

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН...

УДК 621.38:658.5

А. И. ФРИД, Д. И. КАРДАШ

**КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
И СОПРОВОЖДЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

В статье приводится анализ современного состояния производства электронной техники, места контроля и диагностики программного обеспечения в них. Предлагается концепция осуществления адаптивного контроля и диагностики программного обеспечения процессов производства и сопровождения электронной техники. Сформулированы задачи развития контроля и диагностики программного обеспечения для повышения функциональности и качества электронной техники. *Контроль и диагностика программного обеспечения; адаптация процессов контроля и диагностики; перспективная компонентная база; конфигурируемые интегральные устройства*

Одним из значимых факторов развития предприятий производства современной радиоэлектронной аппаратуры является динамика научно-технической и производственной разработки электронных устройств и их компонентов. С учетом такой динамики все большее значение приобретают задачи модернизации и совершенствования процессов создания электронной продукции. В современных условиях особую роль играет их информационный аспект, в частности – задачи адаптивного контроля и диагностики (КиД) программного обеспечения (ПО) и конфигурационной информации современной компонентной базы на этапах производства и эксплуатации. Данная работа посвящена анализу их состояния, выявлению путей решения проблем и созданию концепции построения адаптивных КиД информационного компонента производства перспективных устройств электронной техники (ЭТ).

**1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Особенность современного мира состоит в том, что интенсивность изменения антропогенных процессов в нем стала чрезвычайно высокой. Существенное значение приобрела временная интенсификация производства ЭТ (сокращается жизненный цикл производимой продукции). Его специфика заключается в том, что его объект претерпевает постоянную модифи-

кацию. При этом предполагается интенсивная модификация продукции уже после ее изготовления, т. е. на этапе эксплуатации. Данная модификация может рассматриваться как продолжение производственного процесса. Большая часть временных и материальных затрат переносится с изготовления аппаратуры на проектирование информационной составляющей. Последняя уже рассматривается не только как информационное обеспечение программно-управляемых устройств (памяти программ, микроконтроллеров), а как конфигурирование аппаратуры. Особое внимание уделяется инструментальным системам программирования.

В настоящее время при создании электронного оборудования активно используются программируемые (конфигурируемые) интегральные схемы. Смещение акцента с использования обычных программно-управляемых микропроцессоров и микроконтроллеров на применение конфигурируемой интегральной техники не просто позволяет модернизировать компонентную базу ЭТ, а приводит к существенному изменению процесса их проектирования и изготовления.

Разработка ПО микропроцессорной компонентной базы при ее реализации на базе ПЛИС должны предваряться конфигурацией интегральных устройств. При этом набор функций такого устройства наиболее приближен к решаемой задаче и может быть скорректирован. Микроконтроллеры, для которых создается ПО, в свою очередь являются результатом проектирования.

В отличие от практики создания ЭТ на базе микропроцессорных устройств с жесткой логикой функционирования, система команд вычислительного ядра на базе ПЛИС может быть определена самим разработчиком ЭТ. На рис. 1 показано взаимовлияние процессов разработки и модификации ЭТ, построенной на основе конфигурируемой элементной базы.

Первоначальная разработка ПО осуществляется на основании требований технического задания, которое в дальнейшем подвергается модернизации. Причинами ее проведения могут быть изменения функциональности конфигурируемой аппаратуры и изменения требований к результатам проектирования. Модернизация программного и аппаратного обеспечения приводит к изменению объекта КиД, что в свою очередь вызывает коррекцию алгоритмов КиД.

Такая ситуация, когда структура и функциональность аппаратного обеспечения является зависимой от решаемых задач семантического и прагматического уровня, с одной стороны приводит к повышению эффективности применения ЭТ на реконфигурируемой компонентной базе, а с другой стороны приводит к усложнению процессов КиД.

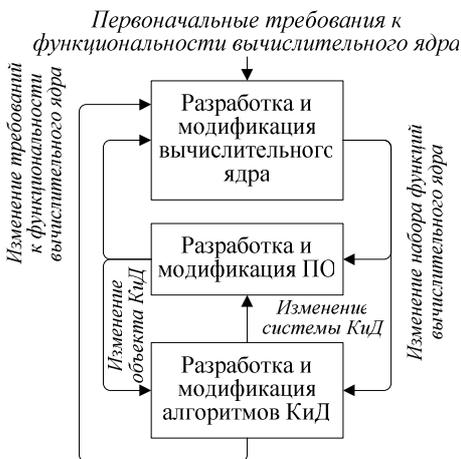


Рис. 1. Взаимовлияние процессов разработки ЭТ

В этих условиях приобретает ценность развитие практики применения и производства конфигурируемой компонентной базы и устройств, созданных на ее основе. КиД таких устройств приобретает адаптивный характер, что приводит к возникновению новых задач. Настоящая работа посвящена их анализу.

Можно выделить основные особенности развития современной электронной промышленности:

- уменьшение технологических норм при производстве компонентной базы (минимального технологического размера);

- повышение степени интеграции перспективных интегральных устройств и, как следствие, расширение набора функций и усложнение компонентной базы;

- существование современных производственных процессов в условия прототипирования производимой продукции;

- унификация аппаратного обеспечения, позволяющая повысить серийность изготовления, снизить его стоимость и повысить надежность;

- усложнение математического обеспечения как производственного процесса, так и эксплуатации продукции;

- перераспределение объема и значимости функций между программным и аппаратным обеспечением в сторону программ, реализующих усложняющееся математическое обеспечение;

- повышение трудозатрат на информационную составляющую разработки;

- усиление роли контроля, диагностики как аппаратуры, так и ПО.

**Уменьшение технологических норм и повышение степени интеграции.** Развитие компонентной базы идет по пути уменьшения технологических норм. В настоящее время достижимы минимальные технологические нормы в 90 нм, а в перспективе эти размеры предполагаются равными 45 нм [1]. Их снижение приводит к повышению степени интеграции микросхем и расширению функциональных возможностей. Одновременно с этим положительным результатом снижение минимальных технологических норм и повышение степени интеграции негативно влияет на стоимость технологического обеспечения, величину трудовых затрат и сложность математического и программного обеспечения.

**Прототипирование производимой продукции и унификация аппаратного обеспечения.** Процессы проектирования и разработки современных электронных изделий как схемотехнические, так и программные, преимущественно реализуются на основании использования прототипов. При этом происходит циклическое изменение как аппаратуры, так и ПО. Это позволяет сократить экономические и временные издержки при проектировании и изготовлении продукции.

**Перераспределение функций между программным и аппаратным обеспечением.** В силу необходимости уменьшения времени проектирования, модернизации, расширения состава функций, снижение затрат на всех этапах жизненного цикла электронных изделий, все

большая нагрузка возлагается на их ПО. Это позволяет получить возможность последующей модернизации без замены аппаратной части [2].

Так, для конфигурируемой компонентной базы существует статистика мирового лидера фирмы Cadence Design Systems относительно перераспределения затрат на аппаратную и программную части при уменьшении ее технологических норм (см. рис. 2).

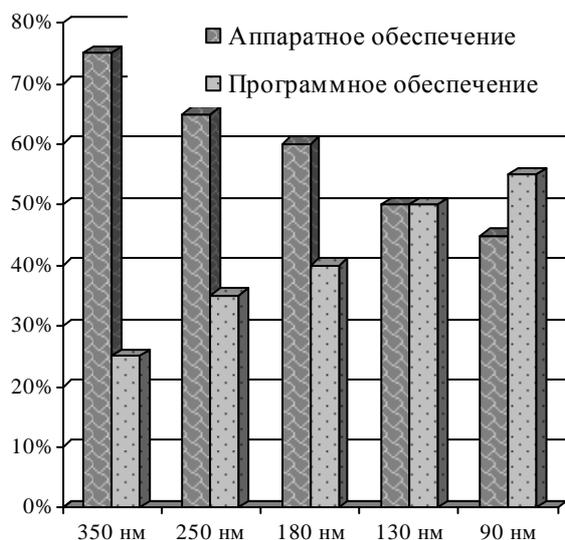


Рис. 2. Отношение затрат на разработку программной и аппаратной части

Видно, что при дальнейшем сокращении технологических норм доля затрат на ПО и информационные технологии будет возрастать. Подобная тенденция характерна не только для процесса разработки компонентной базы (СБИС), но и для ЭТ в целом, тем более, что практика создания современных электронных систем все больше склоняется к созданию систем на кристалле (System on Chip, SoC), когда все устройство управления реализуется в виде единой интегральной микросхемы с минимумом внешних устройств.

**Усложнение математического обеспечения и повышение трудозатрат на информационную составляющую разработки.** Расширение функциональных возможностей ЭТ и повышение сложности ее компонентной базы обуславливает усложнение маршрутов проектирования и алгоритмов работы электронных устройств. Так, по опыту создания авиационной техники, в [2] отмечается, что зачастую эффективность алгоритмов не может быть обоснована теоретически или полностью подтверждена в ходе испытаний, а в качестве меры по обеспечению эффективной эксплуатации указывается возможность оперативного уточ-

нения алгоритмов работы комплекса на всех этапах его жизненного цикла. В свою очередь, усложнение интегральных схем приводит к усложнению математического и программного обеспечения как процесса проектирования, так и процесса сопровождения ЭТ. По статистическим данным Cadence Design Systems трудозатраты на проектирование интегральных схем зависят от технологических норм их проектирования (см. рис. 3).

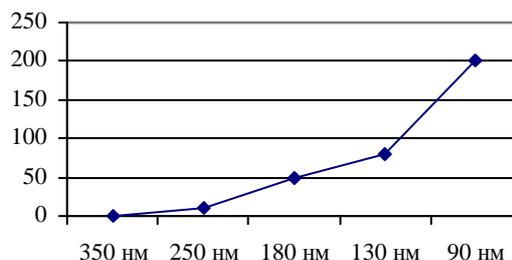


Рис. 3. Зависимость трудозатрат (человеко-лет) на разработку СБИС от минимальных технологических норм

Приведенная зависимость трудозатрат на разработку СБИС также характеризует и тенденцию их роста на разработку.

#### Усиление роли контроля и диагностики.

Усложнение интегральных устройств приводит к тому, что вероятность внесения ошибки (несоответствия требованиям системной спецификации) в их топологию увеличивается. Примером тому может служить тот факт, что при эксплуатации процессора Intel Pentium I было выявлено две ошибки, в современном процессоре Intel Core 2 количество официально признанных ошибок достигает 105 [3]. При проектировании современных конфигурируемых СБИС на первый план по трудозатратам выступают вопросы их верификации (до 70% трудозатрат) [5]. При этом она может проходить, в том числе, и на уровне вычислительного моделирования. Верификация является частным случаем процесса КиД, направленным на подтверждение соответствия результатов разработки требованиям технического задания на проектирование.

В условиях отмеченных особенностей развития современной электронной промышленности можно сделать вывод о том, что КиД ПО проектирования, изготовления и эксплуатации современных электронных устройств выходят на первый план. Относительная значимость аналогичных процессов аппаратного обеспечения понижается в силу их зависимости от информационной составляющей.

В этих условиях производство ЭТ приобретает адаптивный характер. Его структура (см.

рис. 4) предполагает то, что техническое задание на проектирование, управление адаптацией и эксплуатацией прототипов ЭТ находится под воздействием интенсивно изменяющихся внешних требований.



Рис. 4. Структура адаптивного процесса производства ЭТ

На рисунке показано, что изменяющиеся внешние требования приводят к изменению технического задания на проектирование. На его основании и под воздействием блока управления адаптацией проектируется или модернизируется устройство ЭТ (в зависимости от того, создается ли устройство в первый раз или происходит разработка очередного его прототипа). На основании результатов проектирования происходит изготовление устройства. В процессе создания устройства ЭТ могут возникать воздействия на алгоритмы КиД (см. рис. 1). В дальнейшем, при эксплуатации и сопровождении появляются новые версии ПО и конфигурации аппаратуры, а следовательно, и адаптация КиД. В результате адаптации вырабатываются управляющие воздействия, предназначенные для обеспечения изменения производственного процесса в ответ на произведенные действия.

Для реализации адаптивного производственного процесса перспективных устройств ЭТ предлагается концепция адаптивного контроля и диагностики их программного обеспечения.

Основным понятием данной концепции может быть назван *адаптивный производственный процесс*, находящийся под постоянным воздействием изменяющихся *внешних требований* различного характера (маркетингового, технического, технологического, организационного и пр.). Под воздействием этих требова-

ний происходит перманентная *адаптация технического задания*, проектирование и *адаптация прототипа ЭТ*, *адаптация производственных процессов*. Неотъемлемой частью адаптивного производственного процесса являются *адаптивные КиД*, концептуальная структура которых представлена на рис. 5.

Контрольно-диагностические процедуры, действующие в рассматриваемых условиях, выполняются над изменяющимися объектами (в первую очередь – программными), в силу чего к ним самим возникает требование адаптивности.

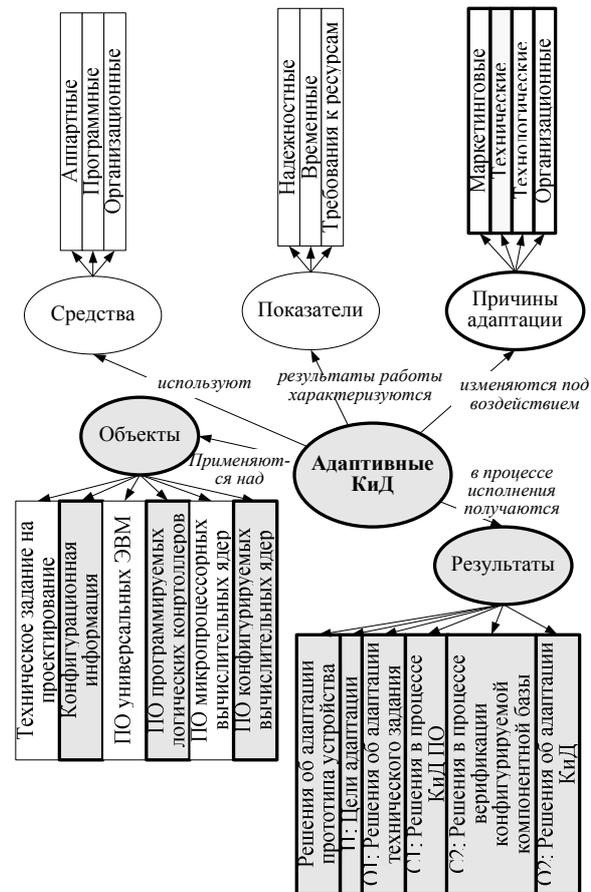


Рис. 5. Концепция адаптивного КиД

В отличие от адаптации ПО устройств ЭТ, построенных на базе процессоров с жесткой логикой функционирования, при использовании конфигурируемой элементной базы возникают новые понятия, которые выделены в приведенной концепции.

При сохранении тех же причин адаптации, их интенсивность в настоящее время возрастает и приводит к необходимости нового подхода к ее проведению. Придание свойства адаптивности КиД ПО позволит повысить функциональность и качество процессов производства и сопровождения электронной продукции.

## 2. МЕСТО ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Процесс обнаружения программных и конфигурационных ошибок при производстве и модификации прототипа электронного устройства можно представить в виде упрощенной функциональной диаграммы, приведенной на рис. 5.

Из функциональной диаграммы видно, что объектами КиД являются как отдельные части, так и проект в целом. На рисунке выделены места обнаружения и пути устранения ошибок (утолщенные линии). Выделенным шрифтом показано место применения результатов работы адаптивных КиД, использованных при построении концепции (см. рис. 4).

В работах [4, 5] в качестве основной проблемы разработки современных конфигурируемых устройств указывается необходимость создания новых подходов к функциональной верификации СБИС. Так, по приведенной в [5] статистике, в настоящее время причинами повторного запуска в производство изделий в 75% случаев являются ошибки логического функционирования. Также отмечаются сложности в организации КиД и необходимость обнаружения ошибок на ранних этапах проектирования.

На рис. 6 представлен процесс обнаружения программных и конфигурационных ошибок при адаптации ЭТ, показывающий взаимосвязи операций КиД.

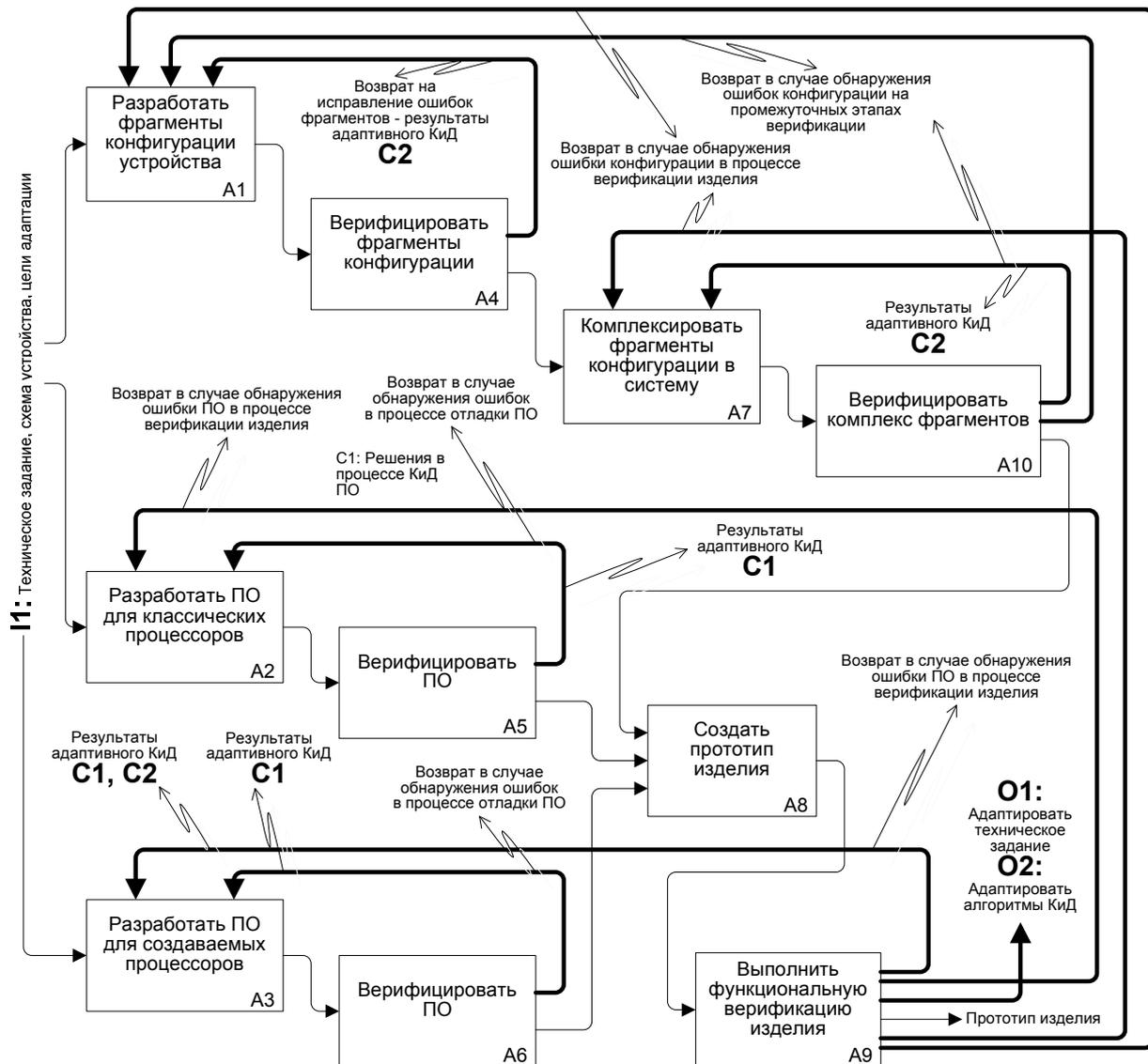


Рис. 6. Процесс обнаружения программных и конфигурационных ошибок при адаптации ЭТ

Обозначения *I1, C1, C2, O1, O2* соответствуют позициям рис. 5. Длительность показанных на рис. 6 основных путей возврата в случае возникновения ошибок определяет время проектирования изделия (увеличение до 70%). Значимым является момент обнаружения ошибок. Так, обнаружение ошибок на поздних этапах проектирования (блоки А9, А10) приводит к существенному увеличению времени проектирования.

В современных условиях свойство сложности верификации рассматривается как залог решения многих проблем проектирования компонентной базы [5]. Этот вывод справедлив и для разработки устройств ЭТ.

Циркулирующие в ходе осуществления производственных процессов информация и материальные объекты разнородны и многовариантны, а создание комплексных методик потребует использования новых подходов к тестированию и способов генерации тестов.

При этом сложность как программного, так и аппаратного обеспечения их производства и эксплуатации неуклонно возрастает, что приводит к росту вероятности возникновения внешних неисправностей. В силу увеличения доли информационной составляющей особое внимание уделяется решению задач КиД ПО.

Отсутствие или недостаточный уровень развития комплексных КиД рассматриваемых процессов в настоящее время признается причиной, тормозящей развитие современной высокотехнологичной аппаратуры.

### 3. ЗАДАЧИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью повышения функциональности и качества ЭТ, необходимо сформулировать задачи перспективных исследований, лежащие в рамках предлагаемой концепции адаптивных КиД ПО.

Можно выделить следующие особенности современных электронных устройств: интенсивное изменение функциональных требований; постоянно возрастающая сложность программного и аппаратного обеспечения; связанность процессов производства и эксплуатации; применение конфигурируемой компонентной базы, в силу чего разработчик приобретает возможностью применения процессора, специализированного под решаемые задачи.

На основании выделенных особенностей можно сформулировать следующие требования к процессам КиД: адаптивный характер исполнения; приемлемая сложность базы тестовых воздействий и временная эффектив-

ность их применения; комплексность подхода к проведению КиД ПО; учет взаимовлияния аппаратной и программной составляющей устройств ЭТ.

Совокупность протекающих процессов производства электронных устройств (при использовании прототипирования) может быть проиллюстрирована рис. 7.

На рисунке номерами выделены области, соответствующие элементам концепции КиД ПО, разработка которой позволяет повысить функциональность и качество продукции.

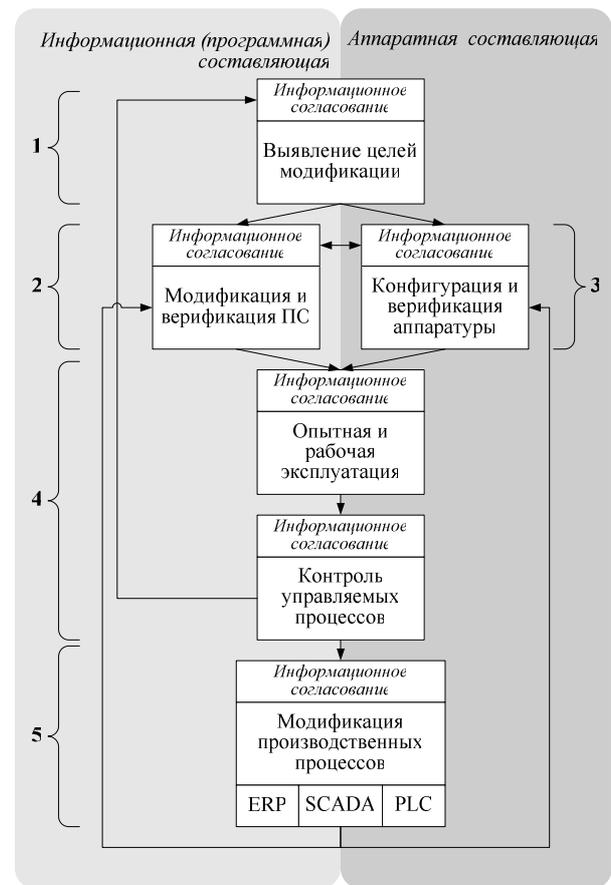


Рис. 7. Совокупность протекающих процессов производства электронной техники

Как было отмечено в начале данной работы, для повышения эффективности применения конфигурируемой элементной базы при построении перспективных устройств ЭТ должны быть решены следующие задачи:

- 1) разработка методики определения целей модификации ПО;
- 2) разработка комплекса адаптивных алгоритмов КиД ПО, работающих в изменяющихся условиях производства, эксплуатации, высокой сложности и реконфигурации компонентной базы вычислителя;

3) разработка методики согласования верификации аппаратуры с адаптивными алгоритмами КиД ПО;

4) разработка методики адаптивного тестирования ПО на целевой платформе и алгоритм автоматической генерации базы тестовых примеров (положения данной методики подробнее изложены в [6] и защищены патентом на комплексное изобретение [7]);

5) разработка системы организационного управления адаптивным КиД информационного обеспечения производственными процессами в условиях модификации (пример построения такой системы для решения задач разработки ПО приведен в [8]).

В качестве общей задачи в рамках предлагаемой концепции можно указать необходимость информационного согласования разнородных процессов КиД друг с другом. Комплексный подход к решению поставленных задач позволит осуществлять КиД ПО производства и эксплуатации перспективных устройств ЭТ, удовлетворяющие указанным требованиям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривая управляющее и специализированное ПО микроконтроллеров, программируемых логических контроллеров, систем на кристалле, можно сделать вывод о том, что задачи КиД подвергаются существенному изменению. Предложена концепция адаптивного КиД, заключающаяся в том, что в условиях интенсивной модернизации программного и аппаратного обеспечения должны подвергаться адаптации и алгоритмы КиД.

В существующих условиях успешное применение перспективной компонентной базы тормозится отсутствием комплексных подходов к выполнению контролирующих процедур. Их развитие должно опережать дальнейшее совершенствование технологий изготовления электронной техники, чтобы использование функций новой компонентной базы было наиболее эффективным. Решение сформулированных задач в рамках изложения концепции является перспективным направлением исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красников Г. Я.** Страна должна быть достойна современной микроэлектроники // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* 2008. № 1. С. 4–7.
2. **Иванов Д. В.** Современные принципы построения программного обеспечения бортовых и наземных программно-аппаратных комплексов //

ОАО «Корпорация "Русские Системы». 2006 [Электронный ресурс] (<http://www.rusys.ru/docs/Den/article.pdf>).

3. Intel® Core™ 2 Extreme Processor X6800D and Intel® Core™2 Duo Desktop Processor E6000 and E4000 Sequence. Specification Update / Фирма Intel. Май 2007 г. [Электронный ресурс] (<http://downloadcenter.intel.com/design/processor/specupdt/31327914.pdf>).

4. **Лохов А., Рабоволок А., Филиппов А.** Физический синтез PFGA. Система Precision Physical Synthesis // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* 2005. № 6. С. 78–79.

5. **Лохов А., Рабоволок А.** Комплексная функциональная верификация СБИС. Система Questa компании Mentor Graphics // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* 2007. № 3. С. 102–109.

6. **Скрябин А. М., Кардаш Д. И.** Способ организации процесса динамического тестирования программного обеспечения специализированного вычислителя // *Вторая Всероссийск. науч.-техн. конф. с международным участием «Мехатроника, автоматизация, управление» (МАУ'2005): Сб. тр. Т. 2.* 2005. С. 281–287.

7. **Скрябин А. М., Кардаш Д. И., Фрид А. И.** Пат. 2300795 Российская Федерация, МПК7 G 05 В 23/00. Устройство и способ для контроля управляющей программы вычислителя; заявл. 14.06.05; опубл. 10.06.07, Бюл. № 16. 9 с.

8. **Скрябин А. М., Кардаш Д. И.** Нечеткая экспертная система оценки управляющего программного обеспечения // *Аспирант и соискатель.* 2008. № 3. С. 137–140.

## ОБ АВТОРАХ



**Фрид Аркадий Исаакович**, проф. каф. вычисл. техники и защиты инф. Дипл. инж.-электром. (УАИ, 1968). Д-р техн. наук по управ. в техн. системах (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. управ. сложн. сист. в условиях неопределенности.



**Кардаш Денис Иванович**, доц. той же каф. Дипл. инж. по вычисл. машинам, комплексам, системам и сетям (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по матем. и программн. обесп. вычисл. машин, комплексов и систем (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. систем искусств. интеллекта, интеллект. отказоустойч. систем управления, программн. обеспечения систем управления.