

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

ИСТОЧНИК СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НА БАЗЕ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Розглядається можливість роботи тиристорного перетворювача частоти на основі резонансного інвертора в режимі джерела стабілізованого струму для живлення багатопостових установок індукційного нагріву.

Ключові слова: *джерело струму, тиристорний перетворювач частоти, індукційне нагрівання, система стабілізації струму.*

Рассматривается возможность работы тиристорного преобразователя частоты на основе резонансного инвертора в режиме источника стабилизированного тока для питания многопостовых установок индукционного нагрева.

Ключевые слова: *Источник тока, тиристорный преобразователь частоты, индукционный нагрев, система стабилизации тока.*

Большая часть вырабатываемой в настоящее время электроэнергии подвергается преобразованию и регулированию. Наибольшее распространение в технике, в качестве источников питания потребителей, нашли источники напряжения в виде вентильных преобразователей неизменного напряжения переменного тока в регулируемое напряжение переменного или постоянного тока. Однако, известны многие области техники (электротермия, электропривод, электротехнология, квантовая электроника, преобразовательная техника и др.) в которых использование источников тока повышает эффективность технологических процессов, разрешает многие технические противоречия, обеспечивает их новыми полезными свойствами и техническими возможностями, недостижимые при питании от источников напряжения.

К необходимым для практики источникам тока предъявляются требования как общего характера (высокие энергетические и удельно-экономические показатели, простота, надежность и т.п.), так и связанные с режимами работы потребителей электроэнергии: неизменность тока при возмущениях со стороны нагрузки, возможность регулирования тока в диапазоне не менее 1:10, его стабилизации на заданных

уровнях и др. Поэтому область применения источников неизменного тока занимает особое место в разработках источников питания электротехнологических установок, а необходимость их применения диктуется требованиями сохранения неизменного значения тока в процессе различного рода электротехнологии индукционного нагрева (индукционной закалки, плавки металлов и т. п.) [1]. Примером может быть многопостовая установка индукционного нагрева металла под пластическую деформацию, состоящую из нескольких последовательно включенных индукторов. Такое включение индукторов позволяет избежать дорогостоящих понижающих трансформаторов повышенной частоты, вводимых для согласования уровней напряжения питания индуктора и выходного напряжения преобразователя частоты. При этом необходимо обеспечить неизменное обтекание током всех последовательно включенных индукторов при разгрузке (загрузке) каждого из них или изменении их эквивалентных параметров в процессе нагрева. Иным примером применения источника тока является стабилизация тока индуктора плавильной печи при расплаве металла, что обеспечивает неизменные электродинамические усилия, возникающие между индуктором и расплавленным металлом, а, следовательно, постоянную интенсивность циркуляции расплавленных масс, т.к. величина электродинамических усилий зависит во второй степени от значения тока индуктора.

Для решения таких задач в промышленных технологиях электротермической обработки металлов и металлопродукции все шире используются электротехнологические системы среднечастотной индукционной термообработки металлов на основе тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ), из-за их существенных энергетических и технологических преимуществ по сравнению с применяемыми ранее электромашинными источниками питания. ТПЧ обеспечивают электропитание индукционных установок и комплексов токами частотой 0,5-22 кГц, мощностью десятки - тысячи киловатт, реализуя при этом процессы электротермической обработки, в которых необходимо регулирование питающего тока и его стабильность при изменении параметров нагрузки в широких пределах. В настоящее время получили широкое распространение ТПЧ на основе мостовых резонансных инверторов. Но и в таких ТПЧ возникают принципиальные трудности обеспечения глубокого регулирования тока при многократном изменении электрических параметров нагрузки и при последовательном электропитании установок, что ограничивает их широкое внедрение в промышленности.

Рассматривая всё многообразие нагрузок, можно с точки зрения оптимальной работы ТПЧ разделить их на три типа. Первый тип – это постоянные по параметрам во время работы, но предъявляющие жесткие требования к частоте. Второй тип связан с технологическими про-

цессами, которые дают глубокие изменения реактивного и активного сопротивлений в ходе процесса и требуют сами по себе постоянства тока, но не его частоты. Третий тип связан с технологическими процессами, не требующими постоянства частоты тока и её стабильности во времени, но предъявляющие требования к форме выходного напряжения и диапазону его регулирования. Поэтому повышение эффективности работы этих установок, как правило, связано с улучшением характеристик и показателей применяемого ТПЧ.

Самым сложным объектом среди всех установок индукционного нагрева с точки зрения изменения эквивалентных электрических параметров (активного R и реактивного X сопротивлений) является индукционная плавильная печь. На рисунке 1 приведены типовые кривые изменения параметров R и X при полном заполнении тигля металлом для параллельной схемы замещения индукционной плавильной установки за цикл плавки $t_{ц}$ ферромагнитного металла [2] по отношению к значениям $R_{кон}$ и $X_{кон}$ в конце плавки при $t/t_{ц} = 1$. По кривым видно, что отношение максимального значения R^* к минимальному составляет 1.5 – 2.5, значение X^* уменьшается по ходу плавки в 1.3 – 1.6 раза, что приводит соответственно к изменению добротности Q_H в 2 – 3 раза.

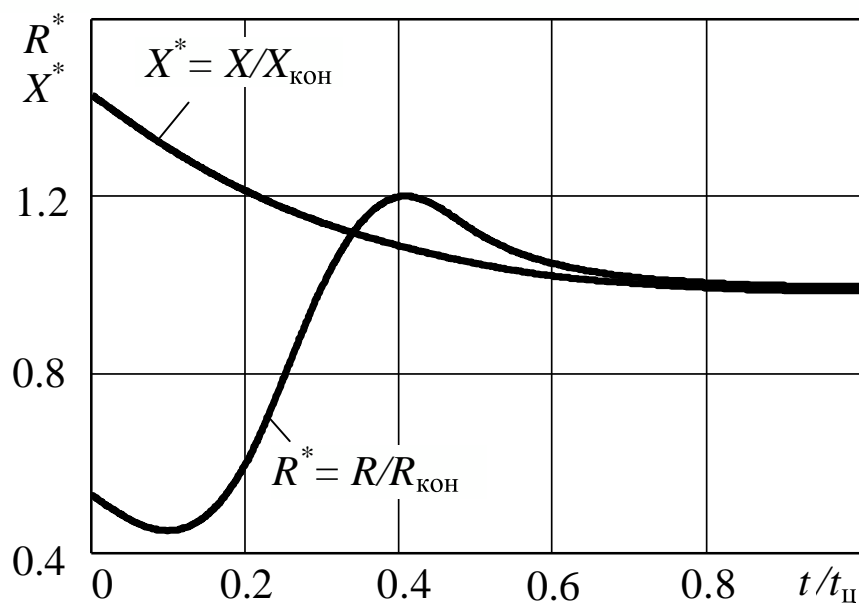


Рисунок 1 – Типовые кривые изменения относительных значений R^* и X^* в процессе нагрева в функции относительного времени $t/t_{ц}$

Настоящая статья посвящена определению возможности работы ТПЧ на основе резонансного инвертора в режиме источника неизменного тока для питания трёхфазной установки индукционного нагрева.

В работе [3] экспериментально была подтверждена возможность регулирования выходного тока резонансного инвертора удвоения частоты с самовозбуждением для индукционной нагрузки. Поэтому для достижения поставленной цели были проведены исследования регулировочных свойств ТПЧ на основе резонансного инвертора с удвоением частоты для питания многопостовой установки индукционного нагрева металла под пластическую деформацию, состоящую из трёх последовательно включенных индукторов (рис. 2), на математической модели в среде OrCAD 9.2. Для повышения эффективности анализа и придания ему универсальности при исследовании электромагнитных процессов на математической модели резонансного инвертора использовалась система относительных единиц [4], согласно которой абсолютные величины значений напряжения и тока на элементах схемы инвертора оценивались соответственно относительно величины напряжения питания инвертора U_d и действующего значения тока I_0 , протекающего в колебательном контуре инвертора при закороченном нагрузочном контуре.

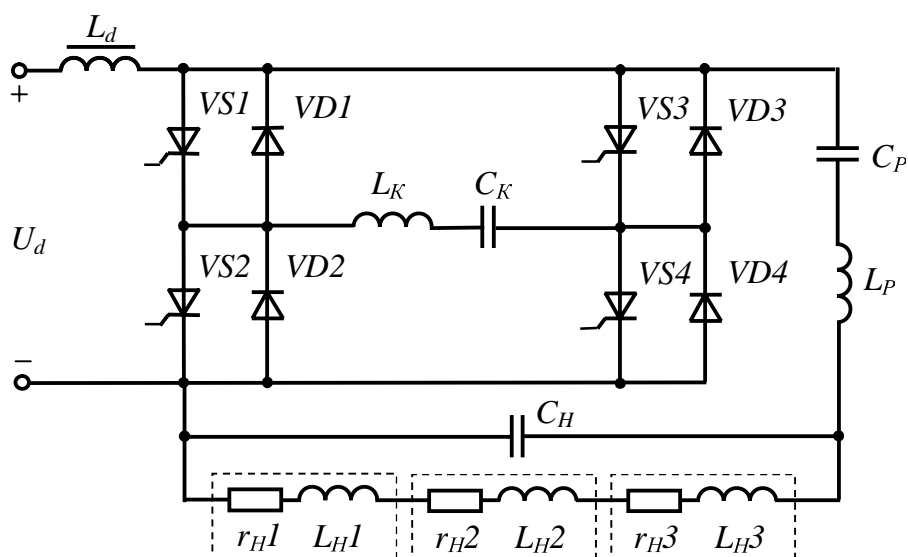


Рисунок 2 – Схема резонансного инвертора с удвоением частоты для питания многопостовой установки индукционного нагрева металла

Известно, что при нагреве ферромагнитного металла от «холодного» состояния до «горячего», с переходом через температуру точки Кюри диапазон изменения эквивалентных электрических параметров индукционной нагревательной установки изменяется в несколько раз. Из этого следует, что изменение в широком диапазоне параметров электротермической нагрузки существенно усложняет использование ТПЧ. Поэтому знание диапазона и характера изменения параметров нагрузки необходимо для правильного согласования с ТПЧ и имеет первостепенное значение при анализе, проектировании и управлении ТПЧ.

Благодаря резонансным свойствам нагрузочного контура, образованного индукционной нагрузкой с параллельно подключенной компенсирующей ёмкостью C_H , обладающего сравнительно высокой добротностью удобным и простым в реализации является частотное регулирование мощности, передаваемой инвертором в нагрузку, т.е. путём изменения его рабочей частоты f_H [5].

При исследованиях были взяты типовые кривые изменения эквивалентных электрических параметров индукционной плавильной установки (рис. 1) для параллельной схемы замещения за период нагрева. Условно весь процесс плавки можно разбить на три характерных этапа [2]. Первый - нагрев металла от начальной температуры до температуры точки Кюри. Второй - нагрев от точки Кюри до температуры 1000 – 1100°С, при которой магнитная проницаемость $\mu = 1$. Третий - нагрев от температуры нагрева 1000 – 1100°С до температуры нагрева под пластическую деформацию. Поскольку процесс индукционного нагрева металла под пластическую деформацию подобен двум первым этапам для плавки, то для моделирования этого технологического процесса справедливы кривые изменения параметров нагрузки для плавки ферромагнитного металла до $t/t_{ц} = 0.3-0.4$. Для математического моделирования типовые кривые были переведены в эквивалентные параметры r_H и L_H по отношению к значениям $r_{H\text{ кон}}$ и $L_{H\text{ кон}}$ в конце нагрева при $t/t_{ц} = 0.4$ для последовательной схемы замещения и представлены на рисунке 3 в функции относительного времени $t/t_{ц}$, где $L_{H\text{ кон}} = 0.25(L_K + L_P)$ (рис.2), $r_{H\text{ кон}} = (2\pi f_{H\text{ ном}})/Q_H$, а $f_{H\text{ ном}}$ – номинальная выходная частота инвертора.

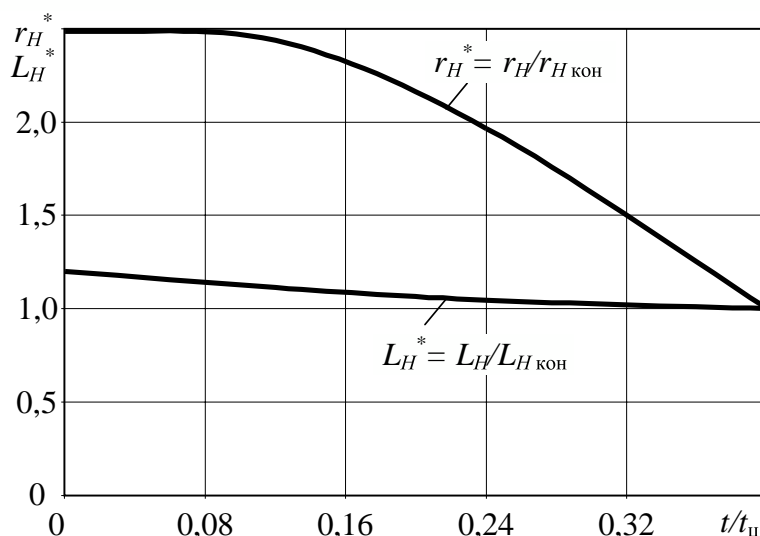


Рисунок 3 – Кривые изменения относительных значений r_H^* и L_H^* в процессе нагрева в функции относительного времени $t/t_{ц}$

По кривым изменения эквивалентных параметров нагрузки были получены в относительных единицах регулировочные характеристики инвертора. В частности получены кривые зависимости изменения тока индуктора $I_H^* = I_H/I_0$, входного тока инвертора $I_d^* = I_d/I_0$ и напряжения на трёх индукторах $U_H^* = U_H/U_d$ в функции относительной выходной частоты инвертора $f_H^* = f_H/f_{H\text{ном}}$ на четырёх условных этапах нагрева, где I_H , I_d , U_H - абсолютные величины.

Для определения правильной настройки нагрузочного контура и соответственно необходимой величины компенсирующей ёмкости C_H были проведены исследования зависимости изменения тока индуктора I_H^* для настройки нагрузочного контура инвертора на номинальную резонансную частоту $f_{H\text{ном}}$ в конце нагрева $t/t_{\text{ц}} = 0.4$ и в начале $t/t_{\text{ц}} = 0$. В результате получены и представлены на рисунках 4 и 5 кривые зависимости изменения тока индуктора I_H^* для двух случаях настройки нагрузочного контура на $f_{H\text{ном}}$, при $C_H^* = (4\pi^2 f_{H\text{ном}}^2 L_H^*)^{-1}$.

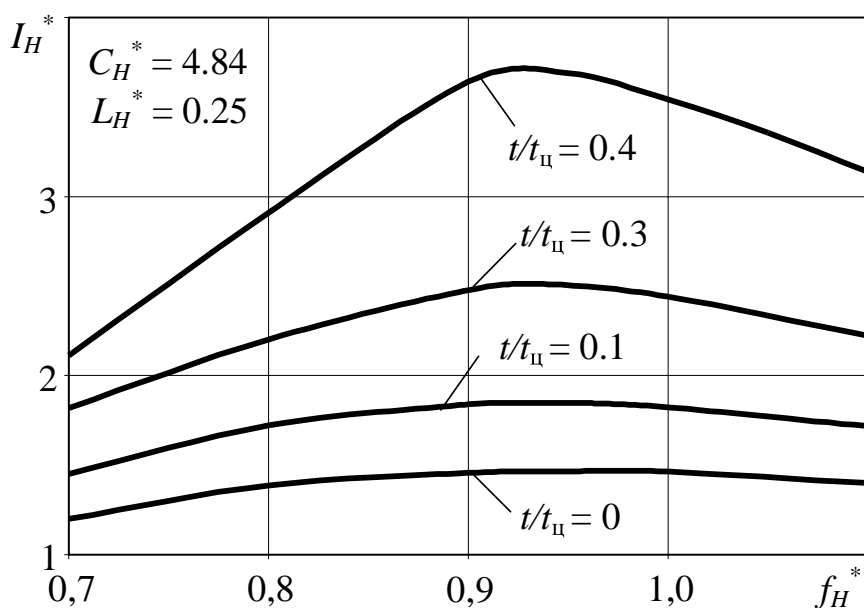


Рисунок 4 – Регулировочные характеристики инвертора для настройки его нагрузочного контура на номинальную частоту в конце нагрева

Из анализа полученных характеристик видно, что при обычной настройке нагрузочного контура по частоте на конец цикла на всех четырёх этапах нагрева не удаётся получить неизменный заданный ток индуктора $I_{H\text{зад}}^*$ в течение всего времени нагрева $t_{\text{ц}}$. В этом случае целесообразно осуществлять экстремальное регулирование частотой инвертора [6, 7] для получения максимально возможной мощности преобразователя на каждом этапе нагрева с целью обеспечения минимального времени нагрева. Но при настройке нагрузочного контура инвертора на

номинальную резонансную частоту $f_{H \text{ ном}}^*$ в начале нагрева можно стабилизировать заданный ток индуктора $I_{H \text{ зад}}^*$ в течение всего времени нагрева. Поэтому, для осуществления стабилизации тока в трёх последовательно включенных индукторах необходимо использовать систему стабилизации тока и выполнить настройку нагрузочного контура в начале нагрева на номинальную резонансную частоту $f_{H \text{ ном}}^*$.

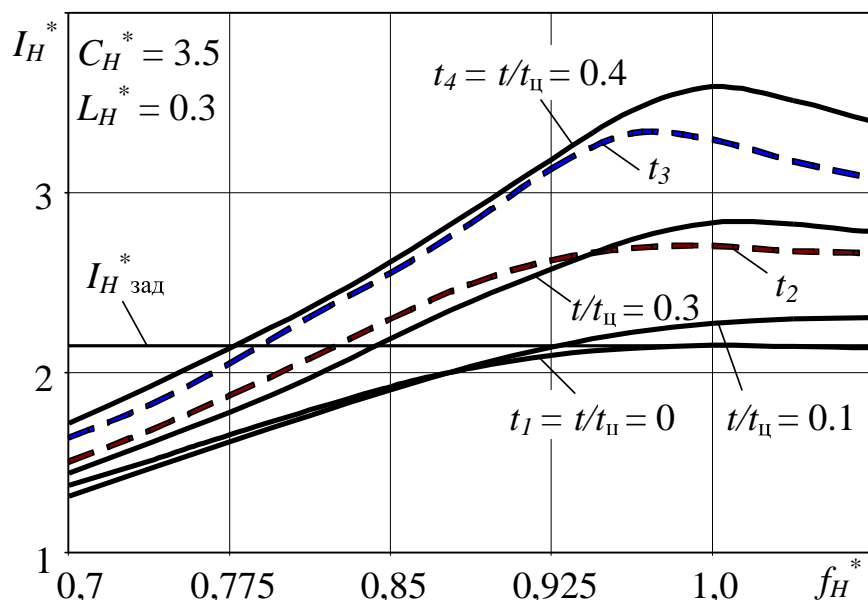


Рисунок 5 – Регулировочные характеристики инвертора для настройки его нагрузочного контура на номинальную частоту в начале нагрева

Для подтверждения того, что осуществляется стабилизация тока во всех случаях загрузки трёх индукторов были получены и представлены на рисунке 5 регулировочные характеристики инвертора для четырёх крайних возможных случаев заполнения индукторов металлом. Первый случай (t_1), когда все три нагреваемых металлических изделия холодные. Второй (t_2) – два изделия холодные, а третье уже горячее и его температура выше температуры точки Кюри. Третий (t_3) – одно изделие холодное, а два горячих. Четвёртый (t_4) – все три изделия горячие и перешли температуру точки Кюри. Исследования показали, что и в этих случаях удаётся получить неизменный заданный ток индуктора в течение всего времени нагрева.

Таким образом, стабилизация тока во всех случаях загрузки последовательно включенных индукторов может быть достигнута при настройке нагрузочного контура резонансного инвертора в начале нагрева на номинальную резонансную частоту.

Для полного анализа работы ТПЧ в режиме источника неизменного тока на четырёх условных этапах нагрева и для различных режи-

мов загрузки индукторов были получены и представлены кривые зависимости изменения входного тока инвертора I_d^* (рис.6) и кривые зависимости изменения напряжения на трёх индукторах U_H^* (рис.7) в функции относительной выходной частоты инвертора f_H^* .

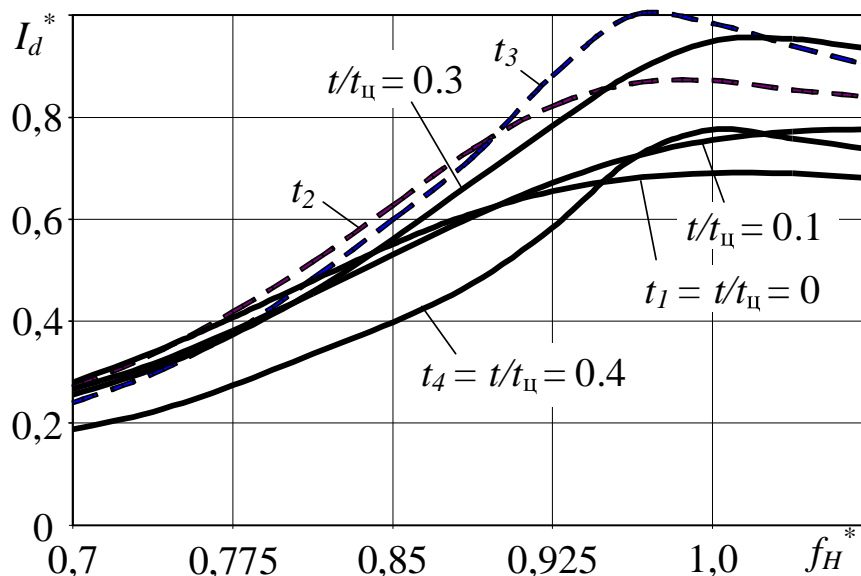


Рисунок 6 – Кривые зависимости входного тока инвертора от относительной выходной частоты инвертора

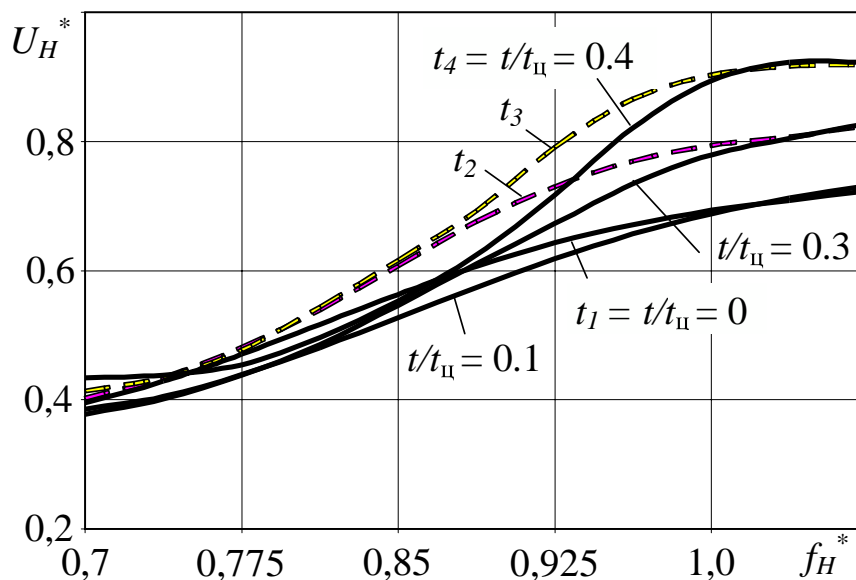


Рисунок 7 – Кривые зависимости напряжения на трёх индукторах от относительной выходной частоты инвертора

Как видно из приведенных кривых зависимостей на рисунках 6 и 7 при стабилизации тока индуктора на заданном уровне $I_{H \text{ зад}}^*$ происхо-

дит уменьшение выходной частоты инвертора к концу нагрева, при этом уменьшаются напряжение на индукторах и входной ток инвертора. Характер изменения выходной частоты инвертора, его входного тока и выходного напряжения при стабилизации тока в индукторах за процесс нагрева представлен на рисунке 8.

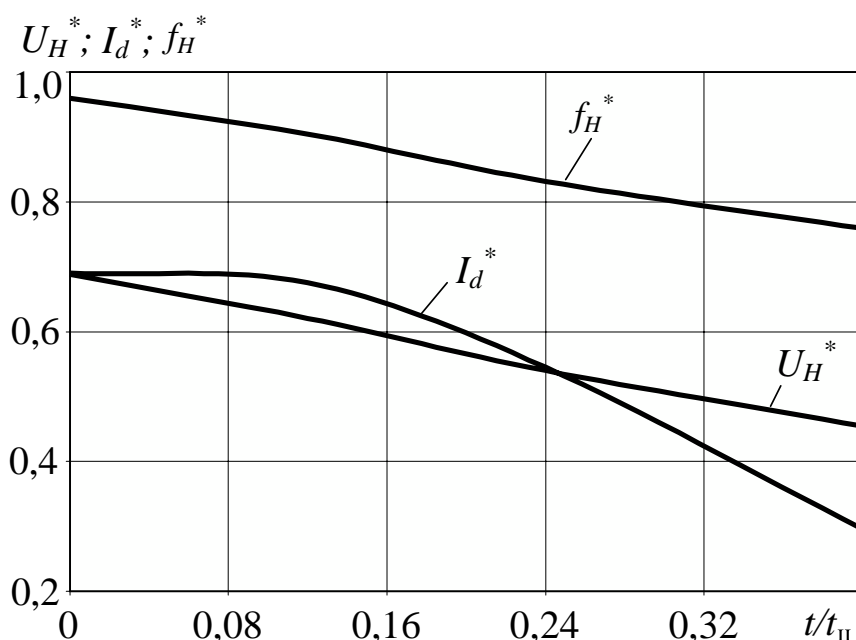


Рисунок 8 – Изменение выходной частоты инвертора, его входного тока и выходного напряжения при стабилизации тока в индукторах на уровне $I_{H\text{ зад}}^* = 2.2$ за процесс нагрева

Для реализации режима стабилизированного тока в нагрузочный контур (НК) резонансного инвертора (РИ) в цепь индуктора устанавливается датчик тока (ДТ), а к системе управления инвертором (СУИ) добавляется узел стабилизации тока индуктора с ПИ-регулятором. На рисунке 9 представлена упрощённая схема нагрузочного контура резонансного инвертора и структурная схема построения системы стабилизации тока индуктора.

Благодаря свойствам ПИ-регулятора, в установившемся режиме работы разность между сигналом задания $i_{H\text{ зад}}$ и величиной тока индуктора i_H равна нулю, что соответствует определённому сигналу на выходе ПИ-регулятора $u_{упр}$, подаваемого на вход СУИ, устанавливающего соответствующую частоту управления инвертором $f_{упр}$ и соответственно частоту его выходного напряжения f_H .

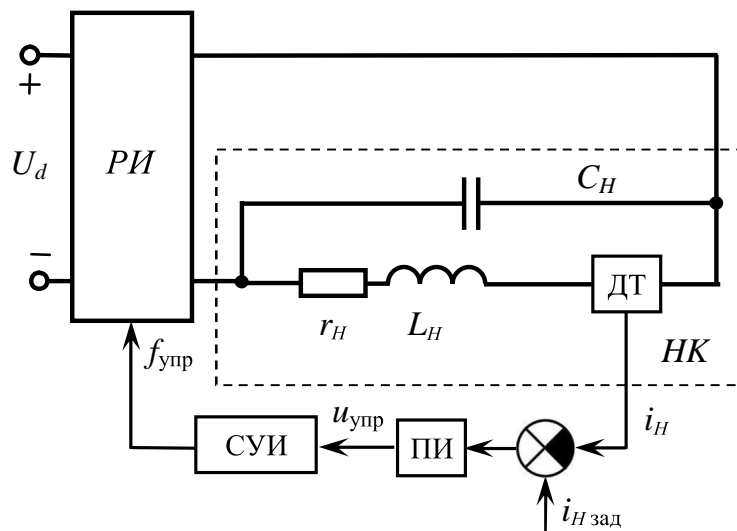


Рисунок 9 Упрощённая схема нагрузочного контура резонансного инвертора и структурная схема построения системы стабилизации тока индуктора

При изменении эквивалентных параметров индукционной нагревательной установки или напряжения питания инвертора, происходит изменение тока индуктора, а, следовательно, разность между сигналом задания и контролируемой величиной становится отличной от нуля, что приводит к соответствующему изменению сигнала на выходе ПИ-регулятора до тех пор, пока разность между сигналом задания и контролируемой величиной не станет равной нулю. Таким образом, система производит автоматическую настройку на заданный режим работы ТПЧ со стабилизацией тока индуктора.

Выводы.

1. С помощью математического моделирования показано, что источником неизменного тока для питания многопостовой установки индукционного нагрева металла под пластическую деформацию может быть ТПЧ на основе резонансного инвертора с частотным регулированием.

2. Установлено, что стабилизация тока во всех случаях загрузки трёх последовательно включенных индукторов может быть достигнута при настройке нагрузочного контура резонансного инвертора в начале нагрева на номинальную резонансную частоту.

3. Предложено для стабилизации тока индуктора в течение всего времени нагрева к системе управления инвертором добавить узел стабилизации тока с ПИ-регулятором, который позволит автоматически настраивать заданный режим работы ТПЧ со стабилизацией тока индуктора.

Библиографический список

1. Васильев А.С., Гуревич С.Г. Иоффе Ю.С. Источники питания электротермических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1985. 248с.
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. Глебин А.Г., Саратовский Р.Н., Ушаков В.И., Кобец Д.В. Регулируемый резонансный инвертор тока с самовозбуждением / Сб. науч. тр. Донбасского госуд. техн. ун-та. – 2008. – Вып. 27. – С. 419 – 426.
4. Шитицын В.В., Лузгин В.И., Новиков А.А., Антонова В.Н., Тигунов В.В. / Анализ электромагнитных процессов в автономном последовательном инверторе методом эквивалентных генераторов.// Технічна електродинаміка. – 1985 - №2. – С. 39 – 45.
5. Саратовский Р.Н. Комбинированный способ согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной плавильной печью // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – 2006. – Ч.4. – С. 39 – 44.
6. Саратовский Р.Н., Глебин А.Г., Ушаков В.И. Экстремальный регулятор для управления тиристорным преобразователем частоты при плавке металлов в индукционной печи // Електротехніка та електроенергетика. – Запорізький нац. техн. ун-т. – 2004. – №2. – С. 55 – 60.
7. Декл. пат. на корисну модель №11233 України, МПК⁷ H02M7/515. Спосіб екстремального регулювання вихідної частоти перетворювача // Саратовський Р.М., Глебін А.Г. – № и 2005 05728; Заявл. 13.06.2005; Опубл. 15.12.2005.; Бюл.№12. – 4 с.

Рекомендовано к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.