



УДК 621.396.6

С. С. Соколов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)*

## Принципы и практика системной инженерии в магистерской подготовке по направлению "Конструирование и технология электронных средств"

*Обсуждена необходимость и возможность введения в учебный процесс подготовки магистров по направлению "Конструирование и технология электронных средств" принципов системной инженерии. На основании понятия цикла жизни изделия и модели его конкурентоспособности выявлен набор компетенций, которым должен обладать системный инженер применительно к конкретному объекту проектирования в сочетании с управленческой практикой. Предложено примерное содержание рабочей программы дисциплины "Системная инженерия".*

### **Сложная система, системная инженерия, цикл жизни изделия, проектные решения, технологии проектирования, компетенции магистра техники и технологии**

В предыдущие годы, когда в России были созданы научно-методические и нормативно-технические основы проектирования и создания сложных технических объектов, проблема конкурентоспособности и качества изделий (исключая изделия военного применения) не стояла так остро. Однако в эпоху глобализации возникла потребность в согласовании и гармонизации положений системной инженерии с достижениями и рекомендациями, полученными в сфере управления качеством, управления проектами, программной инженерией и других областях.

Это касается и сферы технического образования, которое должно опираться на необходимость овладения компетенцией целостного рассмотрения методологии системной инженерии, определив ее как организованную творческую технологию, содержащую следующие основные положения:

- системная инженерия многоаспектна, что необходимо отразить при определении ее содержания;

- деятельность системного инженера основана на понимании цели процесса системной инженерии – оптимальном определении функциональных границ между человеческими интересами, системой и ее окружением – физическим, техническим, деловым, экономическим и социальным [1].

В настоящее время продолжают действовать и развиваться два основополагающих подхода системной инженерии при проектировании и создании технических средств:

- системный подход через представление технических средств как сложных технических систем, как целостного объекта, с выявлением его системных свойств через соответствие базовым принципам и постулатам: принципу физической реализуемости (постулаты целостности и автономности), принципу моделируемости (постулаты дополненности, неопределенности и действия) и принципу целенаправленности (постулат выбора) [2];

- рассмотрение всех аспектов создания и функционирования сложных технических средств во взаимосвязи и полноте через анализ их жизненного цикла (system life cycle approach) – рамочной организационной основы инженерного мышления [3].

Создание современных инженерно насыщенных систем представляет собой область междисциплинарных исследований, содержащую достижения технических, технологических, управленческих, социально-экономических, политических наук и науки о человеке. Последние две сферы требуют постоянного внимания и изучения в силу динамичности социальных и политических про-

цессов, влияющих на конечный результат при выполнении программ или крупных проектов.

Поэтому образовательный процесс в магистратуре по техническим направлениям должен с необходимостью содержать следующие дисциплины:

- системная инженерия;
- инженерный менеджмент, инновации и предпринимательство;
- системный анализ и принятие решений, исследование операций;
- проектирование продукции и организация ее производства.

При этом возможны два сценария реализации образовательных программ по системной инженерии.

Первый сценарий реализует рассмотрение системных проблем создания сложных инженерных объектов в общем виде. В этом случае системная инженерия является фундаментом программы и дополняется специальными дисциплинами.

Второй сценарий предусматривает рассмотрение инженерных проблем в определенной предметной области. При этом дисциплина системной инженерии является поддерживающей основную образовательную программу (ООП).

Подготовка магистров по направлению 11.03.03 "Конструирование и технология электронных средств" в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете им. В. И. Ульянова (Ленина) ведется по второму сценарию. В ходе освоения ООП по указанному направлению магистранты овладевают следующими компетенциями, необходимыми современному системному инженеру:

- способностью анализировать, проектировать и реализовывать системные решения по созданию электронных (радиоэлектронных) средств на основе модели их жизненного цикла (малые проекты);
- успешно и профессионально работать в междисциплинарной команде;
- способностью активной и грамотной коммуникации с коллегами и со сторонними участниками процесса.

Кроме того, системная инженерия как дисциплина позволяет привить навыки системного мышления, понимания (охвата) в целом проблемы создания технических средств, необходимых для их профессионального роста и формирования корпуса главных конструкторов – руководителей проектов любого уровня и программ.

Классическими примерами отечественных системных инженеров высочайшего уровня яв-

ляются главные конструкторы технических средств различного назначения – С. П. Королев (межконтинентальные баллистические ракеты), И. В. Курчатов (ядерное оружие), И. Д. Спасский (атомный подводный флот), А. А. Расплетин (радиотехнические комплексы).

Возможно, они не получили специальной подготовки по системной инженерии. Расширение их сферы ответственности и набора компетенций происходило постепенно по мере их профессионального и карьерного роста, так что, в конце концов, они оказались в состоянии охватить целиком всю проблему создания этих важнейших для страны технических средств.

Автор настоящей статьи пытался достигнуть названной цели, читая в течение ряда лет дисциплину "Проектирование сложных технических систем" магистрантам, обучающимся по направлению 11.03.03 "Конструирование и технология электронных средств". Содержание дисциплины базировалось на материалах монографии [2], важным частным достоинством которой является пример анализа сложной радиотехнической системы (РТС) с позиций системотехники. Целью анализа являлось получение прогноза состояния РТС, попытка ответить на вопрос "как будет развиваться система при определенных условиях?". С точки зрения системной инженерии сегодняшнего дня это была попытка оценки риска влияния принятия новых технических решений на успешность реализации проекта создания РТС.

Предложенная в [2] динамическая модель РТС оказалась сложной для восприятия ее магистрантами. Однако выделенные ими основные контуры модели – технический, экономический, эффективностный и временной – позволили сформулировать индивидуальное задание каждому магистранту по композиции иерархической структуры и системному анализу сложной системы любого вида, в том числе и технической.

Такой системный анализ включал в себя, во-первых, выявление системных признаков рассматриваемой системы, а затем признаков ее сложности, т. е. соответствие системы принципам физичности, моделируемости и целенаправленности и их постулатам. Во-вторых, магистрант должен был предложить свои критерии оценки эффективности, устойчивости и надежности системы.

Однако современный анализ требует обязательного рассмотрения проблемы создания нового изделия с учетом таких важнейших факторов как устой-

чивость его спроса на рынке, т. е. конкурентоспособности технических решений, недооцениваемой в прошлые годы, а также срока окупаемости затрат на разработку и запуск в серийное производство.

Конкурентоспособность изделия на рынке зависит от его:

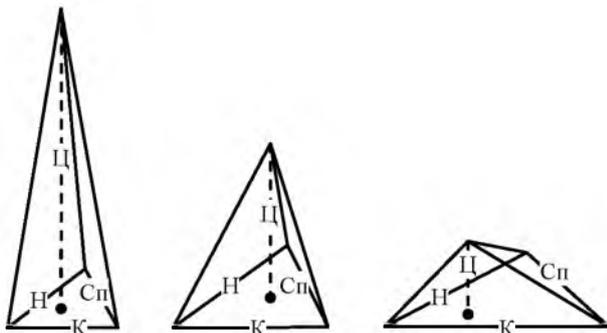
- качества (совокупности функциональных параметров и потребительских свойств);
- надежности (совокупности эксплуатационных свойств);
- серийно-пригодности (совокупности конструкторско-технологических свойств);
- стоимости (совокупности экономических показателей, рентабельности производства).

Моделью конкурентоспособности изделия, отражающей устойчивость спроса на него на рынке, может служить, например, устойчивость разных пирамид (рисунок). Ребра основания пирамид представляют показатели качества (К), надежности (Н) и серийно-пригодности (Сп); высота пирамиды отражает экономические (ценовые) показатели (Ц).

Устойчивость пирамиды возрастает с увеличением площади ее основания и с уменьшением высоты или с увеличением площади  $S$  поверхности и уменьшением объема  $V$  пирамиды.

Функционал  $U \Rightarrow \{\min(V) \max(S)\}$  есть некоторый минимаксный показатель конкурентоспособности РЭС, компоненты которого – явные антагонисты. Поскольку достижение экстремальных значений составляющих этого минимаксного показателя конкурентоспособности возможно на разных этапах и стадиях жизненного цикла изделия, полностью решить проблему создания конкурентоспособной продукции и, что немаловажно, за ограниченное время возможно, только опираясь на принципы системной инженерии.

Методической основой для изучения магистрантами принципов системной инженерии могла бы стать монография [4] – первое методическое пособие по рассматриваемой проблеме, изданное в России за последние 30 лет ограниченным тиражом.



В [4] обобщен огромный зарубежный опыт системной инженерии по созданию аэрокосмических средств; опыт, может быть, малоизвестный и малоиспользуемый. Хотя основные подходы к проектированию и созданию сложных технических систем – последовательность этапов и стадий, цикличность процедур – не являются чем-то новым. Однако нынешние выпускники специалитета (инженеры) и магистратуры (магистры техники и технологий) технических университетов слабо представляют роль и значение системного инженера в современном производстве в условиях существования пятого и зарождения шестого экономических укладов в мировой экономике, в условиях жесткой конкуренции и глобализации. Им хорошо знаком системный программист, но это частный случай системного инженера.

Современный инженер – это специалист, "грамотно сочетающий традиционную инженерную деятельность с эффективной управленческой практикой, создающий на этой основе конкурентоспособную продукцию" [4]. Ему приходится работать на стыке разных дисциплин. Поэтому для успешной работы по руководству проектами разного уровня или отдельной программы системный инженер должен иметь:

- хорошую подготовку в естественнонаучных и инженерно-технических дисциплинах;
- технические достижения в определенной предметной области;
- навыки в нескольких инженерных областях;
- навыки межличностного общения и коммуникативные способности;
- способность быстро усваивать новые идеи и информацию;
- "здоровый" скептицизм, позитивность мышления;
- интуицию при опережающем использовании передовых технологий, правильно оценивая риски и их влияние на успешность проекта в целом.

В качестве отступления следует отметить, что за рубежом системную инженерию рассматривают шире, чем учебную дисциплину: появилась и востребована профессия системного инженера.

Особенность деятельности системного инженера (в отличие от "классического" инженера) состоит в том, что он "... имеет дело с задачами, которые изучены не полностью; для этих задач не существует известных уравнений, связывающих переменные; задачами, при решении которых требуется отыскать баланс между конфликтующими целями с несоизмеримыми атрибутами" [4].

Понятие "системная инженерия" очень многозначно: это и системная методология XXI в.; но и процесс, и в этом заключается сложность его понимания и адаптации к реальным объектам и ситуациям [5]. И одной из сложностей, возникающей при освоении студентами этой дисциплины по утвержденной рабочей программе, является проверка уровня освоения студентами содержания дисциплины.

Участие студентов в реальном проекте в течение семестра исключено. Вряд ли имеет смысл заучивать многочисленные определения и рекомендации, составляющие существо монографии [4]. Остаются качественные задачи, предлагаемые студентам в конце каждого ее раздела. Но эти задачи не имеют конкретных ответов, поэтому предлагать их для решения может лишь преподаватель, обладающий достаточным для их интерпретации уровнем понимания системной инженерии. А вот это – самая серьезная проблема.

В то же время создание технических средств, относящихся к направлению подготовки 11.03.03 "Конструирование и технология электронных средств", невозможно без опоры на принципы системной инженерии. Известно, сколь велико многообразие этих средств, процессов их создания, динамичность компонентной базы, диапазон параметров, области использования, конкуренция на мировом рынке; не следует забывать и о социальных, экономических и политических последствиях их применения.

Это значит, что дисциплина "Системная инженерия" должна быть базовой дисциплиной учебного плана подготовки магистров по указанному направлению.

Далее представлено примерное содержание дисциплины "Системная инженерия". За основу взяты рекомендации монографии [4] с учетом специфики объекта проектирования – радиоэлектронных средств.

**Тема 1. Основы системной инженерии.** Современные радиоэлектронные средства (РЭС) как

объект системной инженерии. Сложные системы: основные понятия, характеристики и методы анализа. Цикл жизни сложных систем: этапы и стадии их разработки, создания и эксплуатации. Системная инженерия РЭС как профессия. Примеры и упражнения.

**Тема 2. Стадии разработки концепции.** Выявление общественной потребности в новых видах РЭС. Разработка и согласование требований к РЭС: этапы и участники. Аванпроект как этап разработки концепции и структуры системы и определения средств поддержки проекта – научных, инженерных, производственных, финансовых и социальных. Анализ рисков и компромиссов и принятие решений по критерию "затраты – эффективность – время". Примеры и упражнения.

**Тема 3. Разработка инженерно-технических решений.** Реализация функциональных требований на этапе эскизного проектирования. Анализ состояния компонентной базы и выявление потребностей в ее новых видах. Разработка прототипа системы и программных средств, необходимых для ее функционирования. Испытания прототипа и испытательное оборудование. Системная инженерия на этапе технического проектирования. Комплексирование, испытания и аттестация системы в целом. Примеры и упражнения.

**Тема 4. Разработка РЭС с учетом производства.** Этап производства в жизненном цикле сложных систем. Производство как сложная система: производственные процессы. Подготовка РЭС к производству: проблемы перехода от разработки к производству. Этап эксплуатации и сопровождения в жизненном цикле РЭС. Модернизация РЭС. Примеры и упражнения.

Знания и навыки, полученные магистрантами в ходе освоения данной дисциплины, помогут им на современном уровне подготовить и успешно защитить магистерскую диссертацию, представляемую в форме технического проекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холл А. Д. Опыт методологии для системотехники / пер. с англ. под ред. Г. Н. Пивоварова. М.: Сов. радио, 1975. 447 с.
2. Дружинин В. В., Конторов Д. С. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 54 с.
4. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Свит, С. Сеймур и др.; пер. с англ. под ред. В. К. Батоврина. М.: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
5. Лоусон Г. Путешествие по системному ландшафту. М.: ДМК Пресс, 2013. 370 с.

S. S. Sokolov  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

## Principles and practice of systems engineering in the master's training in "Design and technology of electronic equipment"

*The necessity and the possibility of introducing of systems engineering principles in the educational process of masters training on knowledge field of "Design and technology of electronic equipment" is discussed. Taking into account some of the concept of life cycle of the product and the model of its competitiveness, a set of the competence, which should have a systems engineer for specific object designing in combination with management practices, is offered. The approximate the working program of "Systems engineering" discipline is proposed.*

Complex system, system engineering, life cycle of the product, design solutions, design technologies, competency of master of engineering and technology

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2015 г.

---

УДК 621.37

А. Э. Баскакова, В. М. Тургалиев, Д. В. Холодняк  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры с постоянной шириной полосы пропускания на элементах с сосредоточенными параметрами

*Рассмотрены перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры (ППФ) на элементах с сосредоточенными параметрами, состоящие из LC-контуров и инверторов сопротивления или проводимости. Перестройка центральной частоты обеспечивается переменными конденсаторами, входящими в контуры и инверторы. Проанализирован диапазон перестройки ППФ с сохранением постоянной ширины полосы пропускания. Приведены условия сохранения абсолютной и относительной ширины полосы пропускания. Обсуждены ограничения на диапазон перестройки ППФ, связанные с практической реализацией инверторов сопротивления/проводимости и с использованием реальных управляющих элементов (переменных конденсаторов). Представлены результаты проектирования перестраиваемого ППФ третьего порядка с постоянной абсолютной шириной полосы пропускания.*

### Полосно-пропускающие фильтры, элементы с сосредоточенными параметрами, перестройка, постоянная ширина полосы пропускания

С целью поддержки различных стандартов беспроводной связи в современных системах связи для разделения частотных каналов используется, как правило, набор (банк) полосно-пропускающих фильтров (ППФ) [1]. Перестраиваемый ППФ способен заменить собой несколько ППФ с фиксированными (неперестраиваемыми) характеристиками, что позволяет уменьшить число используемых фильтров и, тем самым, способствует снижению массогабаритных показателей, сложности и стоимости системы связи.

Для некоторых применений важно, чтобы ширина полосы пропускания фильтра сохраня-

лась постоянной при перестройке центральной частоты  $f_0$ . В настоящее время известны методы проектирования перестраиваемых ППФ на отрезках линий передачи, обеспечивающие сохранение абсолютной ( $\Delta f = \text{const}$ ) или относительной ( $\Delta f / f_0 = \text{const}$ ) ширины полосы пропускания [1]–[4]. Недостатком фильтров на отрезках линий являются их значительные размеры в сравнении с длиной волны, что ограничивает возможности применения таких фильтров в нижней части СВЧ-диапазона. Малогабаритные перестраиваемые ППФ могут быть выполнены на элементах с