

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Ю. В. НИКИТЮК, А. А. СЕРЕДА, А. Л. САМОФАЛОВ

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
CALS/PLM, CAE-СИСТЕМЫ**

Практическое руководство

для студентов специальностей

1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»,

1-31 04 03 «Физическая электроника»,

1-31 04 08 «Компьютерная физика»,

1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»,

1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы»,

1-98 01 01 «Компьютерная безопасность (по направлениям)»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2023

УДК 004.9(076)
ББК 32.973-02я73
Н623

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук Д. С. Кузьменов,
кандидат технических наук Д. В. Прокопенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Никитюк, Ю. В.

Н623 Введение в технологии компьютерного моделирования.
CALS/PLM, CAE-системы : практическое руководство /
Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda, А. Л. Самофалов ; Гомельский гос.
ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – 30 с.
ISBN 978-985-577-947-7

В практическом руководстве рассмотрены структура, цели и задачи, особенности внедрения, преимущества и недостатки CALS/PLM-систем; представлены возможности, направления развития и лидеры рынка CAE-систем; описаны расчетные методы, используемые для инженерных исследований в CAE-системах.

Адресовано студентам специальностей 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)», 1-31 04 03 «Физическая электроника», 1-31 04 08 «Компьютерная физика», 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности», 1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы», 1-98 01 01 «Компьютерная безопасность (по направлениям)».

УДК 004.9(076)
ББК 32.973-02я73

ISBN 978-985-577-947-7

© Никитюк Ю. В., Серeda А. А.,
Самофалов А. Л., 2023

© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 CALS/PLM-системы	5
1.1 Основные термины и определения.....	5
1.2 История CALS/PLM-систем.....	6
1.3 Структура CALS/PLM-систем.....	8
1.4 Цели и задачи CALS/PLM-систем.....	11
1.5 Внедрение CALS/PLM-систем.....	12
1.6 Преимущества и недостатки CALS/PLM-технологий.....	13
2 CAE-системы.....	16
2.1 Возможности CAE-систем	16
2.2 Лидеры рынка CAE-систем	17
2.3 Основные направления развития CAE-систем	18
3 Расчетные методы, используемые для инженерных исследований в CAE-системах.....	20
3.1 Аналитические методы	20
3.2 Численные методы	22
3.3 Метод конечных элементов	25
Литература.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Важными навыками, которые должны быть приобретены выпускниками факультета физики и информационных технологий, можно считать следующие:

- анализ физических закономерностей на основе современных теоретических представлений и использование математических и компьютерных методов;

- выполнение исследовательской работы в областях, где используются физико-математические методы анализа и компьютерные технологии;

- разработка физико-математических методов для решения задач в областях техники, экономики и управления.

Формирование этих навыков тесно связано с использованием моделирования для изучения разнообразных физических процессов, происходящих в материалах и изделиях.

В конце 1980 – начале 1990 годов стал осуществляться массовый переход от освоения и применения языков программирования к внедрению проблемно-ориентированных программных систем и сред, создаваемых на базе достижений в компьютерном моделировании. По устоявшейся терминологии наукоемкие программные системы компьютерного моделирования относят к CAE-технологиям, составляющим естественнонаучное ядро триады CAD-CAE-CAM-технологий в системе CALS/PLM-технологий.

1 CALS/PLM-СИСТЕМЫ

1.1 Основные термины и определения

НИИ – научно-исследовательский институт.

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

САПР – система автоматизированного проектирования.

ЧПУ (числовое программное управление) – система цифровых вычислительных устройств для управления производственным оборудованием.

CNC (Computer numerical control) – числовое программное управление (ЧПУ).

Цифровой двойник (digital twin) – цифровая интерактивная копия реального физического объекта, созданная для эффективного управления им и оптимизации бизнес-процессов его создания.

BOM (bill of materials) – ведомость спецификаций изделия – это список материалов и комплектующих, их количество, необходимое для производства данного изделия.

CAD (computer-aided design) – система автоматизированного проектирования.

CAE (computer-aided engineering) – компьютерные системы для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа или симуляции физических процессов.

CAI (computer-aided inspection) – компьютерные системы для контроля качества физических моделей и изделий. Используются совместно с измерительными приборами.

CALS (continuous acquisition and life cycle support) – непрерывная информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий.

CAM (computer-aided manufacturing) – компьютерные системы для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

CPC (collaborative product commerce) – цифровая среда управления корпоративной информацией участников производственной цепочки для координации процессов проектирования, производства и послепродажного обслуживания на протяжении жизненного цикла изделия.

SCM (supply chain management) – система цифрового управления цепочками поставок.

ERP (enterprise resource planning) – система цифрового планирования ресурсов предприятия.

MES (manufacturing execution system) – система оперативного планирования и управления производственными процессами.

MRP (material requirements planning) – компьютерные системы для планирования потребностей в материалах.

PCM (product configuration management) – система цифрового установления функциональных и физических характеристик изделия, их согласованности с заданными требованиями и проектной и эксплуатационной документацией на протяжении его срока службы.

PDM (product data management) – управление информацией об изделии.

PLM (product lifecycle management) – управление жизненным циклом изделия

SCADA (supervisory control and data acquisition) – система цифрового диспетчерского управления производственными процессами. Предназначена для обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

1.2 История CALS/PLM-систем

1960-е годы. Начало внедрения вычислительной техники в производственные процессы. Компьютеры применяли для решения частных задач, которые относились к разным этапам жизненного цикла изделий. С помощью вычислительной техники автоматизировали учётно-управленческие функции внутри автоматизированной системы управления производством (АСУП). Одновременно с ними появились автоматизированные системы управления технологическими процессами АСУТП.

1970-е годы. Появление первых систем для конструкторского проектирования – CAD-систем, которые использовали средства вычислительной техники в процессах конструкторской и технологической подготовки производства и генерировали двумерные чертежи изделий. Для улучшения логистики ресурсов предприятия была разработана система планирования потребности в материалах.

Возникновение идеи интегрированных компьютерных производственных систем, обусловленной увеличением числа компьютерных систем на предприятиях и проблемой обмена информацией между ними. Госстандарт СССР разработал методику описания изделий в условиях автоматизации проектирования и производства для выработки единого системного подхода к формализованному представлению конструкторской и технологической информации и формированию информационного языка.

Начало 1980-х годов. Появление 3D CAD-систем, которые заменили двумерные CAD-системы и позволили инженерам конструировать произвольные поверхности твёрдого тела в трёх измерениях. Методы проектирования эволюционируют от статических двумерных чертежей с разными видами и разрезами к динамическим трёхмерным виртуальным геометрическим моделям изделий.

Появление CAE-систем, которые разрабатывались параллельно с 3D CAD-системами. CAE-системы расширяли функциональные возможности компьютерного проектирования за счёт того, что помогали инженерам оценить работоспособность и поведение трёхмерной модели изделия в условиях, близких к реальной эксплуатации, без больших затрат времени и средств. Появление CAM-систем, при использовании которых инженеры получили возможность писать управляющие программы для станков с ЧПУ на основе результатов инженерного анализа.

1985 год. Разработана CALS-технология для военно-промышленного комплекса США, которая стандартизировала электронное представление изделий и обмен технической и коммерческой информацией. CALS-технология упорядочивала процессы и сокращала затраты, связанные с информационной поддержкой логистики.

Середина-конец 1980-х годов. Появление программных комплексов управления данными об изделии – PDM систем, которые создавались для поддержки CAD-, CAM- и CAE-систем. Функции ранних PDM-систем заключались в предоставлении пользователям информации об изделии и обеспечении её целостности через центральное хранилище данных.

Переход PDM-систем в CPC-системы, обусловленный ростом контрактного производства и развитием интернет-технологий, которые предоставили необходимую инфраструктуру для разработки лёгких и универсальных пользовательских интерфейсов с низкой стоимостью поддержки. Развитие интернет-технологий позволило снизить стоимость владения CPC-системами для предприятий и наладить кооперацию с международными поставщиками и клиентами. CPC-системы управляли только технико-конструкторской документацией; чего было недостаточно для управления жизненным циклом изделия.

Систему планирования производственных ресурсов заменила система планирования ресурсов предприятия – ERP. Появление системы управления взаимоотношениями с клиентами – CRM. Появление системы управления цепочками поставок – SCM. Системы ERP, CRM и SCM ориентировались каждая на свой этап жизненного цикла изделия. PDM не интегрировались с ERP и CRM, так как изначально разрабатывались для обработки технико-конструкторской информации.

2005 год. Компания Dassault Systems разработала концепцию PLM, которая стала развитием CALS-технологий. PLM-программы были призваны расширить возможности PDM-программ. Если PDM ориентировались на управление информацией, то PLM представляла собой процесс, который поддерживал сбор, организацию и повторное использование информации в течение жизненного цикла изделия.

Вторая половина 2000-х годов – настоящее время. Интеграция PLM-систем и ERP-систем. Появление концепции цифрового предприятия, основу которого составляет интеграция PLM-систем и ERP-управляемого искусственным интеллектом.

1.3 Структура CALS/PLM-систем

Разработка и изготовление современных изделий требует применения программного обеспечения разного направления. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и систем их автоматизации представлены на рисунке 1.

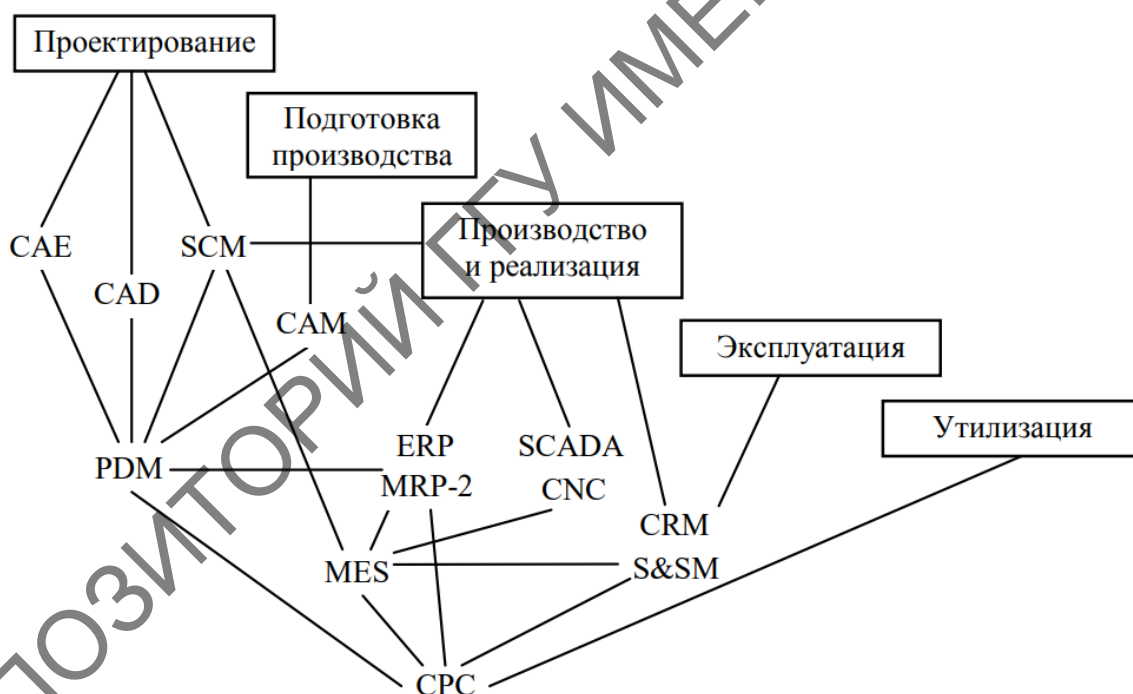


Рисунок 1 – Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

CAD – это средства автоматизированного проектирования изделий, которые реализуют информационные технологии для выполнения функций проектирования и представляют собой организационно-

техническую платформу для автоматизации проектирования. Для обозначения программ автоматизированного проектирования используется акроним – САПР.

CAE – это программы для решения инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Алгоритмы CAE основаны на численных методах решения дифференциальных уравнений. Современные CAE применяются совместно или интегрированы в CAD. CAE позволяет оценить поведение компьютерной модели изделия в реальных условиях эксплуатации и проверить работоспособность изделия.

CAM используется для программирования производственных процессов, станков с ЧПУ. В CAM используются модели и сборки, созданные в CAD, для формирования траекторий перемещения инструментов. Под CAM понимают как процесс компьютерной подготовки производства, так и программно-вычислительные комплексы, которые используют инженеры-технологи.

PDM – это система управления инженерными данными о продукте, обеспечивает координацию работы систем CAE/CAD/CAM.

SCM – это система цифрового управления цепочками поставок. SCM автоматизирует и управляет снабжением, товародвижением на предприятии и распространением продукции. Управление цепочками поставок включает в себя изготовление продукции, поставку сырья, месторасположение, запасы, транспортировку и информацию.

ERP – это система цифрового планирования ресурсов предприятия. ERP управляет такими бизнес-процессами, как бухгалтерский учёт, закупки, управление проектами, управление рисками, обеспечение нормативно-правового соответствия, планирование, составление бюджетов и прогнозов, создание финансовых отчётов. ERP объединяет многочисленные бизнес-процессы и передаёт данные между ними, устраняет дублирование и обеспечивает целостность данных с помощью «единого источника достоверных данных».

MRP используется для планирования ресурсов на предприятии и включает в себя функции автоматического создания заказов на закупку и производство необходимых комплектующих. MRP оптимизирует время поставки материалов и комплектующих таким образом, чтобы материалы, необходимые для производства, поступали одновременно. MRP ускоряет доставку тех материалов, которые в данный момент нужны в первую очередь, и задерживает преждевременные поступления.

MES – это система оперативного управления производственными процессами, в которой используются данные о статусе и движении заказов и материалов на изготовление на производственных участках.

CPC – это цифровая среда управления корпоративной информацией участников производственной цепочки для координации процессов проектирования, производства и послепродажного обслуживания на протяжении жизненного цикла изделия.

SCADA – это система цифрового диспетчерского управления производственными процессами. Предназначена для сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления в реальном времени.

CNC – числовое программное управление (ЧПУ).

CRM – это система цифрового управления взаимоотношения с клиентами. CRM формирует документы по шаблону, ставит задачи менеджерам на каждом этапе сделки, отправляет сообщения и письма клиентам, создает отчеты по заданным показателям, рассчитывает стоимость услуг, отслеживает важные даты и сроки.

S&SM – это система управления продажами и обслуживанием. Кроме указанных на схеме в рамках PLM-систем также используются нижеперечисленные системы автоматизации.

CAI – это компьютерные системы для контроля качества физических моделей и изделий, причём цифровая модель выступает в качестве эталона. Используются совместно с измерительными приборами.

BOM содержит информацию о сборках, деталях, комплектующих и сырье, необходимых для изготовления одной единицы готового продукта с указанием количества каждого предмета. Информация представляется в виде иерархии, где готовый продукт отображается на верхнем уровне, а сборки, детали, комплектующие и сырьё – на нижних уровнях. Указано количество каждого предмета, необходимого для завершения одной единицы следующего самого высокого уровня сборки.

PCM устанавливает функциональные и физические характеристики изделия, их согласованность с заданными требованиями и проектной и эксплуатационной документациями на протяжении срока службы изделия.

ESM – это система цифрового управления изменениями в инженерных системах, их планирования, реализации и оценки в зависимости от влияния разных факторов.

Таким образом, PLM-системы представляют собой организацию процессов разработки, производства, послепродажного сервиса и эксплуатации изделий за счёт информационной поддержки процессов жизненного цикла на основе стандартизации методов представления информации на каждой стадии жизненного цикла и безбумажного электронного обмена данными.

Сегодня недостаточно только средств моделирования для разработки изделий, поэтому концепция PLM выходит за рамки CAD, CAM,

CAE, PDM. 70 % всех затрат на продукт приходится на цикл проектирования (PLM), а остальное – на оперативное управление и логистику (ERP). Применение ERP платформ начинается там, где технологическая информация не важна: управление ресурсами, финансовыми потоками, запасами и т. п. PLM и ERP дополняют друг друга. PLM отвечает за разработку продукта. ERP отвечает за послепродажное обслуживание, информация для которого поступает из PLM платформы. Важную роль при этом играет обмен последней информацией между платформами.

Применение PLM активно развивается в создании сложной наукоемкой продукции, которую проектируют и производят интегрированные промышленные структуры: НИИ, НПО, КБ, предприятия технического обслуживания, ремонта, утилизации и др. Развитие концепции PLM обусловило появление «виртуального предприятия» — нового подхода к выполнению сложных проектов, который объединяет на контрактной основе участников жизненного цикла изделия, действующих в едином информационном поле. Благодаря такому подходу становится возможным реализовать совместные проекты по разработке, производству, сбыту и сервисному обслуживанию наукоемких товаров.

1.4 Цели и задачи CALS/PLM-систем

Цели внедрения PLM-систем на предприятиях:

- увеличение выручки;
- сокращение затрат, связанных с производством и реализацией ассортимента продукции.

Выделяют шесть главных задач PLM-систем при разработке продукта:

1. **Управление данными о продукте.** Эти данные используют для решения задач производства, материально-технического снабжения, сбыта, эксплуатации и ремонта.

2. **Управление основными средствами производства.** Обеспечивает достижение высокого уровня контроля и точности работы оборудования для бесперебойного цикла производства.

3. **Управление программами и проектами.** Предоставляет информацию о взаимосвязанных работах для эффективного управления проектами: бюджет проектируемого изделия, планирование необходимых производственных мощностей, установка логистических и коммуникационных связей.

4. **Сотрудничество на протяжении жизненного цикла продукта.** Повышает эффективность разработки изделия, сокращает его себесто-

имость и срок вывода на рынок за счёт непрерывной обратной связи между интегрированными процессами проектирования, производства, сбыта и обслуживания.

5. Управление качеством. PLM-системы позволяют эффективно решать задачи контроля качества на всех этапах жизненного цикла изделия:

- маркетинг;
- проектирование;
- разработка технических условий;
- материально-техническое снабжение;
- закупка;
- разработка производственных процессов;
- производство;
- испытания;
- сертификация;
- монтаж;
- эксплуатация;
- техобслуживание;
- утилизация.

6. Охрана окружающей среды и труда. Позволяет снизить затраты и минимизировать производственные риски с учётом требований законодательства в области охраны окружающей среды и труда за счёт сокращения времени на заполнение бланков и предписаний по технике безопасности.

1.5 Внедрение CAIS/PLM-систем

Основные отрасли внедрения PLM-систем:

- аэрокосмическая и оборонная промышленность;
- автомобилестроение и транспорт;
- потребительские товары и розничная торговля;
- электроника и полупроводниковая техника;
- энергетика;
- тяжелое машиностроение и промышленное оборудование;
- судостроение;
- медицина и фармацевтика;
- строительство и городская инфраструктура;
- научные исследования;
- нефтегазовая промышленность.

Список изделий, для которых используется PLM, обширный и включает в себя сельскохозяйственную технику, авиакосмическую технику, автомобили, химикаты, компьютеры, бытовую электронику и технику, электрооборудование, лифты, эскалаторы, продукты питания, мебель, медицинское и промышленное оборудование, лекарства, корабли, одежду и обувь, программное обеспечение, телекоммуникационное оборудование, поезда, турбины, часы и прочее.

1.6 Преимущества и недостатки CALS/PLM-технологий

Основные преимущества применения концепции PLM:

- сокращение времени вывода изделия на рынок;
- сокращение материальных издержек;
- повышение качества изделия;
- быстрый обмен электронными данными и документами;
- параллельное выполнение сложных проектов несколькими рабочими группами;
- уменьшение количества ошибок при разработке изделия;
- сокращение производственного брака;
- полная достоверность производственного учёта;
- обеспечение высокого уровня качества изделий;
- в рамках PLM возможна разработка «цифрового двойника», который объединяет геометрию механических, электронных и программных компонентов с физикой процессов, моделирующих поведение физического объекта с высокой степенью достоверности. С помощью цифрового двойника можно выполнять сложные инженерные расчёты и поиск оптимальной конструкции. Раньше выполнение подобных задач требовало большого количества промежуточных действий, что сильно усложняло процесс поиска оптимального инженерного и научного решения. Сегодня с использованием PLM и цифровых двойников поиск решения происходит в единой среде, в короткие сроки и с заданным результатом.

Основные недостатки применения концепции PLM.

Дополнительные затраты. Внедрение такого комплекса может потребовать отказа от уже существующих на предприятии систем (что приведет к дополнительным затратам), а заказчик окажется более тесно связанным с единственным поставщиком выбранного решения.

Проблема целостности данных. Поскольку речь идет об управлении информацией на протяжении всего жизненного цикла, то возникает необходимость интеграции – как минимум систем конструкторской, техноло-

гической подготовки производства и системы управления предприятием. Для решения этой задачи необходимо внедрить в рамках всего предприятия единую систему классификации изделий, единые справочники (материалов, комплектующих и т. п.) и обеспечить поддержку работы в распределенном режиме. Как показывает практика, в настоящее время эта задача не решена на подавляющем большинстве отечественных предприятий. Более того, даже между конструкторской и технологической подсистемами почти всегда существует разрыв в потоке данных (не считая подготовки программ для станков с ЧПУ). Следовательно, одним из первых шагов для реального внедрения PLM-систем должна стать организация единых справочников в рамках предприятия.

Прослеживаемость данных. Немаловажной проблемой прослеживаемости данных об изделии на протяжении всего его жизненного цикла является то, что в различных системах (конструкторских, технологических, производственных) используются разные наборы данных. Сегодня в предлагаемых разработчиками системах, как правило, практически не реализована сквозная прослеживаемость существования конкретного экземпляра изделия на всех стадиях его разработки, производства и сопровождения (за исключением единичного и мелкосерийного производства преимущественно оборонного назначения и особо ответственных изделий гражданской продукции). Для изделий серийного и массового производства в лучшем случае речь идет о прослеживаемости партии изделий.

Открытость. Поскольку отечественные предприятия и проектные организации всё активнее участвуют в глобальных проектах, они уделяют особое внимание кооперации с поставщиками и заказчиками. При этом использование современных коммуникационных технологий имеет для предприятий как положительный, так и отрицательный эффект. С одной стороны, использование возможностей интернета очень привлекательно для создания каталогов продукции и интернет магазинов, с другой – возникает необходимость в надежной защите конфиденциальной информации от проникновения извне.

Организационные проблемы. Внедрение систем в масштабах предприятия всегда затрагивает интересы различных групп сотрудников, интеграция же в рамках единой системы конструкторских, технологических и управленческих данных неизбежно приводит к конфликтам интересов. Как показывает практика, прежде всего конфликты вызывают распределение прав доступа к информации между службами (проблема «кто главный») и перевод данных, ранее являвшихся достоянием отдельных сотрудников, на корпоративный уровень (проблема «неза-

менимых людей»). Кроме того, при внедрении систем подобного уровня предприятия сталкиваются с необходимостью выработки собственных стандартов, методик и инструкций. Здесь, в отличие от внедрения, скажем, САПР, копирование чужого опыта по ряду причин практически невозможно из-за различий в специфике работы, бизнес-процессов, инфраструктуры, а коллеги, уже прошедшие этот путь, не стремятся делиться информацией. К тому же внедрение новой системы очень часто вызывает сопротивление сотрудников, работающих с уже существующими системами.

Без решения указанных проблем внедрение сложной информационной системы практически неосуществимо, не говоря уже о том, что попытки соединения всех функциональных возможностей в рамках одной системы приводят к созданию своего рода информационного монстра, неудобного для решения профессиональных задач специализированными группами пользователей.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие термины и определения, связанные CALS/PLM-системами, Вы знаете?
2. Какие наиболее важные этапы развития CALS/PLM-систем Вы можете привести?
3. Опишите структуру типичной CALS/PLM-системы.
4. Каковы основные цели и задачи внедрения CALS/PLM-систем?
5. Какие преимущества и недостатки CALS/PLM-технологий Вы можете назвать?

2 САЕ-СИСТЕМЫ

По устоявшейся терминологии наукоемкие программные системы относят к САЕ-технологиям (САЕ, Computer Aided Engineering), составляющим естественно-научное ядро триады CAD-САЕ-CAM-технологий в системе CALS/PLM-технологий.

САЕ-системы можно условно разделить на 2 группы:

1. Системы полнофункционального инженерного анализа, обладающие мощными средствами, большими библиотеками конечных элементов, а также многоцелевой направленностью решаемых инженерных задач. В них предусмотрены собственные средства моделирования геометрии. Кроме того, есть возможность импорта через промышленные стандарты Parasolid, ACIS и пр. Полнофункциональные САЕ-системы лишены ассоциативной связи с CAD. Поэтому, если в процессе подсчета появляется необходимость изменить геометрию, то пользователю придется заново производить импорт геометрии и вводить данные для расчета. Самой известной подобной системой является ANSYS американской компании ANSYS.INC. Для создания геометрической модели в ANSYS используется ядро Parasolid, интегрированное во многие другие коммерческие программные продукты.

2. Системы инженерного анализа, объединенные единым интерфейсом с CAD-системами в интегрированную систему проектирования. Они имеют менее мощные средства анализа, но зато поддерживают ассоциативность с геометрией, поэтому отслеживают изменения модели. Кроме того, такие системы включают функционал для формирования конструкторской документации – чертежей, спецификаций и пр. К ним относятся CAD/CAM/САЕ-система NX компании Siemens PLM Software, Creo Elements/Pro (ProEngineer) компании PTC, CATIA и SolidWorks компании Dassault Systèmes и др.

2.1 Возможности САЕ-систем

Преимущество САЕ-систем состоит в том, что они позволяют:

- уменьшить стоимость разработки за счет проведения испытания модели на компьютере вместо дорогостоящих эксплуатационных испытаний;
- сократить время, необходимое для представления продуктов на рынок, путем уменьшения количества циклов разработки изделия;
- улучшить изделия посредством быстрой проверки сразу большого количества концепций и сценариев перед принятием окончательного

решения, тем самым предоставляя дополнительное время на обдумывание новых конструкций.

С помощью CAE можно проводить:

- прочностной анализ компонентов и узлов на основе метода конечных элементов;
- частотные исследования;
- термический и гидродинамический анализ;
- кинематические исследования;
- моделирование таких процессов, как литье под давлением;
- оптимизацию продуктов или процессов и др.

Наибольшей популярностью CAE пользуются в следующих отраслях производства:

- машиностроение и станкостроение;
- оборонная и аэрокосмическая промышленность;
- энергетика, судостроение;
- производство полупроводников;
- телекоммуникации;
- химическая, фармацевтическая и медицинская промышленность;
- строительство;
- производство систем отопления, кондиционирования, вентиляции;
- автомобильная промышленность.

2.2 Лидеры рынка CAE-систем

ANSYS (биржевой индекс ANSS) основана в 1970 году. На компанию работает почти 3 000 профессионалов, штаб-квартира располагается в городе Canonsburg (Пенсильвания, США). Компания ANSYS давно является единственным лидером рынка CAE. Ведущую позицию она заняла еще в 2006 году. И с каждым годом ANSYS, динамично развиваясь, улучшает свои показатели.

Dassault Systemes (биржевой индекс DASTY), с 2009 года возглавляющая рейтинг «королей» PLM, на рынке CAE занимает 2-ую позицию. Работы в области CAE-технологий ведутся под брендом SIMULIA, который появился после приобретения в 2005 году компании ABAQUS. Инструменты для инженерного анализа содержатся также в пакетах CATIA и SOLIDWORKS. Таким образом, у этой французской компании, помимо штаб-квартиры в Voelizy-Villacoublay, есть еще два географических центра, влияющих на развитие CAE-технологий: у подразделения SIMULIA штаб-квартира находится в городе

Providence (шт. Род-Айленд, США), а у SOLIDWORKS – в городе Waltham (шт. Массачусетс, США).

Siemens PLM Software удерживает 3-е место на рынке PLM. Штаб-квартира компании, являющейся подразделением европейского концерна Siemens, располагается в городе Plano (штат Техас, США). Линейка продуктов CAE, выпускаемых Siemens PLM Software, включает NX CAE – набор средств инженерного анализа с основными расчетными модулями NX Nastran, NX Thermal и NX Flow.

Таблица 1 – Программные продукты лидеров рынка CAE-систем

Компания	Специализация			
	CAD	CAM	CAE	PDM/PLM
ANSYS	SpaceClaim		ANSYS Mechanical, ANSYS CFD	
Dassault Systems	SolidWorks, CATIA	CATIA	SIMULIA (ABAQUS, fe-safe, Isight, TOSCA) SolidWorks Simulation	Enovia (Smarteam), SolidWorks Enterprise PDM
Siemens PLM Software	NX, Solid Edge	NX-CAM	NX-CAE	Teamcenter
PTC	CREO (Pro/Engineer)	CREO	CREO (Pro/Mechanica)	Windchill
Autodesk	AutoCAD, Inventor	Inventor		PLM 360

2.3 Основные направления развития CAE-систем

В процессе развития CAE разработчики стремятся увеличить их возможности и расширить сферы внедрения. Основными направлениями развития CAE являются:

- совершенствование методов решения междисциплинарных задач моделирования;
- разработка новых платформ для интеграции различных систем CAE, а также для интеграции CAE-систем в PLM-решения;
- повышение функциональной совместимости CAE- и CAD-систем;
- совершенствование методов построения расчетных сеток, описания граничных условий, параллельных вычислений и т. д.;

– улучшение характеристик моделей, которые применяются для описания свойств материалов;

– оптимизация систем CAE для компьютерных платформ с 64-битными и многоядерными процессорами, и тем самым улучшение условий для моделирования сложных конструкций с большим количеством степеней свободы.

Вопросы для самоконтроля

1. В каких отраслях производства наиболее эффективно используются CAE-системы?
2. Перечислите лидеров рынка CAE-систем.
3. Назовите основные направления развития, которые используются CAE-системами?
4. Какие преимущества обеспечивает применение CAE-систем?

3 РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В CAE-СИСТЕМАХ

Обычно исходная задача инженерного анализа формулируется в дифференциальных уравнениях с частными производными совместно с начальными и граничными условиями. По используемому математическому аппарату методы решения задач в частных производных делят на две группы: *аналитические* и *численные*.

3.1 Аналитические методы

Получение решения построением в явном виде функциональных аналитических зависимостей позволяет оценивать влияние на объект исследования различных факторов, однако это возможно лишь для узкого класса объектов исследований при простейших зависимостях в краевых условиях.

Краткий обзор аналитических методов представлен структурной схемой на рисунке 2.

При помощи различных подстановок в аналитических методах используются приёмы сведения исходной задачи к более простым, например: решение уравнения в частных производных – к решению обыкновенных дифференциальных уравнений, решение обыкновенных дифференциальных уравнений – к решению алгебраических и т. д.

Использование каждого из рассматриваемых на рисунке 2 методов ограничивается видом области и краевых условий и используемой системой координат. Так, например, метод разделения переменных (метод Фурье) можно использовать для классических задач при однородных граничных условиях; метод функций Грина снимает указанные ограничения, но построение этих функций требует определенной изобретательности, и в некоторых случаях трудновыполнимо; метод конформных отображений используется для любой формы области, однако лишь для стационарных задач; в методах интегральных преобразований требуется большая трудоёмкость при обратном переходе от изображений к оригиналам.

Все указанные выше аналитические методы в той или иной мере используются на практике для получения предельных оценок и предварительной проработки конструктивных решений.

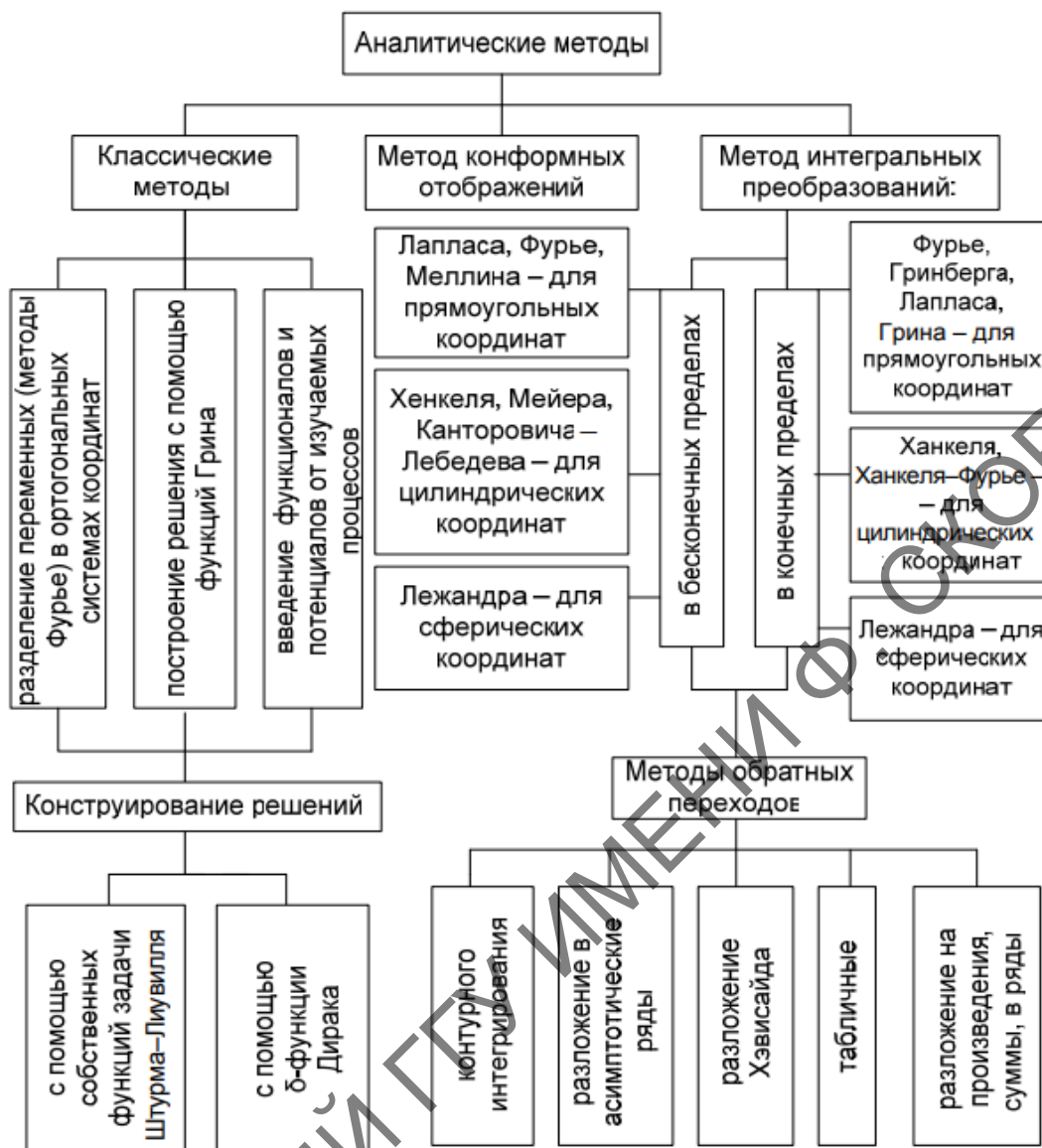


Рисунок 2 – Общая схема аналитических методов

Отметим, что методы решения прямых нелинейных задач разработаны слабо. Наиболее распространенным приёмом является линеаризация, т. е. сведение, где это возможно, нелинейной задачи к линейной, например, с помощью интегральных преобразований или путём разложения нелинейных зависимостей в ряд Тейлора в окрестности среднеинтегрального значения с сохранением только линейной или какой-либо другой части разложения.

Наибольшие трудности возникают при решении нелинейных нестационарных задач в трёхмерной постановке для тел произвольной формы с переменными характеристиками во времени. Подчеркнем, что аналитическая теория решения этих задач до сих пор не разработана в достаточной степени.

3.2 Численные методы

Для более точных и сложных моделей аналитические решения удаётся получить сравнительно редко. Многие важные технические задачи не могут быть решены аналитически вследствие сложности геометрии конструкции и граничных условий. Для решения задач со сложной геометрией основным инструментом в настоящее время являются численные методы.

Численные методы – методы приближённого решения математических задач, сводящиеся к выполнению конечного числа арифметических действий над числами, выполняемых обычно приближенно. Они дают результат в виде числового значения с погрешностью, приемлемой для данной задачи. Отличие от аналитических методов:

- численные методы позволяют получить только приближенное решение задачи;

- численные методы позволяют получить решение задачи с конкретными значениями параметров и исходных данных (т. е. вместо общей формулы аналитического решения получаются конкретные значения искомых величин для определенного набора исходных данных).

Для анализа зависимости решения от параметров и начальных условий необходимо провести целую серию расчетов. В численных методах решения дифференциальных уравнений в частных производных (в отличие от аналитических) в качестве неизвестных используются значения зависимой переменной (температуры, перемещения, напряжения) в некотором конечном числе точек исходной области (в узлах расчетной сетки). Производится дискретизация дифференциальных уравнений. В результате специальных преобразований система уравнений в частных производных заменяется системой линейных алгебраических уравнений для неизвестных значений в узлах сетки.

Схематический обзор наиболее развитых численных методов, находящихся применение в практике инженерных расчетов, представлен на рисунке 3.

Метод конечных разностей (МКР) основан на замене производных в дифференциальных уравнениях и граничных условиях приближенными значениями, выраженными через разности значений функций в конечном множестве отдельных дискретных точек (узлах) исследуемой области, например, с помощью простейших соотношений линейной аппроксимации между соседними узлами и моментами времени. В общем случае для конечно-разностной аппроксимации используются и старшие члены ряда Тейлора при разложении искомых величин в узлах се-

точной области или вводится необходимое число вещественных параметров (весов). Следует отметить, что более простые и наглядные явные схемы требуют определенных соотношений между величинами шагов по времени и пространству для обеспечения сходимости и устойчивости решения, а более сложные неявные схемы являются абсолютно устойчивыми.

Несмотря на относительную простоту, универсальность и возможность получения априорных оценок точности, практическое использование МКР для задач с разрывными граничными условиями и сложными границами области затруднено.

Метод Монте-Карло – численный метод решения различных задач при помощи моделирования случайных событий, основанный на получении большого числа реализаций случайных величин, которые формируются таким образом, чтобы их вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи. Основная идея метода состоит в использовании выборки случайных чисел для получения искомых оценок. Вместо того чтобы описывать процесс с помощью аналитического аппарата (дифференциальных или алгебраических уравнений), производится «розыгрыш» случайного явления с помощью специально организованной процедуры, дающей случайный результат. В сущности, методом Монте-Карло может быть решена любая вероятностная задача, но оправданным он становится только тогда, когда процедура «розыгрыша» проще, а не сложнее аналитических расчетов.

Методы аппроксимирующих функций позволяют искать приближенное решение краевой задачи в аналитической форме, например:

$$x \approx x_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i.$$

Аппроксимирующая система координатных функций x_i строится из условия точного удовлетворения либо граничным условиям, либо дифференциальному уравнению, а входящие неизвестные параметры A_i определяются распространенными методами коллокаций (совпадения), среднеквадратического приближения, методом Галеркина.

Вариационные методы требуют замены дифференциальной краевой задачи некоторой вариационной, причем для построения функционала разработаны специальные методы (энергетический, наименьших квадратов и др.). Это дает возможность, так же, как и в методе аппроксимирующих функций, искать приближенные решения в аналитической форме, применяя широко известные прямые методы, как метод Релея–Ритца, метод взвешенных невязок, метод Галеркина.

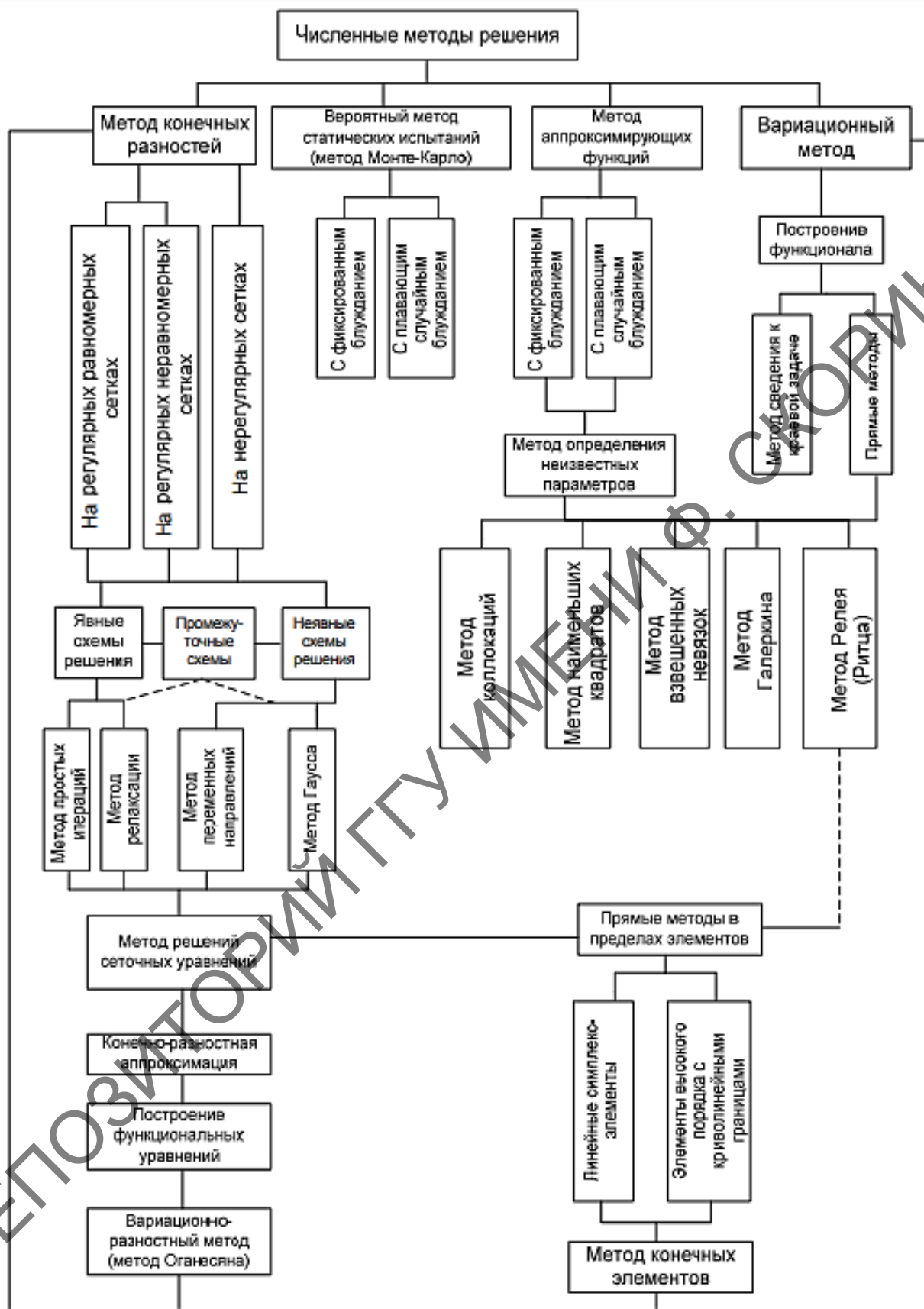


Рисунок 3 – Общая схема численных методов

При применении двух последних методов в случае сложных граничных условий возникают значительные математические трудности, связанные с выбором системы координатных функций.

3.3 Метод конечных элементов

В САЕ-системах центральное место занимают программы моделирования, использующие метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов разработан в 1950-е годы специалистами, работающими в областях строительной механики и теории упругости.

В 1960-е годы был предложен сравнительно простой способ применения МКЭ для анализа прочности путем минимизации потенциальной энергии, что позволило широко использовать МКЭ при решении задач в других областях техники. В это же время были разработаны первые программные комплексы, в которых реализован метод конечных элементов. Появлению этих универсальных программных систем в силу особенностей метода конечных элементов предшествовало создание высокопроизводительных электронно-вычислительных машин.

В 1970-е годы метод конечных элементов из численной процедуры решения задач строительной механики превратился в общий метод численного решения дифференциальных уравнений. В 1980-е годы разрабатываются графические пре- и постпроцессоры, решатели для нелинейных задач.

В 1990-е годы инструментальные средства МКЭ интегрируются в программное обеспечение систем автоматизированного проектирования.

МКЭ объединяет конечно-разностный и вариационный методы в единый вариационно-разностный метод, основанный на аппроксимации непрерывной функции (например, перемещений, напряжений, температур и т. д.), дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций (конечных элементов).

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как температура, напряжение или перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области.

При построении дискретной модели непрерывной величины при реализации МКЭ поступают следующим образом:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками, или просто узлами.

2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.

3. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента (этот полином называют функцией элемента).

Следует отметить, что существует расхождение в понимании сути метода между математиками и практиками. Если первые придают основное значение именно замене функций одного класса суммой функций другого, то вторые акцентируют внимание прежде всего на разбиении области на подобласти, определяющие базисные функции. Эти подходы не отрицают друг друга, однако результатом этого стало совпадение названий подобластей и базисных функций, ассоциированных с ними, – оба объекта называются конечными элементами.

При этом процесс конечно-элементного анализа включает в себя определенное количество последовательных шагов, базирующихся на двух подходах: математическом и физическом (рисунок 4), которые не являются взаимоисключающими, а дополняют друг друга.

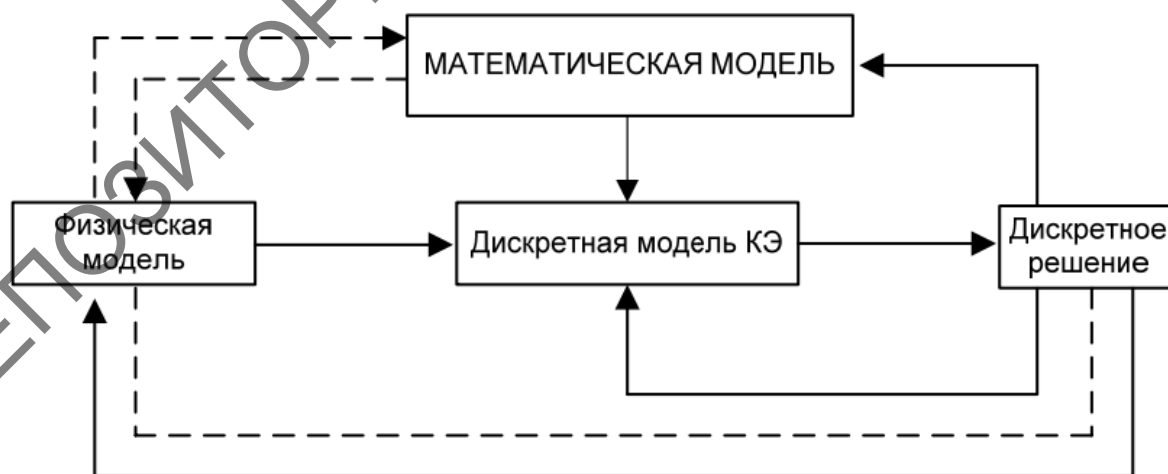


Рисунок 4 – Схема конечно-элементного анализа

Значения функций в узлах элементов на ранней стадии развития МКЭ определялись с помощью минимизации функционала, связанного с рассматриваемым дифференциальным уравнением. В дальнейшем более общие теоретические обоснования позволили исключить необходимость вариационной формулировки физических задач и для вывода систем уравнений, определяющих узловые значения, использовать методы взвешенных невязок.

Общая схема алгоритма расчета по МКЭ.

Последовательность процедур алгоритма МКЭ может быть представлена в следующем виде.

1. Дискретизация рассматриваемой области.

Дискретизация области определения задачи представляет собой замену континуальной среды совокупностью конечных элементов заданной формы, соединенных между собой в узлах. Этот этап, несмотря на видимую простоту, имеет важное значение, хотя он и не обусловлен строгими теоретическими рекомендациями и во многом определяется интуитивно. Обычно при построении конечно-элементной модели руководствуются предварительными представлениями о характере ожидаемого результата и в местах высоких градиентов искомых величин сетку конечных элементов сгущают.

2. Выбор вариационного принципа.

Выбор вариационного принципа определяет основные неизвестные функции, через которые впоследствии устанавливаются остальные неизвестные. Например, в задачах механики деформируемого твёрдого тела используются следующие вариационные принципы: принцип Лагранжа, в соответствии с которым варьируются перемещения; принцип Кастильяно, в соответствии с которым варьируются напряжения.

3. Выбор аппроксимирующих функций. При кусочно-непрерывной аппроксимации предполагается, что перемещения внутри элемента могут быть выражены через перемещения в его узлах. Эта связь описывается при помощи так называемых функций формы, которые аппроксимируют действительное поле перемещений внутри элемента. От выбора аппроксимирующих функций в значительной степени зависит точность решения. Эти функции должны удовлетворять следующим критериям:

- критерию полноты: при стремлении размеров элемента к нулю выбранные функции формы должны обеспечить любые простые значения;
- критерию совместимости: функции формы должны обеспечивать непрерывность перемещений и её производных на границе между элементами.

При выполнении этих критериев с увеличением числа конечных элементов, моделирующих конструкцию, результаты расчёта монотонно сходятся к точному решению.

4. Реализация вариационного принципа.

На этом этапе осуществляется вычисление матриц жёсткостей элементов и построение глобальной матрицы системы алгебраических уравнений и вектора узловых сил. Глобальная матрица жёсткости может быть получена несколькими методами:

- методом непосредственного сложения жёсткостей;
- при помощи конечно-разностных операторов.

5. Учет граничных условий.

Полученная на основе указанных методов матрица жёсткости является вырожденной. Корректировка этой матрицы при учёте граничных условий приводит к невырожденной системе линейных алгебраических уравнений.

6. Решение системы алгебраических уравнений.

Наиболее важными преимуществами МКЭ являются:

- возможность учёта зависимости свойств материалов от температуры при численном моделировании;
- простота рассмотрения задачи при использовании смешанных граничных условий;
- применимость метода для тел, изготовленных из нескольких материалов;
- возможность использования МКЭ при решении задач о телах произвольной геометрической формы.

К основным источникам погрешности решения задач методом конечных элементов относятся:

- погрешность дискретизации;
- погрешность округления;
- погрешность математической модели.

Источником погрешности являются также исходные данные, получаемые, как правило, в результате экспериментов; при этом в целом точность полученных результатов не превосходит точности исходных данных.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие трудности возникают при использовании аналитических методов?
2. Какие аналитические методы Вы знаете?
3. Для чего используются на практике аналитические методы?
4. Перечислите отличия численных и аналитических методов.
5. Приведите последовательность процедур алгоритма МКЭ.
6. Назовите основные источники погрешности МКЭ.
7. Перечислите основные преимущества МКЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

2. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 312 с.

3. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства: учебное пособие / С. В. Лукинских. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 168 с.

4. Компьютерный инжиниринг : учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.

5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : краткий доклад (сентябрь 2019 года) / А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 62 с.

6. Современное инженерное образование : учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.

7. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / науч. ред. К. В. Дорофеев, рук. гр. В. Н. Княгинин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 110 с.

8. Ширяев, Н. CALS, PDM, PLM, далее – везде... / Н. Ширяев // САПР и графика. – 2002. – №. 12. – С.117–119.

9. Паничев, В. В. Компьютерное моделирование : учеб. пособие / В. В. Паничев, Н. А. Соловьев. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2008. – 130 с.

10. Технологии управления жизненным циклом изделия (PLM-системы), Государственное бюджетное учреждение города Москвы «Агентство промышленного развития города Москвы» (ГБУ «АПР»), 2020. – 106 с.

11. Пестрецов, С. И. CALS-технологии в машиностроении: основы работы в CAD/CAE-системах : учеб. пособие / С. И. Пестрецов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 104 с.

12. Чижов, М. И. Управление системами и процессами: курс лекций: учеб. пособие / М. И. Чижов, А. В. Бредихин. – Воронеж : ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. – 121 с.

13. Иванов, С. Е. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства / учеб.-метод. пособие : часть 5. Системы инженерного расчета и анализа деталей и сборочных единиц / С. Е. Иванов ; под ред. Д. Д. Куликова – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. – 48 с.

14. Яблочников, Е. И. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия : учеб. пособие / Е. И. Яблочников, Ю. Н. Фомина, А. А. Саломатина. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 188 с.

15. Каменев, С. В. Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях : учеб. пособие / С. В. Каменев. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 110 с.

16. Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем) / Е. Н. Чумаченко [и др.]. – М. : Учреждение Российской академии наук, Ин-т космических исследований РАН, 2009. – 42 с.

17. Раменская, А. В. Метод Монте-Карло и инструментальные средства его реализации: методические указания / А. В. Раменская, К. В. Пивоварова. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 58 с.

18. Ширвель, П. И. Основы метода конечных элементов в мехатронике : учеб.-метод. пособие : в 2 ч. / П. И. Ширвель. – Минск : БНТУ, 2015. – Ч. 1. – 2015. – 89 с.

19. Маслов, Л. Б. Практикум по курсу вычислительной механики на базе современных программных средств численного анализа (ANSYS) : учеб.-метод. пособие / Л. Б. Маслов, Н. А. Сабанеев. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2009. – 76 с.

20. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практ. рук. / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шамраева. – URSS. 2021. – 272 с.

21. Бурков, П. В. Компьютерное моделирование технологий в нефтегазовом деле : учеб. пособие / П. В. Бурков, С. П. Буркова. – Томск : Изд-во Томского политехнич. ун-та, 2012. – 143 с.

22. Иванов, Д. В. Введение в метод конечных элементов : учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин / Д. В. Иванов, А. В. Доль. – Саратов : Амирит, 2016. – 84 с.

23. Наседкин, А. В. Теория и технология метода конечных элементов : курс лекций / А. В. Наседкин. – Ростов-на-Дону : ФГАОУВПО «Южный федеральный университет», 2011. – 203 с.

24. Logan, D. L. A first course in the finite element method / D. L. Logan. – Cengage Learning, 2016. – 954 p.

Производственно-практическое издание

**Никитюк Юрий Валерьевич,
Середа Андрей Александрович,
Самофалов Андрей Леонидович**

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
CALS/PLM, CAE-СИСТЕМЫ**

Практическое руководство

Редактор А. А. Банчук
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 20.10.2023. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,03.
Тираж 15 экз. Заказ 545.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ