

Палагин А.В., д-р. техн. наук,  
Опанасенко В.Н., д-р. техн. наук

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

[palagin\\_a@ukr.net](mailto:palagin_a@ukr.net)  
[opanasenkovm@nas.gov.ua](mailto:opanasenkovm@nas.gov.ua)

### **Введение**

На сегодняшний день выделяют четыре промышленные революции.

Четвертая (начало XXI века) промышленная революция (Industrie 4.0) должна преобразовать производственные силы, которые станут самоорганизующимися, т.е. смогут получать обратную связь от конечного изделия, узла, станка, бытового прибора. Все это должно произойти с внедрением интеллектуальных роботов, разработка которых будет определять такие направления как усиленную интеграцию киберфизических систем (CPS) в производственные процессы Интернет вещей.

Другими словами, Индустрия 4.0 - производственная сторона, эквивалентная ориентированному на потребителей Интернету вещей, в котором предметы быта, от автомобилей до тостеров, будут подключены к Интернету.

Один из ключевых путей развития интернета вещей и четвертой индустриальной революции заключается в том, что материалы способны идентифицировать себя с помощью своих цифровых меток. То есть на любой детали содержится информация о том, где она произведена, для чего предназначена и так далее. Наиболее распространенная форма - штрих-коды. Такие метки меняют коммуникацию между вещами, которые до этого «не могли говорить».

Разумная фабрика - ключевая точка индустрии 4.0, где организована разумная логистика, когда компоненты, из которых собирается, допустим, телефон, помечены метками, и фабрика сама зна-

ет, как их использовать. Средства производства самостоятельно взаимодействуют друг с другом без помощи человека.

Известны 8 основных разновидностей промышленности [1], которые будут преобразованы с помощью IoT.

– Нефть, газ и горная промышленность. Устройства IoT представляют собой разнообразные датчики, необходимые для получения информации о состоянии добычи.

– Сельское хозяйство. Датчики помещаются в почву для регулирования уровня плотности, температуры и прочих переменных, позволяющие увеличить урожай.

– Коммунальная сфера. Умные датчики-счетчики позволяют удовлетворить возрастающие запросы людей и предприятий в электроэнергии и других ресурсах.

– Ритейл. Датчики, синхронизированными с мобильными приложениями будут использоваться в магазинах для мониторинга поведения покупателей и продвижения нужной рекламы, как это происходит в Интернете.

– Производство. Полностью роботизированные производственные линии, где участие человека сведено к минимуму.

– Транспорт. Устройства IoT будут управлять беспилотными транспортными средствами.

– Доставка еды и другие производственные сервисы. В основе это

будут цифровые метки, связывающие продуктовые магазины и фастфуды.

– Здравоохранение. Устройства IoT будут собирать данные о пациентах, автоматизировать процессы в больницах и т.д.

Благодаря технологическому прогрессу, разнообразные датчики – GPS, датчики движения, камеры, микрофоны – стали достаточно дешевыми. То же произошло и с устройствами, предназначенными для передачи информации по различным каналам беспроводных соединений -Bluetooth LTE, WiFi, LTE и т.д. И эти компоненты будут продолжать дешеветь. Это открывает возможности для интеллектуализации многих предметов путем сбора ими данных и передачи сигналов друг другу.

Все это привело к цифровизации экономики.

### **Цифровая экономика**

Цифровая экономика - это не отдельная отрасль, а виртуальная среда, дополняющая нашу реальность. Все чаще цифровая экономика переплетается с традиционной экономикой, делать четкое разграничение между ними все сложнее. Основными продуктами цифровой экономики есть те же товары и услуги традиционной экономики, предоставляемых с помощью компьютерного оборудования и цифровых систем типа глобальной сети Интернет, что дает свои преимущества, главным из которых является повышение доступности для обычных пользователей к определенным рынкам (товарным или услуг), а не только крупным компаниям, снижение издержек, повышение эффективности и конкурентоспособности.

Международная организация OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) выделяет одну из основных компонент цифровой экономики «Поддерживающая инфраструктура (аппаратное и программное обеспечение, телекоммуникации, сети и др.)».

Стратегическая рамочная программа «Горизонт 2020» открыла эру интенсивного развития smart систем различного уровня и назначения. Это направление поддержано совместной технологической инициативной (ЖТ) «Электронные компоненты и системы для европейского лидерства (ECSEL) на период до 2024г. и одноименным совместным предприятием ECSELJU. Многолетний стратегический план реализации программы исследований и инноваций в области электронных компонентов, систем и технологий (MARSIA) обеспечивает развитие следующих основных доменов: smartmobility, smartsociety, smartenergy, smarthealth и smartproduction. По сути, имеются в виду технологии, воздействующие на все аспекты функционирования современного общества.

В настоящее время на одна национальная экономика не может победить в глобальной конкуренции без развития этих технологий и связанных с ними инфраструктурных преобразований: взаимодействие в реальном времени машин, людей и объектов окружающего мира, обеспечение охраны безопасности личности и общества, эффективное снабжение и распределение (вода, продукты питания и др.), логистика, smart администрирование и, в целом, поддержание устойчивого развития общества. Все множество перечисленных задач и областей деятельности является объектом исследования и разработок стратегического плана MARSIA[1].

Совместное предприятие ECSELJU состоит из трех ассоциаций, объединяющих сотни европейских предприятий, специализирующихся по трем основным направлениям:

Европейская ассоциация предприятий AENEAS, занимающихся исследованиями и инновациями в области микро- и нанoeлектроники;

Европейская платформа EPoSS по интеграции smart систем и интегрированным микро- и наносистемам;

Европейская промышленная организация ARTEMIS, ориентированная на создание широкого класса систем со встроенным интеллектом.

Хотя киберфизические системы, как целостные системы, созданы для выполнения определенных приложений, многие технологические вопросы и проблемы в этих системах являются общими (независимыми от приложений), и как таковые, киберфизические системы могут рассматриваться как поддерживающие технологии.

Киберфизические системы (CPS) - это электронные системы, компоненты и программное обеспечение, которые тесно взаимодействуют с физическими системами: их встроенный интеллект предоставляет возможности для мониторинга, анализа и контроля физических компонентов и процессов в различных приложениях, таких как: мобильность, аэрокосмическая промышленность, здравоохранение, продовольствие, сельское хозяйство и производственные системы. Их способность подключаться и взаимодействовать через все виды сетей и протоколов (включая Интернет, проводную, беспроводную связь) позволяет им сотрудничать, координировать и оптимизировать функциональные возможности высокого уровня.

### **Задачи исследовательского проектирования**

Известен метод формализованных спецификаций, в котором процесс проектирования вычислительной системы (программы или устройства) представляется в виде последовательности этапов, на каждом из которых проект системы представлен совокупностью математических моделей, описывающих различные ее части[2]. Структура должна реализовать некоторую функцию, определенную в терминах математической модели соответствующей предметной области, обладать определенными сложностными характеристиками и функционировать в заданной алгоритмической среде.

Архитектура исследовательской системы проектирования представляется четверкой[2-4]:

$$S = \langle M, Q, A, F \rangle,$$

где:  $M$  – множество математических методов для предметной области, лежащих в основе функционирования системы;

$A$  – множество алгоритмов реализации метода;

$B = \{b\}$  – алфавит конструктивов на базе FPGA, из которых синтезируется структура. Алфавитом будем называть набор всех компонент  $\{b\}$ , на основе которых строятся допустимые описание и реализация проекта;

$F$  – процедура описания проекта (описание объекта).

Таким образом, процесс исследовательского проектирования состоит в решении задачи синтеза структуры на основе конструктивов  $\{b\}$  алфавита  $B$  для выполнения определенного алгоритма  $A$ , реализующего метод  $M$ , лежащий в основе функционирования структуры, в соответствии с требованиями спецификаций. Результатом процедуры  $F$  является описание проекта во входном языке САПР.

Очевидно, сегодня представляется затруднительным предложить общую методологию разработки оптимального метода решения произвольной задачи в произвольной предметной области. Более реалистичным на настоящем этапе развития интеллектуальных систем представляется создание хорошо структурированной библиотеки методов и соответствующих архитектур проектируемой вычислительной системы, хранимых в виде программных файлов во внешней памяти базовой вычислительной подсистемы (рис. 1), и выбор подходящей пары (метод – архитектура) для конкретной проблемной ситуации.

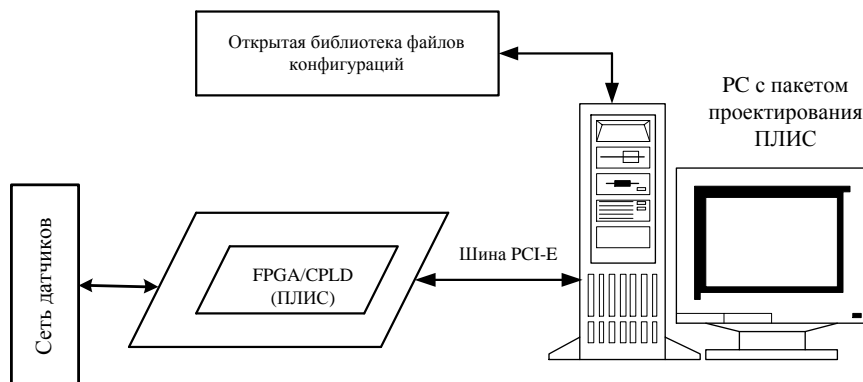


Рис. 1. Структура системы исследовательского проектирования

Таким образом, задача оптимального синтеза сводится к задаче оптимального выбора на предварительно сформированном (и постоянно расширяемом) множестве решений. Этот процесс можно достаточно строго формализовать. В общем случае процесс постановки любой задачи на компьютере требует эффективного человеко-машинного взаимодействия. Предложенный подход позволяет не только получить оптимальное решение задачи, но облегчить ее постановку и взаимодействие пользователя с компьютерной системой.

Целевая функция в аналитическом виде находится одним из приближенных методов, например линейной или нелинейной интерполяции или экстраполяции, по нескольким опорным точкам (структурные реализации алгоритма), которые получают путем предварительного формирования вариантов реализаций алгоритма или берут из набора готовых CORE-ядер, которые входят в состав открытой библиотеки файлов конфигураций. Из множества этих точек, где каждой  $r$ -ой точке ( $r = 1 \div m$ ) соответствует реализация с параметрами  $\langle T_r, C_r \rangle$ , формируется множество Парето на плоскости с учетом соотношений [2]:

$$T_1 \leq T_2 \leq \dots \leq T_r \leq \dots \leq T_m ;$$

$$C_1 \geq C_2 \geq \dots \geq C_r \geq \dots \geq C_m .$$

В общем виде, задача выбора оптимального варианта реализации алгоритма сводится к минимизации функционала:

$$L_r = \alpha(T_r/T_0) + \beta(C_r/C_0) \Rightarrow \min , \quad \text{с учетом ограничений:}$$

$$\begin{cases} T_r \leq T_0 ; \\ C_r \leq C_0 , \end{cases}$$

где:  $\alpha, \beta$  - весовые коэффициенты, которые могут быть определены, например, методом экспертных оценок;  $T_0, C_0$  - заданные предельные значения параметров  $T_r$  и  $C_r$ .

Если заданным ограничениям удовлетворяет единственная точка множества Парето, то реализация, соответствующая этой точке, является оптимальной. Если ограничениям удовлетворяют несколько таких точек, то необходимо минимизировать функционал.

Пусть задана постановка задачи из предметной области, которая может быть решена несколькими методами  $D = \bigcup M_i, (\forall i = 1 \div n)$ . Для каждого из методов существует некоторое множество алгоритмов реализации  $A(M_i) = \bigcup A_{ij}, (\forall j = 1 \div m_i)$ . Каждый из алгоритмов реализуется на базе множе-

ства  $B = \{b_{\omega}\}$ ,  $(\forall \omega = 1 \div k_{ij})$  заданных функций (например, сложение, умножение и другие). Каждая функция конструктива В может быть реализована несколькими вариантами  $C = \bigcup_{\lambda} C_{\lambda}(B_{ij})$ ,  $(\forall \lambda = 1 \div s_{ij\omega})$ . Граф синтеза структуры представлен на рис. 2.

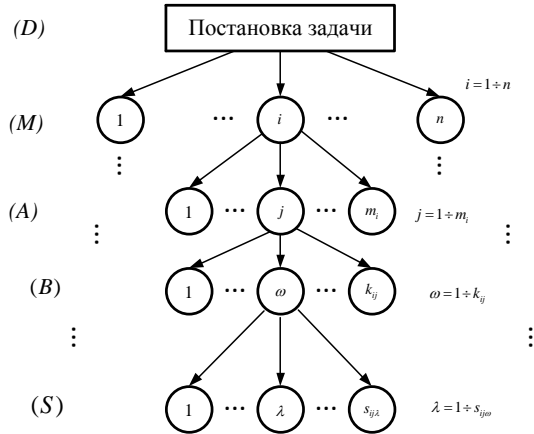


Рис. 2. Граф задачи исследовательского проектирования.

Рассмотрим формализованную постановку задачи оптимизации:

$$\alpha \sum_i \sum_j \sum_{\psi} \sum_{\gamma} q_{ij\psi\gamma} x_{ij\psi\gamma} + \beta \sum_i \sum_j \sum_{\psi} \sum_{\gamma} t_{ij\psi\gamma} x_{ij\psi\gamma} \Rightarrow \min,$$

$$(\forall i = 1 \div n); (\forall j = 1 \div m_i);$$

$$(\forall \psi = 1 \div k_{ij}); (\forall \lambda = 1 \div s_{ij\psi}).$$

учитывая ограничения:

$$\sum_i \sum_j \sum_{\psi} \sum_{\gamma} q_{ij\psi\gamma} x_{ij\psi\gamma} \leq Q_0,$$

$$\sum_i \sum_j \sum_{\psi} \sum_{\gamma} t_{ij\psi\gamma} x_{ij\psi\gamma} \leq T_0,$$

$$(\alpha + \beta) = 1, \sum_{\gamma} x_{ij\psi\gamma} = 1,$$

где  $\alpha, \beta$  - весовые коэффициенты, которые могут быть определены методом экспертных оценок ( $\alpha, \beta \in [0,1]$ );  $c_{ij\psi\gamma}, t_{ij\psi\gamma}$  - аппаратные и временные оценки (относительные)  $\lambda$ -го варианта структуры устройства построенного на функциях из  $\psi$ -го множества описаний реализаций функций для  $j$ -го алгоритма  $i$ -го метода поставленной задачи;

$x_{ij\psi\lambda}$  - булева переменная, которая определяет подходящий вариант реализации структуры устройства ( $x_{ij\psi\lambda} \in \{0,1\}$ );  $Q_0, T_0$  - (относительные) аппаратные и временные ограничения в постановке задачи  $D$ .

Решением задачи синтеза структуры устройства будет выбор оптимальной структуры из набора существующих  $S = \{s_{ij\omega\lambda}\}$ .

### Выводы

Предложен метод формализации процесса исследовательского проектирования, который предназначен для описания процесса разработки цифровых устройств и выбора оптимального варианта структурной реализации для заданной постановки задачи. В результате определяются компоненты структуры, реализующей оптимальный алгоритм выбранного метода решения поставленной задачи при соответствующей системе ограничений.

### Литература

1. 2016 Multi Annual Strategic Research and Innovation Agenda for ECSEL Joint Undertaking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.smart-systems-integration.org/system/files/document/2017 ECSEL MASRIA.pdf](https://www.smart-systems-integration.org/system/files/document/2017_ECSEL_MASRIA.pdf).
2. Палагин А.В. Реконфигурируемые вычислительные системы. / Палагин А.В., Опанасенко В.Н. – Киев: Прогрес, 2006. – 295 с.
3. Опанасенко В. Synthesis of multilevel structures with multiple outputs. / Опанасенко В., Kryvyi S. // CEUR Workshop Proceeding of 10th International Conference of Programming, UkrPROG. – 2016. – Vol. 1631. – pp.32–37.
4. Опанасенко В.Н. Высокопроизводительные реконфигурируемые компьютеры на базе FPGA. / Опанасенко В.Н. // Проблеми інформатизації та управління. – 2009. – Т. 3, Вып. 27. – С. 114-118.

Палагин А.В., д-р. техн. наук  
Опанасенко В.Н., д-р. техн. наук

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*Выполнен анализ основных путей развития четвертой промышленной революции (Industrie 4.0), которая призвана осуществлять усиленную интеграцию киберфизических систем (CPS) в производственные процессы и Интернет вещей (IoT). Industrie 4.0 - это производственная сторона, эквивалентная ориентированному на потребителей IoT, в котором предметы быта, от автомобилей до тостеров, будут подключены к Интернету и смогут получать обратную связь от конечного изделия, узла, станка, бытового прибора. Все это должно произойти с внедрением интеллектуальных роботов. Представлены основные виды промышленности, которые будут преобразованы с помощью IoT. Все это способствует развитию Цифровой экономики. Международная организация OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) выделяет одну из основных компонент цифровой экономики «Поддерживающая инфраструктура (аппаратное и программное обеспечение, телекоммуникации, сети и др.)». Эру интенсивного развития smart систем различного уровня и назначения поддерживает стратегическая рамочная программа «Горизонт 2020» и совместная технологическая инициатива (JTI) «Электронные компоненты и системы для европейского лидерства (ECSEL) на период до 2024г. и одноименная совместное предприятие ECSELJU. Многолетний стратегический план реализации программы исследований и инноваций в области электронных компонентов, систем и технологий (MARSIA) обеспечивает развитие следующих основных доменов: smartmobility, smartsociety, smartenergy, smarthealth и smartproduction. Выполнен анализ технологии Internet of Things – Smart системы, кибер-физические системы, их области применения и особенности построения на базе чиповFPGA. Предложен формализованный метод для исследовательского проектирования структурных реализаций для произвольной задачи в произвольной предметной области путем выбора оптимальной (метод – архитектура) пары, состоящий в решении задачи синтеза структуры на основе конструктивов алфавита для выполнения определенного алгоритма, реализующего метод, лежащий в основе функционирования структуры, в соответствии с требованиями спецификаций.*

**Ключевые слова:** оптимизация, синтез структуры, FPGA, Internet of Things.

**Palagin A.V.,  
Opanasenko V.N.**

## RESEARCH DESIGN PROCESS FORMALIZATION

*The analysis of the main development paths of the fourth industrial revolution (Industrie 4.0), which is designed to carry out enhanced integration of cyberphysical systems (CPS) into production processes and the Internet of things (IoT), is carried out. Industrie 4.0 - is the production side, equivalent to the consumer-oriented IoT, in which household items, from cars to toasters, will be connected to the Internet and will be able to receive feedback from the final product, assembly, machine, household appliance. All this must happen with the introduction of intelligent robots. The main industries that will be transformed using IoT are presented. All this contributes to the development of the Digital Economy. The international organization OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) identifies one of the main components of the digital economy "Supporting infrastructure (hardware and software, telecommunications, networks, etc.)". The era of intensive development of smart systems of various levels and purposes is sup-*

ported by the Horizon 2020 strategic framework program and the joint technological initiative (JTI) Electronic Components and Systems for European Leadership (ECSEL) for the period up to 2024. and the joint venture of the same name ECSEL JU. The multi-year strategic plan for the implementation of the research and innovation program in the field of electronic components, systems and technologies (MARSIA) provides the development of the following main domains: smart mobility, smart society, smart energy, smart health and smart production. The analysis of Internet of Things technology - Smart systems, cyber-physical systems, their applications and construction features based on FPGA chips is performed. A formalized method is proposed for the research design of structural implementations for an arbitrary problem in an arbitrary subject area by choosing the optimal (method - architecture) pair, consisting in solving the structure synthesis problem based on constructs of an alphabet for performing a specific algorithm A that implements the method that realization the structure functioning, in accordance with the requirements of the specifications. The result of the procedure is the description of the project in the CAD input language.

**Key words:** optimization, structure synthesis, FPGA, InternetofThings.

**Палагін А.В.,** Д-р. техн. наук

**Опанасенко В.М.,** д-р. техн. наук

#### **ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДОСЛІДНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

Виконано аналіз основних шляхів розвитку четвертої промислової революції (Industrie 4.0), яка повинна здійснювати посилену інтеграцію кібер-фізичних систем (CPS) у виробничі процеси і Інтернет речей (IoT). Industrie 4.0 – це виробнича сторона, еквівалентна орієнтованому на споживачів IoT, в якому предмети побуту, від автомобілів до тостерів, будуть підключені до Інтернету і зможуть отримувати зворотний зв'язок від кінцевого вузла. Все це повинно статися з впровадженням інтелектуальних роботів. Представлено основні види промисловості, які будуть перетворені за допомогою IoT. Це сприяє розвитку Цифровий економіки. Міжнародна організація OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) виділяє одну з основних компонент цифрової економіки "Підтримуюча інфраструктура (апаратне і програмне забезпечення, телекомунікації, мережі та ін.)». Еру інтенсивного розвитку smart систем різного рівня і призначення підтримує стратегічна рамкова програма «Горизонт 2020» та спільна технологічна ініціатива (JTI) «Електронні компоненти й системи для європейського лідерства (ECSEL) на період до 2024г. й однойменне спільне підприємство ECSEL JU. Багаторічний стратегічний план реалізації програми досліджень та інновацій в області електронних компонентів, систем і технологій (MARSIA) забезпечує розвиток таких основних доменів: smart mobility, smart society, smart energy, smart health і smart production. Виконано аналіз технології InternetofThings - Smart системи, кібер-фізичні системи, їх галузі застосування і особливості побудови на базі чипів FPGA. Запропоновано формалізований метод для дослідницького проектування структурних реалізацій для довільної задачі в довільній предметній області шляхом вибору оптимальної (метод - архітектура) пари, що складається в рішенні завдання синтезу структури на основі конструктивів алфавіту для виконання певного алгоритму, що реалізує метод, що лежить в основі функціонування структури, відповідно до вимог специфікації. Результатом процедури є опис проекту у вхідному мові САПР.

**Ключові слова:** оптимізація, синтез структури, FPGA, Internet of Things.