

*к.т.н. Кобец Д.В.,
Гавриш А.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),*

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

В роботі розглянуто багатоканальну систему керування напівпровідниковим перетворювачем з нечітким аналізатором координат. Представлені результати моделювання стаціонарних режимів роботи індукційного комплексу.

***Ключові слова:** багатоканальна система керування, нечіткий аналізатор.*

В работе рассмотрена многоканальная система управления полупроводниковым преобразователем с нечетким анализатором координат. Представлены результаты моделирования стационарных режимов работы индукционного комплекса.

***Ключевые слова:** многоканальная система управления, нечеткий анализатор.*

Высокочастотные источники питания со звеном постоянного тока успешно применяются в составе установок индукционного нагрева [1, 2]. Установки индукционной пайки, закалки, плавки, наплавки, нагрева металла перед пластической деформацией, горячей посадки машиностроительных деталей, стыковой сварки труб и ленты, сварки по отбортованным кромкам, снятия механических напряжений после сварки труб и листовых конструкций, сушки окрашенных металлических поверхностей и другие могут быть укомплектованы как тиристорными, так и транзисторными инверторами.

Применение автоматических систем регулирования мощности полупроводниковых преобразователей в источниках питания установок индукционного нагрева обусловлено жесткими требованиями к качеству термической обработки и повторяемости результатов нагрева. Диапазон регулирования генерируемой преобразователем мощности достигает 1:20, точность поддержания температуры до 10^{-3} .

Одной из основных особенностей индукционной нагрузки является сильная зависимость ее электрических параметров от температуры нагрева. Активное сопротивление индуктора может изменяться в

1,5...2,5 раза, и индуктивное в 1,3...1,6 раза. Это приводит к изменению собственной частоты нагрузочного контура, образованного индуктором и конденсатором, компенсирующим его реактивную мощность.

Для обеспечения оптимального режима работы инвертора на переменную нагрузку система управления должна постоянно согласовывать частоту работы инвертора с частотой нагрузочного контура, обеспечивая минимальную индуктивную расстройку. Для этих целей используют систему управления с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) [3]. При использовании ФАПЧ основная функция управления мощностью обеспечивается регулятором напряжения промежуточного звена постоянного тока с широтно – импульсным модулированием (ШИМ). Благодаря оптимальной работе инвертора и минимальным коммутационным потерям при изменении параметров индукционной нагрузки, данная схема может быть использована в установках с рабочей частотой свыше 50 кГц. Однако реализация функций управления за счет регулятора напряжения существенно усложняется.

В статье решается задача разработки многоканальной системы управления полупроводниковым преобразователем с импульсным регулированием выходных параметров.

Нормальная эксплуатация полупроводникового преобразователя, т.е. соблюдение заданного электрического режима установки и обеспечение наилучших энергетических показателей, возможна при соблюдении следующих условий:

- постоянная мощность на входе инвертора не должна превышать номинального значения $P_{d\text{ ном}}$;
- инвертированное напряжение и напряжение на отдельных элементах схемы установки не должно превышать максимальных допустимых значений $U_{\text{макс}}$;
- ток индукционной нагрузки не должен превышать номинального значения $I_{\text{ном}}$.

Реализация приведенных условий возможна при использовании управления преобразователем по нескольким каналам. В качестве первого канала будет использоваться управление частотой инвертора. Как уже отмечалось, частоту инвертирования желательно поддерживать близкой к резонансной частоте нагрузки, что позволит обеспечить оптимальный режим коммутации ключей инвертора и повысить значение потребляемой активной мощности. Для реализации данного канала управления потребуется измерение инвертированного напряжения и тока в нагрузке с целью минимизации фазового сдвига.

Второй канал управления необходимо реализовать на базе транзисторного импульсного регулятора входного напряжения. Однако, в отличие от известного ШИМ – регулирования, предлагается использовать

релейное регулирование с несколькими обратными связями [4]. Это позволит построить более гибкую систему управления с возможностью ограничения координат за счет естественных свойств релейного регулятора. Для формирования управляющего сигнала релейного регулятора использован нечеткий анализатор состояния преобразователя и нагрузки, на которого поданы обратные связи по входной мощности, выходному току и напряжению инвертора.

На рисунке 1 представлена структура индукционного комплекса, которая включает неуправляемый выпрямитель (В), регулятор выпрямленного напряжения (РН), мостовой инвертор напряжения (ИН), блок согласования с последовательной компенсацией реактивной мощности (БС), индукционную нагрузку (Н) и систему управления (СУ). Измерительная часть представлена датчиками тока (ДТ), напряжения (ДН) вычислителем мощности (P_d). Подстройка частоты осуществляется через генератор управляемый напряжением (ГУН), входной сигнал которого определяется величиной фазового сдвига от фазового детектора (ФД).

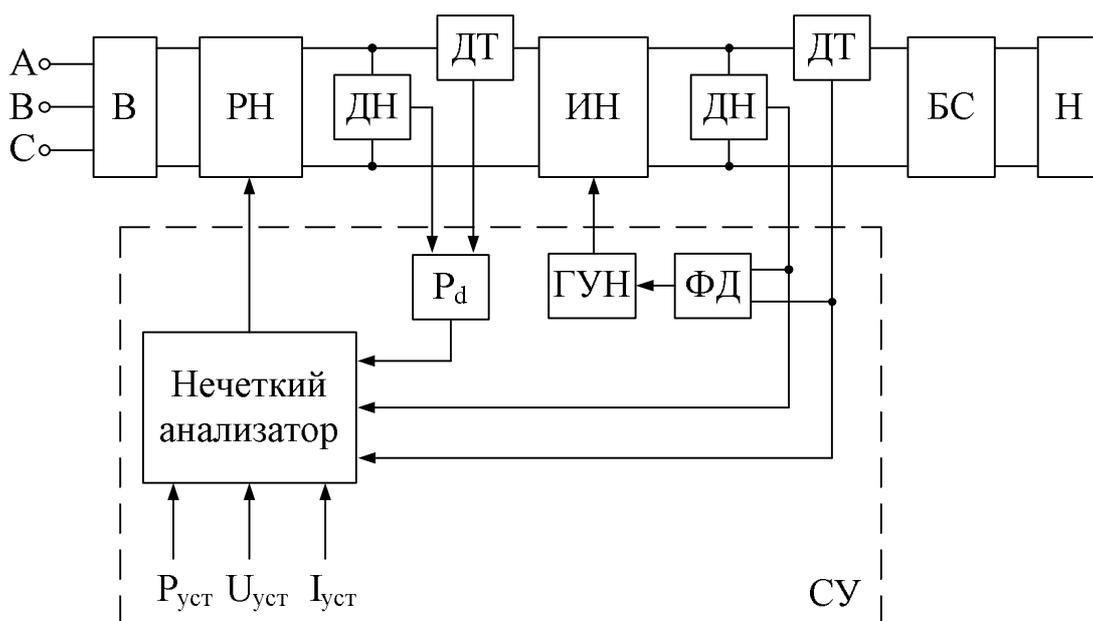


Рисунок 1 – Структурная схема индукционного комплекса

Нечеткий регулятор традиционно строится как некоторое вычислительное устройство с определенной структурой, приведенной на рисунке 2. Она состоит из следующих элементов: блока фаззификации, который преобразует входные физические величины x_i в соответствующие им лингвистические переменные $\mu(x_i)$; базы знаний содержащей набор правил; блок логического вывода, который преобразует входные лингвистические переменные в выходные с определенными функциями принадлежности $\mu(y)$; блок дефаззификации, который преобразует вы-

ходную лингвистическую переменную в физическое управляющее воздействие.

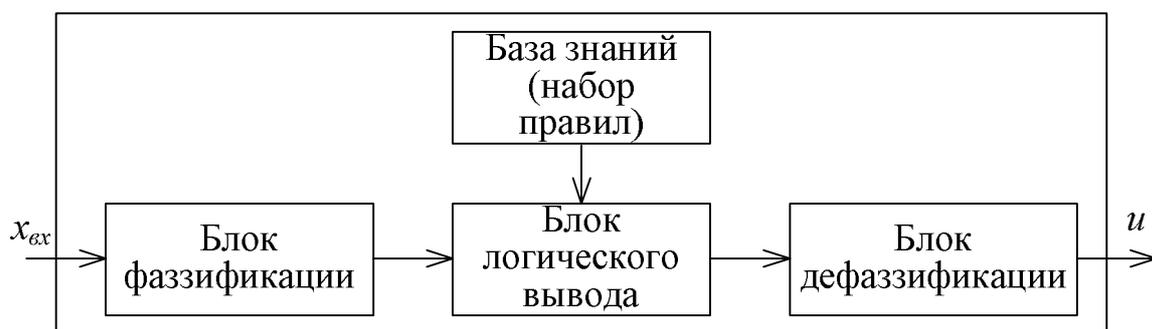


Рисунок 2 – Структурная схема нечеткого регулятора

В работе рассматривался нечеткий регулятор Мамдани с центроидным методом дефаззификации [5].

Для фаззификации координат управления приняты следующие предположения. Управление входной мощностью и выходным током осуществляется как в положительном «*P*», так и в отрицательном «*N*» направлении с дополнительной стабилизацией в окрестности нуля «*Z*», а выходное напряжение только ограничивается на уровне в 1,1...1,5 раза больше номинального значения. Предлагаемые функции принадлежности координат управления приведены в относительных единицах на рисунке 3.

Для выполнения функций ограничения мощности и тока используются правила вида

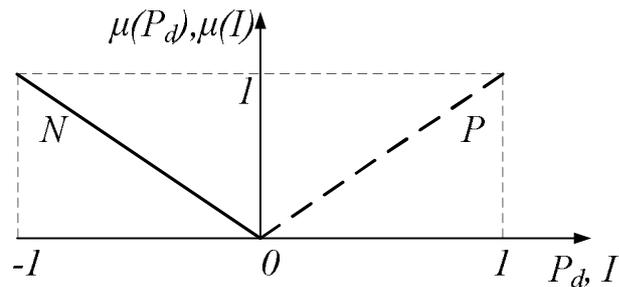
$$\begin{aligned}
 &\text{«Если } P_d - \langle P \rangle \text{ и } I - \langle P \rangle, \text{ то } u - \langle N \rangle; \\
 &\text{«Если } P_d - \langle N \rangle \text{ и } I - \langle N \rangle, \text{ то } u - \langle P \rangle.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Для стабилизации мощности и тока на номинальном уровне используются правила вида

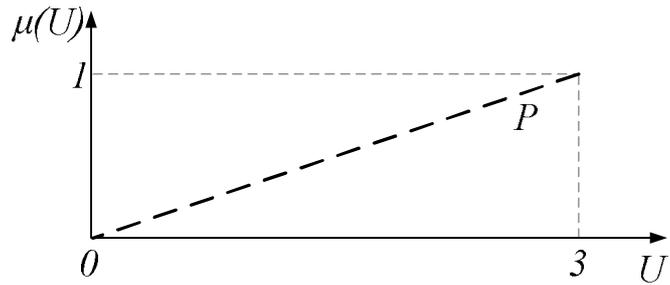
$$\begin{aligned}
 &\text{«Если } P_d - \langle P \rangle \text{ и } I - \langle N \rangle, \text{ то } u - \langle Z \rangle; \\
 &\text{«Если } P_d - \langle N \rangle \text{ и } I - \langle P \rangle, \text{ то } u - \langle Z \rangle.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Для ограничения выходного напряжения используется правило вида

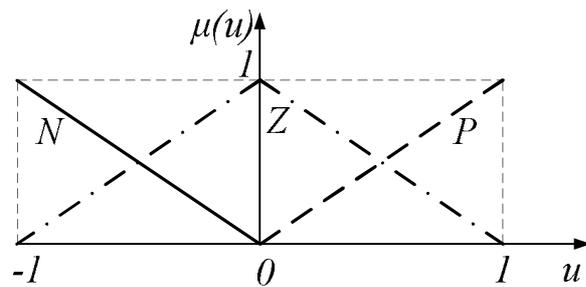
$$\text{«Если } U - \langle P \rangle, \text{ то } u - \langle N \rangle. \tag{3}$$



а) Функции принадлежности мощности и тока



б) Функция принадлежности напряжения



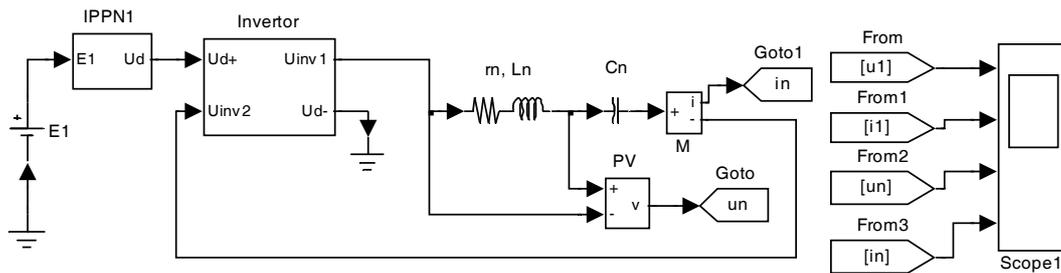
в) Функции принадлежности управления переключением

Рисунок 3 – Функции принадлежности координат управления

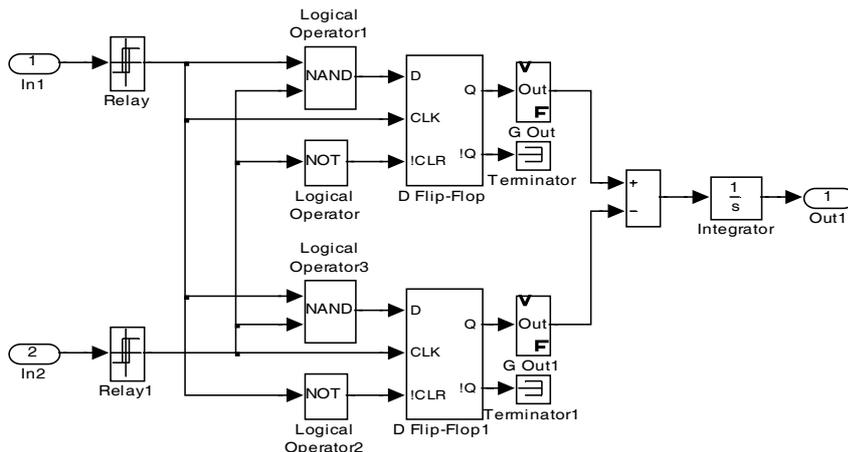
Дефаззификация центроидным методом осуществляется согласно формуле

$$u = \frac{\min_{\max} \int u \cdot \mu(u) du}{\max_{\min} \int \mu(u) du} \quad (4)$$

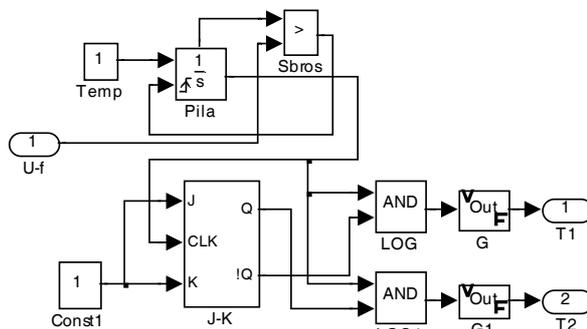
Изучение работоспособности системы управления производилось путем моделирования в среде MATLAB. Модель индукционного комплекса приведена на рисунке 4. На рисунке мостовой инвертор и регулятор напряжения показаны в виде подсистем, так как моделируются стандартными моделями [6].



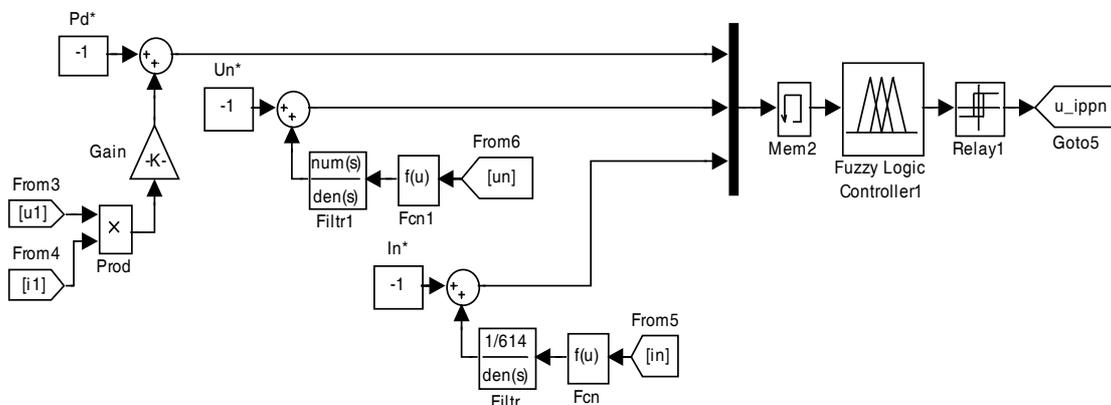
а) модель силовой части источника питания



б) модель фазового детектора



в) модель генератора управляемого напряжением



г) модель системы управления

Рисунок 4 – Модель индукционного комплекса

Анализ работоспособности системы управления был проверен при вариациях активного и индуктивного сопротивления нагрузки. Значение параметров изменялось в 2 раза в большую и в меньшую сторону, при этом в относительных единицах определялось установившееся значение координаты. Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования индукционного комплекса при вариациях параметров нагрузки

Параметры нагрузки, о.е.		Уровень стабилизации координат, о.е.		
r_H	L_H	P_d	I	U
1	1	1	1	1
0,5	1	0,5	1	1
2	1	1	0,5	0,5
1	0,5	1	1	0,5
0,5	0,5	0,5	1	0,5
2	0,5	1	0,5	0,27
1	2	0,73	0,73	1,47
0,5	2	0,37	0,73	1,47
2	2	1	0,5	1

Как показывают результаты моделирования, система управления полностью удовлетворяет требованиям нормальной эксплуатации. Автоматически происходит выбор той координаты, которая подлежит стабилизации при определенном сочетании параметров нагрузки, либо происходит ограничение напряжения в случае возрастания индуктивности нагрузки. При последовательной компенсации нагрузки характерен рост напряжения пропорционально добротности нагрузки. Так как значение добротности нагрузки индукционных установок лежит в диапазоне 3...20, то ограничение напряжения на уровне, не превышающем 1,5 от номинального значения, можно считать удовлетворительным.

Выводы. В результате проведенных исследований предложена структура многоканальной системы управления полупроводниковым преобразователем источника питания индукционного комплекса. В качестве главного регулятора энергетического режима предложено использовать релейный регулятор входного напряжения с нечетким анализатором состояния преобразователя. Разработана математическая модель индукционного комплекса, которая учитывает взаимодействие каналов управления инвертором и импульсным регулятором напряжения. Результаты моделирования подтвердили эффективность работы систе-

мы, как при номинальных, так и при граничных значениях параметров нагрузки.

Библиографический список

1. *Loveless D. L. Power Supplies for Induction Heat Treating / Loveless D. L. Cook R. L., Rudnev V. I. // Industrial Heating, June 1995.*

2. *Силкин Е. М. Транзисторные преобразователи частоты для индукционного нагрева / Е. М. Силкин // Электротехника. - № 10'2004. - С. 24–30.*

3. *Дзлиев С.В. Автоподстройка частоты в транзисторных инверторах напряжения для индукционного нагрева / С.В. Дзлиев, И.С. Тихомиров, Д.А. Патанов, П.О. Чернецов, Д.Н. Бондаренко // “Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий (АПЭЭТ-2006)”. Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Екатеринбург, 19-21 апреля 2006 г.*

4. *Кобец Д.В. Оптимизация динамических режимов стабилизирующего импульсного преобразователя напряжения понижающего типа / Д.В. Кобец // Технічна електродинаміка. – 2002. – №2. – С. 24 – 29.*

5. *Кобец Д. В. Система нечеткого управления источниками питания индукционных установок / Д.В. Кобец, Р.Н. Саратовский, С.Н. Середя, В.И. Ушаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - Випуск 8(140). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 224 - 227.*

6. *Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.: ил.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Ульшиным В.А.