

УДК 621.396.662

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОПИСАТЕЛЬНОЙ, КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

О. Э. Кильдишева, генеральный директор ОАО «Российский институт мощного радиостроения», к.т.н.; kildisheva@rimr.ru

А. А. Смаль, аспирант ОАО «Российский институт мощного радиостроения»; smal_aa@mail.ru

Рассмотрена взаимосвязь описательной, концептуальной и математической моделей при разработке средств радиосвязи и их элементов. Приведен пример составления моделей для антенно-согласующего устройства.

Ключевые слова: описательная модель, концептуальная модель, математическая модель, антенно-согласующее устройство, быстродействие, точность согласования.

Введение. При разработке средств радиосвязи и их элементов не всегда удается сразу построить макет будущего устройства и исследовать на нем его существенные свойства. Чаще всего для этих целей используют математические модели, позволяющие оценивать разрабатываемое устройство по нескольким существенным показателям, добиваясь либо экстремальных, либо оптимальных в данных условиях значений.

Такие задачи возникают при проведении как научно-исследовательских работ, где по каким-то соображениям построение макетов, физических моделей не всегда возможно, так и плановых работ, например при проектировании твердотельных радиопередающих устройств (РПДУ) большой мощности.

Построение математических моделей подобных устройств целесообразно проводить в три этапа:

- построение описательной (содержательной, словесной, вербальной) модели;
- построение концептуальной модели (на уровне основных идей);
- построение математической модели, формализующей физику процессов описательной модели и основные идеи концептуальной модели.

Описательная модель. Назначение описательной модели — дать ясное представление о месте, роли, целях и задачах данного устройства в структуре системы (средстве связи), а также о физических процессах, происходящих в этом устройстве при выполнении основных задач, последовательности и качестве их выполнения, взаимном влиянии элементов устройства и их совокупном влиянии на достижение конечного результата. Кроме того, на основании декомпозиции процессов, анализа их физической сущности, оценки важности и степени влияния на достижение главной цели необходимо определить наиболее существенные процессы, их характеристики, возможные способы их оценки и требования к этим показателям.

Описательная модель представляет собой резюме по анализу состояния вопроса и постановке задачи на исследование. Выводы по описательной модели являются исходными данными для построения концептуальной модели, служащей для решения поставленных задач на уровне идей, т.е. на более высоком уровне абстракций, чем описание физических процессов, происходящих в отдельных элементах и системе в целом.

Концептуальная модель как система взаимосвязанных и вытекающих один из другого взглядов на те или иные явления, процессы [1] объединяет основные процессы на уровне идей их описания и исследования, служит оболочкой, блок-схемой алгоритма, определяющего взаимодействие и последовательность реализаций процессов для достижения поставленной цели. Отдельные блоки алгоритма в рамках концептуальной модели являются наименованиями частных моделей процессов, выявленных в результате декомпозиции и отбора на качественном уровне наиболее существенных из них.

Таким образом, в концептуальной модели реализуется более высокий уровень абстракций — уровень взаимосвязанных задач, готовых для наполнения их математическим содержанием, а именно частными математическими моделями основных процессов.

Математическая модель. Это следующий этап — преобразование концептуальной модели в формализованную математическую. Основная задача формальной (математической) модели заключается в том, чтобы оценить качество функционирования устройства и выбрать пути его построения с максимальными показателями качества.

В обобщенном виде последовательность процессов разработки и взаимодействие моделей различных уровней абстракции представлены на рис. 1.



Рис. 1. Последовательность разработки и взаимодействие моделей различных уровней абстракции

Применение моделей имеет большую практическую ценность при создании устройств, входящих в состав систем связи, разработка физических моделей которых на начальных этапах нецелесообразна по причине больших временных затрат и высокой стоимости макетирования. В подобных случаях физический макет устройства изготавливается по результатам ранее разработанной формализованной модели устройства — на этапе, когда возможные пути построения уже рассмотрены и выбраны лучшие из них с позиций предъявляемых к данному устройству критериев качества. От формализованной (математической) модели на заключительном этапе осуществляется переход к жестким схемам и к контролю качества на конкретных схемах — экспериментальных образцах.

Рассмотрим процесс построения моделей на примере блока, входящего в состав РПДУ, такого как антенно-согласующее устройство (АнСУ).

Описательная модель АнСУ. РПДУ, выходное сопротивление усилителя которого фиксированно и равно, как правило, $Z_{\text{номин}} = 50$ или $Z_{\text{номин}} = 75$ Ом, должно позволять осуществлять работу на различные излучающие антенны. При этом сопротивление антенно-фидерного тракта (АФТ) является комплексным:

$$Z_{\text{АФТ}} = R + jX,$$

где R и X — соответственно вещественная и мнимая части сопротивления.

Сопротивление изменяется в зависимости от рабочей частоты и условий развертывания антенны, а с течением времени — под влиянием внешних факторов. В общем случае вещественная часть сопротивления $R \neq Z_{\text{номин}}$, где $Z_{\text{номин}}$ — номинальное сопротивление выходного тракта РПДУ, и присутствует некоторая мнимая часть $X \neq 0$. Вследствие этого в АФТ образуются отраженные волны, что приводит к потере мощности, снижению коэффициента полезного действия РПДУ, ухудшению неравномерности амплитудно-частотной характеристики и т.п. [2].

Устранить эти нежелательные эффекты позволяет АнСУ, основной задачей которого является обеспечение согласования импеданса выходного усилителя РПДУ с входным импедансом АФТ с заданной степенью точности в заданном диапазоне рабочих частот.

В рамках данного примера рассмотрим построение моделей для узкополосного АнСУ, производящего подстройку каждый раз при переходе на новую рабочую частоту.

Произведем декомпозицию основной задачи, т.е. выделим подзадачи, которые необходимо решить для достижения главной цели:

- определение априорно неизвестного комплексного сопротивления АФТ $Z_{\text{АФТ}}$ на текущей рабочей частоте в текущий момент времени;

- определение номиналов элементов согласующего контура (СК), необходимых для обеспечения согласования, т.е. таких, которые при подключении в цепь осуществляют преобразование определенного ранее $Z_{\text{АФТ}}$ таким образом, чтобы полностью скомпенсировать мнимую часть сопротивления, а вещественную — максимально приблизить к $Z_{\text{номин}}$;

- контроль точности согласования (оценивается по значению коэффициента бегущей волны (КБВ_{согл}) в АФТ).

В наиболее общем виде обозначим блоки АнСУ, необходимые для выполнения каждой из подзадач (рис. 2):

- блок измерения комплексного сопротивления АФТ $Z_{\text{АФТ}}$;

- СК, элементы которого подключаются в цепь для соответствующей трансформации $Z_{\text{АФТ}}$;

- блок вычисления и управления, который реализует тот или иной алгоритм подбора/расчета номиналов элементов согласующего контура, необходимых для обеспечения согласования, а также выдает команды на подключение/отключение элементов СК, производит контроль КБВ и выводит индикацию основных параметров устройства на дисплей;

- система коммутации, осуществляющая все необходимые подключения.

Сформулируем основные характеристики АнСУ и требования, предъявляемые к ним, а также обозначим элементы устройства, оказывающие приоритетное влияние на рассматриваемые характеристики:

1) *быстродействие устройства.* На сегодняшний день с разработкой современных транзисторных РПДУ и различных видов связи, требующих осуществления перестройки за максимально короткое время, быстродействие устройства является одним из важнейших показателей эффективности работы АнСУ. Для рассматриваемого устройства быстродействие должно обеспечиваться на уровне не более 100 мс.

При этом на данный показатель наиболее существенное влияние оказывают следующие элементы системы АнСУ:

- коммутационная система. Дело в том, что в случае, когда речь идет о построении АнСУ для мощных РПДУ (5 кВт и более), для подключений используются мощные ВЧ-реле, которые обладают большой инерционностью и существенно ограничивают быстродействие устройства в целом;

- блок вычисления и управления. Современный уровень развития микропроцессорной техники позволяет свести к минимуму затраты машинного времени при проведении вычислений, поэтому наиболее важным с точки зрения обеспечения быстродействия устройства представляется выбор алгоритма расчета номиналов элементов СК, необходимых для обеспечения согласования;

2) *точность согласования* характеризуется значением КБВ в тракте после согласования (КБВ_{согл}), которое контролируется всякий раз после настройки. Для рассматриваемого устройства техническим заданием устанавливается пороговое значение КБВ, которое, как правило, не хуже 0,9 во всем диапазоне рабочих частот.

На данный параметр сильнее всего влияют процессы, происходящие в следующих блоках АнСУ:

- блок измерения комплексного сопротивления АФТ $Z_{\text{АФТ}}$. Погрешность в определении комплексного сопротивления АФТ непосредственно влечет за собой ошибку в определении номиналов элементов СК, требуемых для обеспечения согласования, что приводит к снижению точности согласования;

- согласующий контур. Можно выделить две составляющие погрешности согласования, определяемые им: а) погрешность согласования, возникающая при округлении рассчитанных блоком вычисления и управления номиналов элементов СК до ближайших имеющихся в наборе, обусловленная конечной разрешающей способностью органов настройки; б) погрешность номиналов элементов СК, вызванная наличием паразитных конструктивных реактивностей, приводящих к отклонению реального номинала элемента СК от его ожидаемого значения.

Результаты, полученные в описательной модели АнСУ, используем в качестве исходных данных для составления концептуальной модели АнСУ.

Концептуальная модель АнСУ представляет собой более высокий уровень абстракции по сравнению с описа-

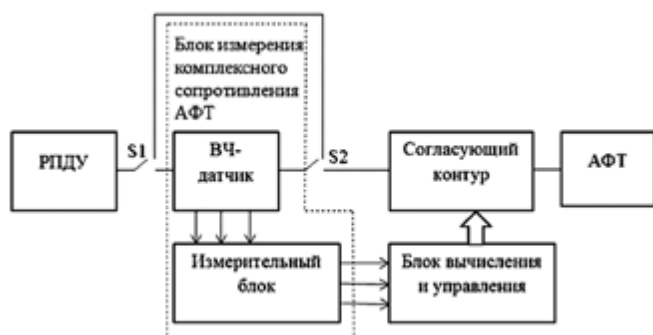


Рис. 2. Обобщенная структурная схема АнСУ на уровне описательной модели

тельной моделью. В рамках данной модели обозначим на уровне идей возможные реализации основных блоков, входящих в систему АнСУ:

1) *согласующий контур*. Относительно построения СК имеются следующие варианты [3]:

- устройства с плавной регулировкой контура;
- АнСУ, в которых согласующий контур состоит из наборов сосредоточенных реактивных элементов, выполненных в виде отдельных катушек индуктивности и конденсаторов;
- АнСУ, в которых согласующий контур образован комбинацией сосредоточенных элементов и элементов с распределенными параметрами.

Учитывая тот факт, что перестройка элементов (особенно из одного крайнего положения в другое) приводит к дополнительным временным потерям, а также то, что при выработке определенного ресурса повышается опасность выхода из строя электромеханических деталей, сделаем выбор в пользу последнего из рассмотренных вариантов построения СК.

В самом общем виде СК разрабатываемого устройства представляется в виде магазина дискретных конденсаторов и магазина отрезков длинных линий. Данный вариант построения СК, как известно, обладает устойчивой сходимостью, что является решающим фактором при выборе СК;

2) *блок вычисления и управления* строится на современной микропроцессорной базе, обладающей большими функциональными возможностями. Основная функция блока вычисления и управления в системе АнСУ состоит в реализации того или иного алгоритма настройки, в части которых на сегодняшний день существуют следующие варианты [3]: а) АнСУ с поисковыми алгоритмами настройки, в которых номиналы элементов согласующего контура подбираются за несколько этапов на основании показаний датчиков; б) АнСУ с измерительно-вычислительным алгоритмом настройки, в которых тем или иным способом производится измерение параметров нагрузки (антенны), вы-

числение по ним требуемых номиналов элементов согласующего контура и их одновременное включение в тракт.

Современные требования к высокому быстродействию антенно-согласующего устройства способны удовлетворить АнСУ с измерительно-вычислительным алгоритмом настройки. Платой за повышение быстродействия является усложнение конструкции блока измерения параметров АФТ;

3) *блок измерения комплексного сопротивления АФТ $Z_{АФТ}$* . В рамках описательной модели было установлено, что блок измерения полного комплексного сопротивления АФТ включает в себя ВЧ-датчик и измерительный блок. При этом для каждого из них возможны различные варианты построения. ВЧ-датчик, к примеру, может быть выполнен на основе длинной линии с отводами, токового трансформатора или измерительного моста [4, 5]. Каждый из предлагаемых вариантов обладает своими достоинствами и недостатками с позиций точности измерения параметров нагрузки, массогабаритных характеристик, стоимости и технологической сложности изготовления.

После рассмотрения всей совокупности характеристик для проектируемого устройства был выбран ВЧ-датчик на основе измерительного моста с линиями задержки в каждом из плеч и с пятью контрольными точками, по данным о напряжении в которых определяются комплексное сопротивление антенны на данной частоте, коэффициент стоячей волны (КСВ) в тракте, а также требуемые параметры согласующих элементов [5].

Измерительный блок для разрабатываемого устройства содержит пять детекторных каналов — по числу контрольных точек ВЧ-датчика. Выпрямленное напряжение с выходов детекторных каналов — это входные данные для блока вычисления и управления.

На данном этапе моделирования структурная схема разрабатываемого устройства представляется уже более подробно (рис. 3).

Детальное описание структурной схемы автоматизированного АнСУ приведено в [5].

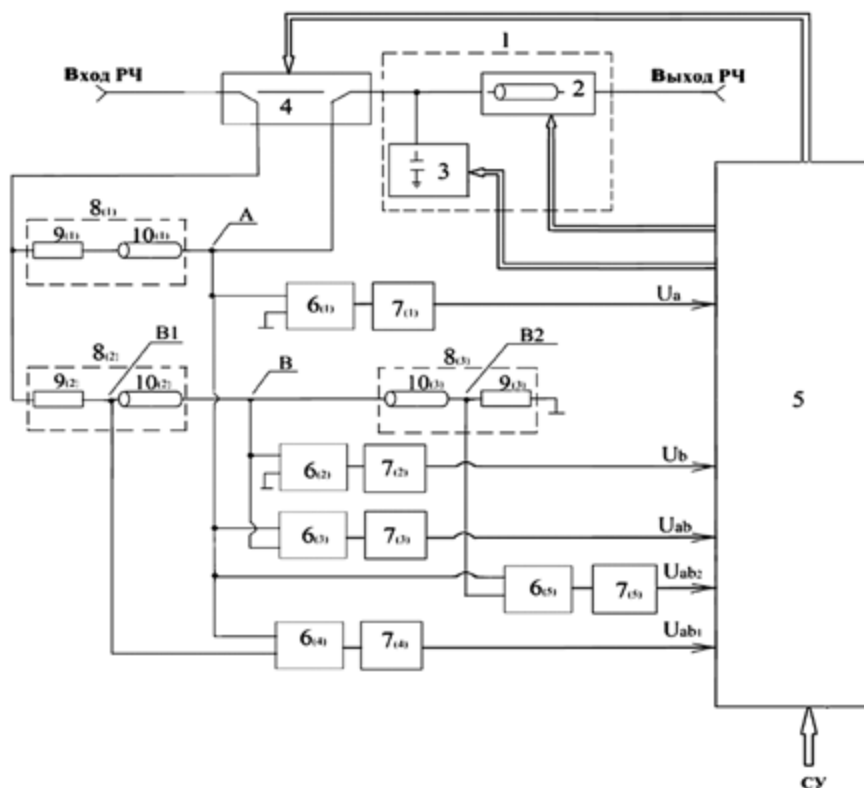


Рис. 3. Структурная схема АнСУ на уровне концептуальной модели:

1 — согласующий контур; 2 — измерительный блок; 3 — магазин конденсаторов; 4 — длинная линия с дискретно коммутируемой длиной; 5 — микроконтроллер; 6 — детектор; 7 — буферный каскад; 8 — плечо измерительного моста; 9 — резистор; 10 — линия задержки

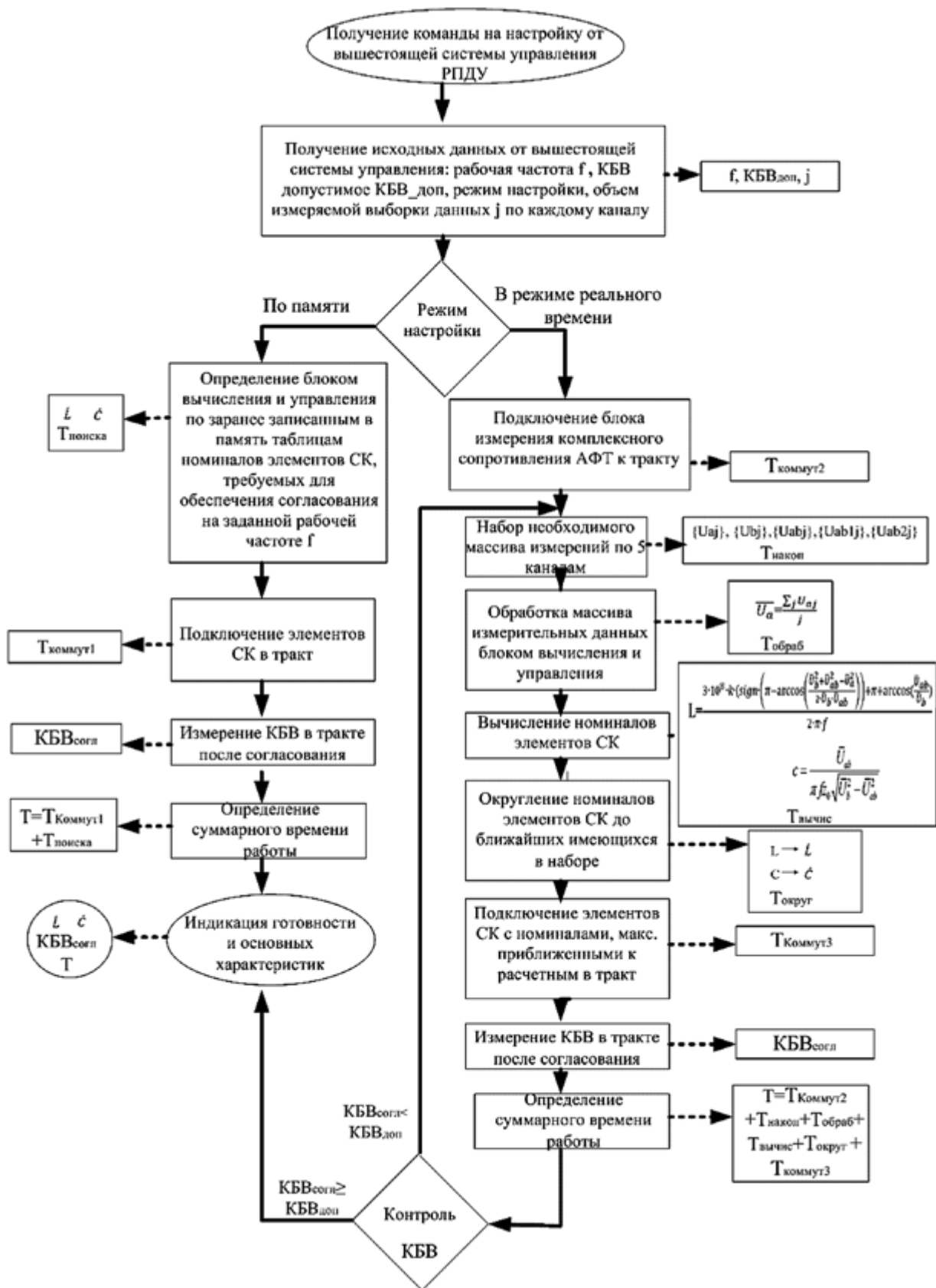


Рис. 4. Блок-схема алгоритма настройки АнСУ

Примечание. В формулах для расчета L и C используются следующие параметры:

$$Sign = \begin{cases} +1, & \text{если } U_{ab1} \geq U_{ab2}; \\ -1, & \text{если } U_{ab1} < U_{ab2} \end{cases}; k \text{ — коэффициент укорочения длины волны в линии; } f \text{ — рабочая частота, Гц; } U_a, U_b, U_{ab}, U_{ab1}, U_{ab2} \text{ — измеренные напряжения, В; } z_0 \text{ — волновое сопротивление линии, Ом.}$$

Математическая модель АнСУ. На следующем этапе переходим к наполнению взаимосвязанных процессов (рис. 4). Более подробная информация о способах вывода расчетных формул в [5, 6].

Основная задача математической модели заключается в оценке качества функционирования устройства и выборе пути построения с максимальными показателями качества. На этапе описательной модели были сформулированы основные составляющие показателей качества для системы АнСУ: быстродействие и точность настройки, а также требования, предъявляемые к ним. Рассмотрим теперь результаты моделирования и выделим элементы устройства, оказывающие приоритетное влияние на рассматриваемые характеристики при данном конкретном построении АнСУ.

Быстродействие устройства. При настройке АнСУ время, затрачиваемое на обработку данных, необходимые вычисления и округление расчетных значений номиналов элементов СК до ближайших имеющихся в наборе, составляет единицы миллисекунд и не оказывает существенного влияния на суммарное быстродействие устройства. Наибольшую роль играет длительность процессов коммутации и накопления массива измерений. Минимизация времени коммутации, т.е. времени переключения дискрет для мощных АнСУ, не представляется возможной из-за технологических ограничений. Что касается времени накопления, то его минимизация ведет к снижению точности согласования, поэтому оно устанавливается для каждой конкретной задачи, исходя из требуемого соотношения быстродействие/точность.

Точность согласования. По результатам проведенных экспериментов было установлено, что для рассмотренной схемотехнической реализации АнСУ погрешность настройки соответствует требуемому уровню ($K_{\text{БВ}}^{\text{согл}} \geq 0,7$) во всем диапазоне рабочих частот. Накопление массива зашумленных значений напряжений, используемых в дальнейших расчетах, и их последующая статистическая обработка позволяют повысить точность согласования и обеспечить $K_{\text{БВ}}^{\text{согл}} \geq 0,9$ во всем диапазоне рабочих частот [6].

Кроме того, для рассматриваемого устройства могут быть предложены следующие способы минимизации погрешности согласования:

- предварительная оценка реальных параметров номиналов элементов согласующего контура;
- доработка программного обеспечения вычислительного блока АнСУ с учетом в расчетных формулах неточности подбора номиналов элементов L и C .

Заключение. При разработке средств радиосвязи и их компонентов на основе новой элементной базы, новых микропроцессорных и производственных технологий возника-

ет необходимость оценки эффекта от их внедрения по различным показателям качества, которые не всегда удается измерить на макетах из-за их отсутствия, невозможности или отсутствия необходимости предварительного изготовления. В данных условиях целесообразно применить набор моделей разрабатываемого устройства различной (нарастающей) степени абстракции: описательной, концептуальной, математической.

Описательная модель служит для отображения физических процессов, происходящих в исследуемых устройствах при реализации их основных функций. В концептуальной модели отражаются основные, прежде всего новые, идеи, позволяющие решить необходимые задачи наилучшим образом, а также предлагаются методы их математического представления для оценки качества выполняемых основных функций. В математической модели на основе выбранных в концептуальной модели качественных методов описания наиболее существенных процессов производится их окончательная формализация, позволяющая количественно оценить эффективность вновь предложенных концептуальных решений.

Наличие обратных связей в структуре взаимодействия моделей позволяет корректировать адекватность математической модели по степени соответствия ее физическим процессам в описательной модели.

Удобство практического применения моделирования при разработке радиоэлектронной аппаратуры проиллюстрировано на примере АнСУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кондаков Н. И.** Логический словарь-справочник. 2-е изд., испр. и доп.— М.: Наука, 1975, 720 с.
2. **Бурова А. А., Кильдишева О. Э.** Выбор рациональной схемы радиопередатчика методом анализа иерархий // *Электросвязь*.— 2013.— № 3.— С. 54–56.
3. **Бурова А. А.** Современные тенденции развития антенно-согласующих устройств КВ диапазона // Матер. XIX Международной науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», т. 2, с. 774–783. — Воронеж, 2013.
4. Антенно-согласующее устройство с повышенным быстродействием: пат. Российская Федерация № 142638 / А. А. Смаль, А. Л. Калинин.— 2013.
5. **Бурова А. А., Калинин А. Л., Леппа В. Р.** Мощное антенно-согласующее устройство с повышенным быстродействием // *Электросвязь*.— 2012.— № 4.— С. 56–58.
6. **Смаль А. А., Кильдишева О. Э.** Анализ погрешности антенно-согласующего устройства, использующего измерительно-вычислительный метод настройки // *Электросвязь*.— 2013.— № 6.— С. 46–48.

Получено 20.04.15

ИНФОРМАЦИЯ

КНИГА К 70-ЛЕТИЮ ПОБЕДЫ

На выставке «Связь-Экспокомм-2015» Центральный музей связи им. А. С. Попова представил новый сборник «**Великая отечественная война в знаках почтовой оплаты**», выпущенный при поддержке ФГУП «Космическая связь» и Федерального агентства связи РФ.

В сборнике, вышедшем к 70-летию Победы, представлен фила-

телистический материал из фондов Центрального музея связи им. А. С. Попова, отражающий хронологию ВОВ, историю объединения наций в борьбе против фашизма и рассказывающий о мужестве и героизме советского народа, военачальниках, а также о наградах, мемориалах и памятниках.

Генеральный директор ГП КС **Ю. Прохоров** отметил, что Центральный музей связи им. А. С. Попова и ГП КС уже на протяжении нескольких лет реализуют совместную программу сотрудничества, цель которой — поддержка и развитие музейного фонда и научного потенциала уникального российского отраслевого музея.