

УДК 004.891

А.А. Квасников, С.П. Куксенко

Обзор экспертных систем по электромагнитной совместимости технических средств

Выполнен обзор экспертных систем по электромагнитной совместимости. Кратко изложены история развития и классификация современных экспертных систем. Указаны основные элементы и особенности построения программной архитектуры, а также примеры экспертных систем по электромагнитной совместимости технических средств различного назначения.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экспертная система, техническое средство, радиоэлектронное средство, печатная плата, линия передачи.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-4-7-18

Различные радиоэлектронные средства (РЭС), в частности, и технические средства (ТС) в целом всё шире используются во всех сферах деятельности современного общества. При этом увеличение количества этих средств часто приводит к нарушению их совместной работы из-за возникновения взаимных электромагнитных помех (ЭМП). Поэтому обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС) является актуальной проблемой.

Согласно ГОСТ Р 50397–2011, ЭМС технического средства – это его способность функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых ЭМП другим ТС. При этом под техническим средством подразумевается электротехническое, электронное и радиоэлектронное изделие, а также любое изделие, содержащее электрические и/или электронные составные части (оно может быть устройством, оборудованием, системой или установкой). Для решения проблемы обеспечения ЭМС ТС, связанной с дорогостоящими и длительными испытаниями, целесообразно на этапе проектирования использовать специализированное программное обеспечение (ПО). При этом решение задач ЭМС требует от проектировщика глубоких экспертных знаний. Поэтому разработка данного класса ПО ведется в направлении расширения его функциональных возможностей и внедрения элементов экспертных систем (ЭС), что позволяет разработчикам более эффективно и рационально использовать их ресурсы на этапе проектирования. Однако в научной литературе отсутствует актуальный обзор по особенностям разработки ЭС по ЭМС. Поэтому цель данной работы – выполнить обзор современного состояния исследований по разработке ЭС по ЭМС и выявить тенденции их развития на основании имеющихся открытых научных источников. При этом следует отметить, что авторы данной работы не претендуют на полноту выполненного обзора, поскольку рассматриваемая тематика весьма обширна, а ознакомительные версии ЭС в открытом доступе отсутствуют, что значительно осложняет выявление и обобщение особенностей заложенного в них математического и программного обеспечения.

История развития ЭС

История развития ЭС берет свое начало с середины XX в., что напрямую связано со стремительным развитием компьютерных технологий. Предпосылкой к созданию классических ЭС являлись попытки разработки интеллектуальных систем (ИС), автоматизирующих умственную деятельность человека. Первые ИС представляли собой программы, способные решать задачи с помощью эвристических методов и принципа обобщения, свойственного человеческому мышлению. В дальнейшем стало очевидно, что эффективность ИС зависит не только от заложенных в нее алгоритмов и методов, но и от знаний, которые она содержит. Также поскольку разработка универсальных ИС для решения широкого класса задач являлась трудозатратной, то была разработана общая концепция построения ИС. Такие ИС были названы ЭС. Целью разработки ранних ЭС было создание компьютерных систем, позволяющих решать задачи, выполнение которых требует наличия глубоких экспертных знаний в конкретной области. Так, были созданы ЭС, применимые в областях медицины, математики, образования, промышленности, химии, электроэнергетики и др. [1–6].

Архитектура ЭС

Современные ЭС условно делятся на классические, нейронные, нечеткие, нейро-нечеткие, веб-экспертные, мультиагентные, реального времени и принятия многокритериальных решений [7]. Программная архитектура классической ЭС, основанной на проверке правил проектирования, схематично представлена на рис. 1. Она состоит из: пользовательского интерфейса (инструмент взаимодействия пользователя с системой); модуля объяснения логических выводов (пояснения, как ЭС пришла к конкретному выводу); базы знаний (экспертные знания в конкретной предметной области); рабочей памяти (базы данных объектов и фактов, используемых системой для решения конкретных задач); механизма логического вывода (выводы на основе проверки правил проектирования и их приоритетов из базы знаний); модуля пополнения знаний (механизм пользовательского ввода новых данных в систему). При этом основными частями ЭС являются база

знаний и механизм логического вывода. Процесс наполнения базы знаний часто сопровождается затруднениями, связанными с преобразованием экспертных знаний в четкий набор логических правил [8]. Поэтому созданы специальные алгоритмы [9], а также подходы, основанные на применении нейронных сетей и методов поиска ассоциативных правил. Преимущество последних заключается в том, что базовый алгоритм обучения может автоматически генерировать базу знаний для ЭС [10, 11].

Классические ЭС являются наиболее применимыми на практике. Тем не менее разработке ЭС, имеющих отличные от них программные архитектуры, посвящены усилия многих исследователей. Так, известен пример разработки веб-экспертной системы для сбора уплаты за регистрацию транспортных средств [12]. ЭС реализована с использованием возможностей системы управления бизнес-правилами Blaze Advisor и развернута на сервере приложений Java. Также предложен метод динамического планирования для ЭС реального времени, пригодный для управления или мониторинга сложными промышленными процессами, использование которого обеспечивает высокоэффективное применение ресурсов [13]. В работе [14] приведены особенности разработки нейро-нечеткой ЭС, в которой используется база знаний, сгенерированная с помощью правил машинного обучения, а не содержащая статические правила. Подобная реализация механизма наполнения базы знаний ЭС делает возможным получение контекстно-зависимого персонализированного набора правил, который может быть использован, например, для повышения эффективности работы мобильных приложений, предоставляющих персонализированные услуги пользователям. В работе [15] представлен обзор алгоритмов машинного обучения и возможных сфер их применения при разработке ЭС различного назначения.

Важным этапом создания ЭС является разработка требований к их функционалу. Так, выполнен анализ атрибутов ЭС, процесса разработки требований ЭС и возможных методов, которые могут быть использованы при создании ЭС [16, 17]. В качестве основных критериев оценки эффективности ЭС выступают интеллектуальность (способность ЭС решать задачи аналогично человеку-эксперту), экономичность (генерация решений за минимальное время) и удобство в её использовании. Процесс разработки требований делится на пять этапов: выявление требований; моделирование (создание абстрактного описания системы с использованием ER- и/или UML-диаграмм); анализ требований (формирование

списка функций, вида представления данных и интерфейса системы, выявление ошибок, связанных с возможной неполнотой, непоследовательностью или неконкретностью требований); валидация и верификация (проверка того, что заложенные ЭС правильны и адекватны); управление требованиями (обеспечение постоянного соответствия результатов работы ЭС её требованиям и документирование требований).

Особенности современных ЭС по ЭМС ТС

Как известно, проблема обеспечения ЭМС ТС связана с генерацией, передачей и приёмом электромагнитной энергии [18]. Так, эмиттер (источник) генерирует ЭМП, которые через кондуктивную, гальваническую или электромагнитную связь поступают на рецептор (приёмник).

На практике принято выделять три уровня ЭМС: внутриаппаратная, внутрисистемная и межсистемная. Первая определена на уровне блока, узла и пр., вторая – системы или комплекса, а третья – между системами и комплексами. Эта специфика обуславливает особенности разработки используемого программного и математического обеспечения и требуемого объема входных данных. Так, при решении задач внутриаппаратной и внутрисистемной ЭМС используются проекционные и конечно-разностные численные методы, а при межсистемной – асимптотические. При этом альтернативные аналитические методы разработаны только для первых двух [19, 20].

Преимуществом их использования являются быстродействие и простота в использовании, а недостатком – ограниченный круг задач, который может быть решен (отсутствие универсальности). Также их использование подразумевает, что разработчик должен самостоятельно оценить возможность применения этих методов для решения поставленной задачи. Использование численных методов позволяет рассчитывать поля и токи в конфигурациях, геометрия которых достаточно сильно приближена к реальным устройствам. Однако эффективность их использования напрямую зависит от вычислительной мощности используемой рабочей станции.

Помимо различий в архитектурах, ЭС различаются организацией баз знаний. В работе [21] рассмотрены различные схемы представления знаний, а также предложен подход к формированию блоков данных (фреймов) для базы знаний по ЭМС. Фрейм является структурой организации знаний, состоящей из ряда слотов. Каждый слот идентифицируется отдельным именем и соответствует определенному свойству объекта, представленного фреймом.



Рис. 1. Программная архитектура классической ЭС [7]

Такое представление базы знаний позволяет описывать как поведение компонентов, так и их взаимосвязи. Преимуществами подхода являются отсутствие ограничений на число слотов в фрейме, возможность использования сложных структур данных, простота в описании и возможность обработки и представления неполных знаний.

Несмотря на имеющиеся различия в реализации современных ЭС, в целом функционально они схожи. Так, из-за необходимости большого числа вычислений, особенно при использовании численных методов, их рекомендуется интегрировать в системы или среды автоматизированного проектирования. Тогда ЭС являются, по сути, программными надстройками к этим системам и средам проектирования, существенно расширяющими их функционал.

Для наглядности изложения далее приведены краткие обзоры функциональных возможностей и примеры реализации известных ЭС по ЭМС ТС.

ЭС по внутриаппаратной ЭМС ТС

В работах [22, 23] предложен подход к организации ЭС по ЭМС печатных плат (ПП), основанный на применении аналитических и численных методов с последующей проверкой правил проектирования. Так, процесс работы ЭС состоит из четырех этапов: ввод данных, анализ, оценка и вывод результатов (рис. 2). Каждому этапу соответствуют отдельные модули, выполняющие определенные задачи. На этапе ввода происходит сбор и классификация информации об анализируемой ПП, а также загрузка файла, содержащего конкретные требования по ЭМС в соответствии с наработками компании производителя или отрасли в целом. После завершения работы этапа ввода данные из считанных файлов используются для классификации цепей за счет анализа свойств, распространяемых по ним сигналов и их назначения.

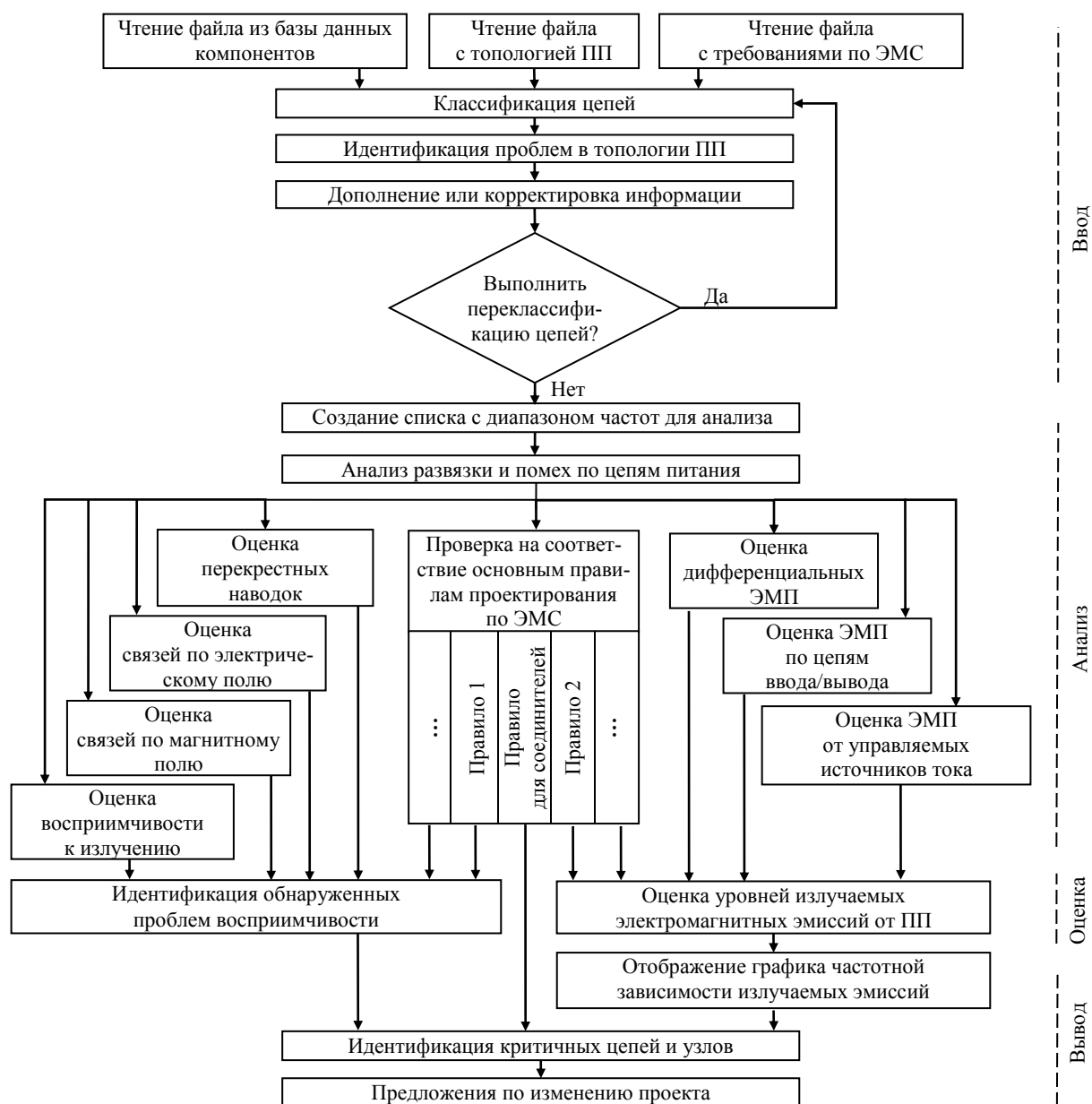


Рис. 2. Структура ЭС по ЭМС ПП [23]

Далее происходит поиск возможных проблем компоновки и трассировки, например, связанных с подключением цепей к нескольким источникам питания или, наоборот, отсутствием электрического контакта, и предупреждение пользователя об этом. Затем пользователь может внести правки, добавить недостающую информацию и перезапустить алгоритм классификации цепей. На этапе анализа выполняется подробный анализ ПП на предмет наличия потенциальных проблем, связанных с её излучением и восприимчивостью, а также выполнить проверку на соответствие основным рекомендациям по проектированию. Для этого предварительно формируется список тактовых частот, используемых в схеме, их гармоник, а также всех частот узкополосных аналоговых сигналов, на которых затем производятся вычисления. Далее на основе полученных результатов формируется общая оценка излучаемых электромагнитных эмиссий от ПП. На этапе вывода пользователю доступен график частотной зависимости излучаемых эмиссий, а также список узлов и компонентов ПП, вносящих наиболее существенный вклад в эти эмиссии. Помимо этого, предлагаются варианты конструктивных решений, направленные на снижение уровня эмиссий и повышение помехоустойчивости ПП.

Известна ЭС EMC Expert, которая ориентирована на выявление проблем ЭМС ПП (рис. 3) [24]. Система состоит из 5 основных компонентов: генераторов промежуточного формата и базы данных, пользовательского интерфейса, базы знаний и анализатора ЭМС. Генератор промежуточного формата предназначен для преобразования файлов анализируемой ПП, созданных с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР), в форму, пригодную для дальнейшей генерации базы данных, реализованной в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования и содержащей список элементов ПП и их параметров. База знаний содержит правила и рекомендации по проектированию ПП. Используя эти базы, система находит имеющиеся недостатки в реализации ПП и отображает их, подсвечивая соответствующие области в графическом интерфейсе пользователя.

В работе [25] обсуждается совместное применение ЭС и электродинамических САПР, а также представлены перспективы развития ЭС в области ЭМС. Также представлен краткий обзор программных средств и подходов к обеспечению ЭМС и предложена обобщенная структура ЭС по ЭМС ПП, функциональные модули которой обеспечивают выполнение 4 этапов работы системы: ввод, классификация, оценка (проверка правил проектирования и оценка ЭМС), формирование отчета. Структурная схема ЭС приведена на рис. 4.

Известен алгоритм автоматического размещения компонентов на ПП, ориентированный на уменьшение уровня ЭМП [26]. Вначале компоненты автоматически делятся на группы по списку межсоединений, затем эти группы помещаются на схему,

используя специальный алгоритм. После этого на схему помещаются межсоединения с ограничениями по их длине. Также разработаны алгоритмы для быстрой оценки электромагнитного излучения от ПП, которые позволяют ЭС работать с ограниченным количеством информации о корпусе, кабелях или точном характере сигналов, оценивать различные структуры ПП посредством поиска потенциально сильных источников электромагнитного излучения [27]. Кроме того, предложены алгоритмы, разработанные для ЭС по ЭМС, для оценки конструкций ПП [28]. Так, максимальные значения излучаемых эмиссий, оцененные алгоритмами, сравниваются с измеренными данными различных конфигураций ПП. Алгоритмы определяют наиболее важные механизмы формирования ЭМП, используя информацию о конструктивных особенностях ПП, которые оказывают наиболее существенное влияние на излучаемые эмиссии.



Рис. 3. Структурная схема ЭС EMC Expert [24]

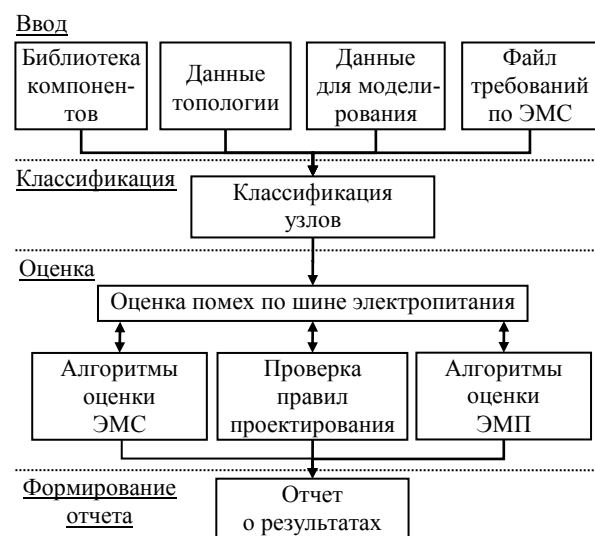


Рис. 4. Структурная схема ЭС по ЭМС ПП [25]

Для удаленных испытаний ТС на ЭМС предложена система, содержащая инструменты сетевого взаимодействия для передачи и управления данными в режиме реального времени (рис. 5) [29]. Она предоставляет эксперту результаты испытаний удаленных ТС, что существенно экономит финансовые и временные ресурсы.

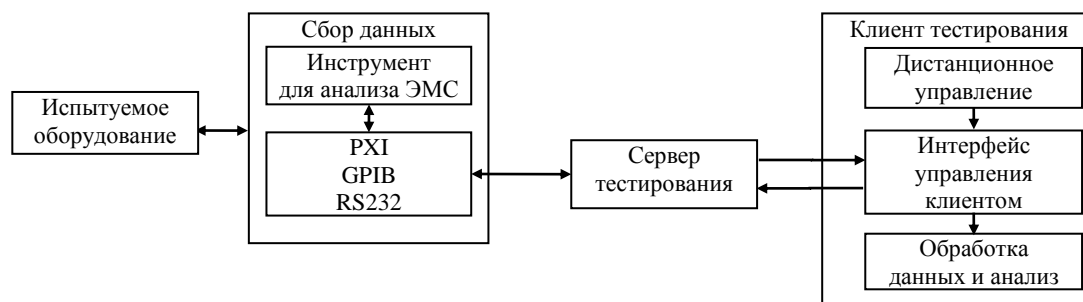


Рис. 5. Структура системы для удаленного тестирования ТС на ЭМС [29]

При разработке баз знаний, содержащих рекомендации по проектированию ПП, кабелей и экранирующих корпусов с учетом ЭМС, широко используются различные лабораторные макеты [30].

В работе [31] представлена ЭС, предназначенная для анализа, синтеза и исследований микрополосковых полосно-пропускающих фильтров. Система содержит базу готовых конструкций фильтров и оригинальный алгоритм оптимизации.

В работе [32] предложена модульная архитектура прототипа ЭС по ЭМС линий передачи (ЛП). Связанные ЛП и устройства на их основе являются основными элементами РЭС, при автоматизированном проектировании которых часто используется квазистатический подход. Стандартная процедура проектирования состоит из пяти этапов: задание входных данных, анализ, оптимизация, прогнозирование и вывод результатов (рис. 6).

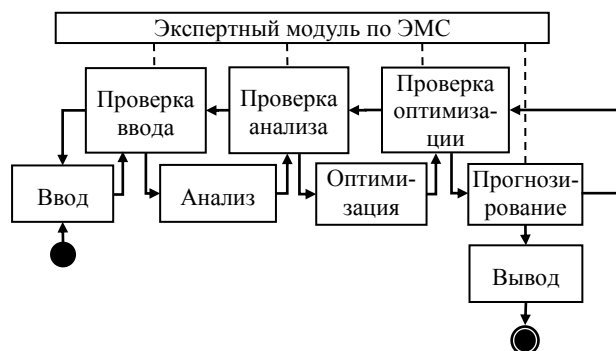


Рис. 6. Диаграмма рабочего процесса ЭС по ЭМС ЛП [32]

Для прямой автоматизации процесса проектирования система содержит экспертный модуль по ЭМС, основанный на базе знаний, содержащей правила проектирования, и позволяющий анализировать результаты каждого этапа и управлять общим процессом работы системы. Если модуль обнаруживает нарушения правил, то в зависимости от выбранного режима работы ЭС либо автоматически возвращается к предыдущим этапам для получения приемлемых результатов, либо сообщает пользователю об ошибках и предоставляет список возможных решений.

ЭС по внутрисистемной ЭМС ТС

На данный момент предложено несколько подходов к созданию ЭС, направленных на решение задач внутрисистемной ЭМС. Так, для решения за-

дач многокритериальной оптимизации и оптимального проектирования военных кораблей с учетом ЭМС предложена ЭС, основанная на применении метода анализа иерархий трехмерных моделей [33]. Трехмерную модель корабля условно представляют в виде куба, каждая ось которого соответствует определенному критерию оценки. Критериями выступают эксплуатационные и технологические требования, электромагнитное излучение и его влияние на персонал/топливо/боеприпасы, стоимость производства и др. При использовании более трёх критериев требуется несколько таких моделей. При этом отмечено, что изменение одного параметра в соответствии с выбранными критериями может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на результат, полученный по другим критериям.

Декомпозиция модели позволяет рационально расположить новое оборудование в системе корабля согласно установленным критериям. При этом каждая ось трехмерной модели ограничена значениями, которые соответствуют эксплуатационным требованиям и ограничениям на это оборудование. В случае выхода тестируемого оборудования за пороговые значения может быть поэтапно применена последовательность действий: изменение технических характеристик рассматриваемого оборудования; изменение характеристик всей системы оборудования корабля; частичная замена частей системы новым оборудованием с учетом эксплуатационных требований; подбор нового оборудования. Основная идея такого подхода к реализации ЭС состоит в получении результата, при котором результирующая трехмерная модель нового оборудования удовлетворяет идеальной ситуации по ЭМС всей системы. В случае если это оказывается невозможным, то ЭС предлагает наиболее близкий к ней вариант.

Возможности применения ЭС по ЭМС различных ТС в современной рабочей среде рассмотрены в работе [34]. В работе отмечено, что, несмотря на разработанные ЭС для проектирования ПП, автомобильных конструкций или других предметных областей, большинство из них – улучшенные системы контроля правил проектирования, включающие в себя аналитические или численные методы моделирования, позволяющие получить прогнозируемый результат. При этом применение ЭС по ЭМС после завершения этапа проектирования может привести к затратам временных и денежных ресурсов на перепроектирование. Поэтому целесообразно использо-

вание ЭС на всех этапах проектирования ТС. Для этого синтезирован алгоритм разработки ТС с применением ЭС по ЭМС (рис. 7).

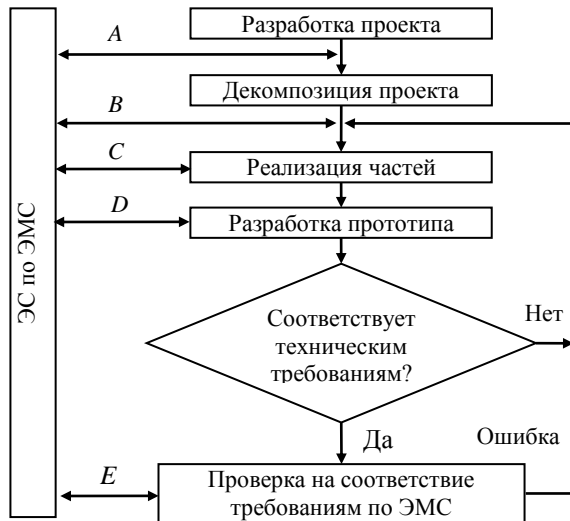


Рис. 7. Блок-схема алгоритма разработки ТС с применением ЭС по ЭМС [34]

На уровне *A* ЭС позволяет выявить потенциальные общесистемные проблемы по ЭМС. На уровне *B* происходит декомпозиция проекта на функциональные части и поиск возможных проблем по ЭМС в них. На уровнях *C* и *D* ЭС предлагает возможные изменения в компоновке составных частей, непосредственно взаимодействуя с соответствующими САПР. Последний уровень *D* предна-

значен для выдачи рекомендаций по решению оставшихся проблем по ЭМС.

Вопросам интеграции ЭС в существующие среды проектирования ТС посвящена работа [35]. Вариант такой интеграции на примере РЭС приведен на рис. 8. Так, на основании технического задания на разработку формируются проектные ограничения и критерии обеспечения ЭМС. Далее производится проектирование РЭС при помощи САПР. Взаимодействие между САПР и ЭС осуществляется с помощью модуля подготовки технической информации. На основе результатов проектирования ЭС генерирует рекомендации по обеспечению ЭМС, на основе которых в проект вносятся необходимые изменения.

Для оценки рисков возникновения проблем ЭМС ТС системы высокоскоростных железных дорог при её эксплуатации предложена четырехуровневая иерархическая модель, представленная на рис. 9 [36]. Так, возможные причины возникновения проблем ЭМС могут быть обусловлены множеством различных факторов, каждому из которых соответствует конкретное значение риска. При этом каждая из проблем в общем виде обусловлена наличием связи между источником и рецептором ЭМП. Процесс оценки риска с использованием модели состоит из нескольких этапов (рис. 10). Сначала выполняется определение рецептора ЭМП, после чего происходит построение его модели анализа риска. Далее с использованием значений риска каждого уровня и их весов рассчитывается общее значение риска ЭМС всей системы.

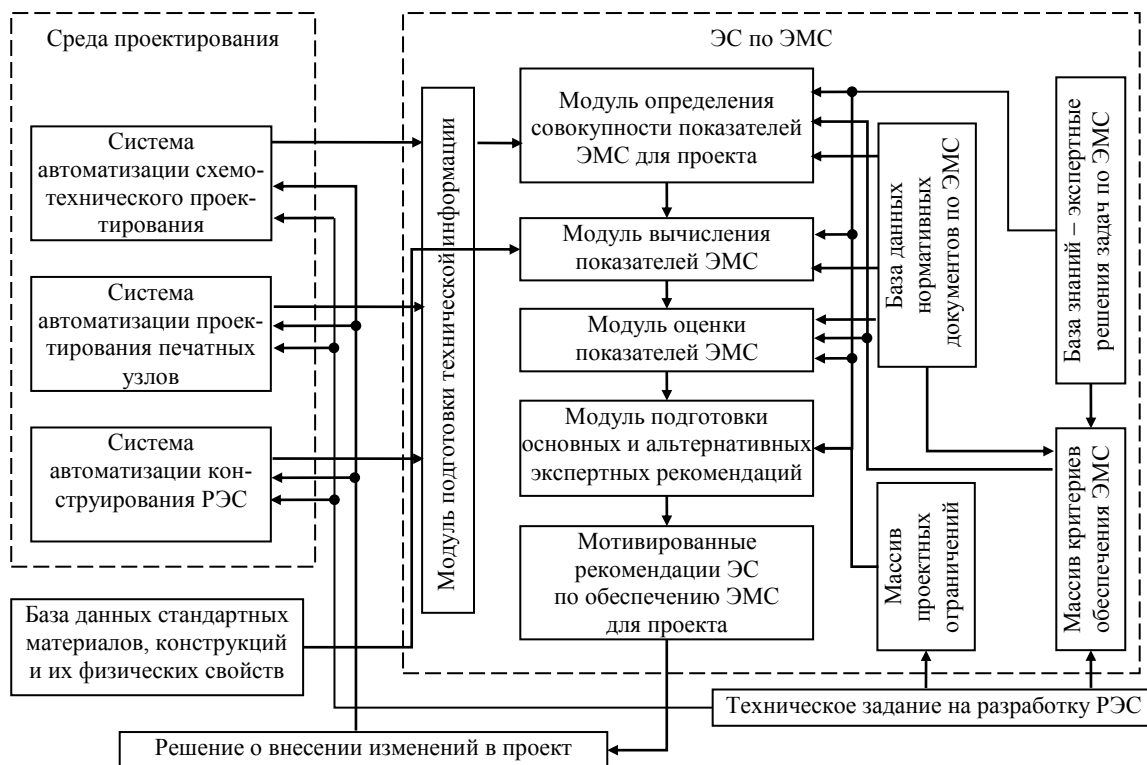


Рис. 8. Структурная схема интеграции ЭС по ЭМС в среду проектирования [35]

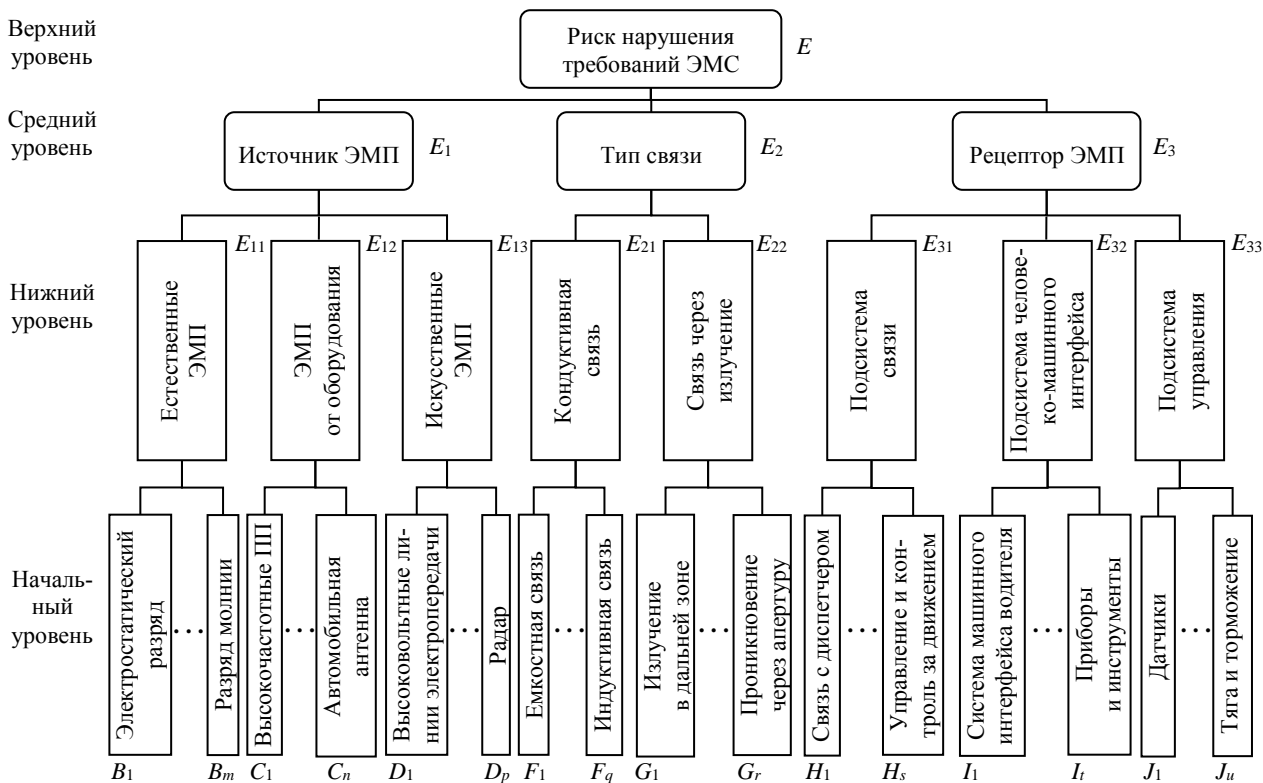


Рис. 9. Модель для анализа риска возникновения проблем ЭМС системы высокоскоростных железных дорог [36]

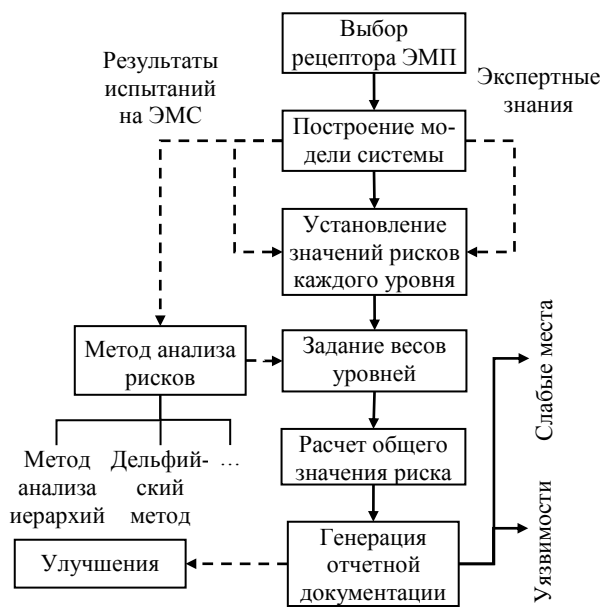


Рис. 10. Диаграмма процесса оценки риска возникновения проблем ЭМС системы железных дорог [36]

Отдельные значения рисков определяются на основе экспертных знаний, результатов испытаний или имеющейся статистики, а значения весов рассчитываются, например, с помощью метода анализа иерархий или аналогичных ему. На последнем этапе производится формирование отчетной документации, на основании которой могут быть выявлены уязвимости и предложены подходы к их устранению.

В работе [37] предложена ЭС по ЭМС автомобилей, которая позволяет выявить проблемы, связанные с излучением и помехоустойчивостью, пере-

крестными наводками, размещением модулей, заземлением компонентов и последующими испытаниями на ЭМС (рис. 11). В работе [38] выполнено сопоставление точности результатов вычисления перекрестных наводок, полученных с использованием алгоритмов оценки индуктивной и емкостной связей, с экспериментальными результатами на примере ТС автомобиля и предложены алгоритмы прогнозирования потенциальных проблем, обусловленных перекрестными наводками. В результате предлагается сравнивать полученные оценки уровня наводок, полученные в «наихудших случаях» работы алгоритма, со значениями, полученными из измерений или статистической обработки.

Методика разработки эффeктивной ЭС, которая используется для анализа, прогнозирования и проектирования ТС с учетом ЭМС на системном уровне, предложена в работе [39]. Так, в систему интегрированы базы данных и модули технических характеристик, проектирования и анализа ЭМС. Отличительной особенностью системы является то, что она разработана с использованием архитектуры клиент-сервер и поэтому может быть одновременно использована разработчиками через локальную компьютерную сеть (рис. 12).

ЭС по межсистемной ЭМС ТС

Вопросам разработки ЭС HardSys по ЭМС военной техники, в которой представление знаний основано на нечеткой логике, посвящена работа [40]. На примере боевого вертолета показано, что классификация электромагнитных характеристик в нечетком виде при использовании ЭС оказывается эффективным средством для определения его наиболее уязвимых мест по ЭМС.

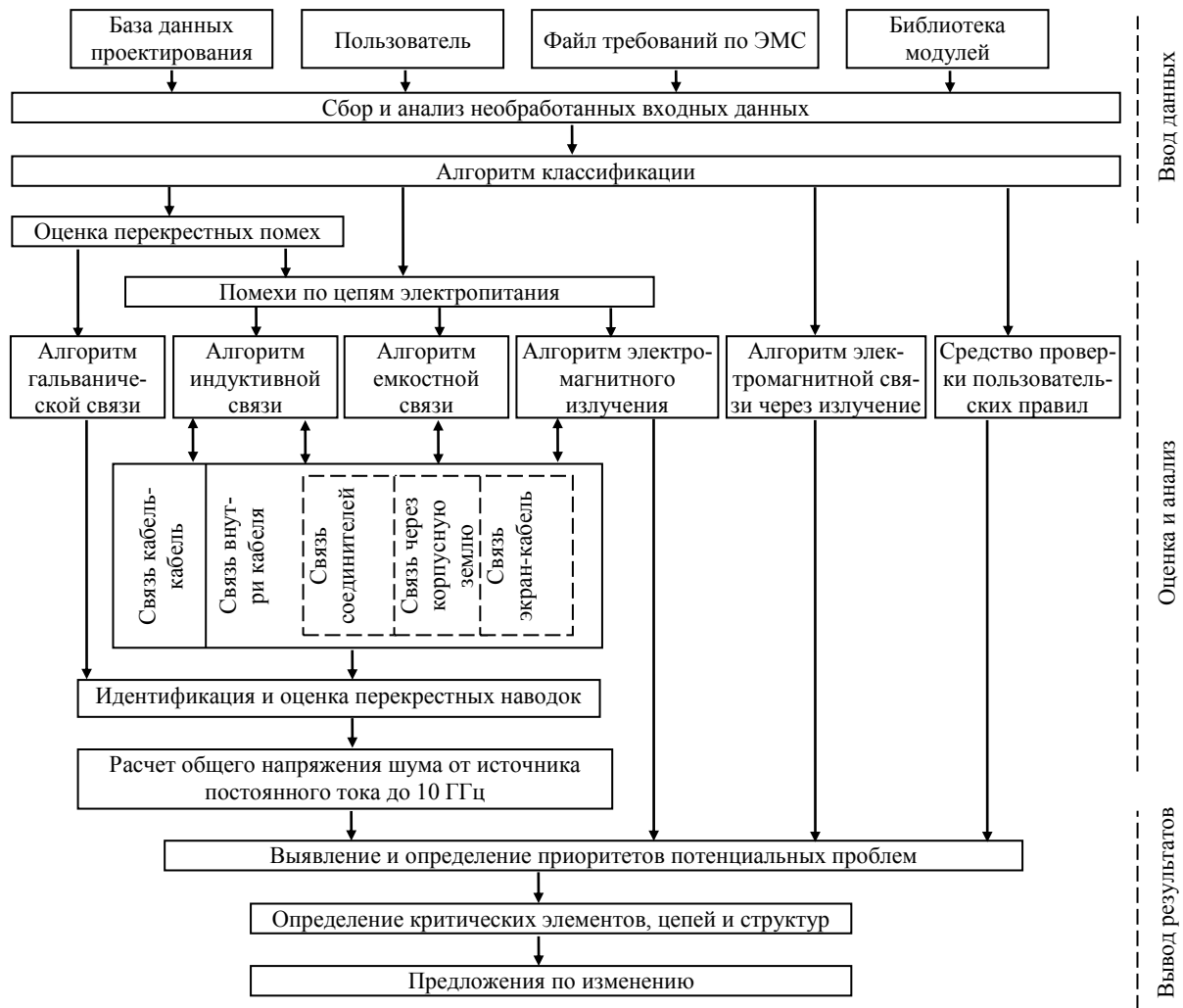


Рис. 11. Архитектура ЭС по ЭМС автомобилей [37]

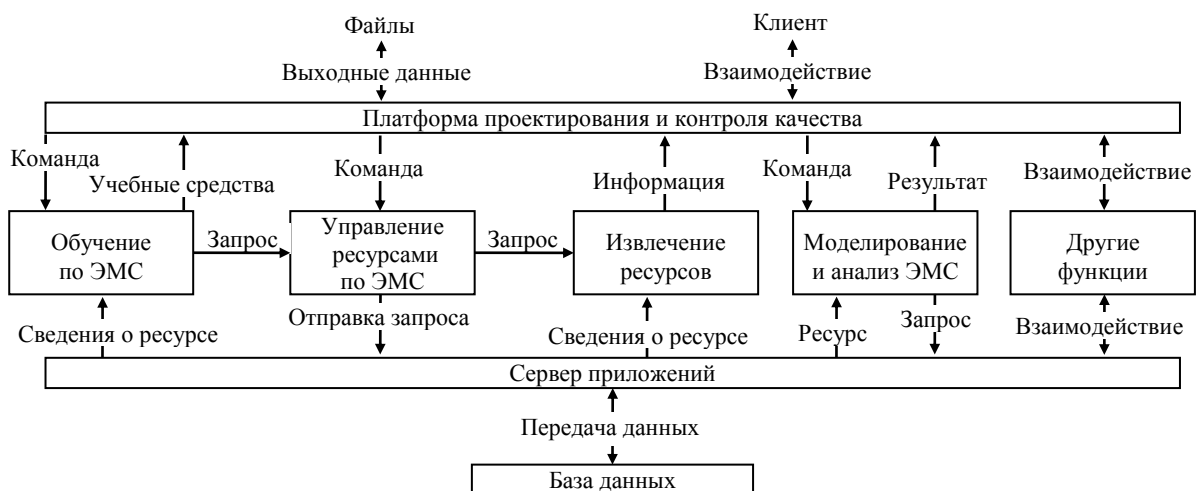


Рис. 12. Архитектура ЭС по ЭМС, основанная на сетевых взаимодействиях [39]

Рассмотрению результатов применения эвристического подхода, использующего базу знаний, к анализу ЭМС радиочастотных приемопередатчиков, близкорасположенных на платформе беспилотного летательного аппарата, посвящена работа [41]. Так, при постановке задачи обеспечения доступности корректной геометрической модели анализируемой

системы используется ЭС предварительной обработки. База знаний построена таким образом, чтобы содержать основные правила моделирования и сценарии, описывающие шаги, задействованные в утвержденной нисходящей/восходящей методологии анализа ЭМС. Далее ЭС используется для мониторинга сигнальной обстановки во временной области

и выбора схем, подходящих для смягчения последствий влияния ЭМП, наводящихся на входные порты приемного устройства.

В работе [42] обсуждается применение подхода, основанного на знаниях, к задаче анализа ЭМС ТС в частотной и временной областях, а также представлены результаты использования ЭС E³EXPERT, использующей методику валидации геометрических моделей анализируемых ТС. Система позволяет прогнозировать, ранжировать и устранять ЭМП, используя выбор схемы подавления помех, основанный на информации из базы знаний.

В работе [43] обсуждается применение ЭС EMC-Analyzer для решения задач ЭМС бортовых и наземных группировок радиотехнических систем в условиях жесткой электромагнитной обстановки. В ходе анализа линейные компоненты радиоприемников (входные цепи, фильтры, изоляция) моделируются в частотной области, а нелинейные с использованием их дискретных моделей и полиномиальных моделей высокого порядка – во временной области. При этом имеющийся функционал ЭС позволяет её использовать для моделирования как межсистемной, так и внутрисистемной ЭМС, а также систем заземления промышленных предприятий.

В работах [44, 45] использован подход к подавлению ЭМП систем расширения спектра по принципу прямой последовательности. Подход основан на использовании ЭС комплексной обработки сигналов при мониторинге среды для определения параметров помеховых сигналов с заданной точностью. После мониторинга окружающей среды система выбирает из специализированной библиотеки наиболее подходящий фильтр для подавления внешних ЭМП.

Заключение

В работе освещено современное состояние исследований по созданию ЭС. Из-за отсутствия в свободном доступе ознакомительных версий ЭС их сравнительный анализ не был выполнен. Поэтому акцент в работе был сделан на систематизацию информации, доступной в открытых научных источниках. Так, приведены краткие сведения об истории создания ЭС и их классификация. Указаны особенности построения современных ЭС по внутриаппаратной, внутрисистемной и межсистемной ЭМС. Показано, что одной из главных тенденций развития этих ЭС является их интегрирование со средами проектирования. Для полноты изложения приведены краткие сведения о функциональных возможностях и примеры построения известных ЭС по ЭМС ТС различного назначения.

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания, благодаря которым статья была значительно улучшена.

Литература

1. Haider K.A. Development of expert systems methodologies and applications / K.A. Haider, Z.K. Rafiqul // International journal of information technology & management information system. – 2015. – Vol. 6. – P. 49–59.

2. Liao S. Expert system methodologies and applications – a decade review from 1995 to 2004 // Expert systems with applications. – 2005. – Vol. 28. – P. 93–103.

3. Automated identification of insulation faults using electro magnetic interference methods / J. Slater, I. Mitiche, A. Nesbitt, G. Morison, P. Boreham // Proc. of IEEE Electrical insulation conference. – Calgary, Canada: IEEE publ., 2019 – P. 473–476.

4. Jain M.B. A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment / M.B. Jain, A. Jain, M.B. Srinivas // Proc. of International conference on condition monitoring and diagnosis. – Beijing, China: IEEE publ., 2008. – P. 1310–1313.

5. Jain M.B. A novel web based expert system architecture for on-line and off-line fault diagnosis and control (FDC) of power system equipment / M.B. Jain, M.B. Srinivas, A. Jain // Proc. of Joint International conference on power system technology and IEEE Power India conference. – Hyderabad, India: IEEE publ., 2008. – P. 1–5.

6. The application of fuzzy mathematics to transformer diagnosis expert system / Q. Ning, Y. Quan, D. Wang, J. Chen, W. Gao // Proc. of 9th IEEE International Conference on the properties and applications of dielectric materials. – Harbin, China: IEEE publ., 2009. – P. 161–164.

7. Tolun M.R. Expert systems / M.R. Tolun, S. Sahin, K. Oztoprak // Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. – 2016. – P. 1–12.

8. Маренко В.А. Способы представления данных в экспертных системах // Математические структуры и моделирование. – 2001. – № 8. – С. 34–39.

9. Пат. 8 356 002 США, МПК G 06 F 17/00. Learning apparatus and method of intelligent system / R. Kim (KR), A. Moon (KR), T. Kang (KR), H. Kim (KR), H. Cho (KR). – № 12 / 123 039; заявл. 05.03.09; опубл. 15.01.13. – 8 с.

10. Agrawal R. Fast algorithms for mining association rules in large databases / R. Agrawal, R. Srikant // Proc. of 20th International conference on very large data bases. – Santiago, Chile: Morgan Kaufmann publ., 1994. – P. 487–499.

11. Agrawal R. Mining association rules between sets of items in large databases / R. Agrawal, T. Imieliński, A. Swami // Proc. of International conference on management of data (ACM SIGMOD). – Washington, USA: Association for computing machinery publ., 1993. – P. 207–216.

12. Demmin A.T. A web-based expert system for vehicle registration / A.T. Demmin, D.A. Zhang // Proc. of IEEE International conference of information reuse and integration. – Las Vegas, USA: IEEE publ., 2003. – P. 420–427.

13. Campos A.M. A real-time expert system architecture based on a novel dynamic task scheduling technique / A.M. Campos, D. Garcia // Proc. of IEEE International conference on industrial electronics, control and instrumentation (IECON02). – Seville, Spain: IEEE publ., 2002. – P. 1893–1898.

14. Mobile expert system: exploring context-aware machine learning rules for personalized decision-making in mobile applications / I.H. Sarker; A.I. Khan, Y.B. Abushark, F. Alsolami // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 10. – P. 1–10.

15. Sarker I.H. Machine learning: algorithms, real-world applications and research directions // SN computer science. – 2021. – Vol. 2, No. 160. – P. 1–20.

16. Requirement engineering techniques in developing expert systems / J.K. Ang, S.B. Leong, C.F. Lee, U.K. Yusof // Proc. of IEEE Symposium on computers & informatics. – Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE publ., 2011. – P. 640–645.

17. Agarwal M. Expert system and it's requirement engineering process / M. Agarwal, S. Goel // Proc. of International

conference on recent advances and innovations in engineering. – Jaipur, India: IEEE publ., 2014. – P. 1–4.

18. Paul C.R. Transmission lines in digital systems for EMC practitioners. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. – 270 p.

19. Computer-based design tools for EMC / M.D. Ganley, S.J. Porter, J.F. Dawson, A.C. Marvin, M.P. Robinson // Proc. of IEEE Colloquium on circuit design and tools for EMC. – London, UK: IET publ., 1995. – P. 1–7.

20. Hubing T. EMC Expert systems for evaluating automotive designs // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Portland, USA: IEEE publ., 2006. – P. 840–841.

21. Frame based knowledge systems for EMC analysis / M. Surekha, A.B. Patki, G. Radha, A.V. Sudha, G.S. Sekhar, P. Shanthi // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Washington, USA: IEEE publ., 1990. – P. 170–174.

22. Hubing T. An expert system approach to EMC modeling / T. Hubing, J. Drewniak, T. Van Doren, N. Kashyap // Proc. of Symposium on electromagnetic compatibility. – Santa Clara, USA: IEEE publ., 1996. – P. 1–4.

23. Expert system algorithms for EMC analysis / T. Hubing, N. Kashyap, J. Drewniak, T. Van Doren // Proc. of 14th Annual review of progress in applied computational electromagnetics. – Monterey, USA: ACES publ., 1998. – P. 905–910.

24. EMC analysis in PCB designs using an expert system / K.N. Rao, P. Venkata Ramana, M.V. Krishnamurthy, K. Srinivas // Proc. of International conference on electromagnetic interference and compatibility (INCEMIC). – Madras, India: IEEE publ., 1995. – P. 59–62.

25. Lai S. Progress of expert systems in electromagnetic engineering / S. Lai, B. Wang // Journal of electronic science and technology of China. – 2005. – Vol. 3, No. 4. – P. 328–333.

26. A method of automatic placement that reduces electromagnetic radiation noise from digital printed circuit boards / Y. Fukumoto, S. Miura, H. Ikeda, T. Nakayama, S. Tanimoto, H. Uemura // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Washington, USA: IEEE publ., 2000. – P. 363–368.

27. Expert system algorithms for identifying radiated emission problems in printed circuit boards / H. Shim, T. Hubing, T. Van Doren, R. Dubroff, J. Drewniak, D. Pommerenke, R. Kires // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Silicon Valley, USA: IEEE publ., 2004. – P. 1–6.

28. Fu Y. Analysis of radiated emissions from a printed circuit board using expert system algorithms / Y. Fu, T. Hubing // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2007. – Vol. 49. – P. 68–75.

29. Research on remote EMC testing system / X. Lei, L. Shanghe, L. Guangqiang, J. Mingji // Proc. of 5th Asia-Pacific conference on environmental electromagnetics. – Xi'an, China: IEEE publ., 2009. – P. 281–284.

30. Van Doorn M. EMC expert system for architecture design // Proc. of Asia-Pacific EMC symposium. – Jeju Island, Korea, 2011. – P. 1–4.

31. Expert system FILTEX32 for computer-aided design of bandpass microstrip filters / B.A. Belyaev, S.V. Butakov, N.V. Laletin, A.A. Leksikov, V.V. Tyumev // Proc. of 15th International Crimean conference microwave & telecommunication technology. – Sevastopol, Ukraine: IEEE publ., 2005. – P. 504–505.

32. Kvasnikov A.A. Prototype of EMC Expert system for optimal design of radio-electronic equipment / A.A. Kvasnikov, S.P. Kuksenko, F.F. Idrisov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1862, No. 012020. – P. 1–6.

33. Tayal M. Expert system using electromagnetic interference and electromagnetic compatibility based criteria for ship design, weapon selection and evaluation / M. Tayal, V. Waman Karve // Proc. of IEEE conference on electromagnetic interference and compatibility. – Hyderabad, India: IEEE publ., 1997. – P. 1–6.

34. Keyer C. EMC expert systems for our modern working environment / C. Keyer, F. Leferink // Proc. of International symposium on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE). – Rome, Italy: IEEE publ., 2012. – P. 1–5.

35. Лемешко Н.В. Об использовании экспертных систем для решения задач электромагнитной совместимости // Теория и техника радиосвязи. – 2016. – № 4. – С. 48–52.

36. Li M. Applying risk assessment technique to electromagnetic compatibility analysis in Chinese high speed railway / M. Li, Y. Wen // Proc. of 6th IEEE International symposium on microwave, antenna, propagation, and EMC technologies (MAPE). – Shanghai, China: IEEE publ., 2015. – P. 441–445.

37. An expert system architecture to detect system-level automotive EMC problems / S. Ranganathan, D.G. Beetner, R. Wiese, T.H. Hubing // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Minneapolis, USA: IEEE publ., 2002. – Vol. 2. – P. 976–981.

38. Validation of worst-case and statistical models for an automotive EMC expert system / D. Beetner, H. Weng, M. Wu, T. Hubing // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Honolulu, USA: IEEE publ., 2007. – P. 1–5.

39. A system-level EMC technical support platform for network-based computers / Q. Wu, J.H. Fu, F.Y. Meng, H.L. Wang, B.S. Jin, F. Zhang // Proc. of Asia-Pacific symposium on electromagnetic compatibility and 19th International Zurich symposium on electromagnetic compatibility. – Singapore: IEEE publ., 2008. – P. 642–645.

40. Lo Vetri J. Evaluation of HardSys: a simple EMI expert system / J. Lo Vetri, A.S. Podgorski // Proc. of IEEE international symposium on electromagnetic compatibility. – Washington, USA: IEEE publ., 1990. – P. 228–232.

41. Demirkiran I. Knowledge-based approach to interference mitigation for EMC of transceivers on unmanned aircraft / I. Demirkiran, D.D. Weiner, A. Drozd, I. Kasperovich // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Fort Lauderdale, USA: IEEE publ., 2010. – P. 425–430.

42. Application and demonstration of a knowledge-based approach to interference rejection for EMC / A. Drozd, A. Pesta, D. Weiner, P. Varshney, I. Demirkiran // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Denver, USA: IEEE publ., 1998. – P. 537–542.

43. Mordachev V. Advanced options of expert system «EMC-Analyzer» / V. Mordachev, P. Litvinko // Proc. of International Symposium on EMC. EMC Europe. – Barcelona, Spain: Technical university of Catalonia publ., 2006. – P. 635–640.

44. Knowledge-based approach to interference rejection for EMC / I. Demirkiran, V.N.S. Samarasoorya, P.K. Varshney, D.D. Weiner, R. Mani, S. Hamid Nawab, S. Tyler // Proc. of IEEE International symposium on electromagnetic compatibility. – Denver, USA: IEEE publ., 1998. – P. 1150–1155.

45. A Knowledge-based approach to interference rejection for direct-sequence spread spectrum (DSSS) systems / U. Demirkiran, D.D. Weiner, P. Varshney, A. Drozd // Proc. of International waveform diversity & design conference. – Lihue, USA: IEEE publ., 2006. – P. 1–6.

Квасников Алексей Андреевич

Аспирант каф. телевидения и управления (ТУ)
Томского гос. ун-та систем управления
и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-7000-956X
Тел.: + 7 (382-2) 41-34-39
Эл. почта: aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru

Куксенко Сергей Петрович

Д-р. техн. наук., профессор каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0001-9713-458X
Тел.: +7 (382-2) 41-34-39
Эл. почта: ksergp@tu.tusur.ru

Kvasnikov A.A., Kuksenko S.P.

Review of expert systems for electromagnetic compatibility of technical equipment

This paper presents a review of expert systems for electromagnetic compatibility of technical equipment. The history of development and classification of modern expert systems are described. The main elements and features of software architecture development are indicated, as well as examples of expert systems for electromagnetic compatibility of technical equipment for various purposes.

Keywords: electromagnetic compatibility, expert system, technical equipment, radio electronic equipment, printed circuit board, transmission line.

DOI: 10.21293/1818-0442-2021-24-4-7-18

References

1. Haider K.A., Rafiqul Z.K. Development of expert systems methodologies and applications. *International Journal of Information Technology & Management Information System*, 2015, vol. 6, pp. 49–59.
2. Liao S. Expert system methodologies and applications – a decade review from 1995 to 2004. *Expert Systems with Applications*, 2005, vol. 28, pp. 93–103.
3. Slater J., Mitiche I., Nesbitt A., Morison G., Boreham P. Automated identification of insulation faults using electro magnetic interference methods. *Proc. of IEEE Electrical Insulation Conference*. Calgary, Canada, IEEE Publ., 2019, pp. 473–476.
4. Jain M.B., Jain A., Srinivas M.B. A web based expert system shell for fault diagnosis and control of power system equipment. *Proceedings of International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, China, IEEE Publ., 2008, pp. 1310–1313.
5. Jain M.B., Srinivas M.B., Jain A. A novel web based expert system architecture for on-line and off-line fault diagnosis and control (FDC) of power system equipment. *Proceedings of Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. Hyderabad, India, IEEE Publ., 2008, pp. 1–5.
6. Ning Q., Quan Y., Wang D., Chen J., Gao W. The application of fuzzy mathematics to transformer diagnosis expert system. *Proceedings of 9th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*. Harbin, China, IEEE Publ., 2009, pp. 161–164.
7. Tolun M.R., Sahin S., Oztoprak K. Expert systems. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2016, pp. 1–12.
8. Marenko V.A. *Sposoby predstavleniya dannyh v ekspertnyh sistemah* [Methods for presenting data in expert systems]. *Mathematical Structures and Modeling*, 2001, no. 8, pp. 34–39 (in Russ.).
9. Kim R., Moon A., Kang T., Kim H., Cho H. Learning apparatus and method of intelligent system. Patent US, no. 8356002, 2013.
10. Agrawal R., Srikant R. Fast algorithms for mining association rules in large databases. *Proceedings of 20th International Conference on Very Large Data Bases*. Santiago, Chile, Morgan Kaufmann Publ., 1994, pp. 487–499.
11. Agrawal R., Imieliński T., Swami A. Mining association rules between sets of items in large databases. *Proceedings of International Conference on Management of Data (ACM SIGMOD)*. Washington, USA, Association for computing machinery Publ., 1993, pp. 207–216.
12. Demmin A.T., Zhang D.A. A web-based expert system for vehicle registration. *Proceedings of IEEE International Conference of Information Reuse and Integration*. Las Vegas, USA, IEEE Publ., 2003, pp. 420–427.
13. Campos A.M., Garcia D. A real-time expert system architecture based on a novel dynamic task scheduling technique. *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON02)*. Seville, Spain, IEEE Publ., 2002, pp. 1893–1898.
14. Sarker I.H., Khan A.I., Abushark Y.B., Alsolami F. Mobile expert system: exploring context-aware machine learning rules for personalized decision-making in mobile applications. *Symmetry*, 2021, vol. 13, no. 10, pp. 1–10.
15. Sarker I.H. Machine learning: algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2021, vol. 2, no. 160, pp. 1–20.
16. Ang J.K., Leong S.B., Lee C.F., Yusof U.K. Requirement engineering techniques in developing expert systems. *Proceedings of IEEE Symposium on Computers & Informatics*. Kuala Lumpur, Malaysia, IEEE Publ., 2011, pp. 640–645.
17. Agarwal M., Goel S. Expert system and it's requirement engineering process. *Proceedings of International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering*. Jaipur, India, IEEE Publ., 2014, pp. 1–4.
18. Paul C.R. *Transmission lines in digital systems for EMC practitioners*. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2012. 270 p.
19. Ganley M.D., Porter S.J., Dawson J.F., Marvin A.C., Robinson M.P. Computer-based design tools for EMC. *Proceedings of IEEE Colloquium on Circuit Design and Tools for EMC*. London, UK, IET Publ., 1995, pp. 1–7.
20. Hubing T. EMC Expert systems for evaluating automotive designs. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Portland, USA, IEEE Publ., 2006, pp. 840–841.
21. Surekha M., Patki A.B., Radha G., Sudha A.V., Sekhar G.S., Shanthi P. Frame based knowledge systems for EMC analysis. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Washington, USA, IEEE Publ., 1990, pp. 170–174.
22. Hubing T., Drewniak J., Van Doren T., Kashyap N. An expert system approach to EMC modeling. *Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Santa Clara, USA, IEEE Publ., 1996, pp. 1–4.
23. Hubing T., Kashyap N., Drewniak J., Van Doren T. Expert system algorithms for EMC analysis. *Proceedings of 14th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetic*. Monterey, USA, ACES publ., 1998, pp. 905–910.
24. Nageswara Rao K., Venkata Ramana P., Krishnamurthy M.V., Srinivas K. EMC analysis in PCB designs using an expert system. *Proceedings of International Conference on*

Electromagnetic Interference and Compatibility (INCEMIC). Madras, India, IEEE Publ., 1995, pp. 59–62.

25. Lai S., Wang B. Progress of expert systems in electromagnetic engineering. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2005, vol. 3, no. 4, pp. 328–333.

26. Fukumoto Y., Miura S., Ikeda H., Nakayama T., Tanimoto S., Uemura H. A method of automatic placement that reduces electromagnetic radiation noise from digital printed circuit boards. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Washington, USA, IEEE Publ., 2000, pp. 363–368.

27. Shim H., Hubing T., Van Doren T., Dubroff R., Drewniak J., Pommerenke D., Kires R. Expert system algorithms for identifying radiated emission problems in printed circuit boards. *Proceedings of IEEE International Conference of Information Reuse and Integration*. Silicon Valley, USA, IEEE Publ., 2004, pp. 1–6.

28. Fu Y., Hubing T. Analysis of radiated emissions from a printed circuit board using expert system algorithms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, vol. 49, pp. 68–75.

29. Lei X., Shanghe L., Guangqiang L., Mingji J. Research on remote EMC testing system. *Proceedings of 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*. Xi'an, China, IEEE Publ., 2009, pp. 281–284.

30. Van Doorn M. EMC Expert system for architecture design. *Proceedings of Asia-Pacific EMC Symposium*. Jeju Island, Korea, 2011, pp. 1–4.

31. Belyaev B.A., Butakov S.V., Laletin N.V., Leksikov A.A., Tyumev V.V. Expert system FILTEX32 for computer-aided design of bandpass microstrip filters. *Proceedings of 15th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology*. Sevastopol, Ukraine, IEEE Publ., 2005, pp. 504–505.

32. Kvasnikov A.A., Kuksenko S.P., Idrisov F.F. Prototype of EMC Expert system for optimal design of radio-electronic equipment. *Journal of Physics: conference series*, 2021, vol. 1862, no. 012020, pp. 1–6.

33. Tayal M., Waman Karve V. Expert system using electromagnetic interference and electromagnetic compatibility based criteria for ship design, weapon selection and evaluation. *Proceedings of IEEE on Electromagnetic Interference and Compatibility*. Hyderabad, India, IEEE Publ., 1997, pp. 1–6.

34. Keyer C., Leferink F. EMC Expert Systems for our modern working environment. *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. Rome, Italy, IEEE Publ., 2012, pp. 1–5.

35. Lemeshko N.V. *Ob ispolzovanii ekspertnykh sistem dlya resheniya zadach elektromagnitnoi sovместimosti* [On the use of expert systems for solving problems of electromagnetic compatibility]. *Theory and Technology of Radio Communication*, 2016, no. 4, pp. 48–52 (in Russ.).

36. Li M., Wen Y. Applying risk assessment technique to electromagnetic compatibility analysis in Chinese high speed railway. *Proceedings of 6th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE)*. Shanghai, China, IEEE Publ., 2015, pp. 441–445.

37. Ranganathan S., Beetner D.G., Wiese R., Hubing T. An expert system architecture to detect system-level automotive EMC problems. *Proceedings of IEEE International Sym-*

posium on Electromagnetic Compatibility. Minneapolis, USA, IEEE Publ., 2002, vol. 2, pp. 976–981.

38. Beetner D., Weng H., Wu M., Hubing T. Validation of worst-case and statistical models for an automotive EMC expert system. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Honolulu, USA, IEEE Publ., 2007, pp. 1–5.

39. Wu Q., Fu J.H., Meng F.Y., Wang H.L., Jin B.S., Zhang F. A system-level EMC technical support platform for network-based computers. *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Singapore, IEEE Publ., 2008, pp. 642–645.

40. Lo Vetri J., Podgorski A.S. Evaluation of HardSys: a simple EMI expert system. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Washington, USA, IEEE Publ., 1990, pp. 228–232.

41. Demirkiran I., Weiner D.D., Drozd A., Kasperovich I. Knowledge-based approach to interference mitigation for EMC of transceivers on unmanned aircraft. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Fort Lauderdale, USA, IEEE Publ., 2010, pp. 425–430.

42. Drozd A., Pesta A., Weiner D., Varshney P., Demirkiran I. Application and demonstration of a knowledge-based approach to interference rejection for EMC. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Denver, USA, IEEE Publ., 1998, pp. 537–542.

43. Mordachev V., Litvinko P. Advanced options of expert system «EMC-Analyzer». *Proceedings of International Symposium on EMC. EMC Europe*. Barcelona, Spain, Technical university of Catalonia Publ., 2006, pp. 635–640.

44. Demirkiran I., Samarasooriya V.N.S., Varshney P.K., Weiner D.D., Mani R., Hamid Nawab S., Tyler S. Knowledge-based approach to interference rejection for EMC. *Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Denver, USA, IEEE Publ., 1998, pp. 1150–1155.

45. Demirkiran U., Weiner D.D., Varshney P., Drozd A. A Knowledge-based approach to interference rejection for direct-sequence spread spectrum (DSSS) systems. *Proceedings of International Waveform Diversity & Design Conference*. Lihue, USA, IEEE Publ., 2006, pp. 1–6.

Aleksey A. Kvasnikov

Postgraduate student, Department of Television and Control, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0001-7000-956X

Phone: +7 (382-2) 41-34-39

Email: aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru

Sergei P. Kuksenko

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department of Television and Control, TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

ORCID: 0000-0001-9713-458X

Phone: +7 (382-2) 41-34-39

Email: ksergp@tu.tusur.ru