

УДК 66.012–52

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫМ НАГРЕВОМ КРЕМНИЕВЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

А.Г. Горюнов, В.А. Курочкин, И.П. Чучалин, В.А. Москалев

Томский политехнический университет

E-mail: tachyon@tpu.ru

Рассмотрена проблема образования внутреннего градиента температуры в кремниевых стержнях во время парофазного химического осаждения поликристаллического кремния в Siemens-реакторе. Показаны способ и устройство с автоматической системой управления, позволяющие значительно снизить градиент температуры. С помощью математической модели разработана наиболее эффективная структура силовой части источника переменного тока и проверена устойчивость САУ источника.

### Ключевые слова:

Siemens-реактор, поликристаллический кремний, математическое моделирование, источник переменного тока, система автоматического управления.

### Key words:

Siemens-reactor, polycrystalline silicon, computer simulation, AC power supply, control system.

### Введение

В основе практически всех российских производств поликристаллического кремния (ПКК) высокой чистоты (как проектных так и введенных в опытно-промышленную эксплуатацию) лежит Siemens-технология, реализующая метод парофазного химического осаждения – «Chemical vapor deposition» (CVD) кремния в процессе водородного восстановления трихлорсилана (ТХС). Технологический процесс проводят в т. н. Siemens-реакторе, представляющем собой химический реактор прочного типа, в котором образующийся кремний осаждается на разогреваемых электрическим током кремниевых стержнях-основах.

В процессе теплообмена с окружающей средой в кремниевых стержнях образуется внутренний градиент температуры. С ростом диаметра стержней увеличивается величина градиента. Внутренний градиент приводит к росту: трещинообразования, вероятности плавления центральной части, энергозатрат, снижает: возможность поддержания оптимальной температуры и качества управления. В итоге – внутренний градиент температуры ограничивает производительность, эффективность и качество производимого поликристаллического кремния. В 2007 г. группой зарубежных ученых проведено математическое моделирование температурного поля в кремниевых стержнях при нагреве гармоническим током, в 2009 г. проведено математическое и физическое моделирование температурного поля в кремниевых стержнях при резистивном нагреве.

Исследования [1] показали, что токи синусоидальной и биполярной импульсной формы наиболее эффективны среди исследуемых и практически обладают равной эффективностью. Применение таких форм тока для резистивного нагрева кремниевых стержней позволяет снизить на более чем 40 % величину внутреннего градиента температуры, что позволяет увеличить время кампании в условиях развитой площади поверхности массив-

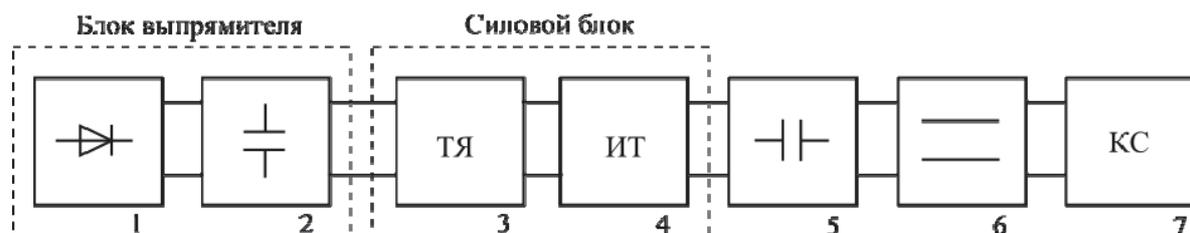
ных стержней, сохраняя при этом высокую интегральную скорость осаждения кремния, а также снижая вероятность срыва технологического процесса вследствие превышения температуры центра стержней точки плавления и разрушения их из-за внутренних температурных напряжений.

Данная работа посвящена разработке источника переменного высокочастотного тока, который позволяет получить указанный выше результат. В связи с тем, что у кремниевого стержня в процессе осаждения меняется как активное сопротивление, так и индуктивность, то особое внимание уделяется автоматической системе управления, в которой реализуются экстремальный регулятор частоты, использующий  $\Delta U$  в качестве управляемой переменной, что позволяет построить контур, способный быстро выйти в экстремальный режим и регулятор тока, включающий внутренний контур амплитуды тока и внешний контур коррекции амплитуды тока.

### Источник питания переменного тока

Проведенный аналитический обзор и патентные исследования источников питания для резистивного нагрева кремниевых стержней говорят о том, что рынок источников питания для Siemens-реакторов в основном представлен источниками постоянного тока и источниками переменного низкочастотного тока (Siemens, GT Advanced-Technologies, Centroterm и др.). Решение, использующее переменный высокочастотный ток для нагрева кремниевых стержней представлено только компанией AEG PowerSolutions [2].

В ходе математического моделирования формирования температурного поля в кремниевых стержнях при нагреве токами различной формы установлено, что применение униполярных импульсов или предложенной компанией AEG суперпозиции двух гармоник, позволяет достичь снижения внутреннего градиента до 30 % при частоте переменного тока в 200 кГц, а биполярные импульсы



**Рис. 1.** Функциональная схема источника переменного тока: 1 – силовой трехфазный диодный мост; 2 – конденсаторная сборка; 3 – транзисторные ячейки; 4 – силовой импульсный высокочастотный трансформатор; 5 – малоиндуктивные высокочастотные конденсаторы; 6 – шина; 7 – кремниевый стержень

или гармонический ток – до 40 %, при частоте в 50 кГц [1].

Функциональная схема устройства, реализующего биполярные импульсные формы тока с частотой не менее 50 Гц [3], представлена на рис. 1.

Для обеспечения требуемых напряжений и токов в канале кремниевых стержней применяется принцип многозонной модуляции, основанный на разделении всего потока энергии на несколько каналов и их последующем суммировании [4].

В схеме источника использован резонансный инвертор с применением современных IGBT-транзисторов класса «U» (Ultra-Fast Speed) с временем спада импульсов (fail time) не более 50 нс и временем «хвоста» (tail time) не более 70 нс, что позволит повысить частоту тока до 100 кГц.

Силовые трансформаторы в схеме понижают напряжение с 600 до 160 В.

При напряжениях на нагрузке более 300 В (стартовый режим работы Siemens-реактора) необходимо использовать дополнительную третью ячейку с отдельным повышающим трансформатором с 600 на 1000 В, вторичная обмотка которого включается последовательно с основными вторичными обмотками.

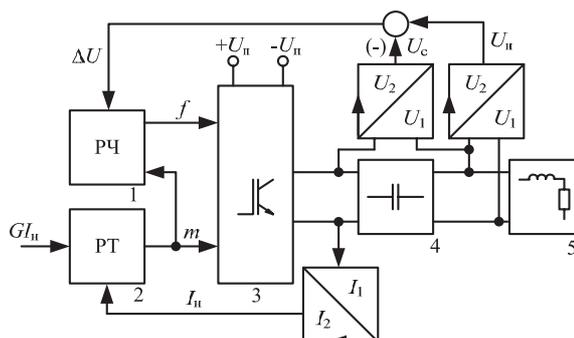
Ферритовые сердечники при естественном охлаждении позволяют работать с индукцией 0,3...0,4 Тл [5]. К сожалению, изготовление ферритовых сердечников больших размеров связано с технологическими трудностями. Использование обычных сплавов в нашем случае приведет к громоздким конструкциям. В результате аналитического поиска обнаружены инновационные кольцевые магнитопроводы серии ГМ414 из аморфных и нанокристаллических сплавов, разработанные и выпускаемые научно-производственным предприятием «ГАММАМЕТ» [6]. Сплав имеет высокие индукцию насыщения и магнитную проницаемость, низкие коэрцитивную силу и магнитные потери.

При частоте тока 50 кГц напряжение на индуктивной составляющей нагрузки достигает 400 В. Поэтому для обеспечения значений тока более 1000 А при питании рассмотренных источников от промышленной трехфазной сети напряжением 380 В необходимо компенсировать реактивную мощность нагрузки с помощью конденсатора [7], в схеме это малоиндуктивные высокочастотные конденсаторы 5 (рис. 1).

### Система автоматического управления

Функциональная схема САУ источником переменного тока приведена на рис. 2. Данная САУ содержит два контура управления:

- током нагрузки ( $I_n$ ), включающий регулятор тока РТ, управляющим воздействием является коэффициент заполнения импульсов ( $m$ );
- резонансом напряжений ( $\Delta U$ ), включающий экстремальный регулятор частоты РЧ, управляющим воздействием является частота импульсов частотного преобразователя.



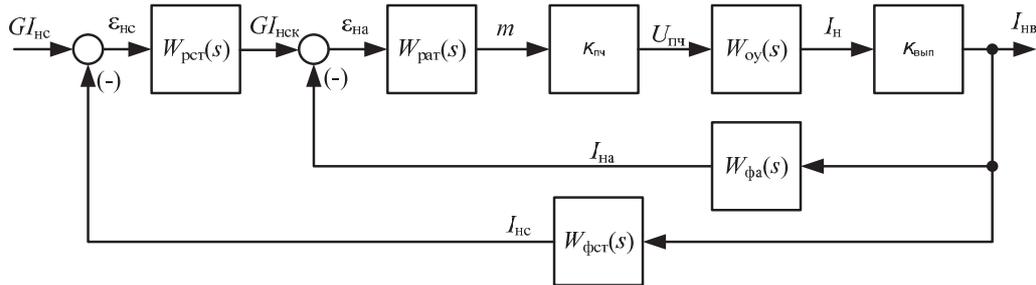
**Рис. 2.** Функциональная схема САУ источником переменного тока: 1 – регулятор частоты (РЧ); 2 – регулятор тока (РТ); 3 – частотный преобразователь (инвертор); 4 – резонансный конденсатор; 5 – нагрузка

Если коэффициент заполнения импульсов находится в диапазоне от 0 до 100 %, не включая границы, а нагрузкой является RLC-контур, то САУ током нагрузки может быть описана как линейная система, представленная на рис. 3.

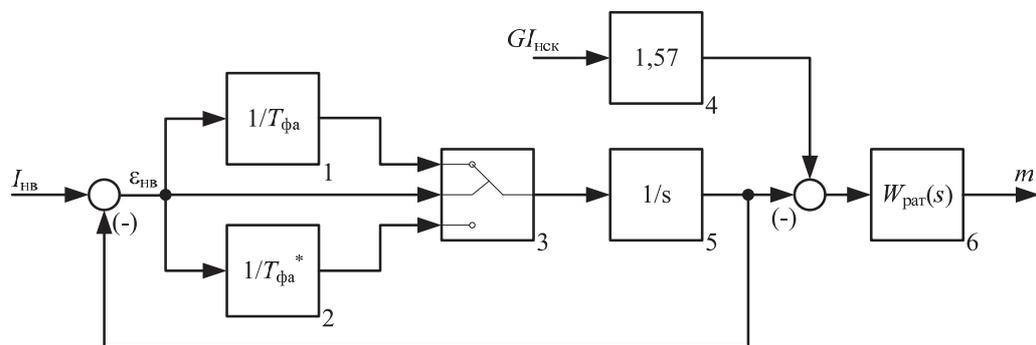
С целью обеспечения высокого быстродействия и статической ошибки, регулятора тока, менее 1 %, применена каскадная система, включающая внутренний контур амплитуды тока и внешний контур коррекции амплитуды тока.

Регулятор среднего значения тока нагрузки работает при небольших отклонениях среднего значения тока нагрузки от заданного значения (до  $\pm 10$  %). Это повышает устойчивость САУ при больших (более 10 %) возмущениях в канале тока. В случае, когда он отключен, заданное значение через поправочный коэффициент поступает на вход регулятора амплитуды тока нагрузки.

С целью обеспечения наибольшего быстродействия внутреннего контура управления амплитудой тока нагрузки реализован на дискретных элемен-



**Рис. 3.** Структурная схема САУ током нагрузки:  $\epsilon_{нс}$  – отклонение среднего тока нагрузки  $I_{нс}$  от заданного значения  $GI_{нс}$ ;  $\epsilon_{на}$  – отклонение амплитудного значения тока нагрузки  $I_{на}$  от скорректированного заданного значения  $GI_{нск}$ ;  $m$  – коэффициент заполнения импульсов ШИМ;  $U_{пч}$  – напряжение на выходе преобразователя частоты ПЧ;  $I_{н}$  – ток нагрузки;  $I_{нв}$  – выпрямленное значение тока нагрузки; ОУ – объект управления;  $W_{рст}(s)$  – передаточная функция (ПФ) регулятора среднего значения тока;  $W_{рст}(s)$  – ПФ регулятора амплитудного значения тока;  $W_{фа}(s)$  – ПФ фильтра амплитуды тока нагрузки;  $W_{фст}(s)$  – ПФ фильтра среднего значения тока нагрузки



**Рис. 4.** Структурная схема САУ током нагрузки: 1, 2, 4 – блоки усилителей; 3 – реле; 5 – интегратор; 6 – регулятор амплитуды тока;  $GI_{нск}$  – скорректированное заданное значение среднего тока нагрузки;  $I_{нв}$  – выпрямленное значение тока нагрузки;  $m$  – коэффициент заполнения импульсов ШИМ

тах. В этом случае регулятор и фильтр амплитуды тока могут быть представлены структурной схемой на рис. 4.

Реле – 3 коммутирует усилитель – 1 на интегратор – 5, если  $\epsilon_{нв} \geq 0$ , либо усилитель – 2 на интегратор – 5 при  $\epsilon_{нв} < 0$ . Постоянная времени  $T_{фа}^*$  задается следующим образом:

$$T_{фа}^* = 10 \cdot T_{фа}.$$

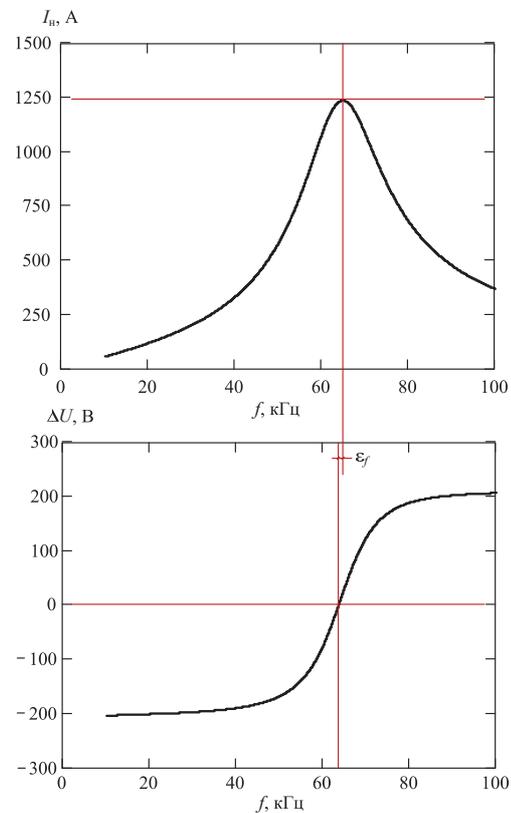
Это позволяет достичь наибольшей скорости регулятора амплитуды тока в случае резкого увеличения тока нагрузки, высокой помехоустойчивости и работать фильтру как пиковому детектору.

Расчеты показали, что при частоте ШИМ, равной резонансной частоте RLC-контура, достигается экстремум (максимум) тока нагрузки (рис. 5). При этом при малых активных сопротивлениях нагрузки, когда действующее напряжение на индуктивности нагрузки  $U_i \gg U_n$ , выполняется условие:

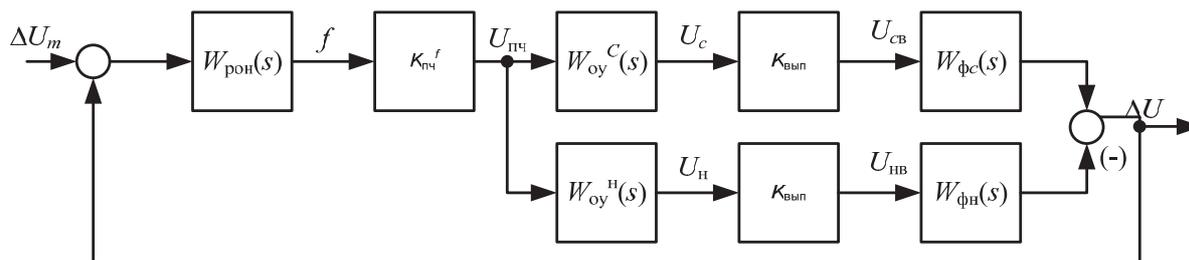
$$\Delta U = U_c - U_n \approx 0.$$

Структурная схема САУ отклонением напряжения  $\Delta U$  приведена на рис. 6.

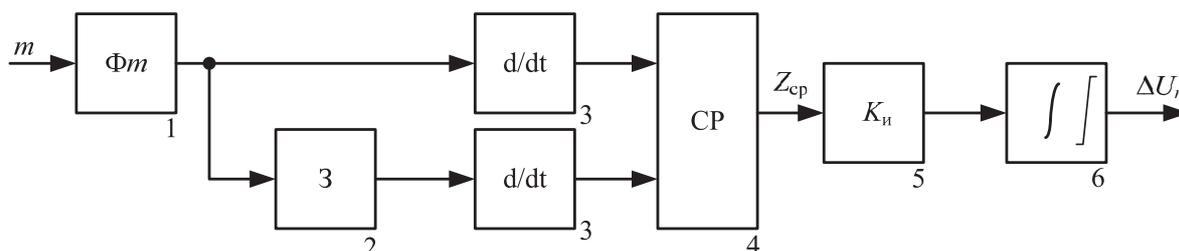
Использование в качестве управляемой переменной отклонение  $\Delta U$  дает возможность построить контур, способный быстро выйти САУ в экстремальный режим (рис. 5). При этом этот контур может представлять из себя линейную САУ по напряжению  $\Delta U$ , так как имеются достаточные для



**Рис. 5.** Ток и напряжение на нагрузке



**Рис. 6.** Структурная схема САУ отклонением напряжения на резонансной емкости и нагрузке:  $W_{рон}(s)$  – ПФ регулятора отклонения напряжения  $\Delta U$ ;  $W_{фс}(s)$  – ПФ фильтра среднего напряжения на резонансной емкости;  $W_{фн}(s)$  – ПФ фильтра среднего напряжения на нагрузке;  $U_{св}$  – выпрямленное напряжение на резонансной емкости;  $U_{нв}$  – выпрямленное напряжение на нагрузке;  $\Delta U_m$  – корректирующее напряжение для компенсации статической ошибки  $\varepsilon$ ; по определению резонансной частоты



**Рис. 7.** Структурная схема экстремального регулятора коэффициента заполнения импульсов ШИМ: 1 – фильтр коэффициента заполнения импульсов; 2 – звено запаздывания; 3 – дифференциатор; 4 – сигнум-реле (сигнум-регулятор); 5 – усилитель; 6 – интегратор с ограничением выхода

построения САУ линейные участки на статической характеристике  $\Delta U(f)$ .

С целью коррекции статической ошибки  $\varepsilon$ , (рис. 7) по определению резонансной частоты САУ отклонением напряжения  $\Delta U$  снабдим дополнительным контуром, включающим экстремальный регулятор на основе сигнум-реле, представленный на рис. 7.

Целью управления является коррекция напряжения  $\Delta U$  таким образом, чтобы достичь минимального  $m$ , что будет соответствовать экстремальному значению тока нагрузки.

#### Модель источника переменного тока

С целью упрощения расчетов при математическом моделировании различных структур источника переменного тока и его системы автоматического управления разработаны две математические модели, приведенные на рис. 8.

В упрощенной математической модели преобразователя частоты (рис. 8, а) используется источник ЭДС с широтно-импульсной модуляцией и управлением по коэффициенту заполнения импульсов и частоте их следования. Это позволяет существенно уменьшить время моделирования. Данная модель предназначена для исследования контуров САУ источником переменного тока.

В свою очередь, исследование возможных структур силовой части преобразователя частоты осуществляется на «полной» модели (рис. 8, б), учитывающей индуктивные и емкостные связи, а также динамические и статические характеристики IGBT транзисторов, диодов и др. элементов. При этом для уменьшения времени вычислений

контур управления частотой не моделируется, устанавливается частота, заведомо соответствующая резонансной.

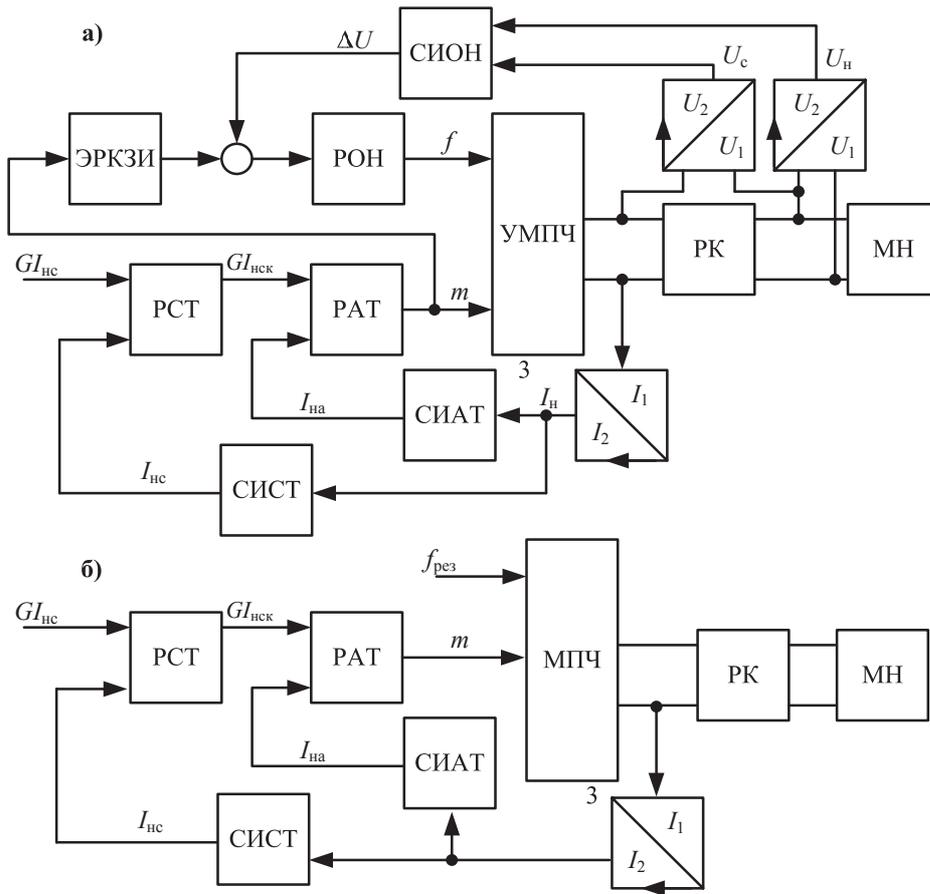
Модель источника переменного тока также использовалась при синтезе и выборе системы управления Siemens-реактором [8].

Анализ переходных процессов (рис. 9) и показателей качества управления показывает, что у САУ источником переменного тока отсутствует перерегулирование, а время регулирования не более 1,5 мс при ошибке управления до  $\pm 1\%$  и 30 мкс – при ошибке до  $\pm 10\%$ . Также результаты исследований показали малую чувствительность разработанной САУ к нестабильности параметров объекта управления.

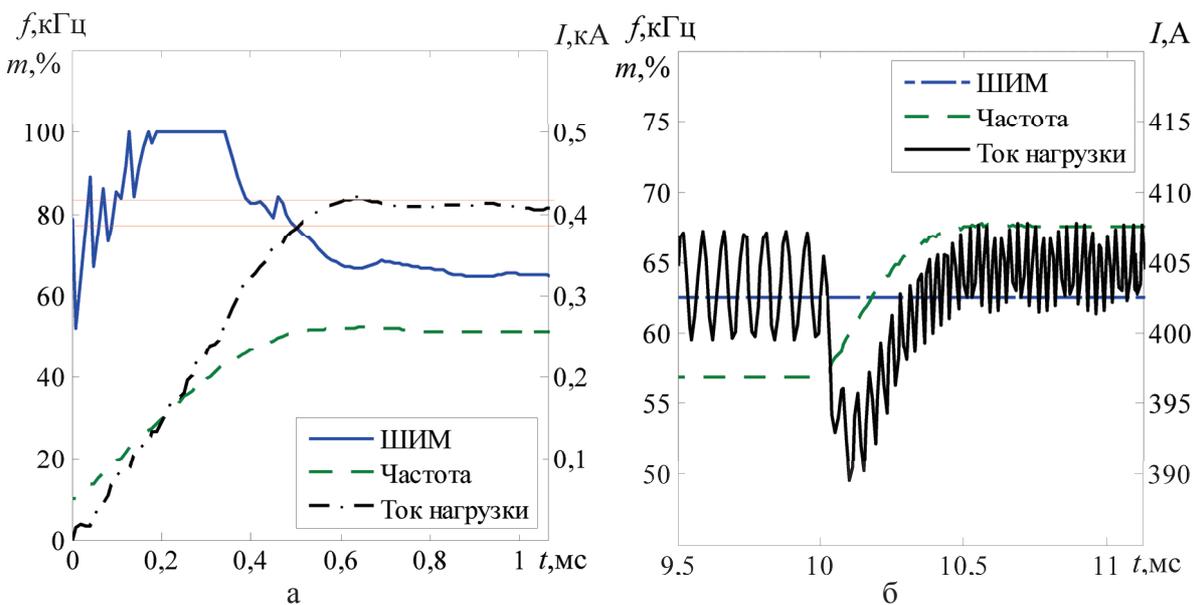
#### Заключение

Ранее полученные результаты исследования формирования температурного профиля в кремниевых стержнях разогреваемых токами различной формы показали, что наибольший эффект снижения внутреннего градиента температуры в стержнях обеспечивается гармоническим и импульсным биполярным током, частотой не менее 50 кГц. Поэтому разработаны технические решения по аппаратной реализации источников переменного тока частотой от 50 до 100 кГц для резистивного нагрева кремниевых стержней реакторов получения поликристаллического кремния и их математические модели в виде программ для ЭВМ в среде MATLAB.

По результатам вычислительных экспериментов выбрана эффективная структура источника переменного тока на основе двух ячейкового резо-



**Рис. 8.** Функциональная схема математической модели источника переменного тока: а) с упрощенной моделью преобразователя частоты (ПЧ); б) с «полной» моделью ПЧ. МН – модель нагрузки; РК – резонансный конденсатор; УМПЧ – упрощенная модель преобразователя частоты; МПЧ – «полная» модель преобразователя частоты; СИОН – схема измерения отклонения напряжения  $\Delta U$ ; СИАТ – схема измерения амплитуды тока; СИСТ – схема измерения среднего значения тока; РОН – регулятор отклонения напряжения  $D\Delta U$ ; ЭРКЗИ – экстремальный регулятор коэффициента заполнения импульсов; ПАТ – регулятор амплитуды тока; РСТ – регулятор среднего значения тока нагрузки;  $I_a, I_{на}, I_{с}$  – мгновенное, амплитудное и среднее значения тока нагрузки;  $m, f$  – коэффициент заполнения и частота импульсов ШИМ;  $f_{рез}$  – резонансная частота;  $U_c, U_n$  – напряжение на резонансном конденсаторе и нагрузке;  $G$  – заданное значение



**Рис. 9.** Переходные процессы САУ источником переменного тока: а) по управлению (запуск); б) по возмущению (ступенчатое изменение индуктивности на 70 %).  $m, f$  – коэффициент заполнения и частота импульсов ШИМ;  $I$  – ток нагрузки

нансного преобразователя частоты с трансформаторной развязкой. Коэффициент полезного действия преобразователя составил не менее 97 %, что соответствует поставленной цели. Разработанная САУ, в условиях постоянно меняющихся параметров объекта, позволяет удерживать систему в резонансном режиме, что позволяет достигать максимальной активной мощности. При этом напряжение и ток на нагрузке имеют синусоидальную

форму без постоянной составляющей частотой до 100 кГц, что позволяет достичь наибольшего эффекта в снижении внутреннего градиента температуры кремниевых стержней (около 44 %) за счет скин-эффекта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов А.Г., Козин К.А., Сачков С.А. Влияние параметров тока пульсирующей формы на резистивный нагрев стержней siemens-реактора // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – № 11/2. – С. 219–223.
2. Device and method for producing uniform temperature distribution in silicon rods during a precipitation process: Patent US 20090229991 A1, Pub. Date 17.09.2009. – 12 с.
3. Устройство равномерного нагрева поликристаллических кремниевых стержней. пат. № 121255 Рос. Федерация. № 2012119449; заявл. 11.05.2012; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. – 4 с.
4. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
5. Черкашин Ю. Расчет трансформаторов при произвольных законах изменения напряжения и тока // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 26–30.
6. Производство магнитомягких сплавов и ленты с аморфной и нанокристаллической структурой под торговой маркой ГАММАМЕТ // Официальный сайт научно-производственного предприятия ГАММАМЕТ. 2012. URL: <http://www.gammamet.ru> (дата обращения: 20.07.2012).
7. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
8. Козин К.А., Горюнов А.Г., Сачков С.А. Синтез адаптивной системы управления нестационарным объектом – Siemens-реактором получения поликристаллического кремния // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 5. – С. 32–38.

*Поступила 21.12.2012 г.*

УДК 62–51

## АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

С.С. Михалеви́ч, С.А. Байдали, И.П. Чучалин, В.А. Москалев

Томский политехнический университет  
E-mail: mse@tpu.ru

*Представлен математический аппарат, позволяющий моделировать методом пространства состояний линейные динамические системы, представляемые в виде произвольных комбинаций динамических звеньев, описанных в статье. Описан порядок моделирования системы автоматического управления методом пространства состояний. Представлен алгоритм выбора последовательности расчета блоков системы управления.*

#### Ключевые слова:

*Система автоматического управления, моделирование, пространство состояний, алгоритм.*

#### Key words:

*Control system, simulation, state space, algorithm.*

#### Введение

На протяжении длительного времени в области автоматического управления уделяется большое внимание описанию динамических систем методами пространства состояний. Аналогичную тенденцию можно наблюдать и в других областях применения теории систем. Методы управления, основанные на частотном анализе, алгебре передаточных функций, преобразовании Лапласа и  $z$ -преобразовании, которые можно считать классическими, играют значительную роль в развитии и при-

менении теории управления и в родственных автоматизации областях. Вследствие их простоты и ясной связи с физической реальностью они, по-видимому, и в будущем сохраняют свое место среди современных методов описания динамических систем. Однако классические методы не могут сохранить свои позиции при решении задач многомерных и сложных систем, где они часто оказываются несостоятельными исключительно из-за вычислительных трудностей, тогда как методы пространства состояний позволяют осуществить четкую