БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ВЕБ-ПРОГРАММИРОВАНИЕ И ИНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГИИ (WebConf2024)

Материалы
6-й Международной научно-практической конференции

Минск, 15–16 мая 2024 г.

Научное электронное издание

МИНСК, БГУ, 2024

ISBN 978-985-881-593-6

© БГУ, 2024

УДК 004.42:004.738.5(06)
ББК 32.973.202-018.2я431

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:
кандидат физико-математических наук, доцент *И. М. Галкин* (гл. ред.);
доктор физико-математических наук, доцент *В. М. Волков*;
кандидат физико-математических наук, доцент *В. С. Романчик*;
кандидат физико-математических наук, доцент *Г. А. Расолько*

Р е ц е н з е н т ы:
кандидат физико-математических наук, доцент *П. В. Гляков*;
кандидат физико-математических наук, доцент *В. И. Репников*

Веб-программирование и интернет-технологии (WebConf2024) [Электронный ресурс] : материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 15–16 мая 2024 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: И. М. Галкин (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-985-881-593-6.

Рассмотрены вопросы применения веб-технологий в образовании, экономике, в сферах вычислений и компьютерного моделирования, защиты информации. Проанализированы проблемы, связанные с особенностями разработки веб-приложений.

Минимальные системные требования:
PC, Pentium 4 или выше; RAM 1 Гб; Windows XP/7/10;
Adobe Acrobat

Оригинал-макет подготовлен в программе Microsoft Word

На русском, белорусском и английском языках

В авторской редакции

Ответственный за выпуск *И. М. Галкин*
Компьютерная верстка *Ю. А. Кременя, Г. А. Расолько*

Подписано к использованию 15.05.2024. Объем 1,68 МБ

Белорусский государственный университет.
Управление редакционно-издательской работы.
Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.
Телефон: (017) 259-70-70.
e-mail: urir@bsu.by
http://elib.bsu.by

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ 10

Игнатенко М. В., Волков В. М., Романчик В. С., Расолько Г. А., Кремень Ю. А. КАФЕДРА ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА БГУ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ 11

Абламейко М. С., Абламейко С. В. КЛАССИФИКАЦИЯ РИСКОВ В СИСТЕМАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 17

Медведев С. В. ПРОГНОЗНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ 20

Ольховик Е. В., Круглик К. С., Вылегжанин Д. В., Яблонский О. Л. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ГЕНЕРАЦИИ ОТВЕТОВ В СИСТЕМАХ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ЗА СЧЕТ ИНТЕГРАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНО НАЙДЕННОЙ РЕЛЕВАНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ 23

Романчик В. С., Перез А. Х. Чернов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РАЗРАБОТКЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ 26

Сарна А. Я. РАЗВИТИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: ГЛОБАЛЬНЫЕ ТРЕНДЫ И НОВЫЕ ВЫЗОВЫ 30

Тузиков А. В., Андрианов А. М. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКА КАНДИДАТОВ В ЛЕКАРСТВА ПРОТИВ КОРОНАВИРУСА SARS-COV-2 35

СЕКЦИЯ 1. ВЕБ-ТЕХНОЛОГИИ 39

Захаренко А. Д. ШАБЛОН ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ SHARED MODELS 40

Королев И. А. АНАЛИЗ ФОТОГРАФИЙ НА ПРЕДМЕТ ПОСТОБРАБОТКИ КАК МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ КОНТЕНТА 42

Лукьянович И. Р., Грибовская Е. А. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ АДАПТИВНОЙ БАННЕРНОЙ РЕКЛАМЫ ДЛЯ ЯНДЕКС ДИРЕКТ И GOOGLE ADS 44

Лукьянович И. Р., Хоруженко Д. Д. АДАПТАЦИЯ ГРАФИЧЕСКОГО КОНТЕНТА ДЛЯ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ 49

Рудикова-Фронхёфер Л. В. О ПОДХОДАХ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ 54

Рудикова-Фронхёфер Л. В. , Постник Д. А. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ИСТОРИЧЕСКОЙ И ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ЦЕННОСТИ 60

Сидоренко А. В., Савченко М. К. РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ В ВИДЕ СМАРТ КОНТРАКТА В БЛОКЧЕЙНЕ 66

Сьянов Д. А. ЦИФРОВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ: ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕДАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ 68

СЕКЦИЯ 2. МОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ 72

Бортновская В. В. ОМНИКАНАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОБЩЕНИЯ БИЗНЕСА С КЛИЕНТАМИ 73

Володина У. А., Войтешенко И. С. О ПРОГРАММНОЙ ПОДДЕРЖКЕ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ МОБИЛЬНОЙ ИНТЕРАКТИВНОЙ РЕКЛАМЫ В ФОРМАТЕ ИГРЫ 75

Дерюшев А. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОТОВЫХ ТЕЛЕФОНОВ В МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА 79

Иванова М. Д., Давидовская М. И. ИНТЕГРАЦИЯ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОС ANDROID 82

Кондратьев Д. П., Бадак Б. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 86

Кохнович Р. О. РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРЕЙМВОРКА FLUTTER 89

Курочка К. С., Башаримов Ю. С. ИССЛЕДОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЦЫ 92

Лемачко Ф. Р., Дерюшев А. А. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОРТАТИВНЫМ КОФЕ-ПРИНТЕРОМ 97

Шуть В. Н., Швецова Е. В. ТЕХНОЛОГИИ СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЭЛЕКТРОКАРОВ 100

СЕКЦИЯ 3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ВЕБ-ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ 105

Абрашина-Жадаева Н. Г. КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОБРАЗОВАНИИ 106

Азаров Н. А., Голубева Л. Л. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ 109

Аленский Н. А. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРЕПОДАВАНИЯ АЛГОРИТМИЗАЦИИ И ПРОГРАММИРОВАНИЯ 114

Барвенов С. А. РЕВИЗИЯ СОДЕРЖАНИЯ КУРСА "ВЕБ-ПРОГРАММИРОВАНИЕ" НА ПЕРВОМ И ВТОРОМ КУРСАХ ММФ БГУ 117

Вельченко С. А., Медведев Д. Г. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ IT-СПЕЦИАЛИСТОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ УНИВЕРСИТЕТА 119

Галкин И. М. О ПРЕПОДАВАНИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ СТУДЕНТАМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ 123

Кравчук А. С., Кравчук А. И., Кремень Е. В. АДАПТАЦИЯ КУРСОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ НА ПРИМЕРЕ ЯЗЫКА C++ 125

Лысак В. В., Расолько Г. А. О РАЗРАБОТКАХ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА МИКРОБИОЛОГИЯ 128

Митрофанова Т. В., Христофорова А. В., Шалимова П. А. СОЗДАНИЕ UML-ДИАГРАММ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ: АНАЛИЗ ВЕБ-ИНСТРУМЕНТОВ 134

Позняк Ю. В., Игнатенко М. В. ПЛАНИРОВАНИЕ ОДНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ЗАНЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРАКТИК 139

Расолько Г. А., Кремень Е. В., Кремень Ю. А. ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КУРСА «УЧЕБНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПРАКТИКА» НА ПЕДАГОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ ММФ БГУ 141

Рафеенко Е. Д., Кондратьева О. М. РАЗВЕРТЫВАНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ В ОБЛАЧНОМ СЕРВИСЕ В РАМКАХ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ WEB-ПРОГРАММИРОВАНИЕ..... 146

Торган Н. А., Воронич Л. В. ПРИМЕНЕНИЕ ОНЛАЙН-РЕСУРСОВ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ В ПРЕПОДАВАНИИ ВЕБ-ТЕХНОЛОГИЙ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ..... 148

Филимонов Д. В. ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД ПРИ ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ АНАЛИЗУ СОРТИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ 152

Черепица Л. С. ПРОЕКТИРОВАНИЕ WEB-СТРАНИЦ СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА ГИПЕРТЕКСТОВОЙ РАЗМЕТКИ В ИНДУСТРИИ ТУРИЗМА 157

Шибут И. П., Сун Юйцин ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ КИТАЯ..... 161

Шкор О. Н. ГЕЙМИФИКАЦИЯ И ИНКЛЮЗИЯ В ОБРАЗОВАНИИ 165

Шушкевич Г. Ч., Шушкевич С. В. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В МНОГОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ С ПОМОЩЬЮ WOLFRAM MATHEMATICA 169

СЕКЦИЯ 4. ВЫЧИСЛЕНИЯ, АЛГОРИТМЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 174

Волков В. М., Кочаловская Е. И., Грицель В. Э. ИТЕРАЦИОННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА ЧЕБЫШЕВА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ..... 175

Volkov V. M. , JingHui Dong , Jiaman Zhu ITERATIVE CHEBESHEV PSEUDO-SPECTRAL SOLVER FOR 2D CONVECTION- DIFFUSION EQUATIONS..... 178

Volkov V. M. , Zhang Jing, Matsuka N. P. SPECTRAL CHEBESHEV COLLOCATION METHOD WITH ARTIFICAL VISCOSITY FOR SIMULATIONS OF DFB -LASER DYNAMICS..... 181

Игнатенко М. В. О КВАДРАТУРНЫХ ФОРМУЛАХ НАИВЫСШЕЙ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ СТЕПЕНИ ТОЧНОСТИ ДЛЯ МАТРИЧНОЗНАЧНЫХ ФУНКЦИЙ..... 183

Корзюк В. И., Рудько Я. В. О КЛАССИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ИЗ ТЕОРИИ ИЗГИБА БАЛОК ТИМОШЕНКО..... 190

Люлькин А. Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ СРЕДСТВАМИ ЛОГИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ 194

Малыхин Г. С. ПОСТРОЕНИЕ ИНДЕКСА ДАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ..... 197

Михасев Г. И., Ради Э. , Мисник В. В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОРАЗМЕРНОГО ПИНЦЕТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ И ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ СИЛ..... 201

Нагорный Ю. Е., Политаев Д. Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГРАФЕНА В РАМКАХ МОДЕЛИ ОБЩЕГО ГАРМОНИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НЕЗАВИСИМОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЖЁСТКОСТИ 206

Нифагин В. А., Дубровина О. В. КОЭФФИЦИЕНТНАЯ ОБРАТНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ 209

Pilipchuk L. A. , Ramanouski Y. V. SENSOR LOCATION PROBLEM FOR THE BIDIRECTIONAL GRAPH: OPTIMAL SOLUTIONS 213

Расолько Г. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКМ MATHEMATICA ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ ПО МНОГОЧЛЕНАМ ЧЕБЫШЕВА 219

Руденок А. Е., Василевич М. Н. ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНОГО ПОЛЯ ПО МОДУЛЮ ПРОСТОГО ЧИСЛА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ БАЗИСА ГРЁБНЕРА 225

Сытова С. Н. ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ 228

Таранчук В. Б. ПРИМЕРЫ ИНТЕГРАЦИИ СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ WOLFRAM MATHEMATICA И СИСТЕМЫ ГЕОБАЗАДАННЫХ .. 233

Чайковский М. В., Архипенко О. А. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТИПА ВОЛЬТЕРРА 238

Шолтанюк С. В. МЕТОДЫ СОВМЕЩЕНИЯ КАДРОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ СЦЕНЫ С ПОМОЩЬЮ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА 241

Якименко Т. С. НЕКОРРЕКТНОСТЬ И РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ В РАВНОМЕРНОЙ МЕТРИКЕ .. 247

СЕКЦИЯ 5. ВЕБ-ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ 249

Архипова Л. И., Медведева Л. Ф. ТРЕНДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БИЗНЕСА НА БАЗЕ ИНСТРУМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 250

Блинов И. Н. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЕБ-РАЗРАБОТКИ НА JAVA: КАК ИИ ПОМОГАЕТ СОЗДАВАТЬ ПРИЛОЖЕНИЯ БЫСТРЕЕ 254

Воробей В. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТОВ И МЕХАНИЗМА ВНИМАНИЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИЗНАКОВ В НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ 256

Aodi Ding , Shuaiyu Zhu MAS MULTI-VIEW ACTION MEGRE 3D 260

Дунец А. П. ПОИСК ПОХОЖИХ ДОКУМЕНТОВ НА ПОРТАЛЕ ЯДЕРНЫХ ЗНАНИЙ BELNET 263

Жемойтяк Н. П., Лаврова О. А. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ КЛЕТКАМИ 266

Жиляк Н. А. ПРИМЕНЕНИЕ CNN ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В АНАЛИЗЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ 271

Легушева П. А. WEB-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДОКУМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ИИ 274

Меркушев М. И. АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ 278

Тылецкий А. В. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ БЕЛОРУССКОЙ РЕЧИ 282

Чжиюань Ли , Абламейко С. В. УЛУЧШЕННАЯ МОДЕЛЬ YOLOV8 ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕЛКИХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ 285

СЕКЦИЯ 6. ОБЩЕСТВО, БИЗНЕС И ЭКОНОМИКА 290

Гринянец Р. Б., Венгеров В. Н., Молчан Ж. М., Котов В. И. СПОСОБЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЗНАНИЙ И НАВЫКОВ В ОБЛАСТИ ТРАНСФЕРА ТЕХНОЛОГИЙ 291

Дубров Б. М. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПУБЛИКАЦИИ В ФОРМАТЕ PDF С УСЛОВИЯМИ РАВНОЙ ДОСТУПНОСТИ 296

Колик А. В. КОММУНИКАЦИЯ БЕЛОРУССКИХ БРЕНДОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ 298

Медведева Л. Ф., Архипова Л. И. CUSTOMER DEVELOPMENT В СОЗДАНИИ ЦЕННОСТИ ДЛЯ КЛИЕНТА 301

Миско А. О., Яковицкая А. С., Шавалда З. Б., Драгун У. В. КОНТЕКСТНАЯ РЕКЛАМА КАК СПОСОБ ПРОДВИЖЕНИЯ ТОВАРОВ И УСЛУГ НА ЗАРУБЕЖНЫЕ РЫНКИ 305

Раловец А. А., Парамонов А. И. ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ ТОРГОВЛЕ НА КРИПТОВАЛЮТНОЙ БИРЖЕ 308

Юхнюк П. П. ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ЦИФРОВИЗАЦИИ И ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЗАЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЗЕМЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ 312

Язханова Х. Д., Абаев Ы. А. СОЗДАНИЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 315

СЕКЦИЯ 7. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ 319

Абрамович М. С., Гарматная Л. В. ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ СЕТЕВОГО ТРАФИКА 320

Зайкова С. А. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ УНИКАЛЬНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ МЕДЦЕНТРА 324

Мальцев М. В. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ 326

Палуха В. Ю., Прохорчик Н. А., Харин Ю. С. ОБ ИМИТАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ В КРИПТОГРАФИИ 331

Пищалова Е. Л. ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БИЗНЕСА: УГРОЗЫ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ 335

Савельева М. Г. МЕТОД СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБЛАСТИ РАСТРИРОВАННОГО ДОКУМЕНТА-КОНТЕЙНЕРА 337

Слащинин О. А. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ И КОММУНИКАЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КИБЕРПРЕСТУПНИКАМИ ДЛЯ КОНСПИРАЦИИ СВОЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ 341

Уласевич Н. И. СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ОТОБРАЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМАТЕ SVG 346

Харин Ю. С., Мальцев М. В., Палуха В. Ю. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГЕНЕРАТОРОВ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ 348

СЕКЦИЯ 8. ПРОЕКТЫ СТУДЕНТОВ И МАГИСТРАНТОВ 353

Богдан В. А. РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ АДАПТИВНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ БИБЛИОТЕКИ И ЕЁ ПОЛНОЦЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ ВЕРСИИ 354

Борисов С. Ю. РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ФИНАНСОВОЙ СТАТИСТИКИ 356

Буримский А. С. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ МЭТЧИНГА ДАТАСЕТОВ 358

Бучилко Т. А., Дмитриева Д. А., Криштопенко Р. А., Ланец Е. С., Цихун А. А., Саевец А. Н. Сверлов А. С. РАЗРАБОТКА БЕЛОРУССКОЙ ИНТЕРНЕТ-ПЛОЩАДКИ «ADING» ДЛЯ МАРКЕТОЛОГОВ: НЕОБХОДИМОСТЬ И ПРЕИМУЩЕСТВА... 360

Быстрова В. А. ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВИДЕОХОСТИНГА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ФЕДЕРАТИВНЫХ СЕТЯХ..... 365

Вельченко С. А., Лядинский Т. А. РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ АДАПТИВНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ БИЗНЕСА В СФЕРЕ ПОДБОРА КОМПЛЕКТУЮЩИХ 367

Веснов Д. А. ANDROID-ПРИЛОЖЕНИЕ СЕРВИСА АРЕНДЫ АВТОМОБИЛЕЙ 369

Глинский Н. А., Бадак Б. А. АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ 371

Глод А. А. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОТЧЕТНОСТИ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ В POWER BI 374

Гончаренко А. Д. АНАЛИЗ ПОДХОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЙ ИНТЕГРАЦИИ, ДОСТАВКИ, ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА И МОНИТОРИНГА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ 377

Гриц А. Ю. МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «КОДЕКСЫ РБ» 382

Досин А. И., Елопов Г. А., Кухарчук Е. О. СРЕДСТВА ВЕКТОРНОЙ ГРАФИКИ В ДИЗАЙНЕ ВЕБ-СТРАНИЦ 386

Зайцева А. Л., Гордейчук М. А. РАЗРАБОТКА ИГРЫ В UNREAL ENGINE 5..... 390

Ковалев П. О. АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАНИИ..... 394

Краснов М. А. УПРАВЛЕНИЕ IOT УСТРОЙСТВАМИ С ОТКРЫТЫМ API ЧЕРЕЗ WEB-ПРИЛОЖЕНИЕ 397

Кривицкая Е. Д. ANDROID- ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МЕБЕЛЬНОГО МАГАЗИНА ... 400

Маленков С. В., Бадак Б. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИКИ..... 402

Муха А. А. СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦИИ СНИМКОВ КТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ 405

Пташук К. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УЧЕТА И АНАЛИЗА ПОСЕЩЕНИЙ ЗАНЯТИЙ В УЧРЕЖДЕНИЯХ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ 407

Савеня И. А., Шушкевич Г. Ч. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ SCIPY 410

Скапцова К. В. ГОВОРЯЩАЯ ИГРУШКА НА ANDROID 413

Слизенко Н. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕГРАММ-БОТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОФОРМЛЕНИЯ БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ В СПИСКЕ ЛИТЕРАТУРЫ 415

Старовойтов Н. А. МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ «TASTE TROVE» 420

Талапина Д. М. МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ХАФА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ШТРИХОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯ 423

Цітоў Ц. А. ПРАЕКТ ЛАКАЛІЗАЦЫІ CMS JOOMLA! 5.X НА БЕЛАРУСКУЮ МОВУ 426

Четвериков В. Б. ГЕНЕРАЦИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ДАТАСЕТА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА С ИЗОБРАЖЕНИЯ 430

Филипенко В. Ю. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ТРАНЗАКЦИЙ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ПЕРЕВОЗКАМ 433

УДК 519.6;539.12.04

ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И ГЕНЕРАТОРОВ

С. Н. Сытова

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская 11, 220006, Минск, Беларусь, sytova@inp.bsu.by

Рассматриваются проблемы, возникающие при широком использовании в математическом моделировании различных физических процессов и явлений готовых пакетов прикладных программ. Данная тематика важна для студентов и аспирантов физического и математического профилей, которые в будущем планируют связать свою деятельность с математическим моделированием разнообразных физических явлений и приборов, а также для научных сотрудников, в задачу которых входит исследование методами математического моделирования различных физических закономерностей. Проблемы рассмотрены на примере моделирования различных электронных усилителей и генераторов, включая объемные лазеры на свободных электронах. Однако приведенные рассуждения справедливы и для других областей математического моделирования физических процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование; пакеты прикладных программ; электронные приборы; математические модели; системы дифференциальных уравнений.

История развития методов математического моделирования разнообразных физических явлений и устройств выявила следующие необходимые этапы проведения математического моделирования: построение на основе феноменологических физических моделей адекватных математических моделей рассматриваемых физических процессов, выбор среди существующих либо разработку собственных численных методов и алгоритмов для их решения, выбор либо разработку собственных компьютерных программ, реализующих данные алгоритмы, а также собственно сами полученные численные результаты и их анализ с возможным последующим уточнением как феноменологических, так и математических моделей, алгоритмов и программ [1, 2].

Начиная с середины двадцатого века и до сегодняшних дней наблюдается бурное развитие исследований в области нелинейных процессов генерации электромагнитного излучения, происходящих в различных типах электронных усилителей и генераторов. Их производительность и надежность в настоящее время обеспечивается использованием сложных электромагнитных структур на основе новых материалов и передовых технологий. Широкое применение таких приборов в разнообразных приложениях (в системах спутниковой связи, телерадиовещании, различных микроволновых устройствах нагрева для промышленного и бытового использования, в научных исследованиях, в том числе – в ускорителях частиц высоких энергий, нагреве плазмы для управляемого термоядерного синтеза, а также в медицинских системах и т. д.) требует надежной работы при высокой мощности и эффективности, а также низкой стоимости [3].

Назовем наиболее распространенные в настоящее время и использующие в своем функционировании достаточно близкие физические принципы электронные усилители и генераторы – лампы бегущей волны (ЛБВ), лампы обратной волны (ЛОВ), карсинотроны и карсинотроды, многоволновые черенковские генераторы (МВЧГ), лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), гиротроны и мазеры на свободных электронах (МСЭ), виркаторы, оротроны, различные варианты черенковских и смит-парселовских ЛСЭ [4–6], объемные лазеры на свободных электронах (ОЛСЭ) [7].

Основа их функционирования заключается в генерации электромагнитного излучения пучками заряженных частиц, в которых эти частицы сгруппированы в сгустки (банчи) и взаимодействуют в резонаторе (замедляющей системе) с замедленными электромагнитными волнами.

Системы уравнений для моделирования ЛОВ, ЛБВ, ЛСЭ и других электронных приборов могут быть найдены в [5, 6] и др. Для их решения используются численные методы [8] и в целом – методы математического моделирования [1, 2].

Для математического моделирования рассматриваемых электронных усилителей и генераторов создан целый ряд компьютерных программ [9], в том числе КАРАТ [10], OOPIC (англ. – Object Oriented PIC) [11], MAGIC [12], PARMELA [13], Genesis 1.3 [14]. Постоянно появляются новые. Следует упомянуть мощный коммерческий программный пакет CST (англ. – Computer Simulation Technology) [15], который позволяет проводить 3D-моделирование электромагнитного поля для проектирования, анализа и оптимизации разнообразных электромагнитных компонентов и систем.

Также в настоящее время в силу экспоненциального возрастания сложности и объема счета большое внимание уделяется проблемам распараллеливания, эффективного использования суперкомпьютеров и распределенных вычислений на массивах компьютеров.

Многие из указанных выше программных продуктов являются коммерческими и имеет высокую стоимость. Но даже если используются свободно распространяемые пакеты программ, в силу их сложности и недостаточной гибкости зачастую требуются значительные усилия по настройке входных параметров данных кодов для получения адекватных результатов моделирования требуемых конкретных установок. Часто исследователи, использующие такие сложные пакеты программ, пытаются обходиться вообще без формулирования систем уравнений, описывающих физические процессы, которые они моделируют, доверяясь разработчикам программ. Это может привести к получению нефизичных результатов [16].

Кроме того, не все ученые имеют доступ к суперкомпьютерным вычислениям, которые являются достаточно дорогими. Но и суперкомпьютер не выдаст численный результат мгновенно. Приведем примерную оценку необходимых затрат. При моделировании таких ускорительных систем как, например, ЛСЭ решение системы полных трехмерных уравнений Максвелла разностными методами на сетках и моделирование методом частиц пучка заряженных частиц, толкаемых в электромагнитном поле силой Лоренца, предполагает моделирование до 10^{10} частиц на примерно 500^3 ячейках разностной сетки за большое (как минимум несколько сотен) число шагов по времени. Для этого может потребоваться оперативная память порядка 0,5 ТБ, а время выполнения даже на хорошем суперкомпьютере может занять от нескольких часов до месяцев работы. При этом для хранения полученных численных данных может потребоваться до 1 ТБ памяти на жестком диске. Понятно, что для создания, например, многомиллионных ускорительных комплексов и установок, а также для проведения экспериментальных исследований на них такое моделирование должно быть выполнено, невзирая на материальные затраты. Также очевидно, что предварительно следует выполнить экспресс-расчеты по одномерным программам с целью сужения и уточнения параметров для последующего эффективного полномерного моделирования.

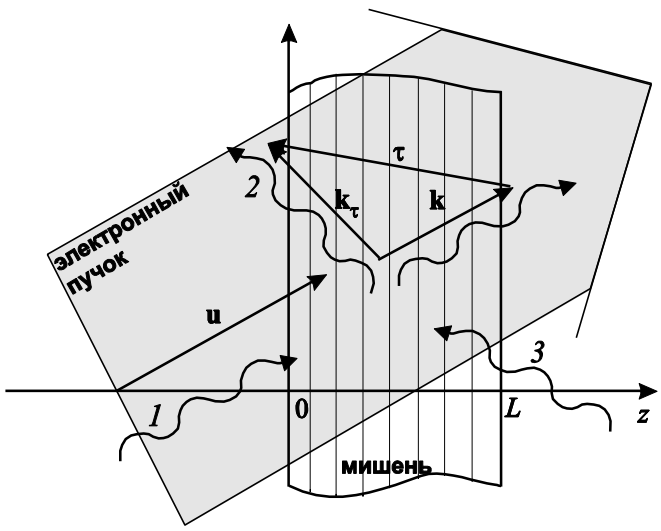
Именно поэтому многие исследователи используют программные коды собственного производства, более того, активно развиваются не просто собственные программы, но и экспресс-коды (не трехмерные полные «тяжелые» коды, а быстрые и «легкие» 1D- и 2D-коды) [17, 18].

В качестве примера такого экспресс-кода для моделирования ОЛСЭ разработан комплекс программ VOLC («*VOL*ume *C*ode») [19, 20]. Он позволяет осуществить математическое моделирование во времени рассматриваемых физических процессов в ОЛСЭ для одного (1D) и двух (2D) пространственных измерений. В первом случае мы имеем одно пространственное

измерение для электромагнитных полей и два измерения (пространственное и фаза) для электронного пучка + время. Простая схема двухволнового ОЛСЭ приведена на рисунке.

Второй случай касается ОЛСЭ с объемными дифракционными решетками, где использованы два пространственных измерения (z и x) для электромагнитных полей и функций распределения пучка электронов [21]. Это т. н. поверхностный квазичеренковский ОЛСЭ (surface quasi-Cherenkov FEL). Такие схемы реализуемы в оптическом и терагерцовом диапазонах [22].

Рассмотрим простейшую математическую модель двухволнового ОЛСЭ в объемной геометрии (см. рисунок). Пусть электронный пучок со скоростью $\mathbf{u}$ и плотностью j_b «падает» под некоторым углом на полубесконечную трехмерную пространственно-периодическую мишень (резонатор) толщиной L. Здесь он находится в синхронизме с одной их электромагнитных волн, образующихся в системе вследствие динамической дифракции. Это означает выполнение известных условий Вавилова-Черенкова для пучка.



Объемная схема ОЛСЭ в геометрии Брэгга

Одновременно на мишень может падать плоская электромагнитная волна с частотой ω и волновым вектором $\mathbf{k}$ (волна 1 на рисунке). Если эта волна находится в условиях дифракции, то в мишени образуется дифрагированная волна с волновым вектором $\mathbf{k}_\tau = \mathbf{k} + \boldsymbol{\tau}$ (волна 2 на рисунке).

В результате аккуратного учета условий объемной распределенной обратной связи в ОЛСЭ и фаз электронов в пучке, компьютерный код VOLC позволяет моделировать сложную трехмерную динамику электронного пучка и распространение электромагнитных волн в трехмерном резонаторе ОЛСЭ. Такая программа подходит для быстрого моделирования, не требуя больших мощностей компьютера. Она позволяет проверить все основные физические законы, лежащие в основе ОЛСЭ, провести быстрый предрасчет условий эксперимента, который затем может быть с большей точностью промоделирован с помощью «тяжелых» компьютерных кодов (рассмотренных выше) на суперкомпьютерной технике (при ее наличии). Таким образом, комплекс программ VOLC предназначен для экспресс-моделирования работы различных типов ОЛСЭ, в том числе экспериментальных физических установок ОЛСЭ НИИ ЯП БГУ.

Компьютерный код VOLC предоставляет возможность моделировать:

1) динамическую дифракцию электромагнитных волн в геометрии Брэгга и Лауэ в различных типах резонаторов, включая естественные кристаллы (рентгеновский диапазон), сеточные и фольговые резонаторы (СВЧ-диапазон) для двух- и трехволнового случая дифракции, различных дифракционных структур (с учетом отраженных волн в оптическом диапазоне длин волн);

2) проверку условий дифракции в системе;

3) вычисление значений коэффициентов разложения диэлектрической проницаемости среды в ряд по векторам обратной решетки;

4) режимы усиления и генерации, включая режим SASE – Self-amplified spontaneous emission;

5) эффекты, обусловленные наличием внешних зеркал;

6) эффекты дисперсии электромагнитных волн в системе;

7) процессы, учитывающие формы внешнего импульса электромагнитного излучения и пространственной формы пучка электронов, падающих на мишень;

8) динамику пучка электронов при прохождении резонатора при моделировании фаз электронов и функций распределения;

9) взаимодействие одного и двух пучков электронов с электромагнитными волнами в условиях дифракции;

10) циклы по нескольким входным параметрам (параметры внешнего импульса электромагнитного излучения, длина резонатора, плотность тока пучка электронов, форма его импульса, геометрические параметры дифракции, отстройка от точного выполнения черенковского условия, параметры фотонного кристалла и др.) для формирования параметрических карт перехода к хаосу в системе.

Входными данными VOLC являются длина волны, плотность тока пучка и его Лоренц-фактор, размеры резонатора, время процесса, фактор асимметрии, параметры геометрии, отклонение от точного выполнения условия Черенкова, значения разложения диэлектрической проницаемости в ряд по векторам обратной решетки, параметры отражения при наличии внешних зеркал и др. Наборы параметров варьируются в зависимости от версии программы (двухволновая геометрия, трехволновая и т.д.).

В качестве выходных данных в файлы выводятся распределения амплитуд электромагнитных волн и пучка электронов в каждый момент времени на концах резонатора, а также соответствующие им фурье-компоненты. Возможен вывод этих данных в зависимости от пространственных координат в каждый момент времени.

VOLC всесторонне протестирован, в том числе путем сравнения численных результатов моделирования и известных аналитических решений. Полученные численные результаты имеют хорошее согласие с теоретическими и экспериментальными физическими результатами. Математическое моделирование с использованием VOLC подтвердило все основные физические закономерности и принципы работы ОЛСЭ, получены пороги генерации для установок ОЛСЭ, эксперименты на которых проводились в НИИ ЯП БГУ. Показано, что для эффективной генерации существует оптимальный набор параметров системы.

Применимость использованных в VOLC разностных алгоритмов и достоверность решения методами математического моделирования ОЛСЭ подтверждается использованием принятых в научном мире исходных уравнений, корректностью использованных приближений, многочисленными положительными примерами валидации и верификации разработанного программного обеспечения − комплекса программ VOLC. Также достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям и согласованностью с существующими аналитическими оценками.

Библиографические ссылки

1. Бэдсел Ч., Лэнгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.

2. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 640 с.

3. Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High power microwave. Boca Raton: CRC Press, 2016. 446 p.

4. Freund H. P., Antonsen Jr T. M. Principles of free electron lasers. Springer, 2018. 716 p.

5. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике СВЧ. М.: Сов. Радио, 1973. 399 с.

6. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: в 2 т., М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. Т. 1. 496 с.; Т. 2. 648 с.

7. Baryshevsky V. G. High-energy nuclear optics of polarized particles. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2012. 640 p.

8. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

9. Reiche, S. FEL simulations: history, status and outlook // The 32st Int. Free Electron Laser Conference: Proceedings of FEL2010, Malmö, Sweden, 23-27 August 2010. Malmö, 2010. P. 134-137.

10. Tarakanov V. P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. № art. 04024.

11. Verboncoeur J. P., Langdon A. B., Gladd N. T. An object-oriented electromagnetic PIC code // Computer Physics Communications. 1995. Vol. 87. P. 199-211.

12. User-configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations / B. Goplen [et al.] // Computer Physics Communications. 1995. Volume 87, Issues 1-2. P. 54-86.

13. Young L., Billen J. The particle tracking code PARMELA // Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, Oregon, USA, May 12-16, 2003. IEEE, 2003. P. 3521-3523.

14. Reiche S. GENESIS 1. 3: a fully 3D time-dependent FEL simulation code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1999. Vol. 429. P. 243-248.

15. CST Studio Suite 2017 offers EM simulation on every scale // Microwave Journal. 2017. February. 2 p.

16. Моделирование неустойчивостей в релятивистском электронном потоке в среде CST Particle Studio / С. А. Куркин [и др.] // Математическое Моделирование. 2017. Т. 29, № 7. С. 109-122.

17. Cyclotron auto resonance maser and free electron laser devices: a unified point of view / E. Di Palma [et al.] // J. Plasma Phys. 2017. Vol. 83. № art. 905830102

18. Optimization of volume free electron laser with photonic crystal foil grid structure for operation in sub-terahertz range / A. Badarin [et al.] // 44th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2019. 2 p.

19. Сытова С. Н. Компьютерное моделирование объемных лазеров на свободных электронах с помощью компьютерной программы VOLC // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Веб-программирование и интернет-технологии» (WebConf09). 8-10 июня 2009 г. Минск, 2009. Часть 2. С. 59-60.

20. Sytova S. Simulation Techniques for Vacuum Electronic Devices // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2022. Vol. 25, No 2. P. 168-176.

21. Сытова С. Н. Модели объемных лазеров на свободных электронах // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 6. С. 124-135.

22. Visible surface quasi-Cherenkov FEL / V. G. Baryshevsky [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1995. Vol. A358. P. 508-511.

23. Shintake T. Review of the worldwide SASE FEL development // Proc. PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA. 2007. № art. MOZBAB01. P. 89-93.