

*к.т.н., доц. Кобец Д.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина).*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК С МАГНИТОСВЯЗАННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ СОГЛАСОВАНИЯ НАГРУЗКИ

У роботі розглядаються особливості моделювання тиристорних джерел живлення з магнітозв'язаним пристроєм узгодження резонансного індукційного навантаження.

Ключові слова: *резонанс, індуктор, джерело живлення, магнітний зв'язок.*

В работе рассматриваются особенности моделирования тиристорных источников питания с магнитосвязанным устройством согласования резонансной индукционной нагрузки.

Ключевые слова: *резонанс, индуктор, источник питания, магнитная связь.*

Индукционный нагрев широко используется в различных технологиях обработки металлов – от пайки и плавки до термообработки и повторного нагрева. Но внедрение современной электротехнологии в промышленность невозможно без создания специализированных источников питания. Как элемент электрической цепи, любой индуктор может быть представлен как комбинация активного и индуктивного сопротивлений. Величины этих сопротивлений являются нелинейными функциями различных параметров, которые могут существенно меняться в ходе технологического цикла. Эти изменения связаны в основном со свойствами нагреваемых металлов и могут существенно менять настройку и параметры нагрузки источника питания и индукционной системы в целом. Следовательно, создание эффективного, надежного источника питания является важным этапом разработки электротехнологической установки в целом.

Приспособление известных устройств преобразовательной техники не позволяет реализовать все преимущества новых технологических процессов, ограничивает их производительность. Только комплексное решение вопросов разработки, технологической части и источника питания с учётом их взаимного влияния позволяет создавать электротехнологическую установку повышенной производительности, надёжности и с улучшенными технико-экономическими показателями.

Большое количество типов источников питания разрабатывается таким образом, чтобы они оптимально соответствовали многообразию потребностей, возникающих при индукционном нагреве. Специфика применения индукционного нагрева в каждом конкретном случае определяет частоту, мощность и другие параметры, такие как напряжение, ток, коэффициент мощности или добротность. Компоненты источников питания должны быть спроектированы для функционирования с соответствующими ограничениями, обеспечивающими высокую надежность их работы на требуемой частоте.

Источники питания для индукционного нагрева являются преобразователями частоты и в большинстве случаев строятся как системы с многократным преобразованием энергии [1,2]. Структурная схема такой системы приведена на рисунке 1.

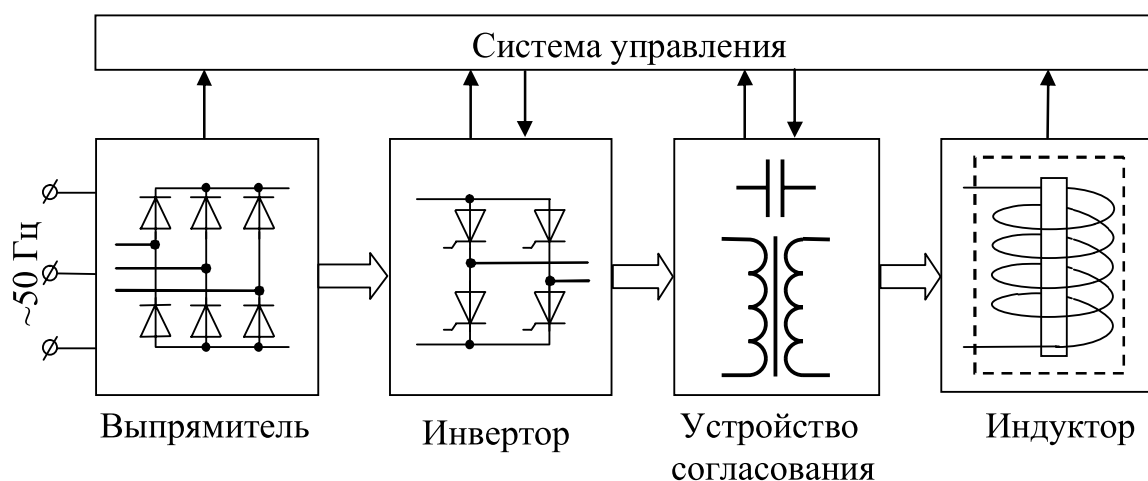


Рисунок 1 – Структурная схема источника питания

Первым силовым блоком является выпрямитель, предназначенный для получения фиксированного постоянного напряжения при питании от промышленной трехфазной сети с частотой 50 Гц. Второй блок представляет собой инвертор, который преобразует постоянный ток в однофазный переменный ток повышенной частоты. Третьим блоком является согласующий элемент, необходимый для нормального функционирования индуктора.

Система управления при помощи обратных связей по электрическим и технологическим параметрам оценивает текущее состояние электротехнологической установки и, воздействуя на управляемые полупроводниковые элементы выпрямителя и инвертора, обеспечивает необходимые изменения амплитуды, фазы и/или частоты выходного напряжения и тока источника питания [3].

В современной теории и практике проектирования источников питания важнейшее положение занимает исследование электромагнитных

процессов преобразователей электроэнергии 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 [4,5]. Уровень детализации моделей полупроводниковых элементов при этом ограничен основной характеристикой – «открыт» или «закрыт». Массовое внедрение в практику современных САПР электротехнических устройств позволило существенно расширить возможности математических моделей полупроводниковых элементов [6]. 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. Промежуточное положение занимает моделирование в программной среде MATLAB [7], в которой отражены только основные характеристики элементов, например, сопротивление в открытом состоянии, время запирающего и др.

Несмотря на меньшую точность моделей полупроводниковых элементов при моделировании в среде MATLAB основным достоинством становятся возможности изучать сочетание моделей элементов разной физической природы, строить иерархические модели, где отдельные функциональные узлы объединяются в подсистемы, применять алгоритмическое программирование и оптимизацию моделей и т.д.

Таким образом, целью работы является моделирование источников питания индукционных установок в среде MATLAB, с использованием встроенных моделей магнитосвязанных элементов раздела SimPowerSystems.

При моделировании источника питания будем использовать метод декомпозиции и иерархического построения модели.

На низшем уровне моделируются отдельные составляющие ключевой схемы, а именно – тиристорно-диодная ячейка, модель которой приведена на рисунке 2.

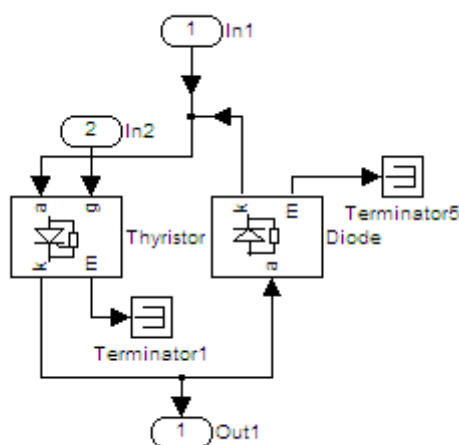


Рисунок 2 – Модель тиристорно-диодной ячейки

Из тиристорно-диодных ячеек строится мостовая схема инвертора с коммутирующей цепочкой в виде последовательно соединенных конденсатора и дросселя (рисунок 3).

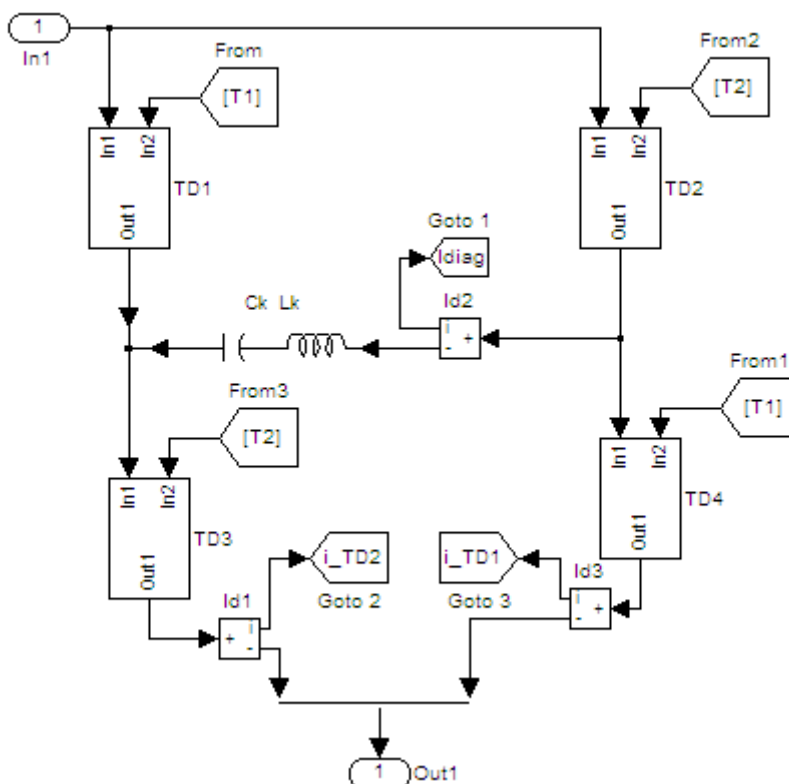


Рисунок 3 – Модель мостового инвертора

Тиристоры отпираются по дополнительному входу от блоков передачи сигнала From1- From 3. Дополнительно к силовым блокам в схему включены измерители тока Id1-Id3.

При допущении, что нагрузка моделируется в виде схемы замещения – последовательной RL-цепью с компенсационным конденсатором, была построена модель нагрузочного контура с учетом магнитосвязанных обмоток индуктора и разделительной индуктивности (рисунок 4). Математическое моделирование магнитосвязанных элементов базируется на общеизвестной T-образной схеме замещения [8].

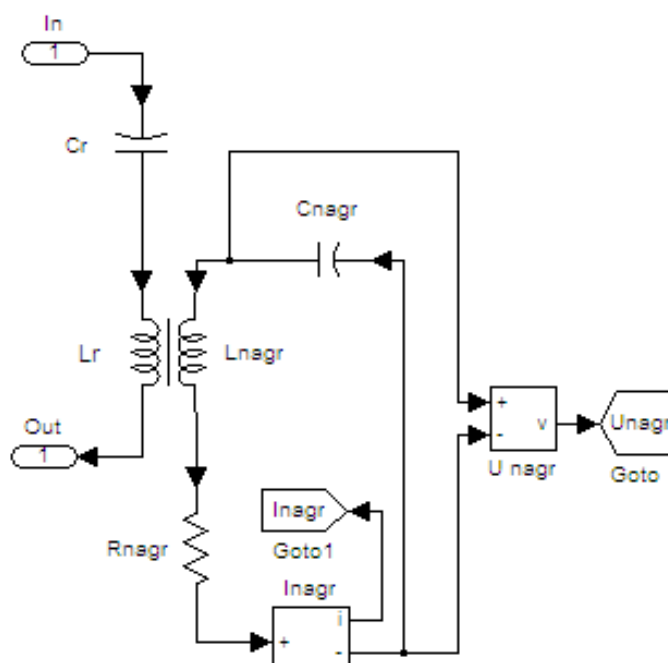


Рисунок 4 – Модель нагрузки с магнитосвязанными обмотками индуктора и разделительной индуктивности

Для анализа электромагнитных процессов в нагрузке используются измерительные блоки тока – I_{nagr} и напряжения – U_{nagr} .

Принимаем допущение, что выпрямитель неуправляемый и на его выходе сформировано стабильное напряжение без пульсаций. В таком случае выпрямитель может моделироваться идеализированным источником постоянного напряжения.

Учитывая сделанное допущение, объединяем нагрузку с разделительным конденсатором в одну подсистему, а инверторный мост с коммутирующей диагональю в другую и строим модель иловой части источника питания (рисунок 5).

Дополнительно применяем измеритель водного тока инвертора I_d .

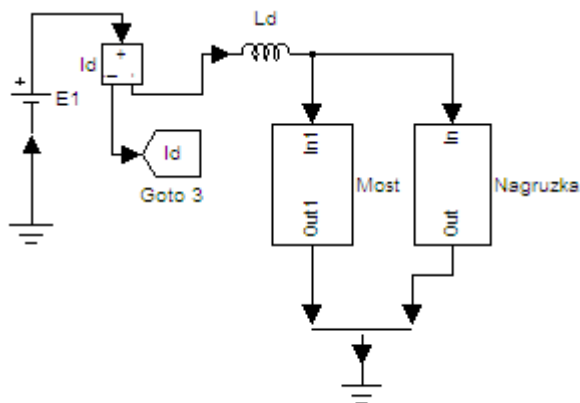


Рисунок 5 – Модель силовой части источника питания

Для анализа частотных свойств источника питания необходимо построить модель системы управления инвертором с возможностью задания частоты отпирания тиристоров попарно в диагоналях моста. Для этого используем преобразователь напряжение - частота на основе интегратора со сбросом. Интегратор $1/s$ формирует пилообразное напряжение с переменным периодом. Сброс организуется элементом сравнения пилообразного напряжения с выхода интегратора и входного постоянного сигнала. Релейный элемент Imp формирует прямоугольный импульс заданной продолжительности. При помощи JK-триггера и логических элементов AND импульсы попарно распределяются на тиристоры в диагоналях моста. Для состыковки сигналов моделей логических элементов и тиристоров применяются согласующие элементы Out.

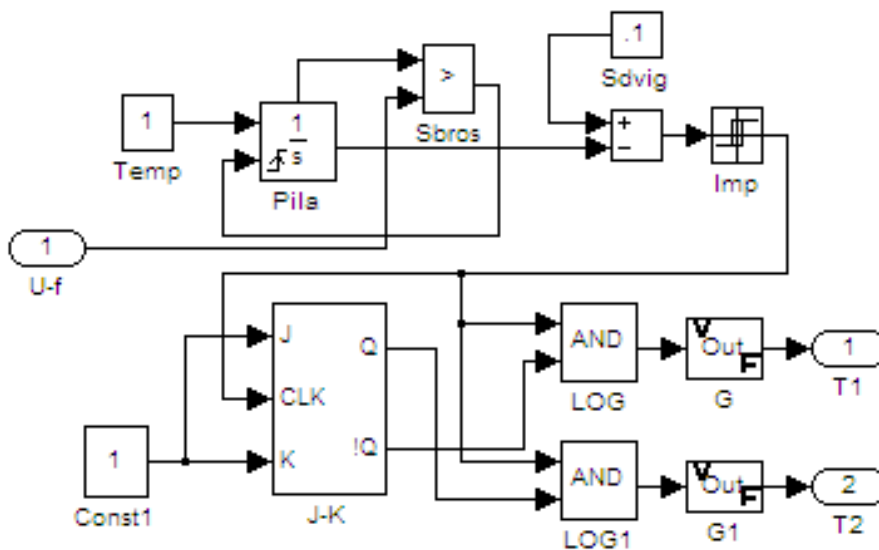


Рисунок 6 – Модель системы управления инвертором

Окончательно модели силовой части источника питания и системы управления инвертором объединяются в общую модель с необходимыми для исследования измерительными элементами (рисунок 7).

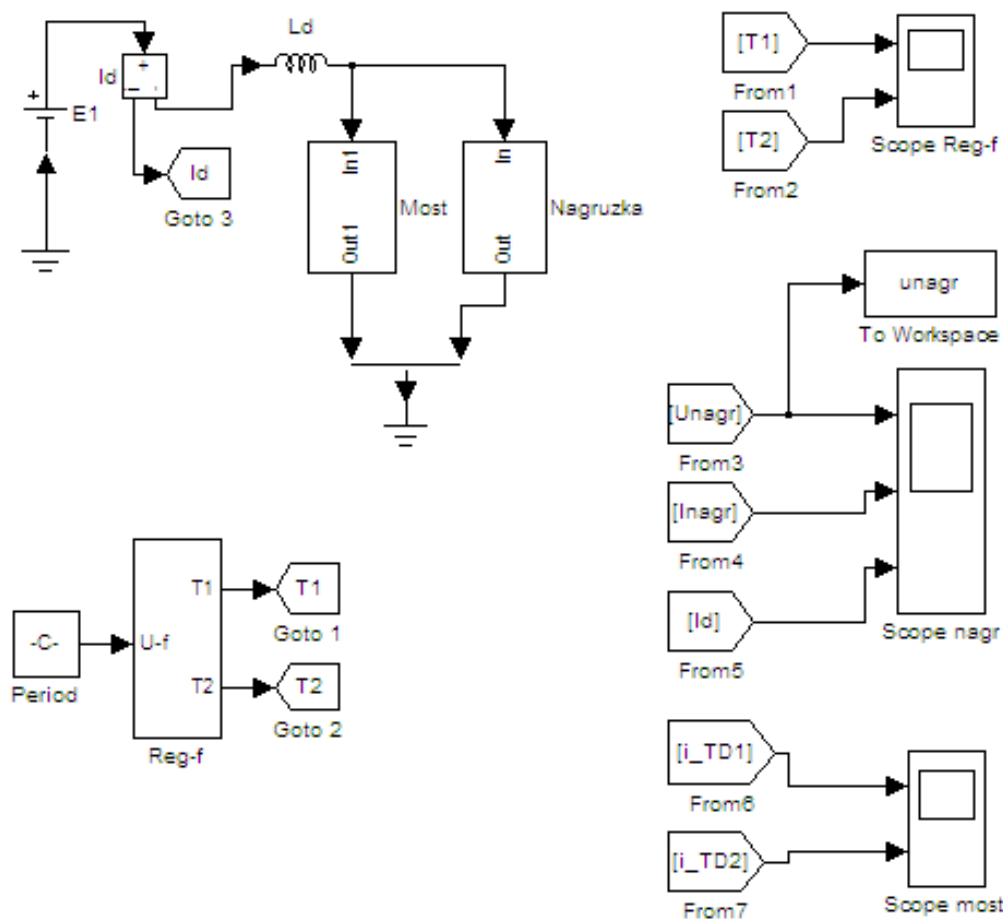


Рисунок 7 – Модель источника питания индукционной установки

Для моделирования установившихся процессов в источнике питания воспользуемся системой относительных единиц [7]. Принимаем в качестве базового напряжение источника постоянного напряжения $E1=100$ о.е., $L_{\Sigma}^* = 1$ – суммарная индуктивность инвертора; $C_{\text{э}}^* = 1$ – эквивалентная емкость.

Производными от базисных величин являются:

- $Z_k^* = \sqrt{L_{\Sigma}^* / C_{\text{э}}^*} = 1$ – волновое сопротивление коммутирующего контура;

- $I_0^* = E1^* / Z_k^* = 100$ – базисный ток;

- $\omega_0^* = 1 / \sqrt{L_{\Sigma}^* C_{\text{э}}^*} = 1$ – базисная частота;

Параметры схемы в относительных единицах приняты:

$$C_k^* = 2; \quad C_p^* = 2; \quad C_n^* = 3; \quad L_n^* = 0.2; \quad L_p^* = 0.25; \quad L_k^* = 0.75; \quad L_d^* = 100.$$

Для определения параметров магнитосвязанных обмоток используется окно настроек, показанное на рисунке 8. В этом окне определяются величины активных сопротивлений обмоток, собственные индуктивности и величина индуктивности взаимоиндукции. Коэффициент магнитной связи, согласно известному соотношению равен

$$\mu = L_m / \sqrt{L_1 L_2} = 0.2 / \sqrt{0.25 \cdot 0.25} = 0.8.$$

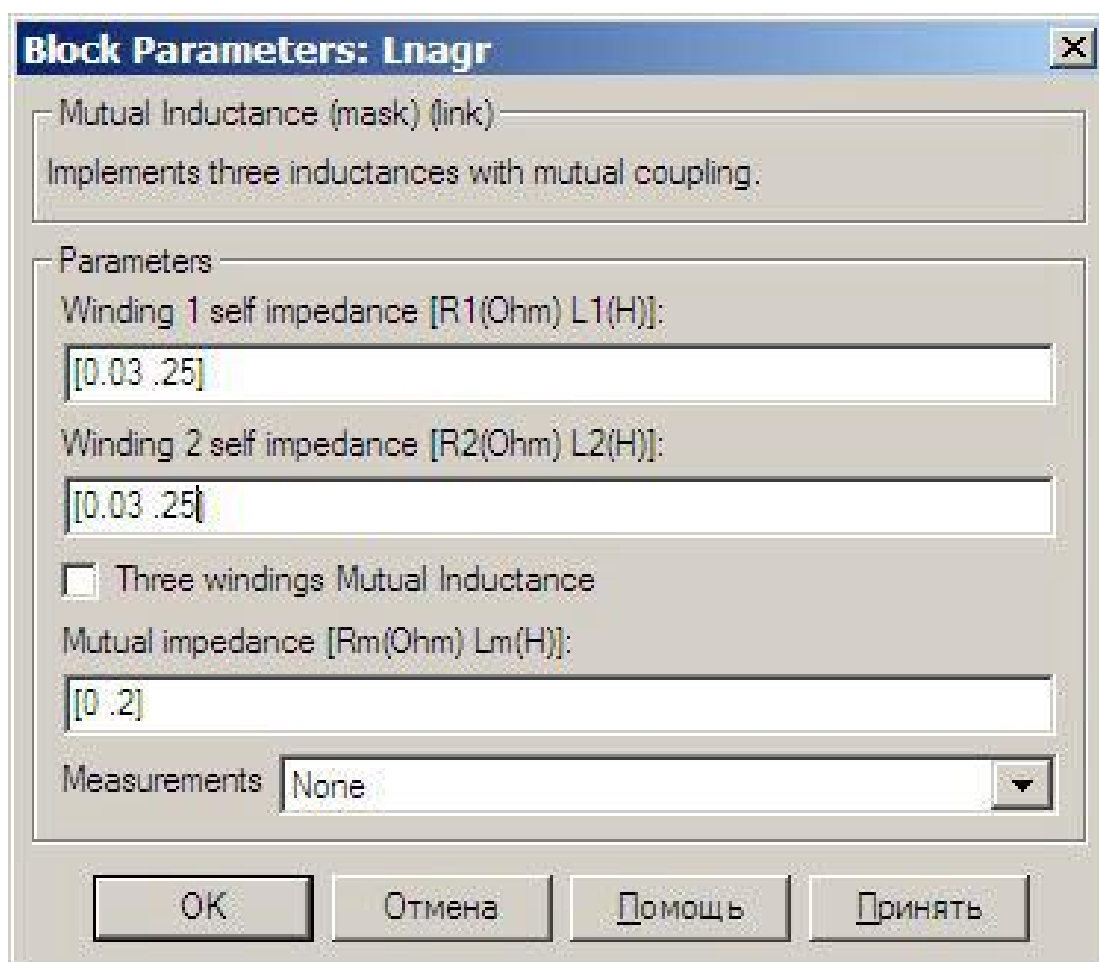


Рисунок 8 – Окно настроек магнитосвязанных обмоток

На рисунке 9 приведены временные диаграммы установившегося процесса в нагрузке и инверторе, полученные в результате моделирования.

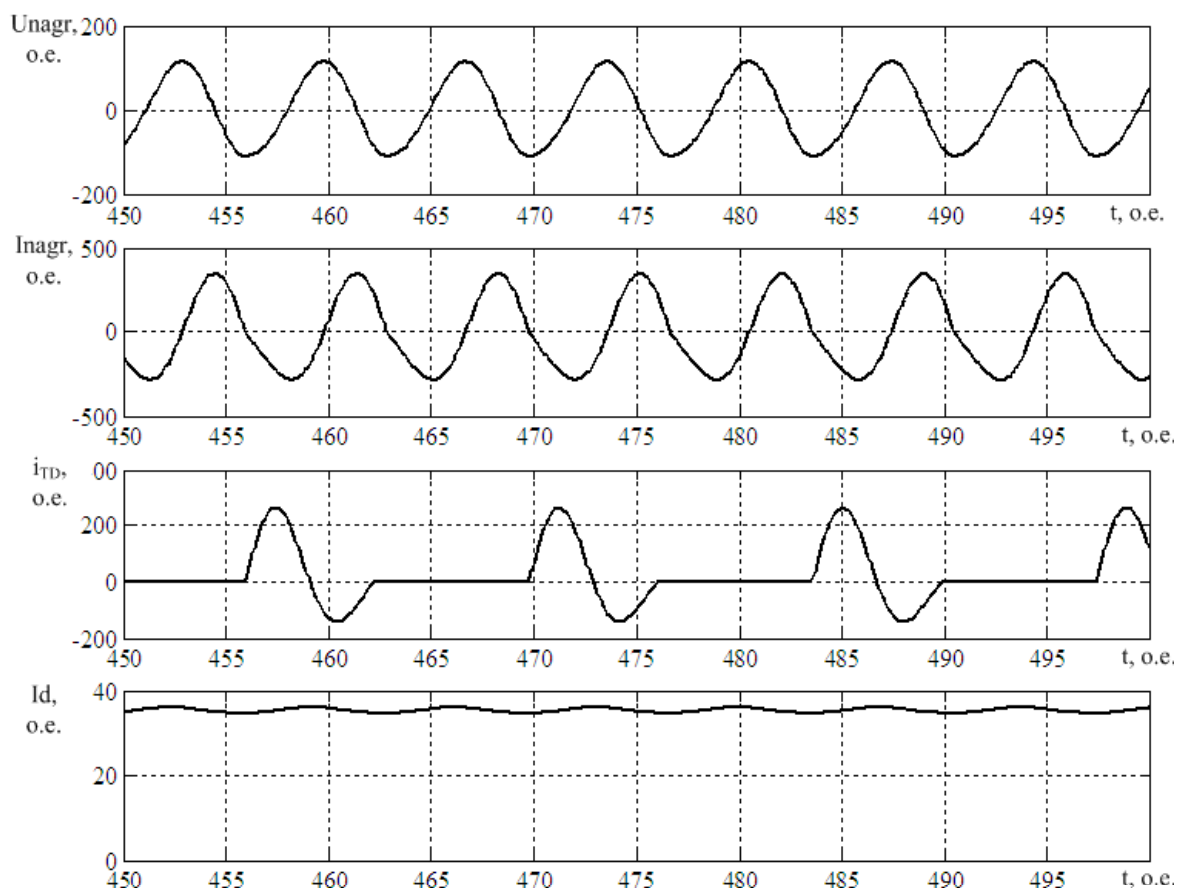


Рисунок 9 – Временная диаграмма токов и напряжений при коэффициенте магнитной связи 0,8

Как видно из диаграмм форма напряжения и тока в нагрузке близка к синусоидальной, а источник работает в режиме с недоиспользованием активной мощности (входной ток инвертора значительно ниже базисного значения).

Выводы. В результате работы предложена математическая модель источника питания индукционной установки с магнитосвязанным устройством согласования нагрузки, которая позволяет анализировать как электромагнитные процессы в силовой части, так и регулировочные свойства инвертора, нагруженного на резонансный магнитосвязанный контур.

Дальнейшее усовершенствование модели предполагает использование средств программирования среды MATLAB с целью оптимизации параметров магнитосвязанных элементов для повышения коэффициента использования источника по мощности.

Библиографический список.

1. Лавлес Д.Л. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева // *Силовая электроника*. – 2007. – №4.
2. Дзлиев С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной закалки зубчатых колес при двухчастотном нагреве // *Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (АРИН-2005)*". Материалы международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 193-200.
3. Бондаренко Д.Н. Автоматизация управления транзисторными генераторами для индукционного нагрева / Д.Н. Бондаренко, С.В. Дзлиев, Ф.В. Чмиленко // *Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева (АРИН-2005)*". Материалы международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 370-378.
4. Тонкаль В.Е. Вентильные преобразователи переменной структуры / В.Е. Тонкаль, В.С. Руденко, В.Я. Жуйков и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 336 с.: ил.
5. Васильев А.С. Система автоматизированного исследования схем силовой электроники / А.С. Васильев, С.В. Дзлиев, С.А. Федосин, Ю.И. Блинов // *Техническая электродинамика*. – 1985. – №1. – С. 3-6.
6. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Салон-Р, 1999. – 590 с.: ил.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.: ил.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. – 7-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. школа, 1978. – 528 с.: ил.

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