

УДК 621.365.5

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И УПРАВЛЕНИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК

С.В. Тригорлый, Д.В. Джема, В.А. Лаврентьев, В.В. Ермолаева

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Программно-аппаратный комплекс предназначен для решения задач разработки СВЧ электротехнологических процессов и установок и управления их рабочими режимами. Комплекс позволяет рассчитывать СВЧ-камеры различного типа, моделировать процессы электродинамики, тепломассопереноса и термомеханики, решать задачи синтеза систем интеллектуального управления. Предложена и реализована структурная схема программно-аппаратной части комплекса для СВЧ-камер с бегущей волной для термообработки диэлектрических материалов. В качестве аппаратной части используется микроконтроллер, для повышения качества регулирования и контроля полученных моделей вводится контур управления по температуре с помощью ИК-термометра, позволяющего измерять температуру объекта непосредственно в поле СВЧ, используя запердельный волновод. При накоплении определенного количества результатов моделирования и измерений процессов СВЧ-термообработки формируется база знаний, которая может быть подключена к алгоритмам управления на базе нечеткой логики.

Ключевые слова: *программно-аппаратный комплекс, математическое моделирование, сверхвысокочастотные процессы и установки, электродинамика, тепломассообмен, термомеханика, системы интеллектуального управления.*

При разработке сверхвысокочастотных (СВЧ) электротехнологических процессов и установок значительная доля в общем объеме работ приходится на разработку и проектирование оборудования, отработку технологических режимов на пилотных установках. Особую значимость эти работы приобретают при использовании автоматизированных производственных систем в условиях повышения требований к качеству выпускаемой продукции и энергетической эффективности промышленных технологий.

В этой связи актуальной задачей является разработка программно-аппаратного комплекса, позволяющего ускорить цикл создания СВЧ электротехнологических установок (СВЧ ЭТУ).

Целью данной работы является разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК), имеющего набор программных средств для реализации единого информационного пространства, включающего в себя математические модели

Тригорлый Сергей Викторович (к.т.н.), доцент, зав. кафедрой «Автоматизированные электротехнологические установки и системы».

Джема Дмитрий Вячеславович, инженер кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы».

Лаврентьев Владимир Александрович (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы».

Ермолаева Вероника Викторовна (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы».

СВЧ электротехнологических процессов и установок, качественный интерфейс пользователя, а также набор технических средств, включая систему управления на базе нечеткой логики.

Рассмотрим *назначение основных блоков ПАК и их взаимодействие*. Составные элементы ПАК показаны на блок-схеме (рис. 1.) Комплекс включает в себя следующие основные компоненты:

- блок информационного обмена и ввода данных о решаемых задачах;
- блок синтеза системы управления СВЧ ЭТУ;
- блок разработки рабочих камер СВЧ ЭТУ;
- блок анализа СВЧ ЭТУ;
- блок экспериментальных исследований;
- блок математической поддержки.

Блок разработки рабочих камер СВЧ ЭТУ (см. блок-схему на рис. 1) предусматривает выбор типа СВЧ-камеры (лучевого типа, с бегущей волной или стоячей волной), выбор режима термообработки (периодический или методический), выбор технологического процесса (нагрев, сушка, плавление, размораживание и др.) и соответствующей математической модели из блока математической поддержки.

В блоке анализа СВЧ ЭТУ осуществляется выбор математической модели для заданного типа СВЧ ЭТУ и технологического процесса с учетом требуемой точности к моделированию. По результатам моделирования оценивается комплекс показателей, характеризующих технологический процесс (распределение температуры, влажности, термомеханических напряжений по объему объекта в различные моменты времени и др.), а также энергетические и экономические показатели работы СВЧ ЭТУ.

Блок математической поддержки кроме указанных выше моделей СВЧ ЭТУ для технологических процессов содержит также модели тепло- и массоотдачи и технико-экономической оптимизации. Модели тепло- и массоотдачи используются как вспомогательные при математическом моделировании процессов нагрева и сушки объектов в СВЧ ЭТУ. В частности, на основе данных моделей определяются коэффициенты тепло- и массоотдачи для различной формы и расположения объектов в пространстве при свободном и вынужденном движении среды. При моделировании учитываются зависимости теплофизических свойств окружающего воздуха от температуры.

Блок синтеза системы управления СВЧ ЭТУ включает следующие основные процедуры:

- а) выбор типа СВЧ установки и режима термообработки;
- б) выбор аппаратной платформы, определение исполнительных механизмов и подключение датчиков контроля технологического процесса;
- в) ввод регулируемых параметров технологического процесса и ограничений на их величину;
- г) синтез системы управления СВЧ ЭТУ с учетом выбранного алгоритма управления, аппаратной платформы и имеющейся базы знаний о поведении объекта управления в ходе технологического процесса;
- д) моделирование управляющих воздействий.

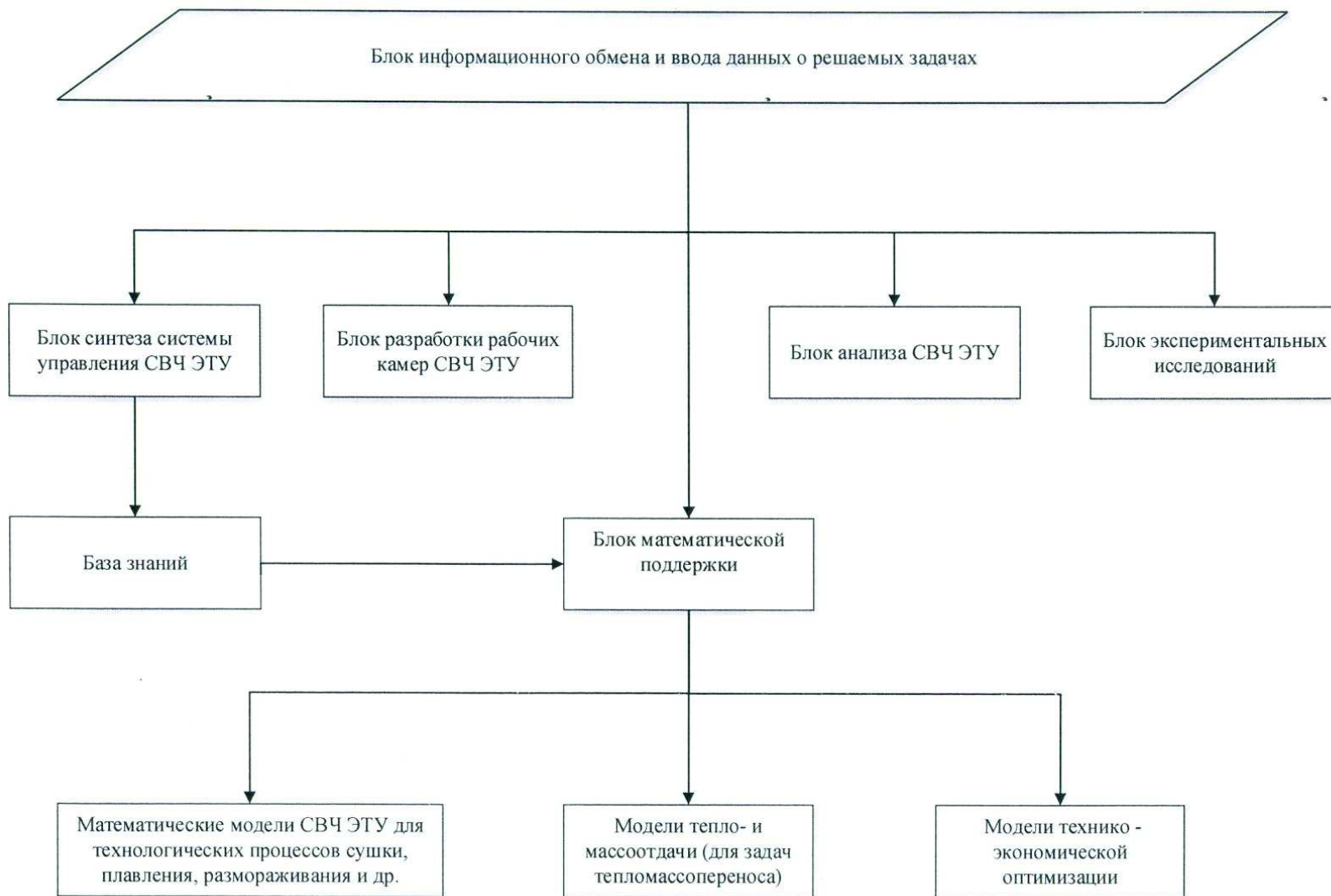


Рис. 1. Блок-схема программно-аппаратного комплекса для разработки СВЧ электротехнологических процессов и установок и управления их рабочими режимами

Как видно из блок-схемы (см. рис. 1), в процесс синтеза системы управления происходит взаимодействие с *базой знаний*. В свою очередь, база знаний связана с блоком математической поддержки для формирования необходимой математической модели, используемой при управлении. Кроме того, предусмотрено пополнение базы знаний по данным результатов управления СВЧ ЭТУ.

Блок экспериментальных исследований предназначен в первую очередь для получения недостающих сведений об электрофизических свойствах обрабатываемых материалов в электромагнитном поле. В частности, учитывая потребность в высокотемпературной обработке диэлектриков в поле СВЧ, представляет интерес получение данных об относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенсе угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ в зависимости от температуры. Результаты экспериментов обрабатываются и пополняют базу данных о физических свойствах материалов и сред.

Математические модели, адекватно отражающие физические процессы, происходящие при воздействии СВЧ электромагнитных колебаний на обрабатываемый объект, являются основой для решения задач разработки автоматизированных энергоэффективных СВЧ ЭТУ, позволяющих получить требуемое качество продукции.

Подавляющее большинство прикладных задач по моделированию СВЧ технологических процессов и установок являются оптимизационными. Рассмотрим **критерии оптимизации, ограничения и управляющие воздействия** применительно к СВЧ-установкам методического типа. СВЧ ЭТУ периодического действия с точки зрения задач управления можно рассматривать как частный случай установок методического действия. Для СВЧ ЭТУ методического действия характерно решение следующих задач управления: перевод системы из начального состояния в заданное, стабилизация и слежение [1].

В качестве примера приведем задачу оптимизации при нагреве диэлектрика в СВЧ-камере с бегущей волной на нерегулярном волноводе (рис. 2). Рассматриваем перевод объекта из начального теплового состояния $T(M)$ в заданное с температурой $T_{\max}$, критерием оптимизации является точность перевода к заданному моменту времени:

$$J = \max_D |T(M, t_{\max}, q) - T_{\max}| \leq \psi, \quad (1)$$

где M – точка в области D объекта термообработки; $t_{\max}$ – заданное время термообработки; q – управляющая функция; ψ – допуск на равномерность нагрева. В качестве ограничения рассматривается наилучшее согласование СВЧ-камеры с линией передачи (максимальный КПД), которое определяется по минимальному значению индуктивного погонного сопротивления СВЧ-камеры.

Основными управляющими воздействиями на процессы термообработки объектов в СВЧ-установках являются: мощность СВЧ генератора, время воздействия, температура нагретого воздуха (при дополнительном поверхностном нагреве с целью выравнивания температуры по объему объекта), скорость транспортировки объекта нагрева (в установках методического типа).

В результате математического моделирования рабочих камер СВЧ ЭТУ определяются их геометрические размеры, требуемая мощность СВЧ генератора, режим работы СВЧ генератора для выполнения установленных технологических показателей.

Разработанное авторами программное обеспечение для математического моделирования технологических процессов в СВЧ-камерах с бегущей волной и лу-

чевого типа [1–4], написанное на различных алгоритмических языках, в настоящее время реализуются в системе MATLAB. Данная система используется как для автоматизированного моделирования и разработки СВЧ ЭТУ, так и для решения задач интеллектуального управления.

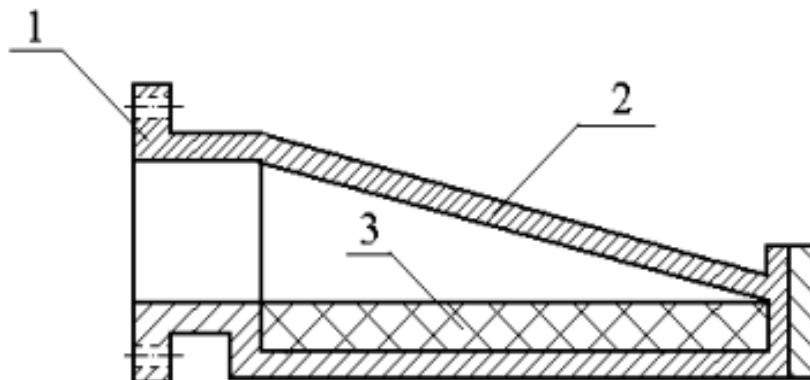


Рис. 2. Продольное сечение СВЧ-камеры на базе прямоугольного нерегулярного волновода:

1 – фланец волновода, 2 – согласующий экран, 3 – нагреваемый диэлектрик

В качестве примера ниже приведены возможности интеграции MATLAB Compiler для создания средств математического моделирования и управления процессами СВЧ-термообработки диэлектриков в камерах с бегущей волной.

На рис. 3 (см. «Реализованная часть») представлена структурная схема программно-аппаратного комплекса СВЧ нагрева для камер с бегущей волной на нерегулярном волноводе. Эта часть комплекса предназначена для определения оптимальных параметров СВЧ-камер с бегущей волной на нерегулярном прямоугольном волноводе (рис. 2), а также для моделирования нестационарных тепловых процессов в нагреваемом диэлектрике. Для построения математических моделей электродинамики и теплопроводности используются соответственно метод эквивалентных схем и метод элементарных тепловых балансов [1].

Модель формируется в среде Matlab 2012 с помощью встроенного языка программирования и реализованных алгоритмов. После отладки модели в интегрированной среде применяется инструмент MATLAB Compiler [5], что позволяет интегрировать полученный код в стороннее приложение. В MATLAB Compiler определяются требуемые функции, к которым нужен доступ, и формируется либо файл приложения *exe*, либо файл библиотеки *dll*. В дальнейшем для запуска исполняемого файла не требуется среда Matlab.

Клиентское приложение, разработанное на платформе Visual Studio 2010 на языке программирования C#, является управляющим ядром программно-аппаратного комплекса. Приложение предоставляет удобный ввод данных для моделирования и осуществляет связь с базой данных, разработанной на платформе Sql Server 2010. В основе работы приложения лежит модель процесса с заданными параметрами. Для каждого процесса в базе данных сохраняются исходные данные, которые посредством Matlab Runtime Compiler передаются в математическую модель.

Модель рассчитывает процесс и возвращает результаты в клиентское приложение. Данные расчета также сохраняются в базе данных для последующего использования. Благодаря такому подходу становится возможным провести моделирование нестационарных тепловых процессов в зависимости от нескольких требуемых параметров.

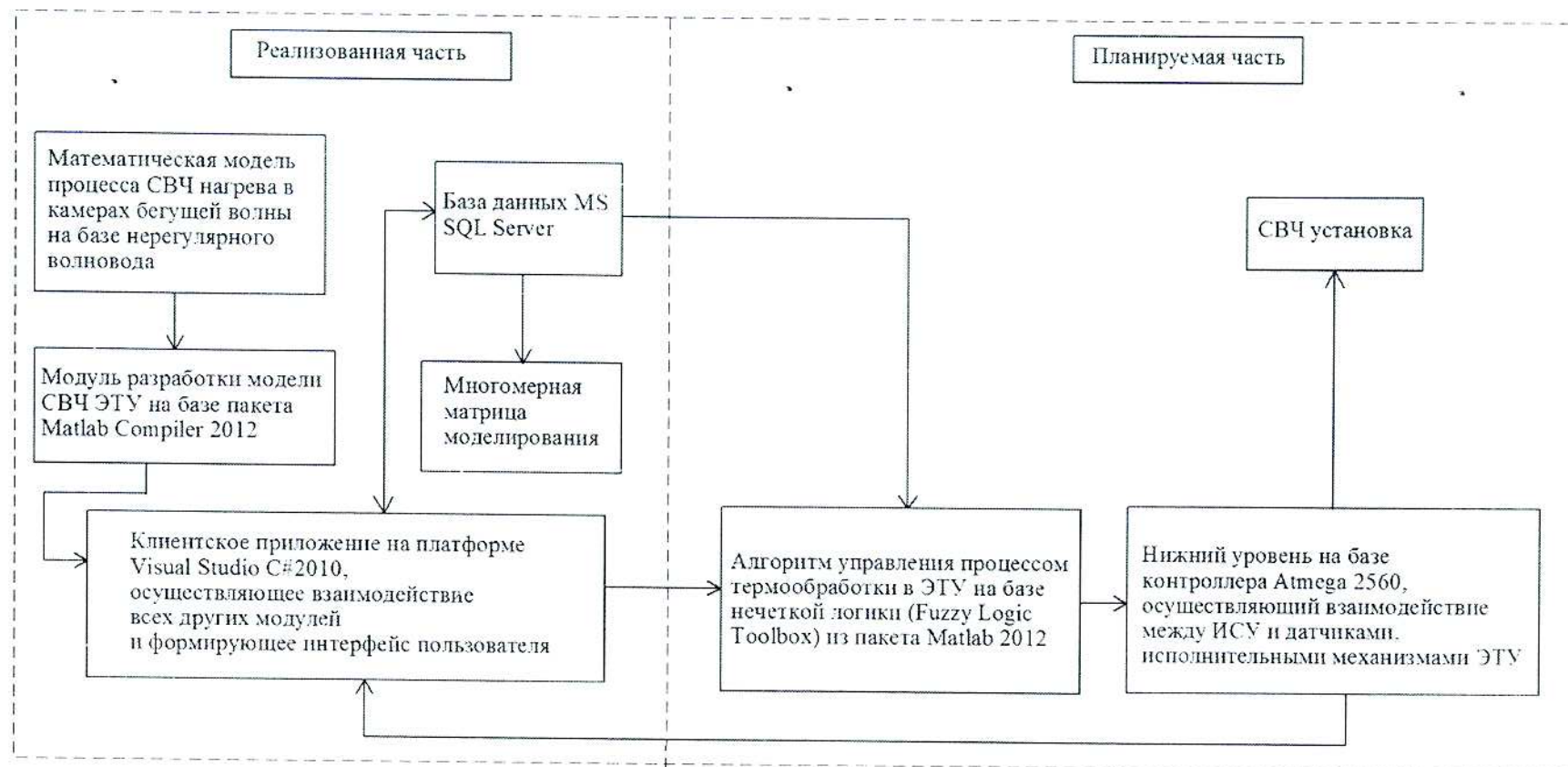


Рис. 3. Структурная схема программно-аппаратного комплекса СВЧ-нагрева в камерах бегущей волны на нерегулярном волноводе

В результате получается многомерная матрица распределения температурного поля в зависимости от таких параметров, как мощность и частота СВЧ-генератора, время воздействия, физические свойства диэлектрика и др. Используя полученную многомерную матрицу, клиентское приложение позволяет провести анализ полученных результатов в графическом виде.

Результаты моделирования температурного поля в продольном сечении диэлектрика при его нагреве в СВЧ рабочей камере с бегущей волной на нерегулярном прямоугольном волноводе приведены на рис. 4. В расчетах использовались следующие исходные данные: частота СВЧ генератора 2450 МГц, начальная температура 293 К, конечная температура 353 К, допуск на максимальный перепад температур $\psi = 15$ К, толщина слоя диэлектрика (силикагеля) 1,3 см. Получены оптимальные расчетные параметры СВЧ ЭТУ: мощность СВЧ генератора 300 Вт, длина рабочей камеры 24 см, время нагрева до заданной температуры $t = 210$ с.

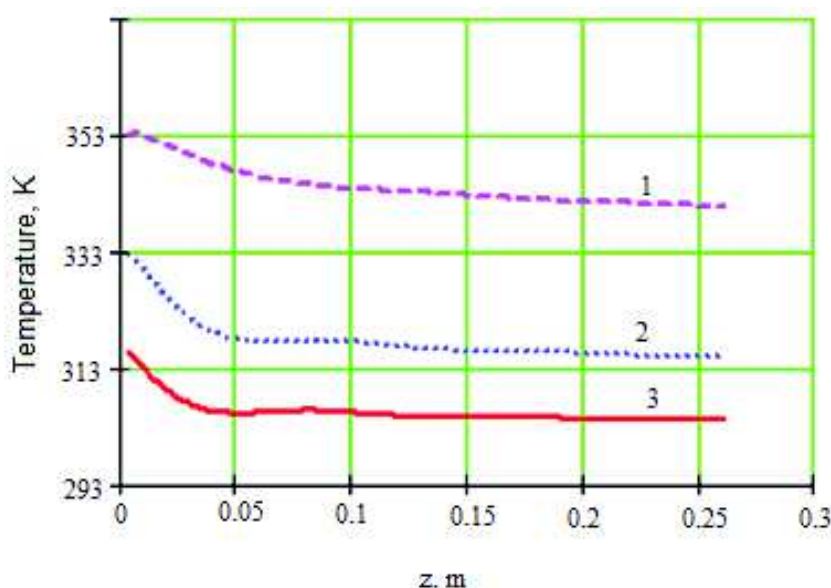


Рис. 4. Распределение температурного поля в продольном сечении z диэлектрика для разных моментов времени t :
1 – для $t = 210$ с; 2 – для $t = 100$ с; 3 – для $t = 50$ с

Дальнейшим развитием проекта является реализация интеллектуальной системы управления процессом СВЧ-термообработки (см. рис. 3 – «Планируемая часть»). Для решения задач управления необходимо получать информацию о регулируемых параметрах технологического процесса, например о температуре и влажности нагреваемого в СВЧ ЭТУ объекта. Однако измерить эти параметры в полном объеме для всего объекта в поле СВЧ затруднительно. Возможно лишь локальное измерение температуры наружной поверхности объекта и измерение его влажности за пределами СВЧ-камеры.

С целью снятия данных ограничений и получения высокого качества управления в данном проекте предлагается задавать закон регулирования с использованием многомерной матрицы, полученной на этапе моделирования процесса СВЧ-термообработки. Законы регулирования планируется реализовать, используя механизмы нечеткой логики с применением пакета Fuzzy Logic Toolbox MATLAB [6].

На основе результатов моделирования, сформированных в многомерной матрице, а также алгоритма управления на базе нечеткой логики определяются характер и степень управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

В качестве основы аппаратной части применяется микроконтроллер Atmega 2560. Используя модули сопряжения на базе релейных выходов и цифро-аналогового преобразователя, аппаратная часть задает требуемый режим СВЧ-термообработки.

Для повышения качества регулирования и контроля полученных моделей вводится контур управления по температуре нагреваемого диэлектрика. Температура измеряется с помощью инфракрасного (ИК) термометра на базе датчика MLX90614-BCI производства Melexis. ИК-термометр позволяет измерять температуру объекта непосредственно в поле СВЧ, используя запердельный волновод.

Посредством данного контура проверяется адекватность полученных моделей и в случае необходимости осуществляется корректировка управляющих воздействий. Результаты измерений температуры сохраняются в базе данных. При накоплении определенного количества результатов моделирования и измерений процессов СВЧ-термообработки формируется база знаний, которая подключается к алгоритмам управления на базе нечеткой логики.

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Программно-аппаратный комплекс является открытой системой с точки зрения программного обеспечения, что позволяет дополнить его новыми математическими моделями, в частности в области решения трехмерных электродинамических задач в различных СВЧ-камерах, задач тепломассопереноса, синтеза интеллектуальных систем управления СВЧ ЭТУ различного типа.

2. Применение математического моделирования для реализации систем управления СВЧ ЭТУ на базе нечеткой логики с последующей коррекцией по сигналам доступной обратной связи дает возможность дополнить информацию с датчиков технологических процессов и обеспечить необходимое качество управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Архангельский Ю.С.* Компьютерное моделирование СВЧ электротермических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 212 с.
2. *Архангельский Ю.С.* Моделирование в системе MathCAD Plus 6.0 процессов СВЧ сушки диэлектриков / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый, Д.В. Джема // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: Межвуз. науч. сб. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1999. – С. 77-82.
3. *Тригорлый С.В.* Численное моделирование и оптимизация процессов сверхвысокочастотной термообработки диэлектриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41. – № 3. – С. 112–119.
4. *Архангельский Ю.С.* Разработка комплекса программ для моделирования СВЧ технологических процессов и установок / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1. – № 1(10). – С. 123–127.
5. MathWork [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.ru/products/matlab-compiler>
6. MathWork [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.ru/products/fuzzy-logic-toolbox>

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2016 г.

HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR DEVELOPMENT OF THE MICROWAVE OVEN OF ELECTROTECHNOLOGICAL PROCESSES AND INSTALLATIONS, MANAGEMENT OF THEIR OPERATING MODES

S.V. Trigorly, D.V. Djema, V.A. Lavrentyev, V.V. Ermolaeva

Yuri Gagarin Saratov State Technical University
77, Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

Hardware and software complex is intended for solving problems of the development of a microwave electro-technological processes and installations, and to control their operating modes. The complex allows to calculate the microwave camera of different type, to simulate the processes of electrodynamics, heat and mass transfer and thermal mechanics, to resolve the problem of synthesis of intelligent control systems. Proposed and implemented structural scheme of hardware and software complex for thermal treatment of dielectric materials in microwave chambers with a traveling wave. In the hardware management system microcontroller is used. To improve quality of regulation and control applied mathematical models used in the control loop on temperature with an infrared thermometer to measure the temperature of an object directly in the microwave, using below-cutoff waveguide. Upon accumulation of a certain number of results of simulation and measurement processes of microwave heat treatment knowledge base is formed, which is connected to the control algorithms based on fuzzy logic.

Keywords: *hardware and software system, mathematical modeling, microwave and installation processes, electrodynamics, heat and mass transfer, thermal mechanics, intelligent control system.*

Sergey V. Trigorly (Ph. D.(Techn.)), Associate professor.

Dmitry V. Djema an engineer.

Vladimir A. Lavrentyev (Ph. D.(Techn.)), Associate professor.

Veronika V. Yermolaeva (Ph. D.(Techn.)), Associate professor.