

УДК 621.382.029.6:658.512.2

DOI 10.53403/9785951505170_2021_26_2_334

Развитие структуры технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых радиоэлектронных систем

В. А. Козлов*, Ю. А. Светлаков*,
А. Ю. Седаков*

Рассмотрена структура технологического обеспечения при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых радиоэлектронных систем. Предложены основные направления развития системного проектирования, которые могли бы повысить его эффективность и востребованность за счет повышения эффективности технологического обеспечения.

В последнее десятилетие при создании бортовых радиоэлектронных систем (РЭС) разработчиками достаточно часто используется системный подход к проектированию и производству как систем в целом, так и их составляющих частей [1–3]. Его несомненными достоинствами являются эффективное использование технологических средств (ТС), имеющихся в распоряжении разработчиков, и широкие возможности в организации замкнутого цикла проектирования и производства. Однако, было бы ошибочно рассматривать системный подход к проектированию и изготовлению бортовых РЭС как некий догматический набор правил и методик. Его можно развивать и совершенствовать по многим направлениям. В настоящей работе кратко излагается сущность системного подхода к проектированию СВЧ компонентов бортовых РЭС и предлагаются основные направления его развития, которые могли бы повысить его эффективность и востребованность за счет повышения эффективности технологического обеспечения (ТО) проектирования и изготовления СВЧ компонентов.

Сущность системного подхода к проектированию СВЧ компонентов бортовых РЭС [1] заключается в разработке методов проектирования, позволяющих осуществить полномасштабное

* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

использование функциональных возможностей СВЧ компонентов для получения выигрыша по техническим характеристикам высокочастотных блоков, в которых они используются. Номенклатура выбранных компонентов, их конструктивное исполнение, рабочие режимы и т. д. определяются исключительно с позиций получения наилучших технических характеристик высокочастотного блока, включающего в себя совокупность отдельных СВЧ компонентов, каждый из которых может, вообще говоря, иметь и неоптимальные технические характеристики. При этом возможности системного подхода могут быть реализованы в полной мере только при адекватном ТО и заключаются в том, что вопросы ТО проектирования и изготовления СВЧ компонентов должны прорабатываться в процессе всего периода проектирования, начиная с самого первого этапа [4]. В этом случае удастся наиболее полно использовать потенциальные возможности ТО для создания СВЧ компонентов с заданными техническими характеристиками. В ряде случаев такой подход приводит к весьма существенным изменениям всего процесса проектирования. В частности, если разработчику ясно, что для реализации заданных технических требований наиболее подходит какая-то конкретная технология (например, изготовление многослойных керамических плат по технологии низкотемпературного совместного обжига – Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC)), то именно под данную технологию строятся математические модели, электрические схемы, разрабатывается конструкторская документация (КД).

В целом, преимущества системного проектирования подтверждены на практике многими разработками бортовой аппаратуры [2, 3, 5, 6]. Однако, дальнейшее совершенствование технических характеристик СВЧ компонентов невозможно без развития методологии системного проектирования и поиска новых путей оптимизации самого процесса проектирования. Очевидно, что это развитие должно касаться ТО проектирования, причем использование новых технологий (и материалов) должно заключаться либо в адекватном выборе технологии, обеспечивающей возможность реализации заданных технических требований к СВЧ компонентам, либо в разработке новых технологических процессов (ТП) для их обеспечения. Это непосредственно следует из основных принципов системного подхода [1, 2].

С учетом изложенных выше особенностей развития ТО при системном проектировании неизбежно возникают новые требования к созданию технологической базы. Технологическая база в широком смысле включает в себя не только ТС (парк технологического оборудования, технологическое оснащение, ТП, методики измерений и испытаний, соответствующие производственные площади и т. д.), но и комплекс технологической документации (ТД), обученный персонал и др. – словом, все, что необходимо для поддержания и развития ТО создания соответствующей продукции.

На рисунке приведена структурная схема этапов проектирования и изготовления СВЧ компонентов бортовых РЛС с учетом ТО. Обоснование этапов проектирования приведено в работах [1, 2]. Рассмотрим возможности ТО всех этапов проектирования, а также этапа изготовления СВЧ устройств бортовых РЭС.

На первом этапе проектирования (см. рисунок) выполняется комплексный анализ технических требований, предъявляемых к совокупности СВЧ компонентов (этап 1). Определив приоритет тех или иных требований, разработчик анализирует возможность выполнения всех требований, включая приоритетные. На основе этого анализа проводится уточнение технических требований к СВЧ функциональным узлам (в состав СВЧ компонента может входить один или несколько СВЧ функциональных узлов), которые входят в состав высокочастотного блока (ВЧ) (например, приемопередающего устройства (ППУ)). При уточнении часто принимаются компромиссные решения, которые могут допускать заведомое ухудшение одних технических характеристик какого-либо СВЧ компонента с целью получения существенного выигрыша по другим [1]. Следует отметить, что критерии выбора разработчиком приоритетных требований могут быть

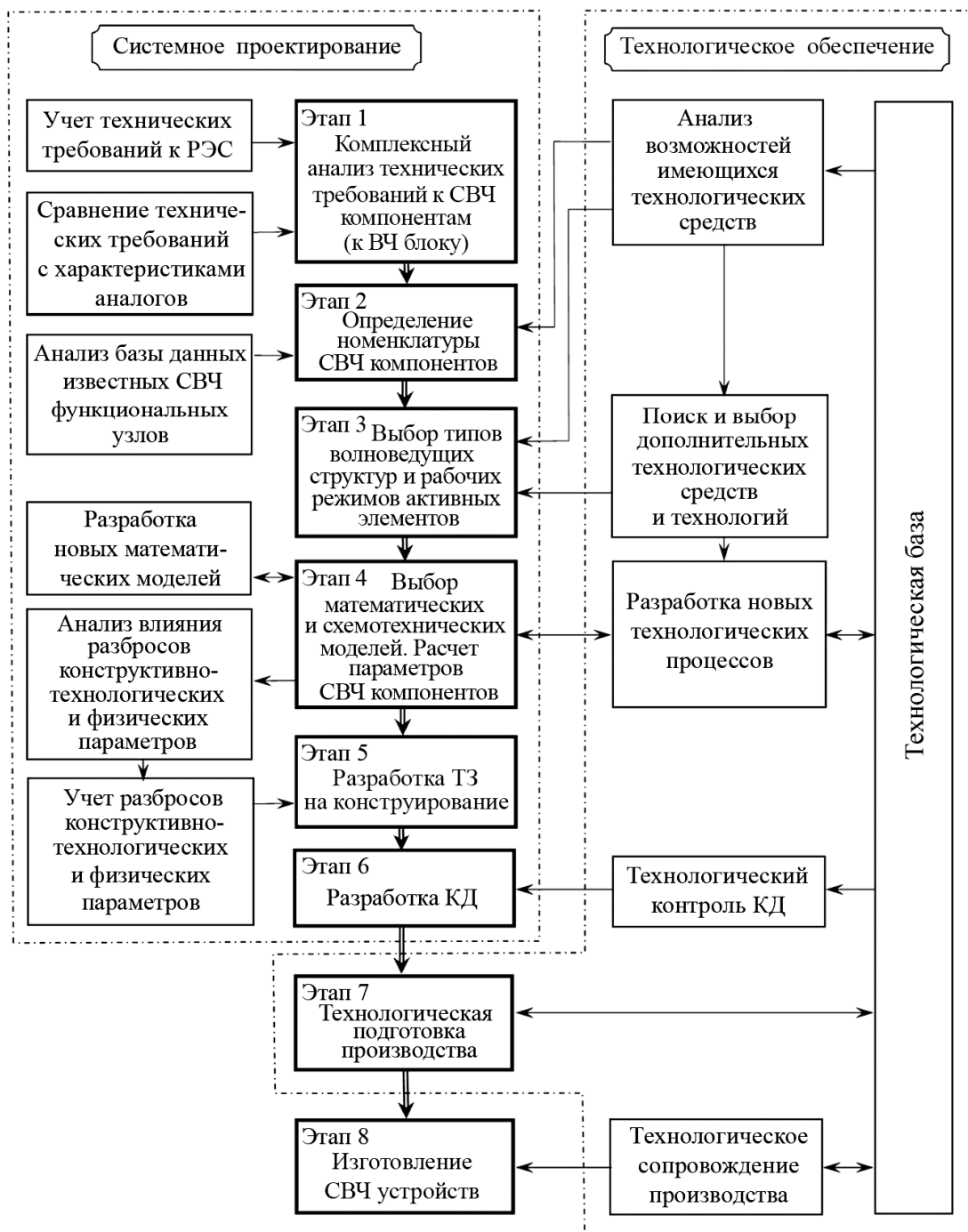


Рис. 1. Системный подход и технологическое обеспечение к проектированию и изготовлению СВЧ устройств

различными в зависимости от задач, которые должны решаться с использованием данной совокупности СВЧ компонентов. Однако, можно сформулировать очевидный критерий, согласно которому к приоритетным техническим требованиям, безусловно, следует относить такие, без обязательного выполнения которых решение задачи проектирования теряет смысл. При комплексном анализе технических требований обязательными являются учет технических требований к РЭС в целом и сравнение технических требований с характеристиками аналогов.

Следует отметить, что изложенные выше принципы комплексного анализа технических требований (этап 1, см. рисунок), включающие в себя определение приоритетных требований и принятие компромиссных решений, на практике достаточно трудно реализовать однозначно. Принятие решения может зависеть от многих факторов, в т. ч. от квалификации разработчика. Поэтому на данном этапе целесообразно формализовать действия разработчика и перейти от качественных характеристик к количественным посредством введения весовых коэффициентов для всех технических требований.

Способы определения численных значений весовых коэффициентов в принципе могут быть различными в каждом конкретном случае. Наиболее простой случай, когда они задаются заказчиком разработки данного СВЧ компонента (например, выделенный объем на борту летательного аппарата, допустимая масса СВЧ устройства, выделенная рабочая полоса частот для ППУ и др.). Однако, это не обязательно; возможно, например, использование экспертных оценок специалистов или результатов анализа общих требований к РЭС и статистических данных по аналогам разработки.

На этапе 1 вопросы технологического обеспечения могут затрагиваться лишь косвенно. А именно, при сравнении технических требований к СВЧ компонентам с характеристиками известных аналогов целесообразно проанализировать, на базе каких технологий созданы эти аналоги. Это может быть полезно, прежде всего, для того, чтобы при переходе к следующему этапу проектирования – определению номенклатуры СВЧ компонентов (этап 2) – не включать в номенклатуру устройства, требующие использования заведомо недоступных для разработчика технологий, а также чтобы оценить возможную степень унификации всей номенклатуры СВЧ компонентов, что позволит сократить сроки проектирования и суммарные материальные затраты на изготовление.

Результаты комплексного анализа технических требований являются исходными данными для второго этапа проектирования – определения номенклатуры СВЧ компонентов (этап 2). Как правило, на этом этапе возможно достаточно большое количество альтернативных вариантов как по типу используемых СВЧ компонентов, так и по конструктивному исполнению. Основным фактором, определяющим номенклатуру СВЧ компонентов, является анализ базы данных известных функциональных узлов и возможностей имеющихся ТС из арсенала технологической базы на данный момент времени. Критерии, по которым осуществляется определение номенклатуры СВЧ компонентов, формулируются в соответствии с техническими характеристиками РЭС в целом (параметры излучаемого сигнала, габариты, масса и т. д.), а не на основе технических характеристик входящих в них СВЧ компонентов [2]. На данном этапе рассмотрение вопросов ТО проектирования позволяет осуществить выбор наиболее подходящего варианта номенклатуры СВЧ компонентов из всех возможных, которые отвечают техническим требованиям, предъявляемым к ВЧ блоку. В данном случае возможны два варианта результатов анализа имеющихся ТС. Первый, наиболее предпочтительный для разработчика, заключается в том, что имеющееся технологическое оборудование и внедренные в производство ТП обеспечивают возможность изготовления всех СВЧ компонентов из выбранной номенклатуры. Второй вариант включает в себя ситуацию, когда ТС недостаточно для изготовления каких-либо СВЧ компонентов из выбранной номенклатуры. В этом случае осуществляются поиск и выбор дополнительных ТС, которые

совместно с имеющимися ТС позволят обеспечить проектирование и изготовление всей совокупности СВЧ компонентов выбранной номенклатуры. Кроме нового оборудования и новых технологических процессов, ТО проектирования и изготовления предусматривает разработку новых материалов, систем контроля и внедрение их в производство, а также разработку документации, регламентирующей проведение испытаний продукции.

На следующем этапе – выбор типов волноведущих структур и рабочих режимов активных элементов (этап 3) – объединены два различных, но неразрывно связанных направления работ: выбор СВЧ волноведущих базовых структур, составляющих конструктивную основу СВЧ компонентов, и выбор рабочих режимов СВЧ компонентов, обеспечивающих возможность выполнения ими заданных функциональных операций. Выбор СВЧ структур определяется несколькими факторами. Во-первых, заданный частотный диапазон уже определяет несколько возможных вариантов структур, которые уточняются при учете требований по массе, габаритам, механической прочности и т. д. Во-вторых, существенную роль играет учет возможностей технологической базы изготовителя. Для выбора рабочих режимов решающими могут быть требования к стабильности выходных параметров, минимизации энергопотребления, устойчивости к внешним воздействиям и т. п.

Следует отметить, что на первых этапах проектирования полного объема требований к ТО не требуется. Для формулировки предварительных приближенных требований достаточно результатов анализа базы данных известных СВЧ устройств, которые могут быть компонентами бортовых РЭС. Однако, степень полноты анализа может позволить на последующем этапе разработки КД (этап 6) практически исключить случаи отрицательного заключения технологического контроля о возможности изготовления СВЧ устройств, поскольку окончательные полные требования к ТО формулируются, когда технологическая база уже практически сформирована с учетом возможностей ТС, поиска и выбора дополнительных ТС и разработки новых ТП. При этом правильность определения номенклатуры СВЧ компонентов и выбора типов СВЧ структур и рабочих режимов подтверждена имеющимися возможностями ТО.

Далее следует этап выбора математических и схемотехнических моделей и расчета параметров СВЧ компонентов, входящих в СВЧ функциональные узлы (этап 4). При проектировании достаточно часто возникают ситуации, когда известных математических моделей оказывается недостаточно. Поэтому необходима разработка новых. При расчете СВЧ функциональных узлов обычно выбираются параметры (характеристики), удобные для экспериментальной проверки (элементы матриц рассеяния, импеданс, комплексные коэффициенты отражения и др.). Здесь следует указать еще одно возможное направление существенного развития системного подхода, которое заключается в том, что на этапе 4 математическое моделирование должно выполняться не только при расчете параметров СВЧ компонентов, но и при разработке новых ТП или выборе наиболее подходящего из доступных ТП. Этот прием предложен и обоснован авторами в работах [7, 8]. Сущность данного предложения заключается в том, что при выборе методов и средств ТП необходимо моделирование возможных альтернативных вариантов ТП, чтобы еще при проектировании без каких-либо затрат на разработку и внедрение ТП выбрать среди них оптимальный с точки зрения обеспечения необходимых характеристик конкретных СВЧ компонентов. В данном случае разработчик не просто анализирует и подбирает наиболее подходящий ТП из известных (из технологической базы предприятия) или инициирует разработку нового по субъективным соображениям или статистическим данным, а оценивает возможные результаты использования того или иного ТП или ряда процессов для получения необходимых характеристик. На этом же этапе производится анализ влияния разбросов конструктивно-технологических параметров на выходные характеристики СВЧ компонентов [9, 10]. Это позволяет без каких-либо затрат на макетирование, на основе одних только расчетов в соответствии с выбранной математической моделью

учитывать степень влияния этих разбросов и предпринимать меры для их компенсации. Могут быть два варианта результата анализа влияния разбросов конструктивно-технологических параметров: либо он определяет границы разбросов и составляет основу для разработки методов их компенсации, либо делается вывод о невозможности практической реализации проектируемого устройства на базе выбранных волноведущих структур и рабочих режимов активных элементов. Во втором случае разработчик возвращается к этапу выбора волноведущих структур и рабочих режимов активных элементов и рассматривает новый вариант структур и режимов.

Результаты этапа 4 служат основой для разработки технического задания на конструирование (этап 5), на основе которого разрабатывается КД устройства (этап 6).

При разработке КД проводится технологический контроль, целью которого является обеспечение высокого уровня технологичности изделий. Технологический контроль выполняется на всех стадиях разработки КД. В процессе выполнения технологического контроля проводится технологическая экспертиза, функционально аналогичная анализу возможностей имеющихся и выбору дополнительных ТС. Однако, она не повторяет, а дополняет проведенный ранее анализ и, кроме того, учитывает возможные новые технологические решения, которые могут быть внесены конструктором при разработке КД. В принципе, возможна ситуация, при которой в процессе технологической экспертизы КД может быть установлено, что имеющихся и дополнительных ТС недостаточно для изготовления СВЧ компонентов, однако ее вероятность невелика, поскольку ТО, выполненное на начальных этапах, базировалось на использовании базы данных известных технологических решений в СВЧ компонентах-аналогах. Если же такая ситуация все-таки возникает, то разработчик принимает одно из двух решений: либо расширить поиск и выбор дополнительных ТС, либо изменить конструкцию СВЧ компонентов так, чтобы обойтись без этого. Как правило, вторая возможность является более оправданной с позиций минимизации материальных затрат на проектирование и изготовление.

Следующим этапом (этап 7) всего цикла системного проектирования и изготовления СВЧ устройств является технологическая подготовка производства (ТПП), который должен быть завершен к началу планируемого запуска изготовления изделий (компонентов СВЧ устройств, СВЧ устройств и т. д.). ТПП является ключевым фактором ТО изготовления изделий и неотъемлемой частью всего процесса создания устройств. На данном этапе проводятся работы по подготовке и выпуску комплекта необходимой ТД, управляющих программ для технологического оборудования с числовым программным управлением, проектирование и изготовление средств технологического оснащения, отработка ТД и КД на технологичность, обучение производственного персонала выполнению технологических операций и др.

В общем случае ТПП имеет свою специфику в зависимости от вида продукции (изготовление макетов или экспериментальных образцов при проведении НИР, производство опытных образцов при проведении ОКР, производство серийных изделий) и может различаться как по объемам работ, так и по их содержанию. Большое значение в данном случае имеет уровень развития технологической базы для обеспечения создания конкретных СВЧ компонентов на момент проведения ТПП. Так, при изготовлении макетов или экспериментальных образцов для подтверждения тех или иных параметров или характеристик СВЧ устройств или РЭС может иметь место ситуация, когда еще окончательно не завершено формирование технологической базы. Например, случаи, когда не определена необходимость в разработке тех или иных ТП, часть работ проводится по кооперации, не завершена разработка отдельных ТП, полностью не закончены проектирование и изготовление средств технологического оснащения и т. д. В таких случаях, как правило, могут быть применены неоптимальные решения по проведению ТПП и изготовлению конкретных СВЧ компонентов, с точки зрения применения тех или иных ТП, технологического оборудования и оснастки и др., исходя из состояния технологической базы на момент проведения ТПП. В прин-

ципе, такой подход не противоречит самому процессу системного проектирования и способствует сокращению сроков проектирования.

Завершающим этапом системного проектирования и изготовления является процесс изготовления СВЧ устройств (этап 8), который включает в себя изготовление всех входящих в них элементов, сборку, регулировку, испытания и предъявление конечной продукции отделу технического контроля. ТО на этапе изготовления СВЧ устройств (этап 8) (технологическое сопровождение производства), в основном, заключается в поддержании эффективности использования ТС развернутых на этапе ТПП (этап 7). Кроме того, на данном этапе выявляются и устраняются неточности, допущенные в процессе проведения ТПП. При этом по результатам анализа качества изготовления пилотных образцов (пилотных партий) должны быть рассмотрены и реализованы возможности повышения выхода годных всех составляющих элементов, входящих в СВЧ компоненты, а также унификация средств технологического оснащения.

Рассмотренная в настоящей статье структура ТО при системном проектировании и изготовлении СВЧ компонентов бортовых РЭС прошла апробацию в разработках ряда СВЧ устройств. Разработка данной структуры была стимулирована прежде всего необходимостью выполнения одновременного проектирования и изготовления нескольких типов СВЧ компонентов для различных типов бортовых РЭС при минимальных суммарных затратах предприятия на ТО. Выполнение проектирования и изготовления СВЧ компонентов в соответствии с предложенной структурой позволило и в существенной степени унифицировать ТС, используемые в различных разработках и упорядочить процесс их использования и обновления. Кроме того, номенклатура технологических работ и последовательность их проведения синхронно с основными этапами системного проектирования позволяют максимально формализовать сам процесс проектирования и изготовления СВЧ компонентов. При тщательном выполнении всех этапов системного проектирования и ТО, совпадение технических характеристик проектируемых СВЧ компонентов с расчетными (или хотя бы минимальное отклонение от расчетных) должно достигаться с высокой вероятностью.

Список литературы

1. Козлов В. А. Седаков А. Ю. Системный подход к проектированию СВЧ и КВЧ компонентов бортовых РЛС // Сб. мат. IX Межд. научно-технической конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». Челябинск: Изд-во Челябинского государственного университета, 2010. С. 103–104.
2. Козлов В. А. Системный подход к проектированию СВЧ-ферритовых компонентов бортовых РЛС // Антенны. 2005. Вып. 5 (96). С. 6–12.
3. Кашин А. В. Системный подход к проектированию бортовых антенно-фидерных систем СВЧ и КВЧ диапазонов // Там же. 2009. Вып. 9 (148). С. 59–66.
4. Седаков А. Ю. Структура технологического обеспечения проектирования и изготовления СВЧ-компонентов бортовых РЛС // Там же. 2010. № 10 (161). С. 57–64.
5. Козлов В. А., Светлаков Ю. А., Седаков А. Ю. Особенности проектирования и технологии изготовления многокаскадных и многоканальных ферритовых КВЧ переключателей // Радиопромышленность. 2013. Вып. 1. С. 79–84.

6. Козлов В. А. Приемопередающие устройства для бортовых импульсных РЛС миллиметрового диапазона // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2002. Т. 5, № 4. С. 44–47.

7. Козлов В. А., Светлаков Ю. А., Шишкин Д. Р., Ивойлова М. М. Математическое моделирование основных этапов технологического процесса механической обработки керамических и ферритовых деталей СВЧ- и КВЧ-устройств // Там же. 2014. Т. 17, № 3. С. 76–80.

8. Светлаков Ю. А., Седаков А. Ю., Ивойлова М. М. Математическое моделирование в проектировании и технологии фильтров СВЧ на коаксиальных керамических резонаторах // Антенны. 2016. № 1 (221). С. 8–17.

9. Светлаков Ю. А. Учет разбросов конструктивно-технологических и физических параметров элементов СВЧ устройств при их проектировании и изготовлении // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 3. С. 21–27.

10. Козлов В. А., Светлаков Ю. А., Седаков А. Ю. Учет влияния разбросов конструктивно-технологических и физических параметров феррит-диэлектрических элементов при проектировании СВЧ и КВЧ ферритовых устройств // Антенны. 2010. Вып. 7. С. 25–30.

Development of Structure of Technological Support Activities at Systemic Designing and Manufacturing of Microwave Components of the Onboard Radio-Electronic Systems

V. A. Kozlov, Yu. A. Svetlakov, A. Yu. Sedakov

Discussion of the structure chart of technological support activities of designing and manufacturing of microwave components of the onboard radio-electronic systems. Main routes of development of system design which could raise its efficiency and a demand at the expense of raise of efficiency of technological support activities are offered.