

Предложенный подход реализован в САПР ТороR. Он не гарантирует построение минимальной по суммарной длине сети, но, в отличие от других подходов, позволяет при минимальных временных затратах минимизировать длину сети

с произвольным числом терминальных вершин, при этом учитываются области, в которых прокладка соединений запрещена, а также мешающие сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томас Х. Кормен. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.

2. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982.

3. Melzak Z. A. On the problem of Steiner // Canadian Mathematics Bulletin. 1961. № 4. P. 143–149.

4. Cockayne E. J. On the efficiency of the algorithm for Steiner minimal trees // SIAM J. Appl. Math. 1970. № 18. P. 150–159.

5. Лузин С. Ю., Попов С. И., Попов Ю. И. Автоматизация устранения клинчей в топологии печатного монтажа // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 116–121.

A. V. Bessonov, S. Yu. Luzin, Yu. T. Lyachek, S. I. Popov
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

DYNAMIC CONSTRUCTION STEINER TREES IN CAD ТороR

An approach is proposed for Steiner trees construction in the case of presence of areas through which the objects connecting is prohibited. The approach is based on a dynamic rebuilding of network connections without additional vertices by adding branch points, and moving them to the optimal position using the force-based algorithm.

Steiner tree, force-based placement, PCB routing

УДК 681.3.06(075.8)

А. И. Ларистов, Ю. Т. Лячек, Мусаид Абдулфаттах Мохаммед Обади
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Проблемы организации web-ориентированной версии системы топологического проектирования печатных плат

Проведено сравнение трассировщиков печатных плат, выявлены основные функции системы топологического трассировщика ТороR и определены особенности организации web-ориентированной версии САПР топологического проектирования печатных плат на его основе.

САПР, трассировка печатных плат, облачные вычисления, web-браузер

В настоящее время при проектировании печатных плат используются различные САПР, обеспечивающие их топологическую трассировку. Среди наиболее широко используемых следует отметить зарубежные системы Spectra/Electra (файлы .dsn), PCAD (.pcb и .asc) различных версий выпуска (2000–2006), Expedition 2005–2007 гг. (.hkp), Eagle (.brd), а также систему оте-

чественных разработчиков ТороR (.fst)*. Следует отметить, что стоимость лицензий на использование этих систем достаточно высока и составляет от нескольких десятков до сотен тысяч долларов, причем по мере усложнения этих систем она

* Сайт разработчиков топологического трассировщика ТороR. URL: <http://www.eremex.com>.

будет только возрастать. При этом алгоритмическое и программное обеспечение трассировки является одной из основных составляющих САПР, определяющих их стоимость в настоящее время. Кроме того, для обеспечения трассировки многослойных печатных плат большой степени сложности (более нескольких сот компонентов при нескольких тысячах контактов и/или трасс) при использовании таких систем, как Spectra, Expedition или Synopsys, требуются высокопроизводительные серверные платформы, стоимость которых сопоставима со стоимостью программного обеспечения САПР. В связи с этим приобретение современных САПР и их официальное использование доступно только для крупных корпоративных пользователей, широко практикующих разработку современной радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры (РЭА и ЭВА). Для пользователей, относительно редко занимающихся проектированием ПП, покупка лицензий таких САПР экономически невыгодна.

Решить эту проблему можно внедрением в САПР интернет-технологий в рамках следующих подходов:

- создание распределенных web-ориентированных версий топологических САПР;
- предоставление аренды САПР в сети Интернет на основе облачных технологий.

Использование первого подхода предполагает реорганизацию (рефакторинг) архитектуры программного обеспечения САПР с разделением системы на 2 уровня: уровень проектирующих (обрабатывающих) подсистем, решающих задачи автоматического размещения компонентов и автоматической трассировки, и уровень обслуживающих подсистем, обеспечивающий графический интерфейс и отображение топологии проектируемой печатной платы.

Программные модули обслуживающего уровня размещаются на рабочей станции пользователя (клиентская часть системы) и обеспечивают графический интерфейс с топологической САПР. Проектирующая подсистема САПР представляет серверную составляющую распределенной САПР и функционирует на web-сервере в сети Интернет. Для синхронизации вызова подсистем и передачи проектных данных в состав распределенной топологической САПР необходимо включить управляющее web-приложение.

Использование распределенной web-ориентированной версии САПР позволит приобретать пользователю более дешевую облегченную лицензию только на обслуживающую подсистему САПР и оплачивать фактическое время использования проектирующей подсистемы в сети Интернет. Перенос проектирующей подсистемы в сеть Интернет позволит фирме-разработчику (фирме-вендору программного обеспечения) создавать централизованные интернет-центры топологического проектирования (web-дизайн-центры) на основе высокопроизводительного масштабируемого серверного оборудования с удаленным доступом.

Второй перспективный подход, связанный с применением интернет-технологий в САПР, базируется на использовании облачных вычислений. При таком подходе, основанном на виртуализации аппаратных и программных ресурсов, базовая САПР подвержена значительно меньшим изменениям. Основной проблемой при переносе топологических САПР в «облако» является доставка насыщенного графического «рабочего стола» с изображением топологии печатной платы на рабочую станцию пользователя. Решение этой проблемы во многом зависит от аппаратной платформы «облака» и в настоящее время находится в стадии проработки крупнейшими производителями серверных платформ и графических процессоров [см. лит.]. В связи с этим остановимся более подробно на методах создания web-ориентированных версий топологических САПР.

Выбор базовой системы для создания web-ориентированной версии топологической САПР зависит от требований, предъявляемых к программному обеспечению со стороны выбранного подхода. Так при разработке распределенной версии системы необходим доступ к имеющейся архитектуре САПР и возможность ее трансформации на основе web-технологий. В связи с этим в качестве базовой топологической САПР была выбрана российская система TороR, имеющая обособленные режимы многовариантной автоматической трассировки с выводом численных критериев качества проектирования печатной платы.

Система TороR включает в себя высокоэффективный трассировщик печатных плат, совмещенный с редактором топологии. Трассировку ПП в TороR можно выполнить гораздо качественнее и эффективнее, чем в любую другую существующую САПР. Это становится очевидным, если сравнивать данные системы по объек-

тивными показателями и при оценке использовать только те критерии, которые определяют конструктивные параметры топологии спроектированного изделия и непосредственно зависят от эффективности и качества используемых в системе процедур автоматического синтеза топологии.

К таким критериям, прежде всего, можно отнести количество нарушений технологических норм, процент неразведенных трасс, число переходных отверстий, суммарную длину проводников и время разводки. При оптимизации указанных параметров в системах необходимо соблюдать и ограничения, определяющие эксплуатационные характеристики изделия, связанные с обеспечением нормального теплового режима и электромагнитной совместимости.

Учитывая, что практически все перечисленные критерии противоречивы, а системы трассировки основываются на различных моделях и алгоритмах, сложно обеспечить однозначное сравнение результатов работы различных трассировщиков. Так как для систем трассировки невозможно определить обобщенный критерий сравнения, то целесообразно сравнивать существующие системы по каждому критерию раздельно.

Если говорить о проценте автоматически проложенных соединений, то его значение не несет информации о качестве топологических решений как в целом, так и для каждого отдельного проводника. Однако система TopoR позволяет проектировщику получить существенно больший процент проведенных трасс без нарушений, чем любой другой трассировщик, из имеющихся на рынке программных продуктов. Кроме того, она предоставляет пользователю высокоэффективные средства автоматизированного редактирования ПП, которые существенно упрощают и ускоряют режим ручной доводки топологии.

Что касается внесения дополнительных переходных отверстий при трассировке, то алгоритмическое обеспечение системы TopoR гарантирует безусловное определение их минимально возможного количества для двухслойных печатных плат. А в общем, как показывает сравнительный

анализ проектирования ПП, он позволяет снизить количество устанавливаемых переходных отверстий на 30 % и более по сравнению с другими типами трассировщиков. Это позволяет существенно уплотнить топологию, экономно использовать монтажное пространство и упростить технологию производства.

Суммарная длина трасс в топологическом трассировщике TopoR оказывается меньше на 20...40 % и более за счет отказа от ортогональной трассировки в пользу произвольного направления. Этот эффект достигается за счет разбиения монтажного пространства на треугольные дискреты и проведения трасс между контактами по кратчайшему для них пути. В получаемой топологии и суммарная длина трасс, и уровень их параллельности существенно меньше, чем в топологии традиционных импортных систем. Кроме того, возможность задания и минимальных (в узких местах), и номинальных (во всех остальных местах) зазоров, а также возможность автоматической и интерактивной разводки и сжатия топологии без нарушения целостности разводки позволяют в широких пределах варьировать ее геометрические параметры, а следовательно, и менять уровень электромагнитных помех без изменения топологической схемы устройства.

Что касается времени разводки, то, несмотря на параллельную обработку множества вариантов топологии, система TopoR получает результаты за значительно меньшее время (в несколько раз и даже в десятки раз быстрее). При этом данные варианты существенно превышают по качеству варианты, полученные с помощью других систем.

Кроме того, следует отметить, что перечисленные преимущества системы TopoR (таблица), обеспечивающие уплотнение топологии и экономию использования монтажного пространства при соблюдении всех проектных норм, позволяют получить многослойные платы с существенно меньшим количеством необходимых слоев трассировки – часто в 2 и более раз меньше.

| Показатели | ИМПУЛЬС | | АВАНГАРД | | АРГУС-СПЕКТР | | НИИИТ | |
|---------------------|---------|-------|----------|-------|--------------|----------|-------|-------|
| | TopoR | P-CAD | TopoR | P-CAD | TopoR | Specetra | TopoR | P-CAD |
| Цепи | 455 | | 242 | | 1043 | | 242 | |
| Компоненты | 213 | | 126 | | 1179 | | 126 | |
| Контакты | 2065 | | 1167 | | 3238 | | 1167 | |
| Межслойные переходы | 1130 | 1536 | 313 | 687 | 240 | 1096 | 6 | 91 |
| Слои | 4 | 10 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 4 |
| Длина соединений, м | 36 | 60 | 14.4 | 21 | 104 | 123 | 2.6 | 5.5 |
| Трудоёмкость, дн. | 2 | 45 | 2 | 40 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 4 |

Хотя здесь приведено сравнение систем по объективным показателям, можно с уверенностью утверждать, что и по субъективным показателям ТороR существенно превосходит другие топологические трассировщики. Он прост в освоении, характеризуется удобным пользовательским интерфейсом. В нем автоматически определяются все «узкие» места разводки и они наглядно отображаются на экране, легко и удобно осуществляются режимы ручного редактирования трасс, переходных отверстий и компонентов, просмотра и задания технологических ограничений, работы с автоматическими процедурами, логично обеспечивается переход от одного режима работы к другому и т. п.

Таким образом, для создания web-ориентированной версии системы топологического проектирования ПП больше всего подходит система ТороR. В связи с этим именно для нее целесообразно определять функции, которые следует предоставлять пользователю на удаленном рабочем месте, а также необходимый интерфейс, особенности организации пользовательской части и средства связи ее с ядром системы при всех необходимых режимах работы пользователя с данной системой.

Организация проектных процедур web-ориентированной версии системы ТороR. Основными проектными операциями по созданию топологии ПП в системе ТороR являются*:

1. Редактирование технологических параметров проектирования или дизайна печатной платы.
2. Автоматическое размещение компонентов схемы с удалением всей предыдущей разводки, выполненной в традиционной САПР, и предварительная так называемая совмещенная трассировка.
3. Автоматическая трассировка в стиле FreeStyle.
4. Редактирование топологии в стиле FreeStyle.
5. Ручное редактирование топологии.
6. Проверка соблюдения проектных норм (DRC).
7. Вывод и сохранение результатов.

Как указывалось ранее, ТороR является только топологическим трассировщиком ПП. Поэтому входными данными для этой системы выступают, как правило, либо описания плат, разведенных в другой системе, либо файлы .pcb с содержанием

информации о посадочных элементах, которые должны быть размещены на печатной плате, со списком цепей между этими элементами и конструктивными данными самой платы.

Обеспечение начала работы с системой. Удаленному пользователю прежде всего должна быть предоставлена возможность на своем рабочем месте открыть проект, загрузить в него файл описания проектируемой платы и получить изображение этой платы в графическом редакторе, отобразить все технологические параметры и все нарушения и ошибки, найденные системой в этом описании. Также необходимо предоставить проектировщику средства, обеспечивающие вызов различных режимов и функций системы ТороR в зависимости от задач, которые он предполагает решать. В связи с этим окно взаимодействия удаленного пользователя с системой должно практически полностью соответствовать окну полномасштабной системы.

В соответствии с задачами, связанными с началом работы, web-система должна обеспечить передачу загруженного (импортируемого из другой системы) файла в базовую часть системы. Программное обеспечение базовой части должно обеспечить подробный анализ этого файла для выявления всех технологических параметров исходной платы (состав используемых слоев, параметров трасс, типов и параметров межслойных переходов, зазоров между проводниками, переходами, границами платы, компонентами и т. д.). Базовая часть системы должна также подразделить все компоненты и цепи на соответствующие группы, определить суммарную длину трасс, количество дополнительных межслойных переходов и выявить и зафиксировать все ошибки и нарушения трассировки. После выполнения полного анализа все выявленные и сгруппированные данные должны быть, во-первых, сохранены в системе, а во-вторых, в виде файлов переданы на удаленную машину пользователя, где эта информация может быть легко востребована, а при необходимости, и несколько изменена проектировщиком. Изменения, вносимые пользователем, должны передаваться в базовую часть системы.

Автоматическое размещение компонентов исходной схемы базируется на использовании модифицированного силового алгоритма для минимизации суммарной длины всех соединений. На этом этапе осуществляется полная перестановка компонентов и перетрассировка соединений с потерей ранее проведенных связей. При

* Сайт разработчиков топологического трассировщика ТороR. URL: <http://www.aremex.com>.

этом выполняется быстрая пробная трассировка, причем трассы прокладываются в одном слое. Разрешается пересечение различных трасс, но не более двух в каждой точке пересечения. Полученный результат (рис. 1) называется совмещенной топологией.

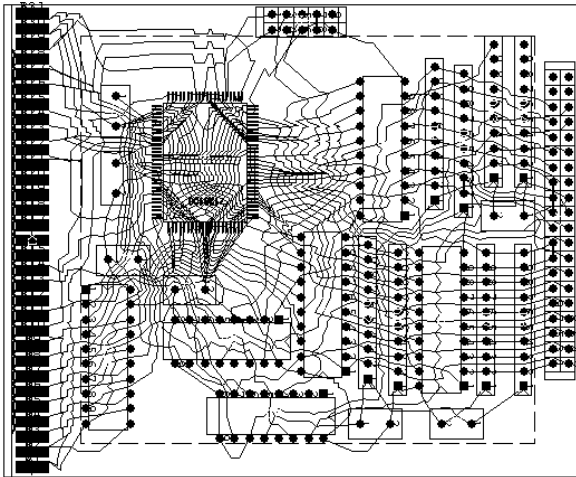


Рис. 1

Режим автоматического размещения компонентов с пробной трассировкой необходимо выполнять в базовой части системы, так как он требует использования особого программного обеспечения, которое по соображениям разработчиков не должно предоставляться на пользовательскую ЭВМ. Пользователю должна передаваться информация только о суммарной длине проводников очередного найденного варианта в строке сообщений в виде записи «исходная длина .../ текущая длина ...». Если полученный результат пользователя устраивает, то он останавливает процесс размещения и может переходить к следующим этапам проектирования.

При этом передачу текста сообщений и информацию о результатах размещения и пробной трассировки выбранного пользователем варианта целесообразно организовать на основе файлов обмена.

Вывод и сохранение результатов автоматического размещения и пробной трассировки должны осуществляться и в базовой части системы, и

непосредственно на машине пользователя. Однако если необходим экспорт файлов в другие возможные в системе форматы, то эта работа должна выполняться базовой частью системы, а затем дублироваться на пользовательской ЭВМ.

Автоматическая трассировка в стиле FreeStyle является основным ядром системы. Она требует выполнения сложных оптимизационных процедур, многовариантного процесса вычисления и составляет математическую, алгоритмическую и организационную основу функционирования системы. В связи с этим для ее информационной защиты от копирования данный процесс может выполняться только в защищенной базовой части системы.

Периферийному пользователю может быть представлен механизм запуска и остановки этого режима, а также информация о найденных оптимальных вариантах трассировки в табличной форме (рис. 2). В выводимой на экран таблице система автоматически сохраняет наилучшие найденные ею варианты трассировки ПП под именами, в которых отображается длина соединения и количество дополнительных переходов. В качестве характерных параметров для каждого сохраненного варианта в этой таблице приводятся суммарная длина соединений, количество дополнительных переходов между слоями, число нарушений зазоров, количество подрезок (сужений) проводников при проходе их в узких местах платы, а также время, затраченное на поиск этого варианта, уровень (значение цикла перекладки цепей), при котором получен этот вариант, и оценка варианта по отношению к предыдущему в шкале «увеличение длины на один убранный переход» (мм/переход). По совокупности этих параметров проектировщик может обоснованно судить о качестве соответствующего варианта трассировки, а система с помощью контекстного меню предоставляет ему возможность выбора и сохранения либо всех вариантов, либо тех, которые наиболее его устраивают для продолжения проектирования.

| Имя | Длина, мм | Переходов | Наруш... | Подрезок | Таймер | Уровень | мм / переход |
|----------------------------|-----------|-----------|----------|----------|--------|---------|------------------|
| ADP_SPEC_4723-62s.fsb | 4723.15 | 62 | 0 | 2 | 3:54 | 4 | |
| ADP_SPEC_4804-58s.fsb | 4803.79 | 58 | 0 | 2 | 2:59 | 8 | 20.2 (80.7 / 4) |
| ADP_SPEC_4871-55s.fsb | 4871.46 | 55 | 0 | 2 | 3:19 | 12 | 22.6 (67.7 / 3) |
| Добавить в проект | | 53 | 0 | 2 | 3:23 | 13 | 56.8 (113.5 / 2) |
| Удалить | | | | | | | |
| Продолжить | | | | | | | |
| Показать | | | | | | | |
| Открыть для редактирования | | | | | | | |
| Отметить варианты | | | | | | | |

Проектировки следует выбрать вариант и перейти в редактор «Freestyle» (F8).
Текущий проект в раздел «Варианты автотрассировки».

Рис. 2

Редактирование в стиле FreeStyle заключается в преобразовании полученной на предыдущем этапе топологии в геометрическое представление с учетом реальных метрических размеров всех трасс (рис. 3).

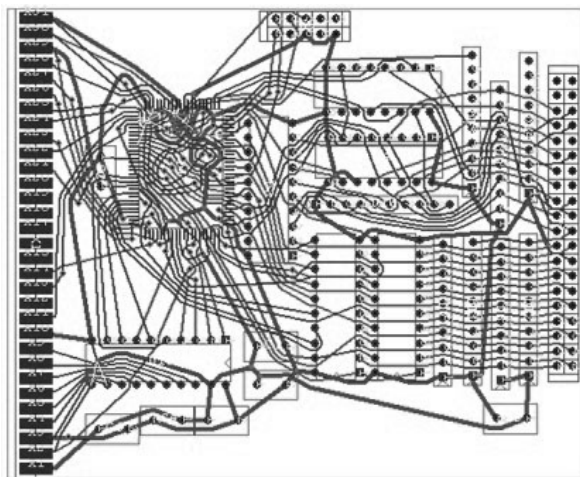


Рис. 3

При этом для выбранного варианта в строке состояния приводятся суммарная длина проводников (например, 4408.46 мм), число межслойных переходов (55) и число нарушений (25).

При наличии нарушений окно сообщений содержит описание нарушений с указанием координат и слоя. Это могут быть, например, нарушения зазоров между компонентами или несоблюдение зазоров между проводниками или переходными отверстиями и др.

При щелчке на сообщении место нарушения выделяется перемещением окна и мигающей подсветкой. Для исправления нарушений необходимо перейти в режим ручного редактирования топологии.

В связи с необходимостью предоставлять пользователю полную картину разведенной платы (и с окном состояния, и с окном выявленных нарушений) на его стороне на этом и дальнейших этапах должно быть сформировано полное окно системы с изображением разведенной платы, со всеми необходимыми кнопками, окнами и средствами редактирования.

Ручное редактирование топологии и проверка соблюдения проектных норм. В этих режимах пользователю должны быть предоставлены все возможности по привязке к компонентам, цепям и переходным отверстиям, чтобы осуществлять над ними необходимые операции редактирования для исправления технологических нарушений и соблюдения проектных норм DRC. Однако для выполнения при этом таких автоматических процедур, как перемещение объектов, перерасчет фор-

мы проводников и их перекладка, подвижка переходов, необходимо обеспечивать передачу требуемой информации из пользовательской в главную часть системы и обратно. Такой обмен информацией необходимо обеспечивать на базе соответствующих файлов. При этом сократить объемы передаваемой информации можно за счет ограничения площади участка платы, параметры элементов которой необходимо пересчитать и перерисовать.

При рассмотренной последовательности проектных процедур необходимо обеспечить их дистанционный вызов и пересылку файлов данных между клиентской и серверной частями системы. Для выполнения данной задачи распределенную САПР необходимо дополнить web-приложением, которое обеспечивает согласованный вызов проектных процедур на стороне сервера и на стороне клиента. В функции web-приложения входит также пересылка файлов проектных данных между серверной и клиентской частями САПР. Существенными компонентами данной архитектуры являются также web-сервер и браузер, которые обеспечивают функционирование распределенной САПР в сети Интернет.

Требования к модификации программного обеспечения системы ТороR. Таким образом, для реализации web-ориентированной версии топологической САПР традиционная архитектура базовой системы должна быть построена по модульному принципу, в соответствии с которым каждая подсистема (обслуживающая и проектирующая) реализована в виде автономных программных модулей. Передача данных между подсистемами осуществляется с помощью файлов; порядок вызова модулей подсистем устанавливает пользователь в процессе диалога с управляющей подсистемой. Характерной особенностью архитектуры является возможность автономного использования проектирующей подсистемы при условии подготовки описания топологии ПП в виде текстового файла на входном языке САПР. Также необходимо предусмотреть автономное использование обслуживающей подсистемы для графического отображения исходной топологии ПП и результатов трассировки в проектирующей подсистеме. Следует отметить, что подобный архитектурный шаблон может быть реализован для большинства известных промышленных САПР в случае их переноса в сеть Интернет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Точилкин С. Перевод графических приложений в облака // Открытые системы. СУБД. 2012. № 3. С. 21–27.

A. I. Laristov, Yu. T. Lyachek, Musaeed Abdulfattah Mohammed Obadi
Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

DESIGN PROBLEMS OF ORGANIZATION OF WEB-ORIENTED VERSION OF TOPOLOGICAL DESIGN OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

Comparison of tracers of printed circuit boards, identified the main functions of the system topological router TopoR and identify the features of the organization of WEB-oriented version of CAD topological design of printed circuit boards on its basis

CAD, tracing circuit boards, cloud computing, WEB browser

УДК 004.942

Ю. А. Кораблев, Д. М. Савельев, М. Ю. Шестопалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Виртуальный полигон исследования отказоустойчивых систем управления

Описывается подход к исследованию отказоустойчивых систем управления (fault tolerant control systems), основанный на концепции виртуального полигона, содержащего комплекс эталонных (benchmark) моделей объектов управления, реализованного в среде Matlab/Simulink.

Проблемно-ориентированная среда моделирования, отказоустойчивые системы управления, диагностика, реконфигурация регулятора, компьютерный эксперимент

Возможности изучения поведения сложных технических систем экспериментальными методами в экстремальных ситуациях, вызванных отказами, сбоями, неисправностями, существенно ограничены. В связи с этим в настоящее время для указанных целей активно применяется компьютерное моделирование, одним из направлений которого является компьютерный эксперимент в реальном или близком к реальному масштабу времени.

Проведение такого эксперимента с использованием исключительно средств вычислительной техники на базе математического моделирования можно рассматривать как виртуальный эксперимент, стоимость которого намного ниже физического эксперимента, а спектр возможных условий его проведения несравненно шире, поскольку допускает исследование экстремальных и потенциально опасных в реальных условиях ситуаций. Однако проведение любого эксперимента (физического или математического) подразумевает организацию некой «лаборатории» или «полигона», в которых создаются все необходимые условия

для проведения такого эксперимента: внешние воздействия, окружающая среда, условия взаимодействия изучаемых объектов друг с другом, особенности поведения изучаемого объекта и т. д. Это естественным образом приводит к концепции «виртуального полигона» (ВП) как проблемно-ориентированной среды моделирования [1].

Процесс проектирования и разработки ВП требует учета особенностей методов компьютерного моделирования в конкретной предметной области. Более того, и применение такого рода вычислительных инструментов требует от исследователя большего знания особенностей современных вычислительных технологий, лучшего владения соответствующими программными средствами. Во многом этот факт становится препятствием на пути их внедрения и, как следствие, причиной снижения эффективности исследований в различных предметных областях.

Сильный разрыв между высоким уровнем технологий и низким уровнем их применения привел к появлению новой концепции использо-