



УДК 621.314.572

Ю. И. Блинов, К. Ю. Блинов, С. А. Галунин, С. Г. Гуревич,
В. В. Ишин, Б. Я. Качанов, Э. Р. Маннанов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Устойчивость работы электротехнологической нагрузки от высокочастотного источника питания

Приведены некоторые тенденции развития современных процессов электромагнитной обработки различных материалов. Показана роль высокочастотных инверторов для обработки материалов. Обсуждены результаты стабильности схемы резонансного инвертора без системы управления. Представлены различные режимы работы резонансного инвертора с объяснением его работы в терминах теории катастроф.

Высокая частота, источник питания, инвертор, устойчивость инвертора

В современной высокочастотной (ВЧ) электротехнологии для обработки различных материалов можно отметить следующие бурно развивающиеся направления:

- создание наноструктурированных материалов;
- обработка различных материалов с газовым рафинированием;
- обработка различных материалов в вакууме или в управляемой газовой среде;
- импульсная термообработка различных материалов;
- ВЧ-обработка изделий сложной формы;
- создание и обработка материалов в холодных тиглях.

Конечно же, развитие новых направлений электротехнологии невозможно без математического моделирования сложных электромагнитных систем. Благодаря стремительному развитию вычислительной техники в последнее время достигнуты значительные успехи в этой области, но имеется и ряд проблем в численном моделировании, которые, несомненно, будут решены.

Источник питания (ИП) – одна из основных частей ВЧ-электротехнологической установки, а ВЧ-инвертор в свою очередь является основной частью ИП. К одной электротехнологии предъявляются не очень жесткие требования к ИП, но для других параметры ИП могут варьироваться в

весьма широком диапазоне. Существуют особые требования для инвертора со стороны ВЧ-электромагнитной системы, например устойчивость при быстром изменении параметров нагрузки, специальный закон изменения мощности, передаваемой в электромагнитную систему, наличие крутопадающей внешней характеристики и т. д. Все эти требования могут быть сформулированы только при изучении поведения ИП, а особенно инвертора, при работе на различную нагрузку. Численное моделирование электромагнитных процессов в инверторе в широком диапазоне изменения как параметров нагрузки, так и его собственных параметров позволяет создать надежный и устойчивый ВЧ-инвертор.

Современные ВЧ-электротехнологические процессы требуют создания инверторов, которые способны работать на нагрузку при изменении ее параметров от короткого замыкания до холостого хода. Разработка таких инверторов требует создания теории их устойчивости при изменении параметров как самого инвертора, так и нагрузки в достаточно широком диапазоне, характерном для индукционного нагрева. Электромагнитные процессы в инверторах при численном моделировании описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка с нелинейными коэффициентами.

Полупроводниковые источники питания для индукционного нагрева обычно работают в частотном диапазоне от одного до нескольких сотен кГц. Анализ схемных конфигураций, используемых в инверторе, показывает, что для целей индукционного нагрева может применяться резонансный инвертор [1].

Существует класс ВЧ-инверторов – резонансные инверторы с удвоением частоты, и их подкласс – резонансные инверторы с удвоением частоты и обратными диодами [2]. Главные особенности резонансных инверторов с удвоением частоты и обратными диодами:

- процесс выключения транзистора происходит всегда при нулевом токе, а значит, коммутационные потери при выключении – незначительны;

- простая система управления инвертором, удовлетворяющая только требованиям технологии, и исключая необходимость слежения за режимом работы транзистора;

- неограниченное увеличение мощности инвертора путем параллельного включения однотипных транзисторных мостов, что позволяет применять оба способа управления мощностью в нагрузке – частотный или/и фазовый. Мощность единичного транзисторного блока при этом определяется только предельными энергетическими параметрами транзистора.

Одна из конфигураций схемы резонансного инвертора с удвоением частоты и обратными диодами может иметь четыре индуктивности L_c (по одной в каждом плече моста) или две в диагоналях моста (рис. 1). В любом случае собственная частота инвертора определена следующими элементами – коммутирующей и разделительной емкостями (C_c и C_d соответственно), суммарной индуктивностью коммутирующего контура L_c и именно эти элементы определяют его резонансную частоту. C_L и L_L – параметры нагрузочного контура.

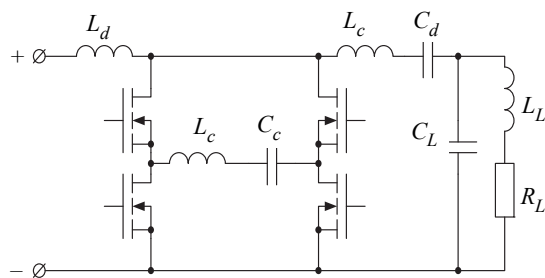


Рис. 1

Более простая схема вышеупомянутого инвертора может быть получена, если весь мост инвертора (рис. 1) заменить только одним ключом – транзистором, лампой, тиристором (рис. 2). При такой модификации инвертора коммутирующая индуктивность L_c может быть соединена последовательно с транзистором либо с разделительным конденсатором C_d [3]. Название этого инвертора в переводе с английского – резонансный токовый прерыватель, или четверть-мост. В работах российских ученых используется термин «релаксатор».

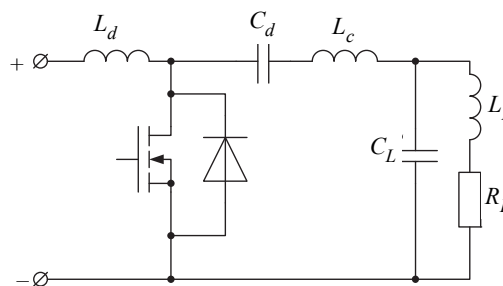


Рис. 2

Стандартные режимы работы этих инверторов известны и описаны в различных публикациях, например [4]. Данная статья посвящена изучению устойчивости резонансных инверторов.

Устойчивость ВЧ-инвертора для электромагнитной обработки различных материалов означает безаварийный режим работы при изменении параметров нагрузки от короткого замыкания до холостого хода.

Специалисты в области ВЧ-инверторов изучают устойчивость ВЧ-силовой электрической схемы инвертора как результат общей устойчивости ВЧ-силовой электрической схемы инвертора и его системы управления. Имеется и ряд публикаций по этому вопросу, например [5], но обычно эти статьи посвящены изучению только совместного режима работы системы управления и ВЧ-силовой части инвертора.

Устойчивость ВЧ-силовой электрической схемы инвертора – важная составляющая общей устойчивости инвертора. Анализ устойчивости позволяет определить количественно как диапазон изменения параметров нагрузки, так и диапазон изменения параметров элементов силовой схемы инвертора. Обычно инженеры определяют предварительные параметры схемы ВЧ-инвертора при его начальном проектировании, и только после этого рассчитанные значения следует уточнить.

Устойчивость инвертора (его работа без опрокидывания) при внезапном изменении параметров нагрузки также должна изучаться, потому что эта проблема очень важна [6] для его надежной работы.

Важна и устойчивость инвертора в переходном процессе, и прежде всего при пуске инвертора. Надежный способ пуска инвертора зависит от алгоритма пуска, начальных условий пуска – напряжений на емкостях, параметров силовой схемы. Для ряда схем инверторов разработаны специальные устройства пуска, которые устанавливаются в схему и разработанный алгоритм для всей ВЧ-силовой схемы обеспечивает надежный способ пуска. Специальные начальные условия, например заданное напряжение на емкостях, также могут обеспечить устойчивый пуск ВЧ-инвертора, и мы пытаемся определить эти условия, потому что этот способ имеет несомненные экономические преимущества.

Разработаны различные методы анализа как линейных, так и нелинейных электрических цепей. Известно, что устойчивость сложной электрической цепи может быть оценена из системы дифференциальных уравнений, которая ее описывает. Не существует никаких проблем, когда имеется система линейных дифференциальных уравнений. Однако инвертор описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, и трудности анализа таких систем общеизвестны.

Сегодня для анализа различных объектов в строительстве, в теории генераторов с самовозбуждением, механике и других областях применяются теория катастроф [7] и теория бифуркаций [8]. К сожалению, методы и подходы этих теорий для анализа нелинейных электрических цепей используются довольно-таки ограниченно ввиду их сложности, а также по причине наличия различных видов нелинейностей в таких системах. Тем не менее, насущная необходимость развития теории ВЧ-инверторов и разработки надежных схемных решений ВЧ-инверторов заставляет начинать такие исследования. Более того, ВЧ-инверторы для индукционного нагрева в подавляющем числе случаев работают на колебательный контур, состоящий из индуктора и компенсирующей емкости. Такая ситуация приводит к тому, что ток индуктора и напряжение на нем имеют дифференциальную зависимость, что существенно облегчает применение различных подходов к анализу устойчивости таких систем, следуя разработанным современным теориям.

Существует также и другая взаимосвязанная и органичная проблема при анализе устойчивости –

определение установившегося режима работы инвертора. Сегодня анализ установившегося режима таких систем позволяет определить напряжения и токи каждого элемента инвертора при анализе переходного процесса. Если установившийся режим работы достигается при численном интегрировании через переходный процесс, токи и напряжения в инверторе могут быть получены в результате процесса пуска. В этом случае существует один «простой вопрос»: что такое установившийся процесс или когда нужно остановить расчет переходного процесса. К сожалению, сегодня мы не готовы дать простые и ясные ответы на эти и другие, более сложные вопросы, касающиеся этой темы.

Итак, впервые приведем режимы работы ВЧ-инвертора, которые характеризуются как хаос. Данные режимы необходимо исключить из всех возможных режимов работы инвертора, так как они не дают устойчивой повторяемости электро-технологического процесса.

Рассмотрим некоторые примеры различных процессов в резонансном инверторе в установившихся и переходных процессах. При этом на простейшей вентильной схеме только с одним нелинейным элементом приведем различные режимы при незначительном изменении как параметров нагрузки, так и уровня заряда разделительного конденсатора. Отметим также, что в ВЧ-электротехнологиях сплошь и рядом имеются сложные нагрузки, которые ведут к комплексным технологическим процессам, а значит, и к нетривиальным вентильным режимам источников питания.

На рис. 3 показан типовой режим работы инвертора во временной области, а на рис. 4 – его фазовый портрет в системе координат – зависимость тока индуктора от напряжения на нем. При этом замкнутая кривая на фазовом портрете означает, что имеется периодический режим.

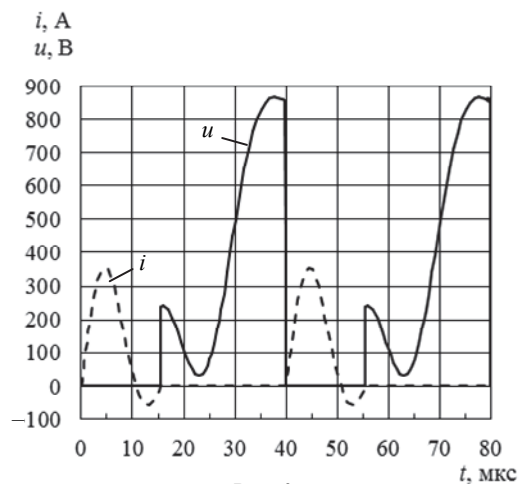


Рис. 3

Аналогичные процессы представлены на рис. 5 и 6. В этом случае наблюдается эффект удвоения периода в инверторе при незначительных колебаниях параметров нагрузки (не более чем на 10%). Сравнение рис. 3 и 5 показывает существенное изменение режима работы транзистора.

Дальнейшее изменение параметров нагрузки дает следующие режимы работы. Рис. 7 демонстрирует установившийся процесс с неопределенным периодом. Переходный процесс с низкочастотной компонентой представлен на рис. 8. Этот процесс может быть классифицирован как хаос,

потому что не существует повторяемости режима работы. В то же время, этот режим также является устойчивым, но низкочастотная модуляция может оказывать огромное влияние на электромагнитную обработку, и такие режимы должны быть заранее исключены. Изменение уровня заряда разделительного конденсатора C_d на 10% приводит к несколько иному вентильному режиму (рис. 9), но он подобен предыдущему (рис. 7). Рис. 10 демонстрирует фазовый портрет процесс пуска для данного вентильного режима.

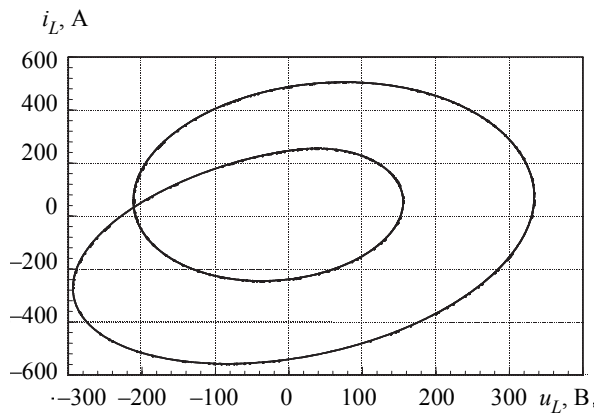


Рис. 4

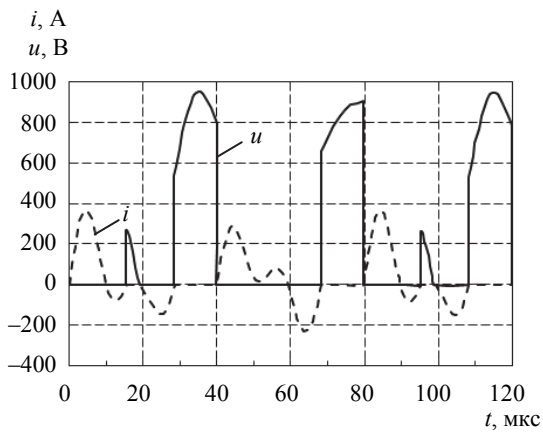


Рис. 5

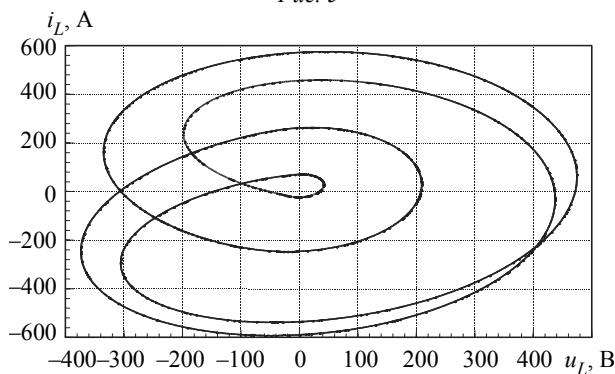


Рис. 6

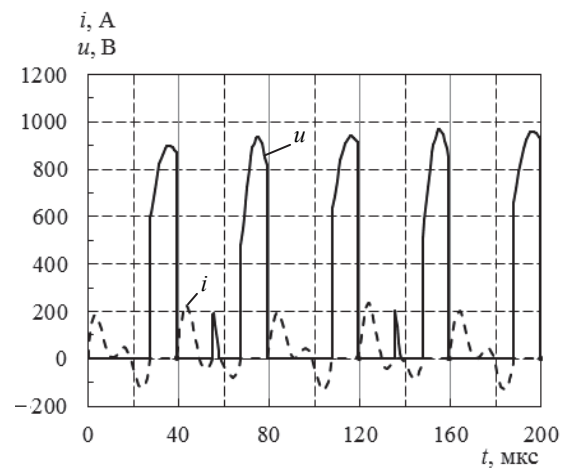


Рис. 7

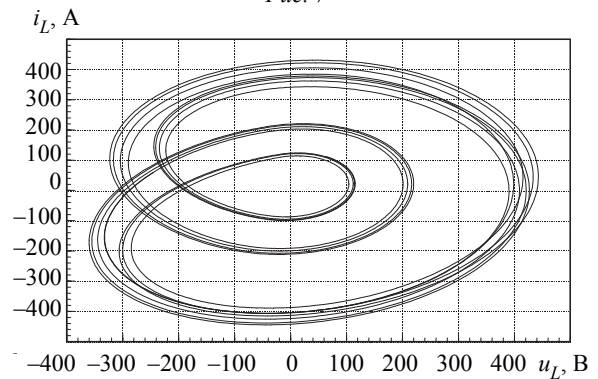


Рис. 8

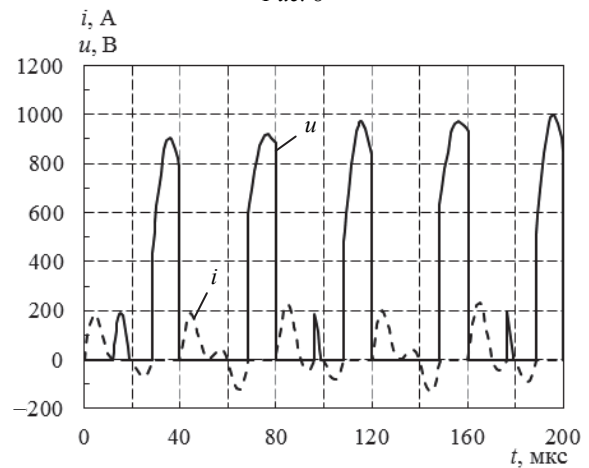


Рис. 9

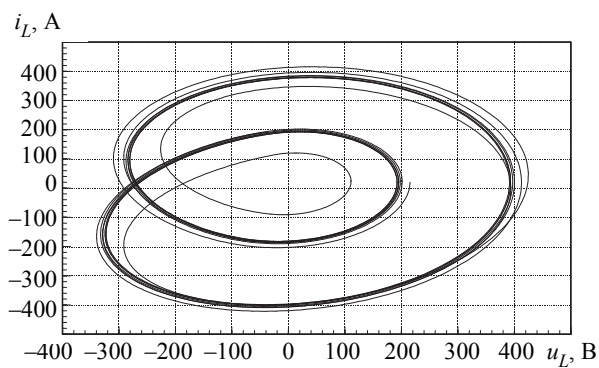


Рис. 10

Изменение уровня заряда разделительного конденсатора приводит к различным условиям пуска и при определенном его значении возможно опрокидывание инвертора.

Подобные результаты могут быть получены и для мостового резонансного инвертора, как и

несимметричные режимы его работы. Несимметричные режимы работы резонансного инвертора – очень интересная тема, и исследования в этом направлении должны быть продолжены.

Итак, впервые для одной из простейших схем ВЧ-инверторов, содержащей только один элемент с нелинейными вольтамперными характеристиками, получены неустановившиеся режимы работы во временной области, которые в терминах теории катастроф классифицируются как хаос. Изменение как начальных условий пуска инвертора, так и параметров колебательного контура приводит к исчезновению данного эффекта.

Работа выполнена в рамках гранта № П668 НК-772П Министерства образования и науки РФ по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. State of the future trends of solid state power supplies for induction heating / E. Dede, J. Gonzales, V. Esteve, J. Jordan // Proc. of the Intern. Induction Heating Seminar. Padua (Italy). 13–15.05. 1998. P. 3–10.

2. Resonant transistor inverters for induction heating / Yu. Blinov, B. Kachanov, A. Shagin, V. Ishin // Proc. of Int. Seminar on Heating by Internal Sources. Padua, 2001. P. 85–90.

3. Blinov Yu., Vasiliev A. The high-frequency power supplies for electrical processes plant // Electric Technology USSR. 1987. № 2. P. 109–117.

4. Induction heat treatment / V. Rudnev, R. Cook, D. Loveless, M. Black. New York: Marcek Dekker, Inc., Monticello, 1997. P. 765–911.

5. Fossas E., Olivar G. Study of chaos in the buck converter // IEEE Trans. on Circuits and Systems – I: Fundamental theory and applications. 1999. Vol. 43, № 1. 1996. P. 13–25.

6. Espi J. M., Dede E. J. Design considerations for three element L-LC resonant inverters for induction heating // Intern. J. on Electronics. 1999. Vol. 86, № 10. P. 1205–1216.

7. Gilmore R. Catastrophe theory for scientists and engineers. New York: John Wiley & Sons Inc. 1981. 635 p.

8. Фейгин М. И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями. М.: Наука, 1994. 288 с.

Yu. I. Blinov, K. Yu. Blinov, S. A. Galunin, S. G. Gurevich, V. V. Ishin, B. Ya. Kachanov, E. R. Mannanov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

STABILITY OPERATION OF ELECTROTECHNOLOGICAL LOAD FROM HIGH-FREQUENCY POWER SUPPLY

Some trends of modern electromagnetic processing of different materials are pointed out. The role of high frequency inverters for treatment of materials is shown. Results of resonant inverter scheme stability without control system are discussed. Classification of inverter stability is done. Different modes of resonance inverter operation are presented with the use of theory of catastrophe.

High-frequency, power supply, inverter, stability of inverter