

УДК 681.518.3
doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ С ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

В. А. Баранов

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
baranov_va2202@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Производство высокотехнологичных изделий микроэлектроники, приборостроения, электротехники, машиностроения с требуемыми функциональными свойствами невозможно без оперативного управления технологическим процессом на основе достоверной измерительной информации о ходе каждой технологической операции и текущем состоянии изделия. Целью работы являлась разработка информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса производства изделий с гетерогенной структурой. *Материалы и методы.* Разработка канала измерения составляющих комплексного сопротивления объекта измерения и напряжения на нем системы управления технологическим процессом изготовления изделий с гетерогенной структурой осуществлена на основе современной парадигмы материаловедения методом системного анализа. *Результаты.* Показана возможность оперативного получения информации о разнородных показателях текущего состояния полуфабриката изделия и многооперационного технологического процесса путем измерений параметров нелинейного комплексного сопротивления объекта с гетерогенной структурой. Разработаны структурная схема и алгоритм функционирования универсального измерительного канала информационно-управляющей системы. *Вывод.* Разработана информационно-управляющая система, реализующая оригинальный способ активного контроля многопараметрических объектов по разнородной информации в ходе технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой. Коррекция разнородных параметров и характеристик каждой технологической операции непосредственно в ходе ее выполнения становится возможной при выборе в качестве универсальной измеряемой величины параметров комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем. Формирование управляющих воздействий осуществляется на основе уравнений связи функциональных параметров и характеристик изделия и технологической операции с параметрами и характеристиками их нелинейного импеданса, которые вносятся в базу данных подсистемы управления. Применение системы обеспечит высокое качество продукции высокотехнологичных отраслей промышленности.

Ключевые слова: информационно-управляющая система, информационно-измерительная система, активный контроль, измерительный контроль, многопараметрический контроль, гетерогенная структура, измерения параметров комплексного сопротивления

Для цитирования: Баранов В. А. Информационно-управляющая система для активного контроля технологических процессов производства изделий с гетерогенной структурой // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. С. 20–29. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR ACTIVE CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR PRODUCTION OF PRODUCTS WITH A HETEROGENEOUS STRUCTURE

V.A. Baranov

Penza State University, Penza, Russia
baranov_va2202@mail.ru

Abstract. *Background.* The production of high-tech products of microelectronics, instrument making, electrical engineering, mechanical engineering with the required functional properties is impossible without operational control of the technological process based on reliable measuring information about the progress of each technological operation and the current state of the product. The aim of the work was to develop an information and control system for active

control of the technological process of manufacturing products with a heterogeneous structure. *Materials and methods.* The development of a channel for measuring the components of the measurement object complex resistance and the voltage on it of the control system for the technological process of manufacturing products with a heterogeneous structure was carried out on the basis of the modern paradigm of materials science by the method of system analysis. *Results.* An information and control system has been developed that implements an original method of active control of multiparametric objects using heterogeneous information during the technological process of manufacturing a product with a heterogeneous structure. Correction of dissimilar parameters and characteristics of each technological operation directly during its execution becomes possible when choosing the parameters of the complex resistance of the object and the voltage on it as a universal measured value. The formation of control actions is carried out on the basis of the equations for the relationship of functional parameters and characteristics of the product and the technological operation with the parameters and characteristics of their nonlinear impedance, which are entered into the database of the control subsystem. Application of the system will ensure high quality of products of high-tech industries.

Keywords: information and control system, information and measurement system, active control, measurement control, multivariate control, heterogeneous structure, measurements of complex resistance parameters

For citation: Baranov V. A. Information and control system for active control of technological processes for production of products with a heterogeneous structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3):20–29. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-3

Введение

Придание изделию определенных функциональных свойств, таких как твердость, коррозионная стойкость, термостойкость, пористость и т.д., является целью технологических процессов электроники, приборостроения, машиностроения [1]. Изделия с гомогенной структурой во многих случаях не удовлетворяют всей совокупности предъявляемых к ним требований. В связи с этим разрабатываются технологические процессы, формирующие гетерогенные структуры, которые обладают функциональными свойствами, недостижимыми при использовании однородных материалов.

Проф. Л. И. Тушинский сформулировал базовый принцип современного материаловедения [2]: **от микроструктуры материала к его макросвойствам**. Получение требуемого функционального свойства изделия достигается формированием определенной микроструктуры материала. Из данного принципа следует, что все макросвойства изделия взаимосвязаны, поскольку определяются его составом и микроструктурой. Микроструктура и макросвойства связаны через мезоуровень, на котором выделяется конечное счетное число различаемых компонентов структуры изделия. Данная формулировка принципа указывает путь придания изделию требуемого свойства, но не отражает определяющее влияние состава материала на свойства изделия и не указывает способ получения необходимой микроструктуры.

А. Д. Верхотуров, Б. Я. Мокрицкий и Д. А. Пустовалов предложили пятизвенную формулу парадигмы материаловедения [3]: **«методология и метод исследования – состав – структура – технология – свойства»**. В рамках данной парадигмы качество изделия как наличие требуемых функциональных свойств достигается формированием соответствующей структуры материала определенного состава в ходе научно обоснованного технологического процесса.

Качественная и количественная информация о свойствах материалов, полученная в ходе исследований выбранным методом, является теоретической основой разработки технологического процесса производства изделий с заданными функциональными свойствами. Достижение высокого качества изделий невозможно без регулирования большого числа разнородных параметров технологического процесса на основе оперативно получаемой измерительной информации о их текущих значениях, т.е. активного измерительного контроля, из-за нестабильности параметров и характеристик сырья, оборудования, среды и неполноты информации о ходе технологического процесса.

По аналогии с формулой материаловедения формула технологического процесса может быть сформулирована в следующем виде: **«метод изготовления – состав – структура – технология с активным контролем – целевое свойство изделия»**. В соответствии с этой формулой разработка информационно-управляющей системы для активного контроля технологического процесса является обязательным этапом проектирования высокоэффективных производственных линий.

Технологический процесс с активным пооперационным измерительным контролем

Технологический процесс представляет собой последовательность технологических операций, в ходе которых сырье, полуфабрикаты подвергаются механическим, химическим, электрическим, тепловым, радиационным и другим физическим воздействиям, направленным на формирование определенного состава и гомогенной (однотипные мезокомпоненты) или гетерогенной (мезокомпоненты нескольких типов) структуры изделия, что придает ему целевое функциональное свойство.

Разделение структур материалов на гомогенные и гетерогенные производится на основе принципа суперпозиции. По отношению к структуре материала принцип суперпозиции формулируется следующим образом: уравнения, описывающие свойства материала, являются линейными по количеству мезокомпонентов. Принцип суперпозиции выполняется для объектов с гомогенной структурой и не выполняется для гетерогенных структур, поскольку уравнения поведения каждого типа мезокомпонентов отличаются друг от друга, и свойства материала различным образом нелинейно изменяются при изменении общего количества мезокомпонентов.

При представлении о технологическом процессе как о динамической системе принцип суперпозиции выполняется для линейных динамических систем с гомогенной структурой, что является теоретической основой решения задач ее анализа. Знание переходной или импульсной характеристики линейной динамической системы позволяет определить реакцию системы на произвольное воздействие.

На рис. 1 представлена структура технологического процесса изготовления изделия с заданными функциональными свойствами с активным пооперационным контролем. Активный пооперационный контроль обеспечивается введением в состав технологической линии многоконтурной информационно-управляющей системы (ИУС). Каждый контур ИУС управляет проведением соответствующей технологической операции и включает в себя измерительный канал (ИК) и управляющий канал (УК). Объединение контуров в систему достигается подключением всех каналов к подсистеме обработки контрольно-измерительной информации, которая состоит из блока обработки измерительной информации, блока формирования команд управления и базы данных.

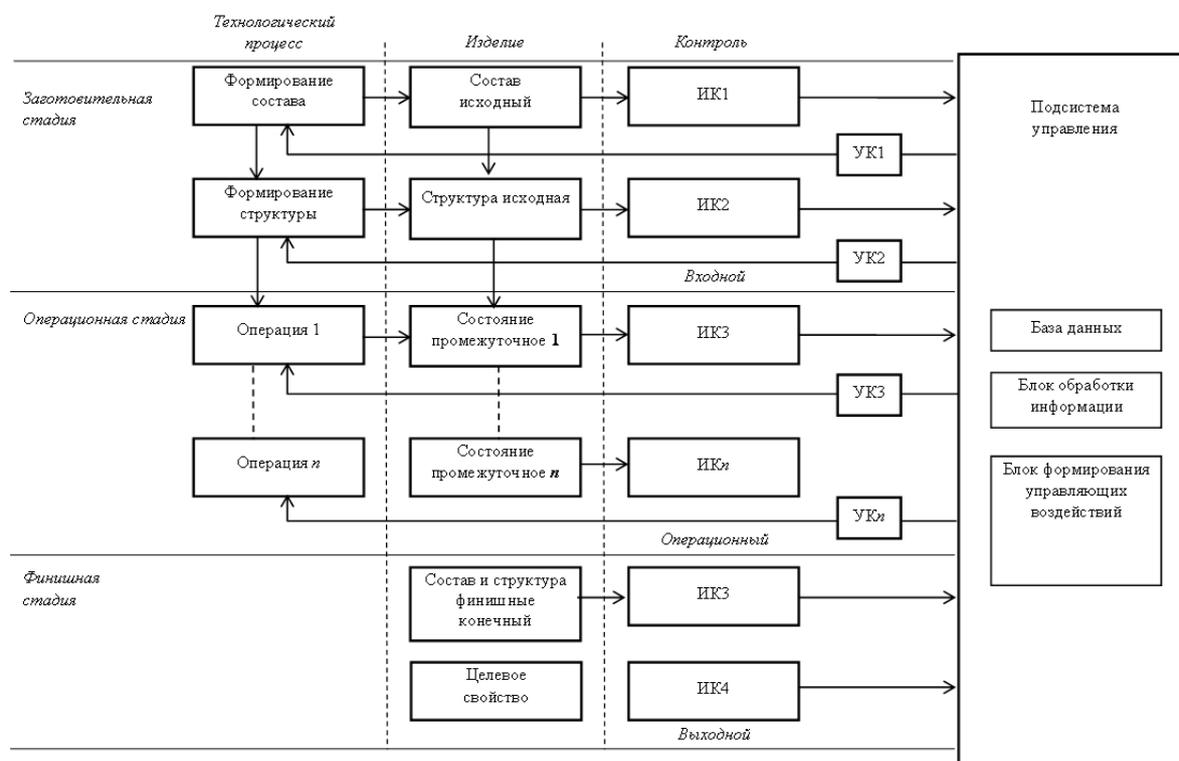


Рис. 1. Информационно-управляющая система технологического процесса с активным измерительным контролем

По типу решаемых измерительных задач технологический процесс делится на три стадии. На заготовительной стадии формируются исходные состав и структура сырья. Качество применяемых материалов подтверждается сертификатами соответствия, выданными по результатам измерений, выполненных по стандартизованным методикам измерений. В базу данных подсистемы управления заносится информация о номинальных значениях параметров и номинальных характеристиках изделия и технологического процесса для каждой технологической операции, а также математические модели их взаимосвязей. Так, например, база данных [4] содержит информацию о процессе микродугового оксидирования (МДО) в виде экспоненциальных регрессионных уравнений связи параметров МДО – процесса и изделия. Модели синтезированы на основе результатов математического моделирования процесса формирования оксидных покрытий и результатов измерений, выполненных на экспериментальной установке в ходе отработки МДО-процесса. Модели описывают зависимости параметров покрытия от типа сплава, концентраций силиката натрия и гидроксида калия, толщины покрытия.

На операционной стадии последовательно осуществляются технологические операции, целенаправленно трансформирующие состояние полуфабриката в направлении придания изделию требуемого функционального свойства. Параметры каждой операции и полуфабриката изделия измеряются соответствующим измерительным каналом (ИК) системы. Полученная измерительная информация совместно с информацией, накопленной в базе данных, обрабатывается блоком обработки информации, который вырабатывает команды управления исполнительным устройством (ИУ). Исполнительное устройство оказывает на процесс однородное или комбинированное физическое воздействие, изменяющее параметры процесса до достижения им требуемого состояния.

Задачей измерительного контроля на финишной стадии является оценивание качества изделия путем подтверждения наличия у изделия целевого функционального свойства в степени, соответствующей установленным требованиям. Измерения проводятся по стандартизованным методикам измерений. Стандартизованные методы реализуются относительно дорогостоящим специализированным лабораторным оборудованием, измерения часто требуют высокой квалификации оператора и значительного времени. Это не позволяет использовать измерительное оборудование, применяемое на заготовительной и финишной стадиях технологического процесса, на операционной стадии.

Комплексный контроль состояния многопараметрического объекта по разнородной измерительной информации

В процессе выполнения каждой технологической операции операционной стадии измеряются разнородные параметры полуфабриката изделия и технологического процесса, влияющие на качество изделия. Результаты измерений используются для комплексного измерительного контроля состояния системы «технологический процесс – изделие», которая рассматривается как многопараметрический объект контроля [5].

Управление технологическим процессом основано на отнесении текущего состояния объекта контроля к одному из следующих качественно различных состояний: нормальное, допустимое, критическое, аварийное. Границами состояний являются предварительно определенные значения частных и комплексных показателей. Текущее состояние объекта определяется путем обработки комплекса значений измеряемых параметров объекта и сравнения показателей с их номинальными значениями.

При пооперационном измерительном контроле технологического процесса под нормальным состоянием реализации технологической операции понимается отсутствие необходимости в корректирующем воздействии на процесс. Допустимым считается состояние технологической операции, при котором возврат в нормальное состояние возможен в течение текущей технологической операции при определенных управляющих воздействиях на процесс. Критическое состояние процесса характеризуется тем, что формирование у готового изделия целевых свойств возможно только при воздействиях на процесс при выполнении всех последующих технологических операций. Аварийное состояние процесса определяется невозможностью всеми имеющимися управляющими воздействиями вернуть процесс в нормальное состояние до его окончания.

Контроль динамики технологического процесса осуществляется путем циклического повторения всех контрольно-измерительных операций через определенные интервалы времени и сопоставления результатов контроля в соседних циклах.

Выбор измеряемых параметров при активном измерительном контроле технологического процесса

Актуальной задачей метрологического обеспечения технологических процессов является разработка методов и средств оперативного измерения параметров и определения характеристик полуфабриката изделия на операционной стадии непосредственно в ходе технологической операции в режиме реального времени. Полуфабрикат изделия не обладает целевым функциональным свойством, поскольку соответствующая микроструктура еще не сформирована. Следовательно, для управления технологическим процессом необходимо контролировать такое свойство изделия, которым оно обладает на всех стадиях технологического процесса и которое функционально связано с целевым свойством. Параметры и характеристики изделия, отражающие это свойство, должны оперативно измеряться в ходе технологического процесса. При этом должны быть известны функции связи измеряемых параметров изделия и технологического процесса с физической величиной, отражающей целевое свойство изделия.

Сформулированным требованиям к контролируемому свойству удовлетворяет электропроводность. Это свойство присуще всем без исключения физическим компонентам технологического процесса на всех его стадиях. Электропроводность описывается пассивными электрическими величинами (емкость, индуктивность, активное сопротивление) и комплексным электрическим сопротивлением.

Выбор параметров комплексного сопротивления в качестве величин, измерение которых позволяет осуществлять измерительный контроль всех операций технологического процесса, предъявляет определенные требования к содержимому базы данных системы управления. Для реализации предлагаемого подхода в состав технологического оборудования должны быть включены средства измерений параметров комплексного сопротивления с соответствующими метрологическими характеристиками. Базу данных ИУС необходимо дополнить математическими моделями связи регулируемых параметров и характеристик технологической операции с параметрами и характеристиками комплексного сопротивления ее материальных компонентов.

Измерения параметров комплексного сопротивления гомогенных объектов

При измерениях параметров объектов с гомогенной структурой используется алгебраическое представление комплексного сопротивления $\dot{Z}_x = R_x + jX_x$, где R_x и X_x – активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления соответственно; j – мнимая единица. Использование исключительно алгебраического представления обусловлено тем, что периодическое напряжение, подаваемое средством измерений на объект измерения может иметь как синусоидальную, так и несинусоидальную форму. При этом подразумевается, что принцип суперпозиции выполняется.

Моделью объекта измерения с гомогенной структурой является линейная многоэлементная двухполюсная электрическая цепь (МДЭЦ) с параллельно-последовательным соединением пассивных электрических элементов трех видов: конденсаторы, катушки индуктивности, резисторы. Моделирование основано на постулировании связи значения пассивной электрической величины с соответствующим параметром объекта измерения. Параметры МДЭЦ считаются линейными, т.е. независимыми от амплитуды приложенного к ней напряжения. Амплитудно-фазовая частотная характеристика является дробно-полиномиальной функцией частоты напряжения питания измерительной схемы.

С позиции метрологии достоинством линейных МДЭЦ является наличие мер пассивных электрических величин (сопротивление постоянному току, электрическая емкость, индуктивность) с нормированными метрологическими характеристиками. Меры пассивных электрических величин используются при синтезе измерительных схем в качестве опорных элементов. По результатам инвариантных измерений параметров элементов линейной МДЭЦ с известной структурой определяются параметры гомогенной структуры на основе предварительно теоре-

тически или экспериментально определенных функциональных связей параметров элементов МДЭЦ и параметров структуры.

На рис. 2 представлена обобщенная функциональная схема измерительного канала ИУС многопараметрического контроля объекта с гомогенной структурой, моделью которого является линейная МДЭЦ.

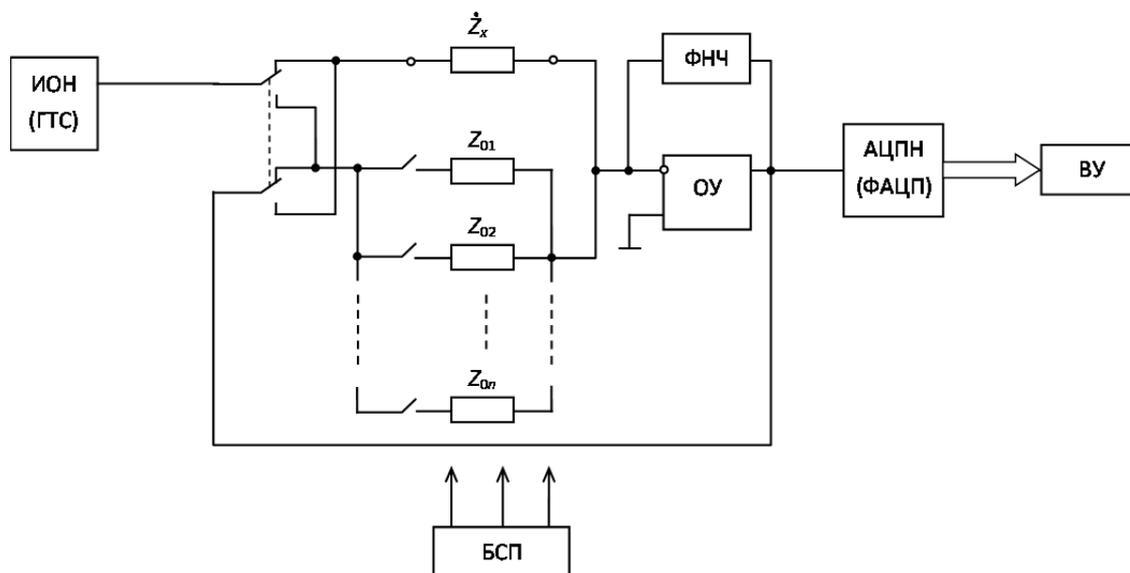


Рис. 2. Измерительный канал ИУС активного измерительного контроля объекта с гомогенной структурой

Основой канала является устройство для определения параметров МДЭЦ [6], которому приданы системные свойства адаптивности и самокалибровки [7]. Устройство составляют активная измерительная схема (ИС) в виде инвертирующего усилителя, состоящего из операционного усилителя (ОУ), фильтра низких частот (ФНЧ), опорных пассивных элементов электрической цепи $Z_{он}$ и объекта измерения с комплексным сопротивлением Z_x , источника опорного напряжения (ИОН) или блока формирования частотно-временных интервалов (БФЧВИ), АЦП напряжения [6] или фазочувствительного АЦП (ФАЦП) и блока самоповерки (БСП) [7]. Результаты аналого-цифрового преобразования обрабатываются вычислительным устройством (ВУ), которое формирует результаты инвариантного измерения в виде совокупности значений параметров элементов МДЭЦ.

Структура канала адаптируется к принятой МДЭЦ: выбирается место включения МДЭЦ в активную ИС (на входе активной ИС или в цепи ее обратной связи), форма напряжения питания ИС (меандр, треугольная, пилообразная, синусоидальная), выбирается структура ИС и алгоритм самокалибровки. Согласно [6], при модели с параллельным соединением элементов объект измерения включается на входе ИС, а при модели с последовательным соединением элементов – в виде отрицательной обратной связи инвертирующего усилителя. Программное обеспечение измерительного канала позволяет ПЭВМ вычислять значения параметров МДЭЦ.

Измерения параметров комплексного сопротивления гетерогенных объектов

Имеются качественные различия между однородными свойствами гомогенных и гетерогенных объектов. Параметры и характеристики объектов с гетерогенной структурой не подчиняются принципу суперпозиции. В отношении электропроводности качественное различие состоит в том, что в гетерогенных структурах, кроме электронной проводимости, имеет место ионная и молионная электрическая проводимость. Наличие нескольких типов электрической проводимости вызывает нелинейность электрического сопротивления и принципиальные изменения вида частотных характеристик. Комплексное сопротивление является функцией амплитуды синусоидального напряжения на объекте измерения. Комплексное сопротивление объектов с гетерогенной структурой не подчиняется принципу суперпозиции, поэтому на из-

мерительную схему корректно подавать только синусоидальное напряжение, и задачу измерения параметров комплексного сопротивления объектов с гетерогенной структурой следует рассматривать как задачу импедансометрии.

Линейная МДЭЦ, составленная из элементов трех традиционных видов, не является адекватной моделью объекта с гетерогенной структурой при решении многих измерительных задач. В связи с этим в электрохимии и других отраслях при синтезе МДЭЦ используется расширенная элементная база. К традиционным элементам добавляются виртуальные элементы: импеданс Варбурга, импеданс Геришера, импеданс постоянной фазы и др. За счет введения в схему таких элементов удастся получить АФЧХ модели, с допустимыми отклонениями воспроизводящую АФЧХ объекта измерения, полученную экспериментально.

Основной метрологической проблемой использования расширенной элементной базы является отсутствие стандартизованных мер виртуальных элементов для использования в качестве опорных элементов измерительных схем. Базис опорных элементов при разработке средств измерений параметров гетерогенных структур составляют, как и для средств измерений параметров гомогенных структур, традиционные пассивные электронные компоненты. Отсюда следует, что модель объекта измерения с гетерогенной структурой должна быть совместима и с традиционными, и с виртуальными элементами МДЭЦ. Такой моделью является одиночный электрический элемент с комплексным электрическим сопротивлением (импедансом) \dot{Z}_X . Математической моделью элемента является комплексное число в тригонометрической форме $\dot{Z}_X = z_X \cos \varphi_X + jz_X \sin \varphi_X$, где z – модуль комплексного числа, φ – фазовый сдвиг между двумя синусоидальными сигналами с равной частотой.

Прямая задача импедансометрии объекта с гетерогенной структурой состоит в определении путем измерений СКС следующих характеристик:

- частотная характеристика $X_X(\omega) = f[R_X(\omega)]$ (диаграмма Найквиста), где ω – круговая частота, при фиксированных значениях амплитуды напряжения U_X на объекте измерения и температуры Θ_X объекта измерения (импедансная спектроскопия);
- температурная характеристика $X_X(\Theta) = f[R_X(\Theta)]$ при фиксированных значениях напряжения U_X и круговой частоты ω (импедансная термоскопия);
- характеристика нелинейности $X_X(U_X) = f[R_X(U_X)]$ при фиксированных значениях круговой частоты ω и температуры Θ_X (импедансная вольтскопия).

Обратная задача импедансометрии объекта с гетерогенной структурой состоит в синтезе эквивалентной МДЭЦ из заданного элементного базиса по критерию совпадения диаграмм Найквистана. Единственность решения обратной задачи достигается использованием дополнительной информации с учетом дальнейшего использования результатов измерений. Обратная задача импедансометрии решается программными средствами.

На рис. 3 представлен универсальный измерительный канал ИУС технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой, который может использоваться для измерительного контроля всех технологических операций. Измерительный контроль параметров технологической операции и изделия основан на электрической модели объекта измерения в виде двухполюсной электрической цепи с нелинейным комплексным сопротивлением \dot{Z}_X и математической модели в тригонометрической или показательной формах.

Объект измерения включается с измерительную цепь, содержащую элементы коммутации. Элементы коммутации выполняют следующие функции: включение объекта измерения в измерительную схему; подключение мер пассивных электрических величин вместо объекта измерения в режиме самокалибровки измерительного канала; формирование оптимальной для текущей измерительной задачи структуры ИС: делитель напряжения или неуравновешенный мост.

Аналого-цифровой преобразователь составляющих комплексного сопротивления АЦП СКС совместно с ИС образует одну из базовых структурных схем устройства для измерения СКС [8]. При использовании измерительной схемы в виде делителя напряжения канал реализует способ измерения СКС двухполюсника и напряжения на нем, который позволяет осу-

ществлять импедансную спектроскопию и импедансную вольтскопию. Канал также позволяет, при необходимости измерять СКС при питании измерительной схемы от внешнего источника напряжения \dot{U}_S с ненормированными метрологическими характеристиками. Это достигается оригинальным алгоритмом аналого-цифрового преобразования напряжений на мерах пассивных электрических величин, включаемых в измерительную схему, и измерения частоты частотомером Ч [9].

Устройство управления УУ АЦП СКС управляет как процессом аналого-цифрового преобразования, так и цифроаналоговым преобразователем напряжения ЦАПН, формирующим напряжение питания ИС U_S . Коды результатов аналого-цифрового преобразования напряжения на элементах ИС и фазового сдвига между напряжениями, выполняемого аналого-цифровым преобразователем синусоидального напряжения АЦПН, поступают в вычислительное устройство ВУ АЦП СКС. ВУ АЦП СКС вычисляет значения активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления. Результаты измерений, полученные измерительным каналом, передаются подсистеме управления ИУС, которая использует измерительную информацию для управления технологическим процессом.

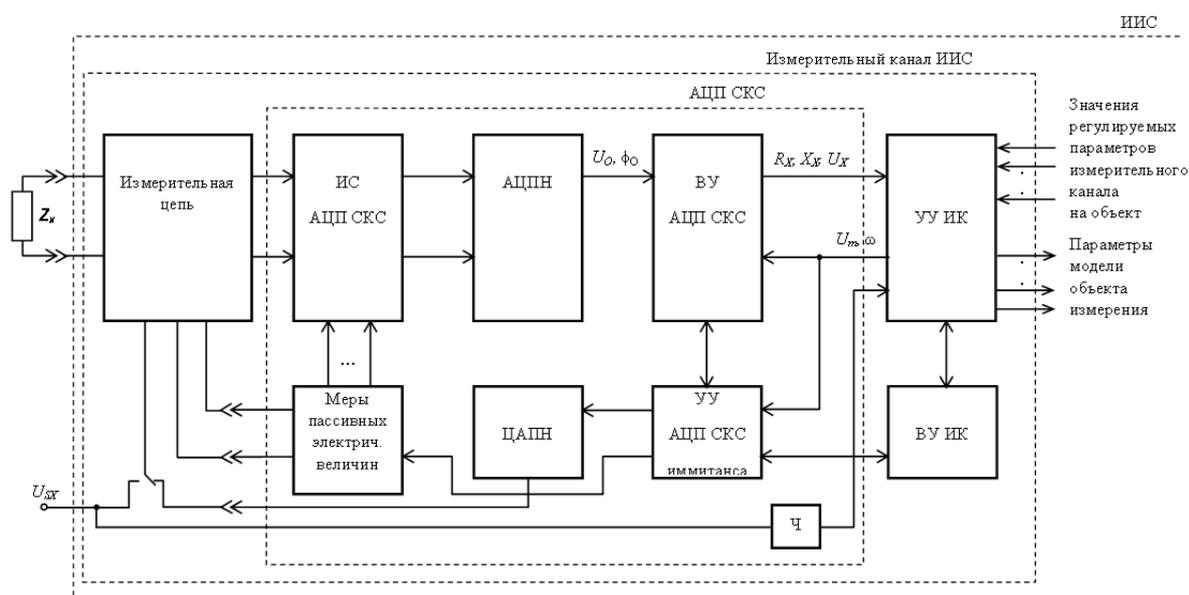


Рис. 3. Измерительный канал ИУС технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой

Заключение

Разработана информационно-измерительная система, предназначенная для функционирования в составе информационно-управляющей системы для управления многооперационным технологическим процессом в микроэлектронике, электрохимии, приборостроении. Информационно-измерительная система позволяет вести пооперационный активный измерительный контроль изготовления изделия с гетерогенной структурой. Предложен новый способ комплексного контроля многопараметрического объекта, позволяющий отнести текущее состояние объекта к одному из возможных четырех качественно различных видов состояния, обеспечивает гибкое управление технологическим процессом, чем обеспечивается стабильно высокое качество продукции. Коррекция разнородных параметров и характеристик каждой технологической операции непосредственно в ходе ее выполнения становится возможной при выборе в качестве универсальной измеряемой величины параметров комплексного сопротивления объекта и напряжения на нем. Формирование управляющих воздействий осуществляется на основе уравнений связи функциональных параметров и характеристик изделия и технологической операции с параметрами и характеристиками их нелинейного импеданса, которые вносятся в базу данных подсистемы управления. Описана структура универсального измери-

тельного канала информационно-управляющей системы технологического процесса изготовления изделия с гетерогенной структурой.

Список литературы

1. Тушинский Л. И., Плохов А. В., Токарев А. О., Синдеев В. И. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М. : Мир, 2004. 384 с.
2. Тушинский Л. И. Синергетические основы эволюции структур в современном материаловедении // Фракталы и прикладная синергетика : сб. тез. Первого междисциплинарного семинара (Москва, 18–21 октября 1999 г.). М., 1999. С. 17–18.
3. Верхотуров А. Д., Мокрицкий Б. Я., Пустовалов Д. А. Метод как основа новой парадигмы материаловедения // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 1. С. 14. URL: <https://readera.org/14340575>
4. Свидетельство о госрегистрации базы данных «Регрессионные модели взаимосвязей параметров МДО-процесса. Параметры, характеризующие пробой покрытий» / Печерская Е. А., Голубков П. Е., Сафронов М. И., Баранов В. А. № 2020621594 ; дата госрег. 31.08.2020. URL: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d02ac2ee1e2f805a9e1f9bdf8dcf01a2>
5. Патент № 2719467 Российская Федерация G06F 17/10 (2020.01); G06F 11/30 (2020.01). Способ комплексного контроля состояния многопараметрического объекта по разнородной информации / Баранов В. А., Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Герасимов А. И., Печерская Е. А., Шерстнев В. В. № 2019134726 ; заявл. 11.11.2019 ; опубл. 17.04.2020.
6. Мартяшин А. И., Светлов А. В. Перспективные направления развития измерителей параметров многоэлементных электрических цепей // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симп. : в 2 т. Т. 2 / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. Пенза : ИИЦ ПГУ, 2003. С. 288–290.
7. Агамалов Ю. Р., Бобылев Д. А., Боровских Л. П., Кнеллер В. Ю. Виртуальный самоверяемый анализатор иммитанса с адаптивными функциональными возможностями // Датчики и системы. 2008. № 7. С. 21–27.
8. Баранов В. А. Систематизация способов измерения составляющих комплексного сопротивления по методу решения обобщенного уравнения мостовой цепи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2008. № 3. С. 110–120.
9. Патент № 2214609 Российская Федерация G 01 R27/02. Способ измерения составляющих комплексного сопротивления двухполюсника и напряжения на нем / Андрияшев А. А., Баранов В. А., Баранов Вл. А., Буц В. П., Недорезов В. Г., Шестернин А. Н. № 2001124545/09 ; заявл. 4.09.2001 ; опубл. 20.10.2003.

References

1. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniy materialov: struktura, svoystva i protsessy nanoseniya neorganicheskikh pokrytiy* = *Methods of materials research: structure, properties and processes of inorganic coatings application*. Moscow: Mir, 2004:384. (In Russ.)
2. Tushinskiy L.I. Synergetic foundations of the evolution of structures in modern materials science. *Fraktaly i prikladnaya sinergetika: sb. tez. Pervogo mezhdistsiplinarnogo seminara (Moskva, 18–21 oktyabrya 1999 g.)* = *Fractals and applied synergetics : a collection of theses. The first interdisciplinary seminar (Moscow, October 18-21, 1999)*. Moscow, 1999:17–18. (In Russ.)
3. Verkhoturov A.D., Mokritskiy B.Ya., Pustovalov D.A. Method as the basis of a new paradigm of materials science. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika* = *Materials Science News. Science and technology*. 2015;(1):14. (In Russ.). Available at: <https://readera.org/14340575>
4. *Svidetel'stvo o gosregistratsii bazy dannykh «Regressionnyye modeli vzaimosvyazey parametrov MDO-protsessa. Parametry, kharakterizuyushchie proboy pokrytiy»* = *Certificate of state registration of the database "Regression models of interrelations of the parameters of the MDO process. Parameters characterizing the breakdown of coatings"*. Pecherskaya E.A., Golubkov P.E., Safronov M.I., Baranov V.A. No. 2020621594; 31.08.2020. (In Russ.). Available at: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d02ac2ee1e2f805a9e1f9bdf8dcf01a2>
5. Patent 2719467 Russian Federation G06F 17/10 (2020.01); G06F 11/30 (2020.01). A method for complex control of the state of a multiparametric object based on heterogeneous information. Baranov V.A., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Gerasimov A.I., Pecherskaya E.A., Sherstnev V.V. No 2019134726; appl. 11.11.2019; publ. 17.04.2020. (In Russ.)
6. Martyashin A.I., Svetlov A.V. Promising directions of development of meters of parameters of multi-element electric circuits. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubiley'nogo simp.: v 2 t. T. 2* = *Actual problems of science and education : tr. International. anniversary simp.: in 2 vol. Vol. 2*. Penza: IITs PGU, 2003:288–290. (In Russ.)

7. Agamalov Yu.R., Bobylev D.A., Borovskikh L.P., Kneller V.Yu. Virtual self-trusted Immitance Analyzer with adaptive functionality. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2008;(7):21–27. (In Russ.)
8. Baranov V.A. Systematization of methods for measuring the components of complex resistance by the method of solving the generalized equation of the bridge circuit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2008;(3):110–120. (In Russ.)
9. Patent 2214609 Russian Federation G 01 R27/02. A method for measuring the components of the complex resistance of a two-pole and the voltage on it. Andryushaev A.A., Baranov V.A., Baranov V.I.A., Buts V.P., Nedorezov V.G., Shesternin A.N. No. 2001124545/09; appl. 4.09.2001; publ. 20.10.2003. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Алексеевич Баранов

кандидат технических наук, доцент
кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: baranov_va2202@mail.ru

Viktor A. Baranov

Candidate of technical sciences, associate professor
of sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 25.05.2021

Принята к публикации/Accepted 26.05.2021