

**Р. Н. САРАТОВСКИЙ**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр, НИПКИ «Параметр» ДонГТУ, Лисичанск;  
**В. И. УШАКОВ**, канд. техн. наук, вед. научн. сотр., НИПКИ «Параметр» ДонГТУ, Лисичанск;  
**Д. В. УШАКОВ**, асп., ДонГТУ, Лисичанск

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОЯЧЕЙКОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

**Введение.** В промышленных технологиях электротермической обработки металлов и металлопродукции все шире используются электротехнологические системы высокочастотной индукционной термообработки металлов на основе транзисторных источников питания (ИП), 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.

Для решения задач, связанных с построением ИП индукционных установок, всё чаще находят применение схемы со структурой построения в виде неуправляемого выпрямителя и инвертора напряжения с эффективным алгоритмом регулирования, для которых постоянная нагрузка встречается очень редко [1]. Инвертор обычно собран на транзисторах типа IGBT или MOSFET и нагружен через согласующий трансформатор на последовательно соединенные конденсатор и индуктор. Данная структура построения ИП отличается простотой силовой части, но в тоже время сложной системой управления, которая обеспечивает необходимый технологический процесс и нормальную работу преобразователя. А нормальная работа, связанная с проведением процесса нагрева, состоящего из несколько этапов технологического процесса, обеспечивается при условии, что выходной ток и мощность потерь силовых элементов не превышают допустимого значения. Необходимый технологический процесс зависит от требуемой мощности и режима работы преобразователя, который осложняется еще и тем, что стабилизацию или регулировку выходных параметров необходимо осуществлять в широком диапазоне в условиях неоднозначных внешних воздействий.

При потребности в ИП с большой мощностью всё чаще применяют ИП выполненные на базе высокочастотных преобразователей (резонансных инверторов напряжения) построенных по многоячейковой структуре формирования выходного напряжения. Такие структуры, состоят из нескольких инверторных ячеек (ИЯ), объединенных по выходу в последовательный или параллельный контур суммирования мощности. Структура параллельно-последовательного типа, получила большое распространение, так как здесь не возникает трудностей с симметрированием токов и напряжений между ячейками [2]. Каждая ячейка питается от одного выпрямителя (В) и содержит свой ВЧ трансформатор (ТВ), вторичные обмотки которых соединены в последовательный контур суммирования мощности. Одним из перспективных способов регулирования выходного напряжения для такого ИП относится принцип многозонной импульсной модуляции. Для этого применяется кодовая модуляция, при которой выходные напряжения ячеек пропорциональны весовым коэффициентам двоичного кода, исходя из того, что ИЯ может находиться в двух состояниях: вольтдобавочном и закороченном. Однако такой принцип регулирования обеспечивает дискретную регулировку напряжения, которая зависит от количества ИЯ. Для устранения этого недостатка в структуру многоячейкового ИП вводится дополнительная непрерывно регулируемая ИЯ (НРЯ) (рис 1), переходящая из одной зоны в другую путём изменения комбинации включённых дискретно регулируемых ИЯ (ДРЯ). График формирования выходного напряжения представлен на рисунке 2. Точность регулирования в этом случае определяется точностью НРЯ.

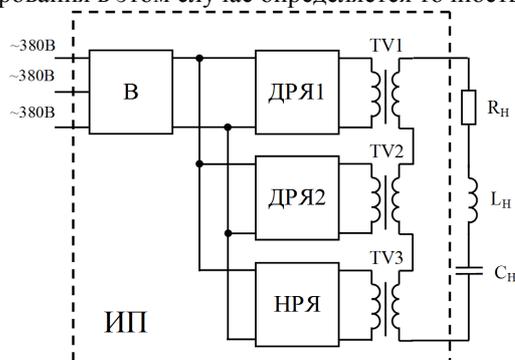


Рис. 1 Структура ИП с последовательным контуром суммирования мощности

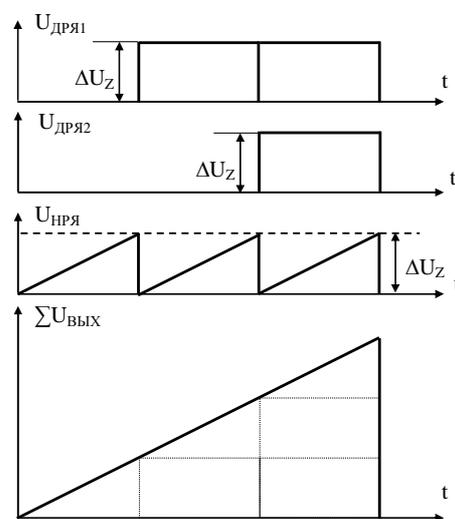


Рис. 2 График формирования выходного напряжения ИП

Для НРЯ возможно применять различные способы регулирования выходного тока преобразователя на базе мостового инвертора напряжения, работающего в частотном диапазоне десятки – сотни кГц [3 - 6]. Одним из таких способов регулирования выходного тока (мощности) является частотное регулирование, которое основано на изменении частоты управления [3]. Другим способом является широтно-частотный способ регулирования, основанный на совмещении широтно-импульсной модуляции и частотного регулирования [4]. Ещё одним способом регулирования является способ, основанный на низкочастотном способе модуляции при синхронизации частоты модуляции с частотой работы инвертора [5] и требующий достаточной сложной программируемой системы управления. На практике же всё чаще применяется комбинированный способ регулирования. Он заключается в одновременном регулировании значения напряжения питания инвертора и автоматической подстройкой частоты управления на резонансную частоту колебательного контура [6]. Этот способ регулирования требует наличие регулятора напряжения, которым и осуществляется регулировка напряжения питания инвертора в зависимости от задания и при изменении параметров нагрузки и своего рода быстрая защита от отклонения сетевого питающего напряжения от нормы. Это в свою очередь требует наличие двухканальной системы управления. По первому каналу осуществляется регулировка питающего напряжения инвертора, а по второму автоподстройка частоты управления на резонансную частоту контура с обеспечением оптимизирующих процессов переключения транзисторов для снижения коммутационных потерь.

Для анализа работы преобразователей частоты в современной теории и практике их проектирования важнейшее положение занимает исследование электромагнитных процессов при помощи математических моделей различного уровня детализации. Существует несколько принципиальных подходов к построению математических моделей преобразователей и соответственно вариантов используемого математического и программного обеспечения. Классическим подходом является моделирование в пространстве состояния, с использованием линейных аппроксимаций пассивных и полупроводниковых элементов силовой схемы. Уровень детализации моделей полупроводниковых элементов при этом ограничен основной характеристикой – «открыт» или «закрит». Массовое внедрение в практику современных САПР электротехнических устройств позволило существенно расширить возможности математических моделей полупроводниковых элементов. Среди широко известных САПР можно назвать такие как OrCAD, Micro-CAP, Multisim и другие, ориентированные на PSpice моделирование программные продукты. Степень детализации моделей полупроводниковых элементов в этом случае весьма высокая, позволяющая изучать электрические свойства близкие к реальным.

**Целью** данной работы является анализ результатов исследования на имитационной модели динамических режимов работы многоячейкового ИП для индукционного нагрева при стабилизации выходного напряжения.

**Материалы и результаты исследований.** Для достижения поставленной цели с помощью программы OrCAD9.2 была разработана имитационная модель ИП, модель силовой части которого приведена на рисунке 3.

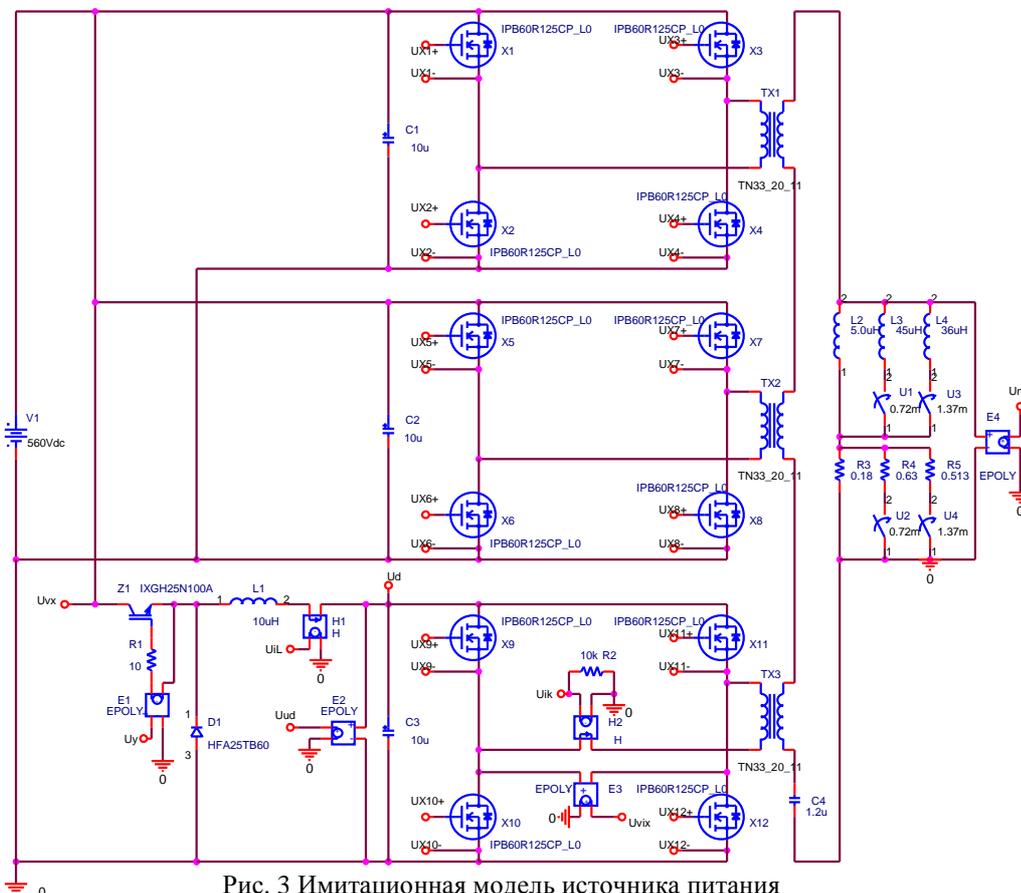


Рис. 3 Имитационная модель источника питания

ИП построен по многоячейковой структуре формирования выходного напряжения. Его силовая часть состоит из неуправляемого выпрямителя и трёх ИЯ, две из которых ДРЯ1, ДРЯ2, а третья НРЯ. В качестве ДРЯ используются мостовые резонансные инверторы напряжения, получающие питание от выпрямителя. В качестве НРЯ используется также резонансный инвертор, получающий питание от импульсного регулятора напряжения понижающего типа (РН), который также питается от выпрямителя. Согласование ИЯ с индукционной нагрузкой, как правило, осуществляется с помощью компенсирующего конденсатора и согласующих трансформаторов. Поэтому каждая ДРЯ и НРЯ нагружены на свой согласующий трансформатор, вторичные обмотки которого соединены последовательно с резонансным контуром, состоящего из индукционной нагрузки и компенсирующей емкости.

Для анализа работы ИП были исследованы динамические режимы его работы при стабилизации напряжения на нагрузке в различных типовых условиях. В качестве типовых условий были выбраны следующие режимы: стабилизация при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения; стабилизация на заданном уровне при резком изменении значения напряжения задания и стабилизация при резком изменении параметров индукционной нагрузки. Для анализа работы в режиме стабилизации напряжения при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения была исследована отдельно работа НРЯ, а именно работа РН и его системы управления, имитационная модель которой представлена на рисунке 4.

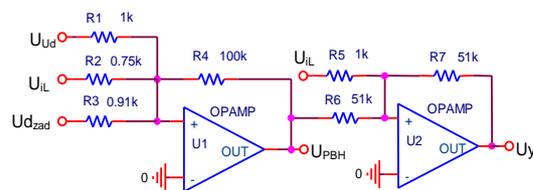


Рис. 4 Модель системы управления РН

Система управления РН построена по принципу подчиненного регулирования координат и является асинхронной релейной системой, которая служит для ограничения отдельных фазовых координат на заданном уровне. В первую очередь ограничению подвергается отклонение (перерегулирование) выходного напряжения  $U_d$ , исходя из требований к качеству переходного процесса. Кроме выходного напряжения ограничению подвергается ток дросселя  $I_L$ . Такое ограничение позволяет обезопасить силовой транзистор от перегрузок и дает возможность обеспечить нормальное функционирование схемы при коротком замыкании в нагрузке. Кроме того, введение обратной связи по току дросселя позволяет повысить устойчивость переходных процессов. В качестве регуляторов используются асинхронные релейные регуляторы, работающие в скользящем режиме, а именно внутренний регулятор тока дросселя, который подчинен внешнему регулятору выходного напряжения (РВН). Такое управление обеспечивает высокие динамические и статические показатели, а также позволяет получить достаточно высокое качество выходного напряжения РН и предельное быстродействие при минимальном количестве элементов схемы и более простой системе управления.

Временные диаграммы работы РН и его системы управления, а также диаграммы выходного тока  $I_{ВЫХ}$  и напряжения инвертора  $U_{ИНВ}$  в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при резком уменьшении и увеличении входного питающего напряжения представлены на рис.5.

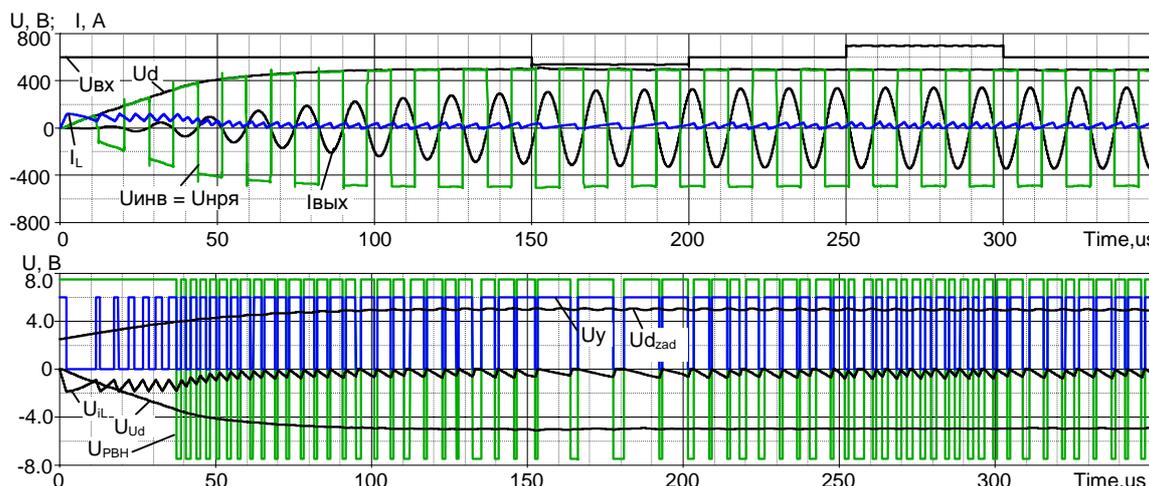


Рис.5 Временные диаграммы работы ИП при изменении входного питающего напряжения

Из представленных временных диаграмм видно, что переходной процесс заряда фильтровой ёмкости, а, следовательно, и изменение напряжения питания инвертора  $U_d$  проходит без перерегулирования с высоким быстродействием. Ток дросселя  $I_L$  не превышает максимального значения и ограничивается на установленном уровне. Здесь же показано реакцию ИП на резкое уменьшение за время 150 - 200 мкс и увеличение за время 250 - 300 мкс входного питающего напряжения  $U_{ВХ}$ . Из диаграмм работы системы управления видно, что она отработывает это изменение и обеспечивает безопасную работу силового ключа во время пуска и стабилизацию выходного напряжения на уровне, соответствующем заданному значению напряжения на нагрузке, что свидетельствует неизменному значению выходного тока инвертора  $I_{ВЫХ}$ .

Для анализа работы преобразователя в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при резком изменении значения напряжения задания и резком изменении параметров индукционной нагрузки была исследована работа системы управления РН и узла стабилизации, имитационная модель которой представлена на рисунке 6.

Для стабилизации напряжения на нагрузке во время процесса нагрева в силовую схему установлен датчик напряжения, через который осуществляется обратная связь с технологическим процессом. По величине напряжения на нагрузке  $U_H$  контролируется пропорциональный ему выходной ток и ток через ключевые элементы (транзисторы и диоды). Выходной сигнал с датчика  $U_H$  поступает в узел стабилизации, в основе которого лежит разностный усилитель с ПИ-регулятором. Сформированный сигнал  $U_H$  поступает на выпрямитель, представленный на модели элементом ABS, и далее на интегрирующую цепочку для формирования среднего значения напряжения на нагрузке  $U_{Hcp}$ . Далее этот сигнал сравнивается разностным услителем с заданным значением  $U_{nzad}$ . В результате на его выходе формируется результирующий сигнал рассогласования  $U_{U3out}$ . Этот сигнал поступает на ПИ-регулятор, выходной сигнал которого является сигналом задания для системы управления РН. Таким образом, на выходе ПИ-регулятора формируется сигнал задания  $U_{zad}$ . Поскольку формирование напряжения на нагрузке осуществляется поэтапно тремя ИЯ, то управляющий сигнал  $U_{dzad}$  для РН формируется согласно графика (рис.2). Если выходное напряжение ИП формируется только НРЯ (первый этап формирования), то значение сигнала задания  $U_{dzad} = U_{zad}$  и соответствует заданному значению напряжения на нагрузке. В случае формирования выходного напряжения на втором этапе, когда работает ДРЯ1 и НРЯ, сигнал задания  $U_{dzad}$  преобразуется в пропорциональный  $U_{dzad} = U_{zad} - U_{dzad max}$ , а если на третьем этапе, когда работают ДРЯ1, ДРЯ2 и НРЯ то  $U_{dzad} = U_{zad} - 2U_{dzad max}$ . Таким образом сумма выходных напряжений ИЯ обеспечивает заданное значение на нагрузке.

На рисунке 7 представлены временные диаграммы работы узла стабилизации, системы управления РН и диаграммы напряжения  $U_H$  и выходного напряжения ИП  $U_{ИПВ}$  в режиме стабилизации напряжения на нагрузке сначала при резком увеличении значения сигнала задания  $U_{nzad}$  в моменты времени 0,5 мс и 1 мс, а затем его уменьшения в моменты времени 1,5 мс и 2 мс.

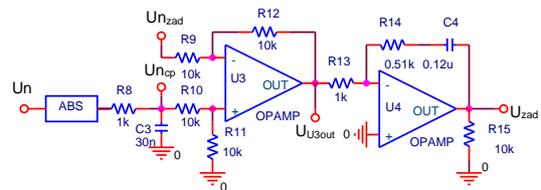


Рис. 6 Модель узла стабилизации

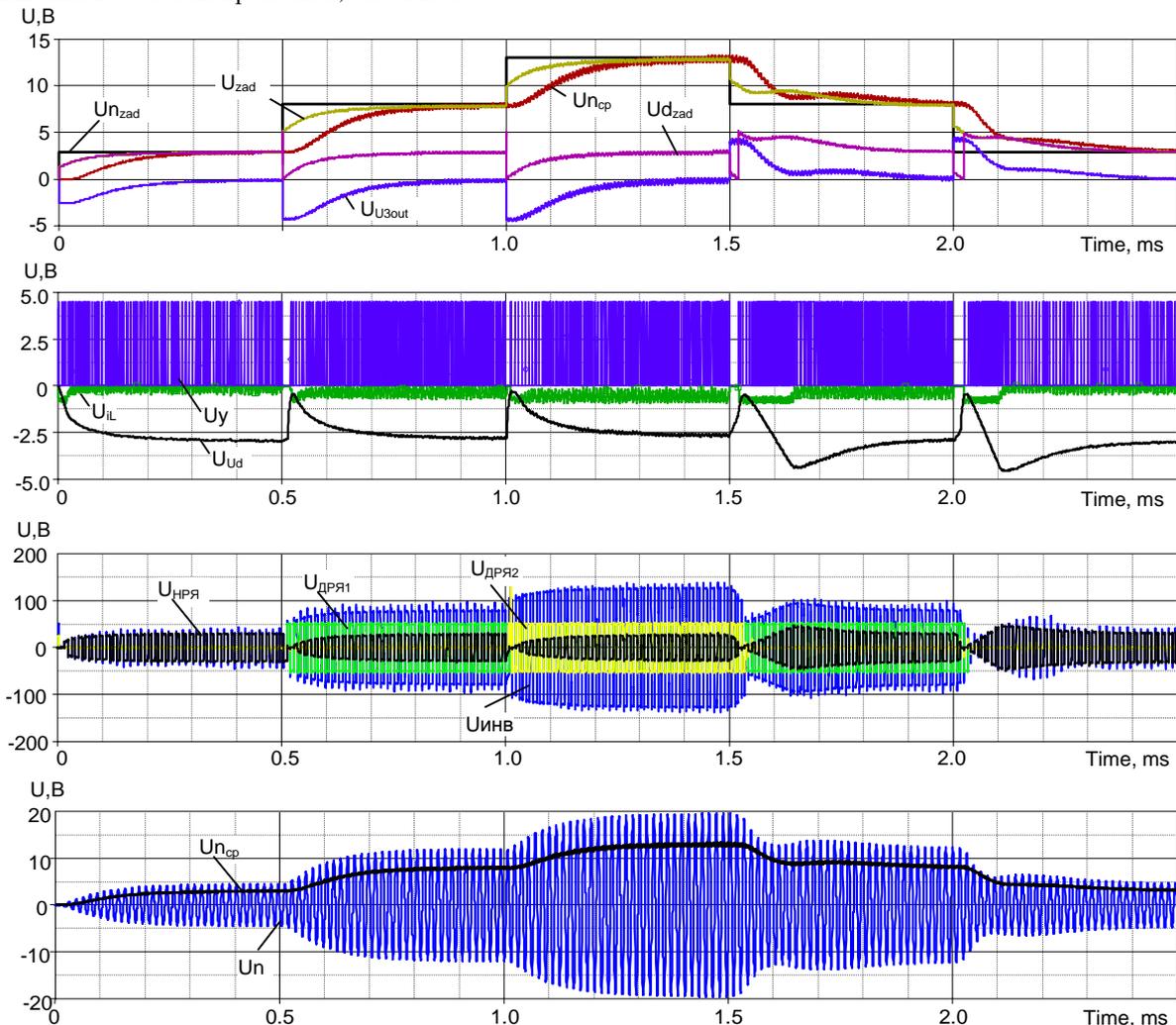


Рис.7 Временные диаграммы работы ИП при изменении сигнала задания

Из представленных временных диаграмм на рисунке 7 видно, что при неизменных параметрах нагрузки резкое изменение сигнала задания  $U_{n\text{зад}}$  приводит к изменению режима работы многочейкового преобразователя. Разностный усилитель в узле стабилизации реагирует на это изменение и ПИ-регулятор осуществляет корректировку сигнала  $U_{\text{зад}}$ , а следовательно и  $U_{d\text{зад}}$ . Система управления РН также реагирует и на его выходе формируется необходимое напряжение питания инвертора, в результате суммарное выходное напряжение ИП  $U_{\text{ИНВ}}$  обеспечивает заданное напряжение на нагрузке. На диаграммах видно, что в момент пуска установлена  $U_{n\text{зад}} = 3\text{В}$  и по истечении 0,4 мс обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования и далее его стабилизация. Эта временная задержка в 0,4 мс связана с инерционностью самого инвертора и постоянной времени ПИ-регулятора. В течении этого времени напряжение на нагрузке формируется только выходным напряжением НРЯ  $U_{\text{НРЯ}}$ , что подтверждается диаграммами изменения напряжения ИП и выходным напряжением ИП  $U_{\text{ИНВ}} = U_{\text{НРЯ}}$ . В момент времени 0,5 мс и 1 мс значение  $U_{n\text{зад}}$  выросло соответственно до 8В и до 13 В и по истечении 0,4 мс в каждом случае также обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования. Напряжение на нагрузке сформировано уже работой НРЯ и ДРЯ1 ( $U_{\text{ИНВ}} = U_{\text{НРЯ}} + U_{\text{ДРЯ1}}$ ) и соответственно НРЯ, ДРЯ1 и ДРЯ2 ( $U_{\text{ИНВ}} = U_{\text{НРЯ}} + U_{\text{ДРЯ1}} + U_{\text{ДРЯ2}}$ ). Далее в момент времени 1,5 мс и 2 мс значение  $U_{n\text{зад}}$  уже снизилось сначала до 8В, а потом до 3 В и по истечении уже 0,5 мс обеспечивается выход на заданный режим без перерегулирования. Напряжение на нагрузке сформировано уже работой НРЯ и ДРЯ1 и соответственно только работой НРЯ.

На рисунке 8 представлены временные диаграммы работы узла стабилизации, системы управления РН и диаграммы напряжения  $U_n$  и выходного напряжения ИП  $U_{\text{ИНВ}}$  в режиме стабилизации напряжения на нагрузке при изменении параметров индукционной нагрузки, эквивалентных для режимов работы начиная с холодного металла до горячего в моменты времени 0,72 мс и 1,37 мс.

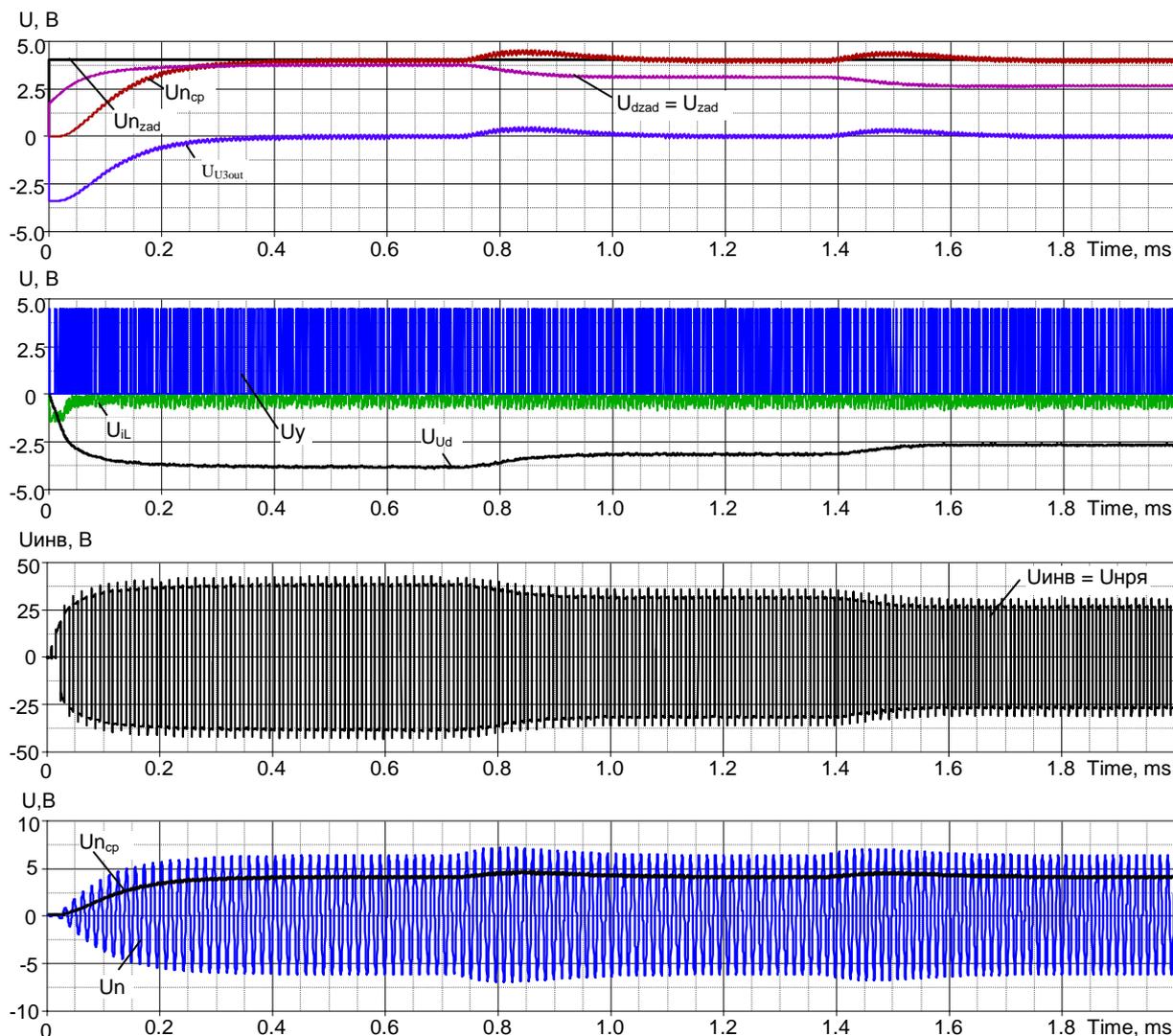


Рис.8 Временные диаграммы работы ИП при изменении параметров индукционной нагрузки

Из представленных временных диаграмм на рисунке 8 видно, что при неизменном напряжении задания  $U_{n\text{зад}}=4\text{В}$  резкое изменение параметров нагрузки приводит к изменению режима работы ИП, а именно изменяется резонансная частота контура и значение напряжения на нагрузке. Разностный усилитель реагирует на эти

изменения и ПИ-регулятор осуществляет корректировку сигнала  $U_{zad}$ , а следовательно и  $U_{d_{zad}}$ , что приводит к изменению напряжения на выходе РН и тем самым к сохранению заданного значения напряжения на нагрузке. Также на диаграммах видно, что резкое изменение параметров нагрузки в моменты времени 0.72 мс и 1.37 мс приводит на время 0.25 мс к незначительному перерегулированию напряжения. Это связано с инерционностью самого инвертора и постоянной времени ПИ-регулятора. В реальных условиях нагрузка меняется значительно медленнее, поэтому узел стабилизации успеет среагировать на это изменение и позволит обеспечить напряжение на нагрузке на заданном уровне в течение всего технологического процесса нагрева. В течение всего этого времени напряжение задания  $U_{nzad} = 4В$ , поэтому напряжение на нагрузке формируется только работой НРЯ, что подтверждается диаграммами напряжения  $U_n$  и выходным напряжением инвертора  $U_{инв}$ . При увеличении  $U_{nzad}$  выше 5В или 10В в работу вступают соответственно ДРЯ1 или ДРЯ1 и ДРЯ2, а процессы стабилизации происходят аналогично как при работе с НРЯ.

Следует отметить, что для обеспечения оптимального режима работы многоячейкового ИП с минимальными коммутационными потерями в транзисторах во время стабилизации или регулирования напряжения на нагрузке в имитационной модели системы управления ИП применен принцип самовозбуждения с адаптивным алгоритмом управления и синхронной работой всех ИЯ. Принцип самовозбуждения основан на том, что по выходным сигналам датчика коммутирующего тока  $U_{ик}$  и датчика выходного напряжения  $U_{вих}$ , установленных в НРЯ, отслеживается изменение собственной частоты нагрузочного контура, связанное с изменением параметров индукционной нагрузки в ходе технологического процесса и постоянно подстраивается частота работы ИП, обеспечивая оптимальное согласование с минимальной индуктивной расстройкой. При этом частота работы ИП полностью определяется собственной частотой нагрузочного контура. Этот принцип управления позволяет обеспечить устойчивую работу ИП в различных динамических режимах, характерных для питания установок индукционного нагрева. К таким режимам относятся 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 имитационная модель многоячейкового источника питания, которая позволяет анализировать как электромагнитные процессы в силовой части, так и регулировочные свойства преобразователя с индукционной нагрузкой.

Анализ результатов моделирования показал достаточно хорошие результаты, по которым видно что предложенная имитационная модель системы управления РН и узла стабилизации позволяет с достаточной точностью обеспечить режим стабилизации напряжения на нагрузке при различных условиях, а также оценить поведение ИП при различных динамических режимах.

Предложенный принцип стабилизации напряжения по аналогии можно также распространить на стабилизацию мощности или выходного тока преобразователя.

**Список литературы:** 1. Васильев А.С. Источники питания электротермических установок / А.С. Васильев, С.Г. Гуревич, Ю.С. Иоффе - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 248с. 2. Паралельно-последовне з'єднання високочастотних інверторів з резонансним контуром на виході / М.М. Юрченко, В.Я. Гуцалюк, П.М. Шевченко [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2005. – Ч.3. – С. 16 – 19. 3. 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. 4. 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. 5. Низькочастотні способи регулювання струму транзисторних інверторів напруги установок індукційного нагрівання / М.М. Юрченко, В.Я.Гуцалюк, П.М. Шевченко [та ін.] // Праці Інституту електродинаміки НАН України (Зб. наук. праць). – 2007. – Вип. 18. – С. 108 – 112. 6. Источник высокочастотного тока для установок индукционных технологий / Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко, В.Я. Гуцалюк, И.О. Слесаревский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2000. – Ч.2. – С. 22 – 23.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vasil'ev, A.S., S.G. Gurevich and Yu.S. Ioffe. *Istochniki pitaniya elektrottermicheskikh ustanovok*. Moscow: Energoatomizdat, 1985. Print. 2. Jurchenko, M.M., V.Ja. Gucaljuk and P.M. Shevchenko. "Paralel'no-poslidovne z'jednannja vysokochastotnyh invertoriv z rezonansnym konturom na vyhodi." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.3. (2005): 16 - 19. Print. 3. Yurchenko, N.N., P.N. Shevchenko and V.Ya. Gutsalyuk. "Sposoby regulirovaniya toka tranzistornogo invertora napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym konturom na vykhode." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.1. (2002): 79 - 81. Print. 4. Gutsalyuk, V.Ya., P.N. Shevchenko and I.O. Slesarevskiy. "Chastotnyy i shirotno-chastotnyy sposoby regulirovaniya tranzistornym invertorom napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym konturom na vykhode." *Tehnichna elektrodynamika*. No.6. (2006): 25 - 29. Print. 5. Jurchenko, M.M., V.Ja. Gucaljuk and P.M. Shevchenko. "Nyz'kochastotni sposoby reguljuvannja strumu tranzystornyh invertoriv naprugy ustanovok indukciynogo nagrivan'ja." *Praci Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy (Zb. nauk. prac')*. No.18. (2007): 108 - 112. Print. 6. Yurchenko, N.N., P.N. Shevchenko and V.Ya. Gutsalyuk. "Istochnik vysokochastotnogo toka dlya ustanovok induktsionnykh tekhnologiy." *Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta energoefektyvnist'"* No.2. (2000): 22 - 23. Print.

Поступила (received) 27.08.2015