

*Ламанов С.Л.,  
к.т.н. Кобец Д.В.,  
к.т.н. Цодик И.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **РАБОТА УСТРОЙСТВА СОГЛАСОВАНИЯ И ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ НАГРУЗКИ С ПОЛУМОСТОВЫМ РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ**

*Наведено результати дослідження пристрою узгодження і гальванічної розв'язки навантаження з напівмостовим резонансним інвертором перетворювача частоти на тиристорах. Розглянутий вплив параметричних коефіцієнтів схеми на характеристики навантажень інвертора.*

***Ключові слова:** ПАКЛС, індукційне навантаження, гальванічна розв'язка, резонансний контур, коефіцієнт зв'язку.*

*Приведены результаты исследования устройства согласования и гальванической развязки нагрузки с полумостовым резонансным инвертором тиристорного преобразователя частоты. Рассмотрено влияние параметрических коэффициентов схемы на нагрузочные характеристики инвертора.*

***Ключевые слова:** ПАКЛС, индукционная нагрузка, гальваническая развязка, резонансный контур, коэффициент нагрузки.*

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Электрические параметры нагрузочного контура могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от физических свойств нагреваемого тела. В свою очередь, если индукционный нагреватель (далее для краткости ИН) является составной частью устройства индукционного нагрева (далее для краткости УИН), выполненного на базе резонансного инвертора, то изменение параметров ИН вызывает изменение режима работы самого источника питания (далее для краткости ИП). Поэтому надежность работы ИП, зависит от правильного согласования параметров инвертора с параметрами ИН, а именно, согласования волнового сопротивления инвертора с активным сопротивлением ИН в целях получения наибольшей выходной мощности при необходимом запасе устойчивости.

На правильность согласования оказывает влияние несколько факторов. Первый – уже упомянутое изменение параметров самого ИН.

Второй – применение различных устройств согласования. Третий – длина соединительной линии между ИП и ИН. При проектировании УИН частота и мощность, как правило, задаются потребителем, а номинальное выходное напряжение выбирается исходя из значения напряжения питающей сети и соображений наилучшего использования тиристоров по току и напряжению.

На указанные выше параметры оказывает влияние также выбор типа инвертора и его схемы – последовательный или параллельный инвертор по полумостовой, мостовой или многомостовой схеме, причем УИН в большинстве случаев строятся как системы с многократным преобразованием энергии [1].

Например, УИН, состоящий из трехфазного мостового выпрямителя и параллельного инвертора тока и подключенный к сети 380 В, имеет, как правило, номинальное выходное напряжение до 1000 В, причем в диапазоне 700 – 1000 В сохраняет номинальную мощность. Мощная нагрузка такого УИН представляет собой индуктор с малым числом витков и большими линейными размерами трубки, а токопроводы, соединяющие конденсаторную батарею с индуктором («короткая сеть»), растут в размерах из-за больших токов. Влияние соединительной линии особенно сильно проявляется в системах централизованного питания ИН из-за усложнения кабельной разводки от высокочастотной подстанции к ИН и усложнения индивидуальной подстройки ИН.

Последовательные резонансные инверторы, широко используемые в УИН, имеют при таком же включении еще меньшее выходное напряжение – полумостовые инверторы – 200...250В, а мостовые инверторы – 400...500В, что еще больше усугубляет вышеуказанную проблему при использовании инверторов таких типов.

**Анализ исследований и публикаций.** Для решения данной проблемы в настоящее время применяют соответствующие согласующие устройства, такие, как классические трансформаторы и автотрансформаторы на магнитопроводах, автотрансформаторная или автоконденсаторная схема подключения нагрузки [2].

Каждое из указанных согласующих устройств имеет недостатки, значительно ограничивающие их использование [3].

Так, классические трансформаторы и автотрансформаторы на магнитопроводах имеют значительные массу, габариты и стоимость, соизмеримую со стоимостью всего УИН, а также существенно снижают общий КПД УИН из-за потерь на перемагничивание магнитопровода.

Автотрансформаторная схема усложняет тоководы, требует наличия отпайки у индуктора, выполнить которую не всегда технологически возможно, а также имеет гальваническую связь ИН с питающей сетью

~380В, что вызывает необходимость дополнительных мероприятий по электробезопасности обслуживающего персонала.

Автоконденсаторная схема подключения ИН значительно увеличивает массу, габариты и стоимость УИН из-за существенного (до 4-х раз) увеличения установленной мощности конденсаторной батареи.

Указанные выше недостатки устройств согласования могут быть в значительной степени устранены применением устройства гальванической развязки, рассмотренного в [4], где для обеспечения гальванической развязки используются индуктивности резонансных инверторов при обеспечении их дополнительным функциональным назначением. Устройство, схема которого представлена на рисунке 1 содержит: выпрямитель 1; фильтровый дроссель 2; коммутирующие конденсаторы 3, 4; тиристоры 5, 8; коммутирующие дроссели 6, 7; встречные диоды 9, 10; а также отдельный контур нагрузки, представленной индуктивностью 11, активным сопротивлением 12 и компенсирующим конденсатором 13. Отличительной особенностью представленной схемы от традиционных схем [5] является воздушная магнитная связь между коммутирующими дросселями и дросселем связи 14, включенным последовательно с нагрузкой и компенсирующим конденсатором.

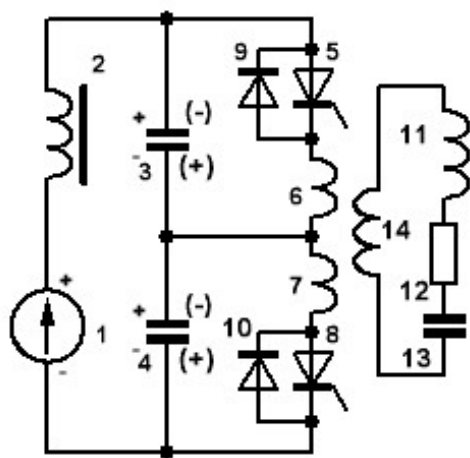


Рисунок 1 – Структурная схема источника питания

Особенности применения рассматриваемой схемы в настоящее время исследованы недостаточно полно.

**Постановка задачи.** Используя численные методы моделирования исследовать работу последовательного резонансного инвертора на ИН с различными рабочими напряжениями путем изменения магнитной связи между коммутирующей индуктивностью и добавочной индуктивностью нагрузочного контура при использовании предложенного устройства согласования и гальванической развязки ИН.

**Изложение материала и его результаты.** Для решения поставленной задачи можно использовать программы моделирования, использующие численные методы, например, ПАКЛС [6].

Для моделирования установившихся процессов в ИП воспользуемся системой относительных единиц [7]. Принимаем в качестве базового напряжение источника постоянного напряжения  $E_1=100$  о.е.,  $L_K^*=1$  – коммутирующая индуктивность инвертора;  $C_K^*=1$  – коммутирующая емкость инвертора.

Производными от базисных величин являются:

$$- Z_K^* = \sqrt{L_K^*/C_K^*} = 1 \text{ – волновое сопротивление контура;}$$

$$- I_0^* = E_1^*/Z_K^* = 100 \text{ – базисный ток;}$$

$$- \omega_0^* = 1/\sqrt{L_K^*C_K^*} = 1 \text{ – базисная частота;}$$

$$- K_H^* = R_H/\sqrt{L_K^*/C_K^*} \text{ – коэффициент нагрузки.}$$

Параметры схемы в относительных единицах приняты:

$$C_K^* = 1; \quad C_H^* = 0,25; \quad L_H^* = 2,67; \quad L_{CB}^* = 1,33; \quad L_K^* = 1,0; \quad L_d^* = 200.$$

Листинг входных данных ПАКЛС приведен на рисунке 2.

Параметры магнитосвязанных обмоток задаются в листинге входных данных ПАКЛС строкой 

0.62	0204K
0.62	0304K

, где коэффициент магнитной связи, согласно известному соотношению, равен

$$\mu = K_{CB} = L_m/\sqrt{L_1L_2} = 1,613/\sqrt{1,0 \cdot 1,0} = 0,62.$$

Результаты расчета графиков временных зависимостей токов и напряжений в исследуемом инверторе при указанных входных данных приведены на рисунке 3.

Особое значение для анализа работоспособности и энергетических параметров инвертора имеет характер изменения входного тока от параметров нагрузки  $I_d^* = f(K_H)$ , а для рассматриваемого инвертора также и от коэффициента магнитной связи между коммутирующей обмоткой и нагрузкой  $I_d^* = f(K_{CB})$ .

Для построения зависимости  $I_d^* = f(K_H, K_{CB})$  были произведены дополнительные расчеты временных зависимостей токов и напряжений в исследуемом инверторе при варьировании значений  $K_H$  и  $K_{CB}$  в пределах  $0,3 \leq K_H \leq 1,5$  с шагом 0,2 и  $0,4 \leq K_{CB} \leq 0,7$  с шагом 0,05.

Результаты исследований приведены в виде графика на рисунке 4.

```

редистрирование 2013.DAT - Ver 2.0.1807 x86 Администратор
D:\PACLS\2013.DAT 866
Полумостовой инвертор
Гальваническая развязка
ПМСТ2013
E 01001002 100.
C 01003004 1. 50.
C 02004002 1. 50.
C 03008009 .25
R 01007008 0.7
L 01001003 200.
L 02003005 1.
L 03006002 1.
L 04004007 1.33
L 05009004 2.67
D 01003002 10000. 10000.
TD01005004 2.0 2.0
TD02004006 2.0 1.0

0.55 0204K
0.55 0304K
0.
0.
0.
2.
0.15952
KCOMM
Это СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ИНВ 026025
SUM 099027001008026
L.
GR 001002015010012017030021
WIND

ВХОД VOL C 01010C 02011C 03012
ВХОД VOL TD01030D 01042TD02031
ВХОД ТОК L 01015L 03016L 04017L 02018
ВХОД ТОК TD01021TD02022L 05019

ВХОД TIME 002
ВХОД CONST001 1.

F
001 метод расчета
0.02 шаг расчета
001 число вентилях, определяющих периодичность процессов в схеме
TD01 имена вентилях
30. время расчета
C 01
F
0.
0.02
005
TD01
5.
01
01
F
NOLIST
'2013.OUT'
T id1 uc1 uc3 il4 ut1 it1
END
1Помощь 2Сохран 3 4Выход 5 6Просм 7Торск 8ANSI 9

```

Рисунок 2 – Листинг входных данных ПАКЛС

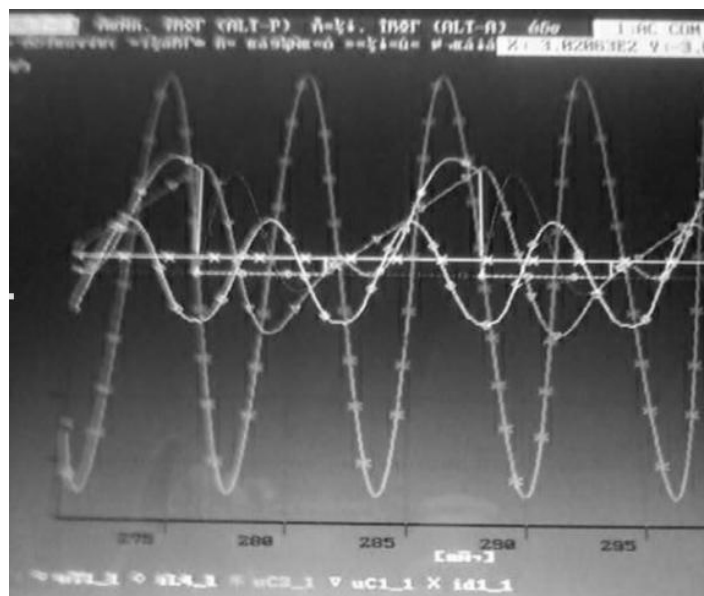


Рисунок 3 – Результаты расчета ПАКЛС

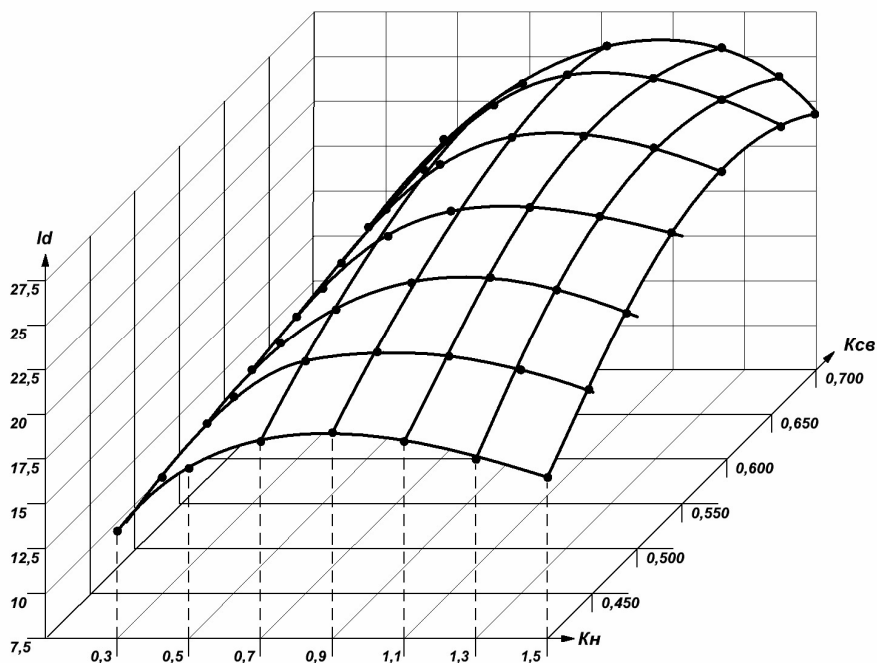


Рисунок 4 – Графики зависимости  $I_d^* = f(K_H^*, K_{CB}^*)$

Как следует из графиков, приведенных на рисунке 4, нагрузочная характеристика инвертора (зависимость входного тока инвертора, пропорциональная его мощности, от коэффициента нагрузки) существенно зависит как от параметров коэффициента нагрузки  $K_H$ , так и от параметров коэффициента магнитной связи  $K_{CB}$  и максимум тока, при изменении  $K_H$ , достигается при различных  $K_{CB}$ .

Особенностью предлагаемого способа согласования и гальванической развязки является возможность сравнительно простого изменения коэффициента связи  $K_{CB}$ . Для этого достаточно изменить взаимное положение обмоток. Следовательно, в рассматриваемом полумостовом резонансном инверторе при использовании воздушного трансформатора, кроме решения задачи согласования и гальванической развязки нагрузки появляется возможность очень простым способом обеспечить настройку наилучших режимов работы тиристоров инвертора путем изменения взаиморасположения коммутирующей и нагрузочной обмоток. При этом режим работы тиристоров инвертора по току, напряжению и времени, предоставляемому тиристорам для восстановления своих запирающих свойств, может изменяться в значительных пределах.

## Выводы

1. Создана математическая модель, которая позволяет исследовать нагрузочные характеристика инвертора при использовании предложенного узла гальванической развязки нагрузки.

2. Полученные зависимости позволяют применить их для расчета характеристик инверторов различной мощности и частоты.

3. Математическая модель позволяет определить параметры нагрузочных характеристик инвертора при изменении параметров коэффициента нагрузки  $K_H$  и коэффициента магнитной связи  $K_{CB}$

4. Дальнейшие исследования узла гальванической развязки должны оценить возможность использования предложенной схемы для согласования инвертора с нагрузками, требующими различных уровней рабочего напряжения путем изменения коэффициента соотношения индуктивностей  $L_{CB}$  и  $L_H$  (коэффициент  $K_{L_{CB}}$ ) и исследовать влияние  $K_{L_{CB}}$  на нагрузочные характеристики и на уровень напряжения нагрузки

### **Библиографический список**

1. Лавлес Д.Л. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева / Лавлес Д.Л. // Силовая электроника. - 2007. - №4.

2. Гусев Ю.М. Согласование тиристорного преобразователя частоты с нагрузкой / Гусев Ю.М., Белкин А.К., Шуляк А.А., Рогинская Л.Э. // Технічна електродинаміка. - Спец выпуск, 1998. - №2, Т2. – С. 23-26.

3. Саратовский А.Н. Особенности способов согласования тиристорного преобразователя частоты с индукционной нагрузкой / Саратовский А. Н. - Сборник научных работ студентов Донбасского государственного технического университета. - Вып. 3 Ч. II. - Алчевск, 2010. - С.143-150.

4. Кобец Д.В. Параметрическая оптимизация магнитосвязанных устройств согласования источников питания с нагрузкой / Кобец Д.В., Ламанов С.Л./ - Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - Вып. 33. – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – С. 359 -364.

5. Тиристорные преобразователи частоты / Белкин А. К, Костюкова Т.П., Рогинская Л.Э., Шуляк А.А. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.: ил.

6. Васильев А.С. Система автоматизированного исследования схем силовой электроники / Васильев А С., Дзалиев С В., Федосин С.Л., Блинов Ю. И // Техническая электродинамика. - 1985. - №1. - С. 3-6.

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

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Лущиком В.Д.*