении частоты управления. В этом случае регулирование можно осуществлять путем изменения частоты, как в большую, так и в меньшую сторону от резонансной частоты. Для такого способа регулирования рекомендуется изменять частоту в диапазоне от  $f_{\max}$  до  $f_{\text{рез}}$ , где  $f_{\max}$  и  $f_{\text{рез}}$  – соответственно максимальная и резонансная выходная частота ( $f_{\max} > f_{\text{рез}}$ ). В этом случае из регулировочной характеристики преобразователя следует, что величина выходного тока зависит от частоты управления и добротности резонансного контура. Недостатком частотного регулирования является необходимость изменения частоты, диапазон которого может выйти за границы допустимых значений [1].

Широко распространенным способом регулирования выходного тока инвертора является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). В этом случае алгоритм управления транзисторами осуществляется при частоте переключения, соответствующей резонансной частоте и однократной ШИМ. Соответствие частоты переключения транзисторов резонансной частоте колебательного контура позволяет получить максимальную мощность нагрузки. Недостатком ШИМ регулирования является наличие динамических потерь мощности при включении транзисторов и выключении диодов. Однако при ШИМ регулировании динамические потери больше чем при частотном способе [1].

Ещё одним способом является широтно-частотный способ регулирования, основанный на совмещении широтно-импульсной модуляции и частотного регулирования. В этом случае изменяется и частота, и ширина импульсов при двух алгоритмах переключения транзисторов [2].

На практике часто применяется комбинированный способ регулирования. Он заключается в одновременном регулировании значения напряжения питания инвертора и автоматической подстройкой частоты управления на резонансную частоту колебательного контура. Для преобразователей мощностью до 10 кВт регулирование напряжения питания инвертора осуществляется преобразователем постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием. Для такого способа регулирования динамические потери в транзисторах инвертора минимальные, а регулирование выходного тока осуществляется по линейному закону [3].

**Постановка задачи.** Обычно для индукционной наплавки применяют высокочастотные преобразователи на базе резонансных инверторов напряжения и инверторов тока, для которых постоянная нагрузка встречается очень редко [4]. Поэтому существует проблема согласования преобразователя с нагрузкой, связанная с проведением сложного процесса наплавки, состоящего из несколько стадий технологического процесса.

Многостадийные процессы нуждаются в особенном изменении параметров питания по нелинейному закону, который определяется спецификой электротехнологии, включающей этапы, где существует необходимость как стабилизировать, так и регулировать попеременно мощность, входной ток или напряжение. Регулирование осложняется еще и тем, что его необходимо осуществлять в широком диапазоне в условиях неоднозначных внешних воздействий.

В связи с этим возникает необходимость создания регулируемого высокочастотного преобразователя, который мог бы обеспечить качественный многостадийный процесс индукционной наплавки в условиях быстрого изменения параметров нагрузки и возможного изменения на-

пряжения питающей сети. Разработка такого преобразователя является актуальной задачей и имеет большое теоретическое и практическое значение.

Поэтому в настоящей статье рассматриваются принципы построения высокочастотного преобразователя на базе резонансного инвертора напряжения, позволяющего обеспечить многостадийный процесс индукционной наплавки твердых сплавов.

### **Изложение материала и полученные результаты.**

От правильного выбора режима индукционной наплавки во многом зависит структура основного и наплавленного металлов, конфигурация слоя твердого сплава и, в конечном итоге свойства наплавленной детали. Продолжительность наплавки является основным параметром, определяющим производительность и экономичность процесса. Она определяется мощностью имеющихся высокочастотных установок, толщиной требуемого слоя твердого сплава и физическими свойствами наплавочной шихты.

Сложный комплекс явлений, происходящий при индукционной наплавке, можно разделить на следующие стадии:

1. Нагрев основного металла до температуры плавления шихты.
2. Расплавление флюсов.
3. Взаимодействие основного металла, флюсов и твердого сплава между собой и с атмосферой.
4. Нагрев и расплавление металлической части шихты.
5. Формирование наплавленного слоя в период кристаллизации.
6. Охлаждение в верхнем интервале температур, сопровождаемое диффузионными процессами.
7. Охлаждение в нижнем интервале температур, когда диффузионные процессы практически не происходят.

На рисунке 1 представлен типовой график для многостадийного процесса наплавки твердых сплавов.

Как видно из графика время цикла наплавки имеет семь стадий  $\Delta t_1 - \Delta t_7$ . Причём одновременно в течении первых трёх стадий происходит подача флюса, а в течении последних двух стадий происходит подача воды. Кроме этого для каждой стадии имеется определённое значение напряжения на индукторе, которое должно стабилизироваться. Поэтому высокочастотный преобразователь должен обладать глубиной регулирования выходного напряжения в пределах 200 – 750 В. Кроме этого его система управления должна контролировать своевременный и безопасный переход с одной стадии на другую и обеспечивать стабилизацию (или регулирование) определенного значения выходного напряжения (выходного тока или мощности) на каждой стадии. Выбор регулируемого параметра на каждой стадии зависит от

технологии наплавки определенного типоразмера деталей. Для обеспечения регулировки или стабилизации выходных параметров в преобразователе должны быть предусмотрены различные способы регулирования (а может и один), вступающие в работу на определенных стадиях наплавки в зависимости от заданного технологического цикла. При этом необходимо учитывать, чтобы алгоритм управления обеспечивал оптимизирующие процессы переключения транзисторов с целью снижения коммутационных потерь, которые на высоких частотах являются основными и определяют нагрузочную способность приборов [5].

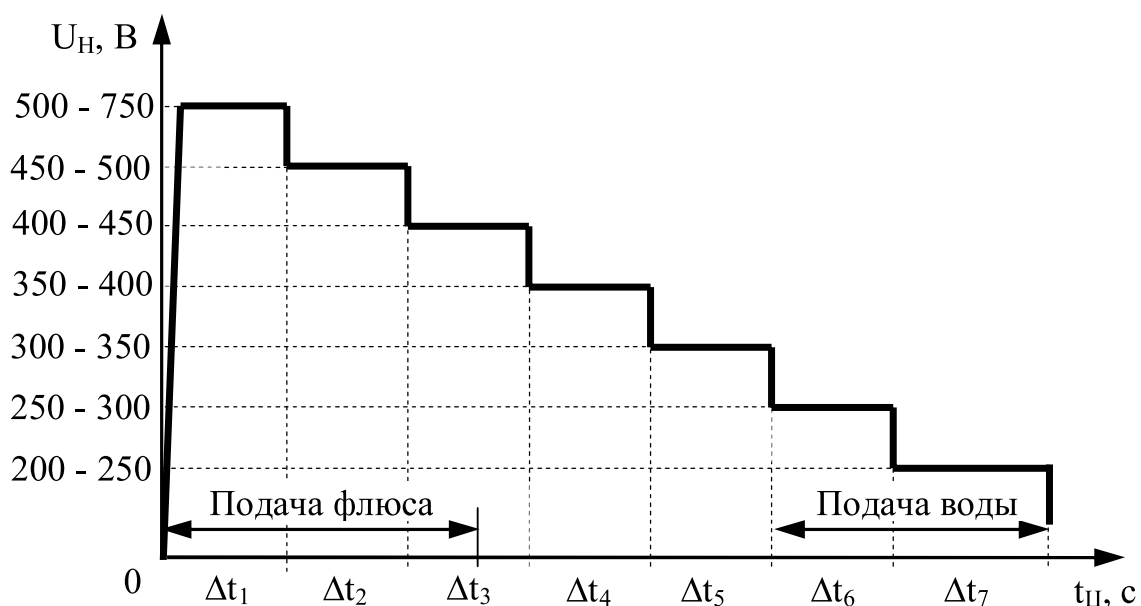


Рисунок 1 – График для многостадийного процесса наплавки твердых сплавов

Поэтому система управления преобразователем выполняет главную роль в обеспечении многостадийного технологического процесса и отвечает за режим работы преобразователя на каждой стадии. Поскольку на различных стадиях возникает необходимость (в зависимости от технологического процесса) или стабилизировать, или регулировать попеременно мощность, напряжение или ток нагрузки, то в системе управления должны быть соответствующие каналы обработки сигналов обратной связи по этим параметрам. Кроме этого к алгоритму управления инвертором предъявляются и основные требования по защите, а именно обеспечение плавного запуска и остановку преобразователя, ограничение зарядного тока накопительной ёмкости, непрерывный контроль режимов работы транзисторов и конденсаторов инвертора с авто-

матическим ограничением от недопустимых режимов, остановку при возникновении предаварийных режимов, сигнализацию появления ограничений и аварийной остановки и т.п. [6].

Таким образом сформулируем основные требования к преобразователю в установках индукционной наплавки:

1. Преобразователь должен энергетически эффективно работать при изменении в широком диапазоне параметров индукционной нагрузки в заданном диапазоне частот на различных стадиях в ходе технологического процесса.

2. Преобразователь должен обеспечивать глубокое регулирование выходной мощности с выбором закона (стабилизация или по программе) и параметра регулирования (мощность, ток, напряжение).

Предлагается рассмотреть структуру построения и принцип работы высокочастотного преобразователя предназначенного для многостадийной наплавки твердых сплавов, функциональная схема такого преобразователя приведена на рисунке 2.

Как уже было отмечено, силовая схема преобразователя состоит из выпрямителя (В), (обычно из неуправляемого на диодах) и мостового резонансного инвертора напряжения на транзисторах VT1 – VT4 типа MOSFET с обратными диодами VD1 – VD4. Согласование инвертора с индукционным нагревателем, как правило, осуществляется без управляемых элементов с помощью компенсирующей емкости  $C_H$  и высокочастотного согласующего трансформатора TV1. Иногда используются силовые контакторы для подстройки компенсирующей емкости или витков трансформатора, осуществляющие переключение в паузах протекания тока. Для реализации перехода с одной стадии на другую, путём регулирования напряжения питания инвертора, применяется импульсный преобразователь постоянного напряжения (ИППН) понижающего типа. ИППН состоит из входного фильтрующего конденсатора C1, ключевого элемента на транзисторе типа IGBT, обратного диода VD1 и сглаживающего выходного LC-фильтра, собранного из дросселя L1 и конденсатора C2. Алгоритм работы системы управления ИППН (СУИП) основан на принципе широтно-импульсного регулирования, при котором выходное его напряжение прямопропорционально величине управляющего сигнала  $U_{упр}$ .

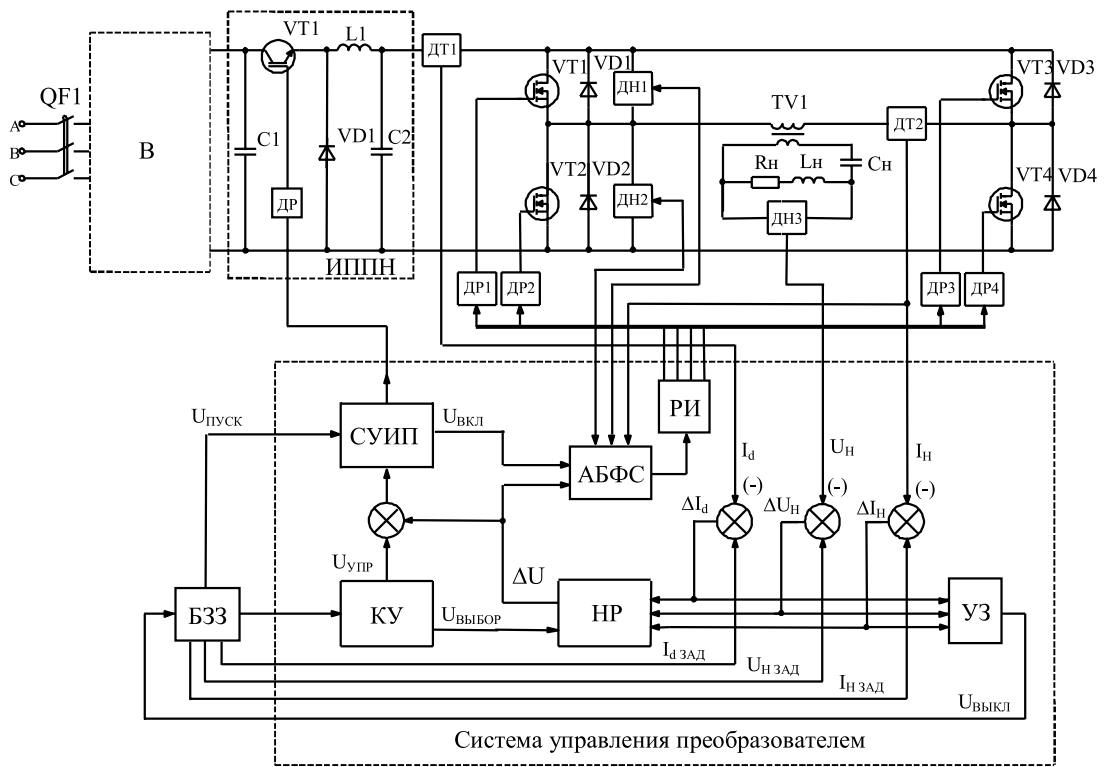


Рисунок 2 - Функциональная схема преобразователя

Работа преобразователя начинается с ввода технологических параметров с блока задания и запуска (БЗЗ) в контроллер управления режимом наплавки (КУ). Как только в КУ введены данные о технологическом цикле (время наплавки, количество стадий, какой параметр и его значение необходимо стабилизировать и на какой стадии, если регулировать, то глубину регулирования) с БЗЗ при нажатии на кнопку «ПУСК» поступает команда  $U_{\text{ПУСК}}$  в СУИП. После чего на выходе ИППН напряжение плавно нарастает, тем самым осуществляется ограничение зарядного тока выходной накопительной ёмкости и предотвращает перенапряжения на транзисторах инвертор в момент пуска. Как только включился ИППН, с некоторой задержкой из СУИП поступает сигнал  $U_{\text{ВКЛ}}$  в систему управления инвертором на его включение. Как видно из графика на рисунке 1 переход с одной стадии на другую сопровождается значительным изменением напряжения на индукторе с последующей его стабилизацией. Поэтому для перехода со стадии на стадию, т.е. для грубой настройки выходного напряжения, согласно алгоритма загруженного в КУ, по его выходному управляющему сигналу  $U_{\text{УПР}}$ , поступающего в СУИП изменяется напряжение питания инвертора и соответственно его входной ток, напряжение и ток индуктора.

Для контроля режима работы преобразователя во время процесса наплавки в силовую схему установлены соответствующие датчики, через которые осуществляется обратная связь с технологическим процессом, а их выходные сигналы служат для контроля и регулирования текущего режима работы.

При неизменном напряжении питания инвертора, по входному току инвертора можно косвенно контролировать мощность преобразователя, что часто необходимо в установках индукционного нагрева. Для этого в цепь входного тока инвертора установлен датчик тока ДТ1, например датчик Холла. По величине его выходного сигнала  $I_d$ , пропорционального контролируемому току, регулируется или стабилизируется мощность преобразователя. В случае превышения её максимально-допустимого уровня срабатывает узел защиты (УЗ) и по его выходному сигналу  $U_{\text{ВЫКЛ}}$  преобразователь либо отключается либо переходит в режим ограничения мощности.

По коммутирующему току инвертора можно контролировать ток через ключевые элементы (транзисторы и диоды), а также пропорциональный ему ток нагрузки. Для этого в диагональ моста инвертора в цепь первичной обмотки согласующего трансформатора TV1 установлен датчик тока ДТ2, выполненный на трансформаторе тока. По величине его выходного сигнала  $I_H$ , пропорционального коммутирующему току, регулируется или стабилизируется значение тока нагрузки и одно-



временно тока через ключевые элементы, а с помощью УЗ также ограничивается его максимальное значение.

Для контроля значения напряжения на индукторе в цепь нагрузки установлен датчик напряжения ДНЗ выполненный на высокочастотном понижающем трансформаторе. По величине его выходного сигнала  $U_H$ , регулируется или стабилизируется значение напряжения на индукторе и также одновременно УЗ осуществляет ограничение его максимального значения.

Для более точного режима стабилизации или регулирования любого из параметров  $I_d$ ,  $I_H$  или  $U_H$  применяется управление инвертором по определённому алгоритму регулирования. Для этого в системе управления предусмотрены элементы сравнения по соответствующим параметрам, которые сравнивают текущие значения с заданными  $I_{d \text{ зад}}$ ,  $I_{H \text{ зад}}$  и  $U_{H \text{ зад}}$  и выдают соответственно разностные сигналы  $\Delta I_d$ ,  $\Delta I_H$  и  $\Delta U_H$ . Эти сигналы поступают на нелинейный регулятор (НР). Одновременно в НР с КУ поступает сигнал  $U_{\text{ВЫБОР}}$ , по которому НР осуществляет выбор регулирующего параметра. Здесь же осуществляется выбор, каким способом необходимо производить регулировку и в зависимости от алгоритма режима технологического цикла, загруженного из БЗЗ. В результате на выходе формируется результирующий сигнал рассогласования регулируемого параметра  $\Delta U$ , который отвечает за величину, которую необходимо регулировать на данной стадии. Сигнал  $\Delta U$  поступает через сумматор в СУИП одновременно с сигналом  $U_{\text{УПР}}$ , а также в систему управления инвертором. По этому сигналу в инверторе осуществляется регулировка либо частоты либо фазы, в случае если этой регулировки не достаточно, то этим сигналом происходит корректировка выходного напряжения ИППН. При регулировании выходной мощности и для обеспечения оптимального режима работы инвертора на переменную нагрузку с минимальными коммутационными потерями в транзисторах инвертора напряжения его система управления должна постоянно согласовывать частоту работы инвертора с частотой нагрузочного контура, обеспечивая минимальную индуктивную расстройку [5]. В этом случае возможно использовать частотное и фазовое регулирование. В обоих случаях система управления инвертором должна сама подстраивать частоту и фазу импульсов управления с учетом изменения параметров индукционной нагрузки. Для этого применяется частотный способ с независимым возбуждением и системой фазовой автоподстройкой, которая состоит из генератора управляемого напряжением и фазового компаратора. Применение устройства фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) диктуется высокой добротности резонансного нагрузочного контура (5 ... 20), поскольку при малейшем изменении частоты управления происходит резкое изменение выходной мощности.

Однако ФАПЧ имеет в своей структуре фильтр низких частот, который уменьшает быстродействие системы и требует увеличения минимального фазового рассогласования, необходимого для мягкой коммутации транзисторов в динамических режимах, что снижает КПД преобразователя. Поэтому предлагается использовать автоподстройку частоты с адаптивным блоком задания фазового сдвига (АБФС) между выходным током и напряжением инвертора, построенный по принципу самовозбуждения, который лишен этих недостатков.

Для реализации самовозбуждения с автоподстройкой частоты в силовую схему вводятся датчики напряжения ДТ1 и ДТ2, контролирующие напряжения на транзисторах одной инверторной стойки VT1 и VT2, а также датчик тока ДТ2, контролирующий коммутирующий ток. С помощью этих датчиков контролируется сдвиг фаз между током транзистора и его напряжением.

Принцип самовозбуждения основан на том, что отслеживается изменения резонансной частоты нагрузочного контура, связанные с изменением параметров индуктора в ходе технологического процесса и постоянно подстраивается частота работы инвертора, обеспечивая оптимальное рассогласование. Частота работы инвертора полностью определяется собственной частотой нагрузочного контура. Такой принцип управления полностью обеспечивает оптимальную коммутацию силовых транзисторов при динамических процессах, характерных для установок индукционного нагрева. К таким процессам можно отнести скачки сетевого напряжения, вызванные, например, включением мощных электроустановок или авариями в сетях электроснабжения, изменения частоты колебательного контура и его активного сопротивления, обусловленные температурной зависимостью электрических параметров индукционной нагрузки, межвитковые замыкания в индукторе, кратковременные короткие замыкания индуктора характерные, например, для технологии сварки труб, извлечение детали из индуктора и т.д.

**Выводы.** В результате работы предложена структура построения высокочастотного источника питания на базе инвертора напряжения с системой автоматической подстройкой частоты по принципу самовозбуждения, которая обеспечивает оптимальную коммутацию силовых транзисторов и устойчивую работу инвертора напряжения в различных динамических режимах, характерных для многостадийного процесса индукционной наплавки твердых сплавов.

Предложенная структура построения позволит разрабатывать надежные, высокоэффективные, универсальные источники питания для различных индукционных технологий.

### **Библиографический список**

1. Способы регулирования тока транзисторного инвертора напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе / Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк [та ін.] // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність"*. – 2002. – Ч.1. – С. 79 – 81.

2. Частотный и широтно-частотный способы регулирования транзисторным инвертором напряжения с последовательным резонансным контуром на выходе / В.Я. Гуцалюк, П.Н. Шевченко, И.О. Слесаревский, П.Ю. Герасименко // *Технічна електродинаміка*. – 2006. – №6. – С. 25 – 29.

3. Источник высокочастотного тока для установок индукционных технологий / Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк, И.О. Слесаревский // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність"*. – 2000. – Ч.2. – С. 22 – 23.

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

5. Бондаренко Д.Н. Коммутационные процессы в транзисторных инверторах для индукционного нагрева / Д.Н. Бондаренко, С.В. Дзлиев, Д.А. Патанов // *Изв. ГЭТУ*. – 1996. – № 497. – С. 98-110.

6. Глебин А.Г. Система управления и защиты высокочастотного транзисторного преобразователя / А.Г. Глебин, Р.Н. Саратовский, В.И. Ушаков // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – 2009. – №. 29. – С. 337 – 346.

**Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.**