ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

# SԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

# СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



Журнал издается с 5.01.1948 г. Выходит 3 раза в год

#### ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐՉՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Մ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ո.Չ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора), З.К. СТЕПАНЯН (ответ. секретарь), С.Г. АГБАЛЯН, Г.Л. АРЕШЯН, Р.В. АТОЯН, В.В. БУНИАТЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН, В.З. МАРУХЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН, С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН, В.С. ХАЧАТРЯН

#### **EDITORIAL BOARD**

R.M. MARTIROSSYAN (Editorial-in-Chief), H.A. TERZYAN (Vice-Editor-in-Chief), Z.K. STEPANYAN (Secretary - in - Chief), S.G. AGHBALYAN, G.L., ARESHYAN, R.V. ATOYAN, V.V. BUNIATYAN, S.P. DAVTYAN, S.M. GHAZARYAN, V.Z. MAROUKHYAN, YU.L.. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN, S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN, V.S. KHACHATRYAN

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՑՐԱՆՑԱՆ

Համակարգչային շարվածքը եւ ձեւավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

О Издательство ГИУА Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2003

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

### К 70 - ЛЕТИЮ ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНЖЕНЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ



Ю.Л. САРКИСЯН, А.А. ТЕРЗЯН

#### РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В ГОСУДАРСТВЕННОМ ИНЖЕНЕРНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ АРМЕНИИ

Представлять Государственный инженерный университет Армении - задача приятная и благородная. Популярность этого крупнейшего Университета достаточно высока как в Армении, так и за ее пределами. Достаточно отметить, что Университет имеет научные связи с 85 зарубежными вузами. В Университете учатся и получили образование студенты из 34 стран мира. Более 500 учебников, книг, научных статей и материалов научных конференций публикуется в год учеными Инженерного университета. Университет совместно с Национальной Академией наук Армении издает периодический научный журнал "Известия Национальной Академии наук и Государственного инженерного университета Армении. Серия "Технические науки". Инженерный университет – обладатель более 2000 авторских свидетельств на изобретения и патентов. Библиотека с 8-ю читальными залами имеет 1,5 млн.-ый книжный фонд.

Обучение в Университете ведется по многоступенчатой системе – гимназия (старшие классы), колледж, бакалавриатура, магистратура и аспирантура. Причем продвижение студентов проходит по пирамиде, т.е. из низшей ступени в высшую проходят только лучшие. Язык обучения - армянский, а также русский и английский для иностранных студентов.

В Университете охвачены практически все современные инженерные специальности, обучение которым ведется в следующих департаментах: химических технологий и природоохранной инженерии, электротехники, энергетики,

машиностроения, приборостроения и автоматизации, механики и машиноведения, информатики и вычислительных систем, кибернетики, радиотехники и систем связи, недрологии и металлургии, транспортных систем, а также математики, физики, языков, социально-политических дисциплин и общей экономики.

Крупным и достаточно элитарным блоком является подготовка инженеровмагистров и инженеров-исследователей практически по всем инженерным специальностям, а также прикладной математике и индустриальной социологии.

В Университете действует 6 специализированных советов по присуждению ученых степеней доктора технических наук и кандидата технических наук по следующим научным направлениям: управление, системы автоматизации и электроника, информационно-измерительная техника, приборы, системы и изделия медицинского назначения, материаловедение и металлургия, машиностроение и машиноведение, электротехника, энергетика, химические технологии и экология.

Предметом особой гордости Университета являются результаты научной деятельности. Однако, прежде чем перейти к описанию научных результатов, полученных в Инженерном университете за последние годы, хотелось бы назвать имена ученых, которые в прошлом, работая в Политехническом институте, сыграли огромную роль в становлении первых научных школ в институте. Это, прежде всего, Ашот Асланян, Вараздат Арутюнян, Нагуш Арутюнян, Сергей Амбарцумян, Степан Гамбарян, Арцрун Гаспарян, Григор Гурзадян, Иван Егиазаров, Кирцак Завриев, Мартин Касьян, Норайр Кочарян, Арменак Назаров, Огсен Сапонджян, Александр Таманян, Оганес Чалтикян, Арташес Шагинян и др.

Научные исследования в Инженерном университете ведутся как в департаментах, так и в исследовательских лабораториях и научных центрах.

В частности, в Центре малых энергетических систем ведутся работы по разработке эффективных фотовольтаических преобразователей солнечной энергии, создаются ветроэнергетические установки различного назначения.

В рамках решения экологических проблем проводятся эко-геологические исследования геодинамики радиоактивного газа радона и причин его накопления в городах и других населенных пунктах. Разрабатываются технические средства для измерения и исследования озона и других газовых составляющих атмосферы, создаются и внедряются промышленные экологически чистые технологические процессы.

В Университете традиционно высокий уровень имеют исследования в области машиностроения, машиноведения и материаловедения. В рамках проводимых здесь работ следует отметить: математическое моделирование и исследование прецизионных манипуляторов и микромеханизмов; разработка и исследование новых смазочных материалов; создание упрочняющих технологий деталей машин; теоретические и технологические разработки получения высокопрочных композиционных порошковых материалов; создание технологии комплексной переработки медных концентратов методами порошковой металлургии.

В области химии разработаны научные основы новых металлургических и химико-технологических процессов, созданы высокотемпературные сверхпроводящие полимер-керамические композиционные материалы и др.

За последние годы в Университете получили развитие исследования в области биомедицинской техники. Здесь создан ряд искусственных суставов с уникальными ортопедическими свойствами, разработаны и исследованы устройства особого назначения для биомедицинских применений, в частности, мобильные устройства кардиологического мониторинга и передачи информации на дальние расстояния.

Проблемы информатики, вычислительной техники и автоматизации на протяжении многих лет являются приоритетными для Университета. В Инженерном университете не только самый крупный департамент информатики и вычислительной техники, но и самый крупный блок научных исследований в этой области. Здесь успешно ведутся работы по созданию элементов и устройств нейрокомпьютеров, средств принятия решения на основе искусственных нейросетей, систем образования, обработки и визуализации данных нанометрового изображения и др.

В рамках создания средств автоматизации сильное развитие получили системы принятия решения. В частности, создана инвариантная адаптивная система поисковой оптимизации с многочисленными адаптивными методами нелинейного математического программирования, основанными как на моделировании поведенческих (методы случайного поиска) и эволюционных (генетические алгоритмы) механизмов живых организмов, так и на строгих математических процедурах (градиентные и др. алгоритмы).

Современное развитие технических наук немыслимо без использования результатов, полученных в прикладной (и не только прикладной) математике. Спектр исследований научных лабораторий департамента математики достаточно широк: от Риччи - полусимметричных структур до нелинейных краевых задач. Наибольшее развитие получили здесь исследования нелинейных краевых задач с фиксированными и подвижными границами. Эти задачи возникают в различных областях теоретического и прикладного естествознания: аэронавтике, электродинамике, гидромеханике, теплофизике, теории фильтрации и др.



Один из учебных корпусов Государственного инженерного университета Армении

Интерес представляют также исследования в области физики и радиофизики. Отметим некоторые из них: теоретические исследования сверхбыстрых фотоэлектрических процессов в металлических и полупроводниковых пленках; рентгенографические и рентгеноинтерферометрические исследования структурных искажений, возникающих в современных кристаллах кремния под влиянием внешних воздействий; теоретическое и экспериментальное исследование волноводных и механических свойств оптических волокон и др.

Остановимся несколько подробно на отдельных направлениях научных исследований, проводимых в Инженерном университете.

Существенные результаты в теории полимеризации и практическом синтезе полимерных нанокомпозиционных материалов получены под руководством профессоров С. Давтяна и А.Тоноян [1-3]. Показано, что методы фронтальной полимеризации позволяют из исходной реакционной смеси непосредственно в ходе процесса формовать конечные изделия различной геометрии. При этом обеспечиваются существенное уменьшение энерго- и материальных затрат (поскольку автоволновая полимеризация поддерживается за счет экзотермичности самой химической реакции) и экологичность процесса (в силу замкнутости технологического цикла и исключения из реакции растворителей).

За последние 15 лет в Государственном инженерном университете Армении совместно с Институтом химической физики Национальной Академии наук Армении, под руководством проф. А.А. Манташяна интенсивно развивается направление по превращению неорганических соединений и веществ под действием цепных химических газофазных реакций. В основе нового подхода лежит идея использования активной газовой среды, содержащей атомы и свободные радикалы частицы с наивысшей химической активностью. На основе данного высокоселективного метода гетерофазного радикально-цепного химического превращения удается эффективно (при низких температурах и высоких скоростях) воздействовать на такие соединения, как: сульфиды, оксиды, хлориды и сульфаты различных металлов. В результате получаются полностью восстановленные порошкообразные (тонкодисперсные) металлы и их оксиды с особыми свойствами, а также ряд других ценных продуктов [4, 5].

Проблемой развития теоретических основ защитного действия ингибиторов и их целенаправленного синтеза занимается научная лаборатория, руководимая проф. К. Тагмазяном. Известно, что основные перспективы расширения эксплуатации многих крупных нефтяных и газовых месторождений в настоящее время связаны с преодолением подсолевых карбонатных отложений глубиной до 5-7 тыс. метров, при температуре до 130-150° С, и для обеспечения постоянного дебита нефти и газа из них становится необходимым проведение кислотной обработки с применением более эффективных и высокотемпературных ингибиторов кислотной коррозии. Авторами разработаны [6,7] технологии получения ряда азотсодержащих композиционных ингибиторов кислотной коррозии. Синтезированные ингибиторы прошли промышленные испытания на различных предприятиях. По данным испытаний, они эффективно защищают нефтяные и газовые трубы в условиях соляно-кислотной обработки.

Значительный интерес представляют работы по синтезу стекол и исследованию их физико-химических свойств. Предложен ряд технологий электроварки стекол различного назначения (проф. К. Костанян) [8]. Проблемам гидродинамики двухфазных потоков, в частности, пневмотранспорта порошковых материалов в плотном слое, выщелачивания солей в потоках при высоких концентрациях твердой фазы, посвящены работы профессоров Р.Акопяна, А. Гюльзадяна и Р. Мирзаханяна [9, 10].

В рамках химико-технологических исследований заслуживают внимания работы проф. Г.Торосяна по развитию метода межфазного катализа в органическом синтезе. В частности, разработан метод межфазного катализа с применением микроволнового излучения [11].

С целью поиска нетоксичных антиоксидантов для стабилизации органических веществ и пищевых продуктов проведено исследование (проф. Р. Варданян) экстрактов из семян ягод и фруктов. Обнаружено, что исследованные экстракты обладают ингибирующим действием на процесс окисления органических веществ. Измерены соответствующие генетические параметры, характеризующие эффективность ингибиторов. Установлено, что по эффективности исследованные экстракты не уступают таким ингибиторам, какими являются фенолы [12].

Проблемам азотного обмена дрожжей посвящены работы проф. Е. Багдасаряна [13].

Исследования проф. В. Мартиросян направлены на создание нетрадиционных технологических схем обработки различных металло-содержащих оксидных и сульфидных руд, которые позволяют с небольшими теплоэнергетическими и экономическими затратами комплексно извлекать из руд такие металлы, как Fe, Cr, Cu, Ti, Mg в чистом виде. Рассмотрен метод комплексной переработки руд хлорной металлургией, позволяющий комплексно или селективно извлекать указанные металлы в виде безводных хлоридов, являющихся сырьем для получения прецизионных металлов и сплавов в виде порошков [14, 15].

Общим проблемам машиноведения посвящены работы научной лаборатории, руководимой проф. Ю.Саркисяном [16, 17]. Здесь, в частности, разработана теория аппроксимационной кинематической геометрии, позволяющая определить точки и прямые движущегося твердого тела, траектории которых аппроксимируют окружность, прямую, сферу, однополостный гиперболоид и другие легко механизируемые кривые и поверхности. С использованием этих точек и прямых создан унифицированный метод кинематического синтеза перемещающих, передаточных и направляющих механизмов, обеспечивающих заданное плоскопараллельное или пространственное движение их звеньев и точек. Выполняются исследования в области оптимального проектирования и управления исполнительных механизмов машин и робототехнических систем с учетом и без учета упругих свойств их узлов и звеньев. Получены необходимые и достаточные условия оптимальности и др.

Рассмотрены вопросы усталостной прочности механических систем и их элементов в условиях сложного сопротивления и воздействия среды с учетом вероятностных представлений процесса усталостного разрушения (проф. М. Стакян) [18].

Под руководством проф. Г. Петросяна выполняются работы по исследованию прочности конструкционных элементов из пористых материалов, а также технологических проблем теории пластичности [19].

Немалый интерес представляют исследования в области механики деформируемого твердого тела: механики разрушения, теории ползучести, колебаний элементов систем (проф. С. Геворкян) [20].

Проводятся исследования (проф. А. Погосян) в области решения проблемы повышения надежности и долговечности деталей и узлов трения машин путем разработки комплексных трибологических мероприятий. Созданы перспективные, экологически чистые композиционные фрикционные и антифрикционные машиностроительные материалы и детали трения машин из них, смазочные композиции и присадки к ним с использованием производственных отходов и безотходной технологии [21].

Разработаны (проф. С. Христафорян) модели самоорганизуемого процесса резания на основе положений неравновесной термодинамики и синергетики. Создается основа для разработки новейшей теории резания и адекватной модели пластического деформирования материалов при резании [22].

Работы проф. М. Варданяна посвящены автоматизации и исследованию различных технологических процессов машиностроения [23].

Под руководством проф. Р. Сагателяна проводятся работы по исследованию процесса обработки чугуна [24].

За последние годы в Университете сформировалось и успешно развивается научное направление по созданию приборов, систем и изделий медицинского назначения. Здесь проводятся исследования биомеханических систем, устройств реабилитации, ортопедических аппаратов для исправления зубочелюстных аномалий. Создан ряд пьезомеханических устройств [25]. Разрабатывается цифровое телекоммуникационное оборудование. В частности, создан карманный интеллектуальный прибор для записи и запоминания 256 кардиограмм для 16-и больных с возможностью высвечивания их на собственном графическом дисплее, проведения их экспресс-анализа с высвечиванием результатов анализа. Прибор позволяет переносить электрокардиограмму сердца в компьютер с целью хранения, детального рассмотрения и передачи ее через Интернет любому абоненту мира [26].

Интересные результаты получены в области создания геометрических моделей физических явлений. В частности, проф. В. Адамяном разработан специальный геометрический аппарат для исследования моделей технологических процессов [27].

Немалый интерес представляют результаты, полученные в области геометрического моделирования поверхностей четырехмерного пространства и создания подсистемы четырехмерной графики в среде Auto Cad (проф. К. Согомонян) [28].

Проводятся исследования (проф. С. Симонян) по разработке моделей, методов, алгоритмов и программ быстрого счета, основанных на использовании субдинамических, непрерывных квазилинейных простых схем, обеспечивающих асимптотическую устойчивость переходных процессов, а также разных дифференциальных преобразований, обеспечивающих разделение переменных для параллельных вычислений. Получены новые результаты в области расширения вычислительных возможностей дифференциальных преобразований, в частности, предложены высокоэффективные параллельные вычислительные модели для решения автономных и неавтономных систем конечных уравнений; разработан метод расщепления многомерных многосвязных динамических систем, существенно расширяющий возможности их анализа и установления их динамических характеристик [29, 30].

Значительный вклад в развитие моделирования динамических систем и численного анализа представляют работы проф. А.Аракеляна [31, 32].

В научной группе проф. С. Кюрегяна разработаны алгоритмы построения моделей многомерных динамических систем на основе экспериментальных данных и векторных временных рядов, адекватных для робастного управления, а также методы робастного управления макроэкономическими динамическими системами в условиях существенных неопределенностей [33].

В лаборатории следящих систем (проф. П. Матевосян) разработана принципиальная схема и дано теоретическое обоснование для создания измерителя двуокиси азота атмосферы. Изготовлены измерители озона и ультрафиолетовой радиации Солнца. Проведены исследования по изучению влияния уменьшения озонного слоя атмосферы на рост заболеваний кожи. Разработаны методика, алгоритм и программа для обеспечения устойчивости нелинейных систем автоматического управления [34].

Работы по разработке логических устройств нейрокомпьютеров в Инженерном университете ведутся под руководством проф. С. Мкртчяна. В частности, разработаны алгоритм и нейронная схема устройства для подсчета числа единиц в двоичном наборе; решена задача распознавания букв с помощью обучаемых нейронных сетей. Обучение нейронных сетей осуществляется с помощью алгоритмов обратного распространения. Созданы пакет прикладных программ для распознавания букв и униполярные схемы на полевых транзисторных нейронных элементах.

Под руководством проф. К. Гулгазаряна разработан новый ранее неизвестный способ создания генераторов сверхвысоких частот, на основе которого создан ряд устройств микроволновых печей [35, 36].

Научная группа, возглавляемая проф. В. Буниатяном, занимается изучением и исследованием сверхвысокочастотных (СВЧ) характеристик инжекционнопролетных диодов (ИПД), а также изучением оптических свойств тонких сверхпроводящих пленок. Предложена новая конструкция и механизм работы ИПД; разработана методика определения параметров примесных уровней в полупроводниках; обоснована целесообразность применения новых широкозонных полупроводниковых материалов для целей СВЧ микроэлектроники; предложен новый способ усиления и детектирования оптических сигналов с помощью сверхпроводящих тонких пленок [37, 38].

Научная группа проф. В. Арустамяна ведет работы по исследованию процессов искажения оптических сигналов в волоконно-оптических кабелях и

разработке инженерных методов их расчетов, разработке и реализации телефонного кодека, обеспечивающего защиту информации в аналоговой телефонной сети, исследованию проблемы оптимизации цифрового канала пространственной структуры ЭВМ, монтажных параметров радиоэлектронной аппаратуры и др [39].



В лаборатории материаловедения

В лаборатории математического моделирования и автоматизированного проектирования (рук. проф. А. Терзян) предложен, разработан и исследован ряд эффективных алгоритмов принятия решения [40]. Предложен и реализован новый подход к определению установившихся и переходных режимов электромагнитных систем в полевой постановке решения задачи. Метод позволяет определять режимы высокоиспользованных электрических машин без привлечения понятий индуктивных сопротивлений, соответствующих при строгом рассмотрении только линейной теории. Развит метод конечных элементов при решении нелинейных краевых задач электромагнитного поля. Существенно новым является синтез специальных базисных функций, позволяющих повысить точность метода без увеличения вычислительных ресурсов. Для метода конечных элементов, который используется в основном при неравномерном шаге, и нередко для трехмерной области получена оценка точности расчетного уравнения, которая используется в качестве критерия динамической декомпозиции сетки дискретизации при численном решении нелинейных краевых задач. В лаборатории создана уникальная система автоматизированного проектирования сложных электромагнитных систем [41]. Интенсивно ведутся работы по созданию виртуальной системы автоматизированного проектирования коллективного пользования.

Коллективом исследователей под руководством проф. Э. Манукяна проводятся работы по развитию системы искусственного интеллекта. В частности, разработана экспертная система по прогнозированию социально-экономического состояния региона и его геополитического окружения. Разработана база знаний экспертной системы, представляющая собой структурно-логическую модель региона как политической единицы с отражением всех его социальноэкономических компонентов. Получены интересные результаты по машинному англо-армянскому смысловому переводу [42].

Заслуживают внимания работы по созданию автоматизированных систем управления различными технологическими процессами (проф. Г. Киракосян) [43].

В рамках создания информационных систем в Университете успешно развиваются методы формирования баз знаний и моделирования познавательных процессов (проф. Э. Погосян) [44].

Проблеме создания распределенных и отказоустойчивых вычислительных систем посвящены работы проф. А.Паляна [45].

Работы научной группы, руководимой проф. Г. Арешяном, посвящены исследованию переходных процессов в электрических машинах переменного тока. Проведен анализ многосвязных систем на базе асимптотических эквивалентных схем с формированием условия эквивалентности энергетических матриц таких выведены основные векторные дифференциальные уравнения систем: элетромагнитодинамики; постулированы интегральные выражения векторпотенциалов и получены уравнения электромагнитных полей в вакууме и в пространстве, содержащем проводящее электрическое вещество; проведено исследование демпфирующего эффекта тонкого стального диска и выведены формулы, учитывающие демпфирующий эффект стальных стенок креостата, в котором в сверхпроводящем состоянии находится обмотка возбуждения линейного синхронного двигателя; разработан новый метод расчета переходных процессов, отличающийся от известных тем, что не требует определения корней характеристического уравнения [46, 47].

Работами проф. В.Алексеевского значительно обогащена теория и практика электрических машин и аппаратов [48].

В научной группе, руководимой проф. Э. Казаряном, ведутся исседования по разработке и внедрению альтернативных источников энергии в промышленные, бытовые комплексы и в сельское хозяйство. Здесь разработана конструкция комплексной солнечной водонагревательной установки с дополнительным подогревом, обеспечивающая высокую производительность, экологическую чистоту окружающей среды и имеющая высокие показатели надежности. Разработан также информационно-измерительный комплекс, позволяющий производить почасовые измерения составляющих солнечной радиации и тем самым корректировать метереологические данные [49].

Работы проф. Ж. Давидяна посвящены развитию теории автоматического регулирования электрических машин и импульсному пуску крупных асинхронных двигателей [50].

Научная группа, возглавляемая проф. Г. Кардашяном, занимается исследованием магнито-измерительных систем для неразрушающего контроля магнитных свойств ферромагнитных материалов. На основе разработанной ими теории созданы качественно новые универсальные средства магнитных измерений и технические средства испытаний магнитных свойств в производственных и лабораторных условиях, позволяющие измерять магнитные параметры в локальных областях при высоких значениях магнитной индукции ферроматериалов [51, 52], вплоть до насыщения, а также определять неоднородность магнитных свойств.

Для Инженерного университета традиционным являются исследования в области создания электромобилей. Создано и испытано множество грузовых электромобилей (ЭМ) для внутригородских перевозок, как, например, ЭМ с

частотно-регулируемым асинхронным электроприводом, управляемым в режиме постоянства абсолютного скольжения; ЭМ с многодвигательным импульсноуправляемым приводом постоянного тока, где применен способ несинфазного импульсного управления, приводящий не только к повышению энергетической эффективности в режимах тяги и импульсно-рекуперативного торможения, но и к увеличению дифференциальных свойств мотор-колесного тягового электропривода ЭМ [53].



В лаборатории гелиотехники

Получены интересные результаты по исследованию параметров электромагнитных процессов в ленточных, спиральных, транспонированных проводниках и электрических полей силовых кабелей (проф. Ж. Мирзабекян, проф. М.Карапетян) [54].

Развитию теории цепей посвящены работы проф. Г.Акопджаняна [55].

Представляют интерес исследования потенциальных полей неоднородных материалов, электромагнитных полей движущих элементарных частиц при скоростях, близких к скорости света (проф.М.Арамян) [56].

Важное значение уделяется проблеме диагностики и раннего оповещения о возможных авариях крупных гидрогенераторов. Разработке методов и средств диагностики гидрогенераторов в условиях эксплуатации посвящен ряд работ проф. Р. Акопяна и проф. Г.Берберяна [57].

Работами проф. Б. Мамиконяна значительно развита информационноизмерительная техника. В частности, им разработан ряд микропроцессорных устройств и электронных преобразователей для измерения параметров различных технологических процессов электрическими методами [58, 89].

Усилиями проф. В. Варданяна создано значительное количество прецизионных датчиков давления, защищенных патентами ряда стран и используемых в различных сферах науки и техники [60, 61].

В области недрологии и металлургии (профессоры Н. Манукян, Э. Сагателян, С. Агбалян, Г. Овсепян, Ю. Агабалян, Л.Саркисян, А. Петросян, С. Сулейманян) ведутся работы в следующих направлениях: исследование процессов, протекающих в горных породах, в условиях высоких давлений до 20 кб и температур до 1000<sup>0</sup> С; разработка моделей гидротермальных систем золотополиметаллических месторождений с целью прогноза оруднения; экологические исследования геодинамики радиоактивного газа-радона и причин его накопления

на урбанизированных территориях сейсмоактивных регионов с целью оценки факторов риска и разработки метода локального экосейсмопрогноза; использование геотермальной энергии для энергетических целей; разработка рациональных конструкций скважин и их водоприемных частей для различных геолого- и гидрогеологических условий; разработка рациональных режимов бурения обычными и гидромониторными долотами при различных геолого-технических условиях; разработка оптимальных систем разведки жильных и жилообразных рудных тел, месторождения цветных и благородных металлов; определение различных факторов воздействия на кондиции рудных месторождений; разработка теоретических и технологических основ для получения высокопрочных армированных порошковых сплавов; разработка теоретических и технологических основ для получения беспористых антифрикционных и конструкционных порошковых сплавов; разработка технологии металлизации алмазных порошков для получения высококачественных инструментов; разработка термобиметаллических и магнитомягких материалов методами порошковой металлургии; разработка технологии и выявление особенностей при термических, химико-термических и термомеханических обработках порошковых сплавов с целью увеличения прочностных свойств порошковых сплавов для расширения их области применения; разработка технологии и выявление особенностей химико-термической обработки твердых сплавов с целью повышения износостойкости и работоспособности твердых сплавов; разработка технологии получения высококачественного железного порошка из железорудных концентратов методом содового рафинирования [62 - 69].

Основное направление деятельности научной группы, возглавляемой проф. И. Тер-Азарьевым, связано с процессами механизированной добычи и обработки природного камня, в частности, рабочих органов добычных машин, их конструкций, разработкой принципов эффективной обработки различных пород природного камня резцовым и алмазным инструментом. Разработаны конструкции обрабатывающих станков, которые производятся в массовом порядке [70].

На протяжении многих лет под руководством проф. Э. Джангуляна проводятся исследования, посвященные проблемам теории резания грунтов. Выдвинуты новые теоретические концепции, основанные на закономерностях статики сыпучей среды. Разработан новый рабочий орган землеройной машины, выведены аналитические формулы, определяющие его оптимальные параметры и усилия резания. В результате внедрения полученных результатов в производство достигнута значительная экономия материальных ресурсов [71].



Солнечные преобразователи лаборатории гелиотехники на крыше церкви Сурб Саркис г.Еревана

Сегодня энергетика, являющаяся базовой отраслью и, по существу, определяющая качество жизни, развивается по многим направлениям: это использование тепловой и атомной энергии, а также возобновимых источников энергии – гидроэнергии, энергии биомассы, солнечной энергии и энергии ветра. Практически по всем этим направлениям в Университете ведутся научные изыскания. В частности, ведутся исследования по оптимизации рабочих режимов тепловых и атомных электростанций, водоохлаждающих систем различных конструкций (рук. проф. В. Марухян) [72]. Многие годы успешно проводит научные исследования по повышению эффективности тепловых электростанций проф. Л. Кулоян [73].

Широкий спектр работ по управлению потерь в электрических сетях и математическому моделированию электроэнергетических систем ведутся под рук.проф. В. Хачатряна [74, 75].

Работы проф. С.Акопяна посвящены развитию методов проектирования газотранспортных и электроэнергетических систем [76].

Повышению эффективности сухих систем охлаждения тепловых и атомных электростанций посвящены исследования проф. Л. Оганесяна [77].

Научные исследования группы, руководимой проф. Г. Бурначяном, связаны с выбором оптимальных внутристанционных режимов гидравлических и тепловых станций с учетом состава работающего оборудования, комплексной оптимизацией режимов работы гидравлических и тепловых станций в сложных энергосистемах, оптимальным развитием сложных энергосистем в условиях неопределенностей исходной информации и др.

За последние годы в Университете совместно с НИИ "Андрон" и ГИДЕП проведена значительная работа по исследованию энергетических ресурсов рек Армении и созданию концепции развития малой гидроэнергетики (проф. Л. Григорян) [78].

Представляют немалый интерес исследования процессов обеспечения эффективных кинематических и аэродинамических режимных условий горения, а также благоприятных экологических условий (предотвращение выделения вредных окислов- SO, NO и др., создание условий реагирования, исключающих образование указанных веществ); выявления эффективных режимных условий горения твердых топлив; разработки соответствующих топочно-горелочных устройств [79].

В лаборатории гелиотехники (рук. проф. Ж. Паносян) ведутся работы в рамках проблемы преобразования солнечной энергии. В частности, представляют интерес научные результаты по разложению молекулы воды на водород и кислород на поверхности полупроводникового фотоанода под воздействием солнечного излучения. Разработаны физические основы такого фотоэлектрохимического преобразования солнечной энергии с участием поверхностных двумерных электронных и экситонных состояний, приводящих к повышению КПД преобразования солнечной энергии. Предложен новый метод экситонной спектроскопии для исследования поверхностных состояний на границах разделов полупроводник-электролит или полупроводник-диэлектрик. Разработана плазмохимическая технология изготовления твердотельных солнечных фотоэлементов, имеющих высокую механическую прочность, стойкость к химическим тепловым и радиационным воздействиям, с использованием тонких алмазоподобных углеродных пленок. Изготовлены и испытаны эффективные и долговечные фотоэлектрические преобразователи и модули солнечных электростанций [80, 81].

Под руководством проф. Р. Варданяна проведены исследования свойств полупроводниковых материалов в магнитном поле. Выявлены новые эффекты, а также развиты методы измерения параметров полупроводников, которые могут применяться при исследовании и разработке полупроводниковых приборов и Проведены исследовательские работы созданию микросхем. также по полупроводниковых преобразователей солнечной энергии. Разработаны полупроводниковые преобразователи с высоким КПД и сравнительно дешевой технологией изготовления [82, 83].

Традиционным направлением исследований в области физики является физика твердого тела. Особенно следует отметить работы в области физики нелинейно-оптические процессы полупроводниках, полупроводников: В поглощение света в многослойных полупроводниковых структурах в магнитном поле, а также рентгеноструктурный анализ и рентгено-интерференционная дефектоскопия полупроводников. В последнее время ведутся интенсивные теоретические исследования в области сверхбыстрых релаксационных процессов в металлах, целью которых является поиск путей повышения быстродействия электронных приборов и устройств, а также в области уравнений состояния твердых тел и в области решеточных моделей (профессоры А. Меликян, Г. Минасян, А. Абоян, А. Саакян) [84 - 86].

Интересные результаты получены в области теоретических исследований оптических свойств низкоразмерных полупроводников (проф. В. Арутюнян) [87].

Исследования в области математики ведутся в основном в следующих направлениях: дифференциальные уравнения, граничные задачи в теории функций, функциональное и динамическое поведение дискретных схем, дифференциальная геометрия.

Рассмотрены классы функций, мероформных в единичном круге, исследованы граничные свойства таких функций, опираясь на факторизованное представление (проф. В. Закарян) [88, 89].

Для систем эллиптических дифференциальных уравнений с постоянными комплексными коэффициентами исследована задача Дирихле и получена явная формула решения. Эта же задача исследована в многосвязных областях, и решение сведено к интегральным уравнениям Фредгольма. Для неправильно-эллиптического уравнения исследована граничная задача Риммана-Гильберта (проф. Н. Товмасян) [90, 91].

Исследована граничная задача Риммана в полуплоскости, когда граничное условие понимается в смысле средней сходимости. Дано необходимое и достаточное условие сходимости этой задачи. Эта же задача исследована в весовых пространствах. Полученные результаты применены для изучения граничных задач типа Риммана-Гильберта для п-голоморфных функций (проф. Г. Айрапетян) [92]. Для изучения логических (комбинационных) схем на основе введенного понятия функциональной активности элементов схем установлено, что функциональное поведение схем (надежность, тестируемость и т.п.) сильно зависит от поведения подсхем, состоящих из наиболее активных элементов. Решена задача обеспечения требуемой надежности схемы введением минимальной избыточной аппаратуры, которая в определенном смысле дублирует функционирование наиболее активных элементов схемы. На основе введенного понятия расстояния между двумя булевыми функциями решена задача реализации данной функции с помощью подсхем, содержащих минимальное число наиболее активных элементов (проф. Ш. Бозоян) [93].

В области дифференциальной геометрии получены следующие результаты: доказаны структурные теоремы для риммановых аналитических и келлеровых Ricполусимметрических пространств, для Ric - параллельных, s-параллельных, sполупараллельных подмногообразий, построены примеры полуэйнштейновых пространств в виде конусов над эйнштейновыми пространствами, исследованы полуэйнштейновые пространства с гармоничной кривизной. Для подмногообразий пространств постоянной кривизны введены различные законы огибания, в терминах таких огибающих полностью описаны взаимосвязи между параллельными и полупараллельными структурами на подмногообразиях (проф. В. Мирзоян) [94].

Исследованы задачи из области геометрии расслоенных пространств, алгебры Ли и геометрии чисел (проф Г. Аракелян) [95].

За последние годы в Университете значительно расширился блок гуманитарных исследований. В частности, в области экономических исследований получены интересные результаты по прогностическому моделированию экономических ситуаций и типизации хозяйственных решений в смешанной экономической системе (проф. В. Петросян) [96].

Проведен анализ периодизации, закономерностей и основных течений армянской экономической мысли. Ряд исследований относится к проблемам преобразования современной национальной экономики (проф. Р.Саринян) [97].

В области социально-политических наук следует отметить исследования русско-армянских отношений, политической истории Армении (проф. В. Тунян) [98], армянской церкви и ее роли в сохранении традиций и обычаев в обществе и др. (проф. Ю. Гаспарян) [99].

Глубокие исследования о социально-политическом положении и освободительной борьбе армян против режима султанской Турции проведены проф. К.Тарояном [100].

Интересные результаты получены проф. Геворкяном в рамкам цикла исследований философского учения Платона [101].

В области литературоведения предпринято исследование по выявлению роли армяно-индийской литературы на становление армянской национальной идеологии (проф. Дж. Мирзабекян) [102].

Список научных исследований и полученных результатов можно продолжить. Однако, думается, что у читателя уже сформировалось представление как о развиваемых научных направлениях, так и о Государственном инженерном

университете в целом. В определенной мере дополняют представление также статьи, опубликованные в настоящем номере "Известий", выпуск которого полностью посвящен ученым Государственного инженерного университета Армении, отмечающего свой 70-летний юбилей.

Роль науки в жизни общества постоянно растет и в наши дни достигла беспрецедентного уровня. Сегодня 90% роста мировой экономики обеспечивается наукой вообще и техническими науками в частности.

Принимая, что наука определяет развитие современного мира, и подтверждая, что сегодня в республике единственным заказчиком науки является государство, мы одновременно должны понять, что невостребованная наука – это бремя для госбюджета, следовательно, наука, в особенности технические науки, должны быть адаптированы к рынку. Мы должны пройти трудный, но необходимый инновационный путь, основываясь на принятые в республике приоритетные направления развития науки и техники.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Давтян Д.С., Тоноян А.О., Багдасарян А.Э., Давтян С.П.** Особенности фронтальной сополимеризации ε капролактама с ω- додекалактамом и физико-механические свойства образцов сополимеров. Препринт ГИУА, Чернологоловка, 1998.
- 2. Давтян С.П., Тоноян А.О., Радугина А.А., Давтян Д.С., Абросимов А.Ф., Савченко В.И. // Высокомолек. соед. А. - 1999. - Т. 41, №2. - С. 242.
- 3. **Давтян С. П., Тоноян А. О., Давтян Д. С., Савченко В. И.** // Высокомолек. соед. А. 1999. Т. 41, № 2. С. 249.
- 4. **Манташян А.А.** Превращение твердофазных неорганических соединений под воздействием цепных газофазных реакций // Хим. журнал Армении. 1996. Т. 49, № 3. С.5.
- 5. **Манташян А.А.** Превращение сульфидов Мо, Сu, Fe и оксидов Fe и Cu под воздействием цепных газофазных реакций // Кинетика и катализ. 1997. Т. 38, № 5. С. 671.
- Тагмазян К.Ц., Оганесян Г.П. Ингибиторы кислотной коррозии. Пат. РФ 1137739, приоритет 20.08.1993.
- Тагмазян К.Ц., Снгрян Ф.Х. Ингибиторы кислотной коррозии. Пат. РФ 1817447, приоритет 27.09.1993.
- 8. Костанян К.И. др. Воздействие оксида алюминия на свойства и структуру алюмоборатных стекол // Хим. журнал Армении. 1999. Т.51, № 2. С.102-106.
- 9. Акопян Р., Мирзаханян Р. Исследование кинетики сушки активного бентонита в аппарате с псевдожиженным слоем // Хим.журнал Армении. 1998. Т.45, № 1-2. С. 26 31.
- Мирзаханян Р., Гюльзадян А. Определение параметров фильтрования при разделении суспензии каолинит – раствор соляной кислоты // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2001. - Т.54, № 2.- С.309 - 313.
- Торосян Г.О. Внутримолекулярная термическая циклиация пропаргилфуринового эфира // ЖОХ. – 2002. - Т.38, вып. 10. - С.1542 – 1543.
- 12. Варданян Л.Р., Варданян Р.Л., Хачатрян А.Г. Ингибирующее действие экстрактов из семян ягод и фруктов // Химический журнал Армении. 2001. Т.54, № 1-2. С 85.
- Сафарян А.С., Багдасарян Е.Г. Усвоение D-стериизомеров и рацематов валина и аланина дрожжами. Candida tropicalis DH-3 // Информационные технологии и управление. – Ереван, 2001. - № 4.
- 14. **Вильнянский Я.Е., Мартиросян В.А.** Кинетика селективного хлорирования хромовых руд хлористым водородом // Хим. журнал Армении. 1973.-Т.26, № 11.- С. 881-888.

- Манташян А.А., Мартиросян В.А. и др. Способ переработки металлургических шлаков хлоридовозгонкой. Пат. РФ 1387457, приоритет 02.07.1993.
- 16. Sarkisyan Y., Ross D., Gupta K., Chebyshev. Approximations of Finite Point Sets with Application to Planar Kinematic Synthesis // Trans. of ASME, series B N1, 1979.
- 17. Sarkisyan Y. Approximation Problems in Kinematic Synthesis of Spatial Mechanisms // Proc. Of the VIII World Congr. on the Theory of Machines and Mechanisms, Prague, 1991. V.1.
- 18. Стакян М.Г. Программное обеспечение расчетов сопротивления усталости деталей, работающих на воздухе и в коррозионных средах // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1997. Т.50, № 1. С. 3 10.
- Mamalis A.G., Petrosyan G.L., Manolakos D.E. Open dic Forging of Sintered Cylinrical Bilets: An Analytical Approach // Journal of Material Processing Technology. – 1999. – V. 96. - P.112-116.
- 20. Геворкян С.Х., Гургенян А.А., Узуноглу Н. Распространение импульса разрыва деформации в цилиндрическом волноводе // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1998. Т.51, № 2. С. 123-127.
- 21. Погосян А.К. и др. Использование новых хлор-фосфорсодержащих соединений в качестве присадок к смазочным маслам // Трение и износ. 1997. Т. 18, №26. С. 736-738.
- 22. **Христафорян С.Ш.** О процессе резания материалов как самоорганизующейся структуре по переработке вещества // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1999. Т. 52, №2. С. 145-152.
- А.с. 1364444 Способ бочкообразного шевингования цилиндрических зубчатых колес / Б.С.Баласанян, М.Е.Вартанян, Р.А.Егиазарян, С.Ш.Христафорян. Опубл. В БИ N1, 1988. Патент РФ 1993г.
- 24. А.с. 1037939 Реактор с внутренней циркуляцией гранулированного катализатора / Г.М.Сагателян, С.А.Фарамазов, К.Л.Худоян, 1983.
- 25. Harytunyan M., Gasparyan I. Dynamic investigation of biostructure of medical applications // 47 Internationales wissenschaft lichnes kolloguium. 2002. 23-26.09.
- Мурадян М., Мовсесян В., Мовсесян Р. Применение оконных функций в задаче измерения продолжительности сегментов ЭКГ // Сб. мат. научн. конф. ГИУА. 2000.- Т.2. - С. 340-341.
- 27. Адамян В.Г., Заимцян Г.М. Проектирование конструкции двухлезвийного резца // Известия НАН РА и ГИУА. 1999. № 23.- С. 311-314.
- 28. Սողոմոնյան Կ.Հ. Գրաֆիկական մոդելավորումը Auto Cad 2002 միջավայրում, երկու մասից / ՀՊՃՀ.- Երևան, I մաս 2001. 158թ., II մաս 2002. 206 էջ.
- Simonyan S.O. and Avetisyan A.G. Differential Taylor Homotopic Model of Finite Equation Sets // Engineering Simulation. – 1998. - V. 15, № 1. - P. 19-32.
- Симонян С.О., Гукасян П.Э. Расщепление линейных динамических систем на основе дифференциально-тейлоровских преобразований // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. техн. наук. 1998. – Т.51, № 3, - С. 338-341.
- Arakelyan A., Sahanyan H., Harutyunyan U., Esayan M., Movsesyan M. On the solution of multiple criteria dynamic decision making problem // The 7<sup>th</sup> International Conference of the International Society for Decision Support Systems. - Ustrom, Poland, July, 2003.
- Аракелян А., Кардашян А. Сплайн обработка двумерных медико-биологических сигналов: Доклады НАНА. – 2003. - Т.103, N1. - С. 45 – 48.
- Кюрегян С.Г. Минимизация погрешностей косвенных измерений // Измерительная техника. -1994. - № 12.
- 34. Матевосян П.А., Мнацаканян М.Г., Базикян Г.К., Мелконян Д.О., Погосян П.Б. Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации Солнца и раковых заболеваний кожи в Армении // Медицинская наука Армении. – Изд. "Гитутюн" НАН РА. – 1999. - XXX IX, №1.
- 35. Патент 3.555.281 (США) / К.А. Гулгазарян, А.П. Скибарко.
- 36. Патент 1.205.131 (Великобритания) / К.А. Гулгазарян, А.П.Скибарко.
- Aroutionian V.M., Buniatian V.V., Soukiassian P. Microwave characteristics of BARTTT diodes based on silicon carbide // Solid-State Electronics. - 1999.- V. 43. - P. 343-348.
- Aroutionian V.M., Buniatian V.V., Gevorgian S.S. A new method of determination of parameters of traps in semiconductors // Phys. stat. Sol.( b). - 1998. - V. 210. - P. 805-808.

- Арустамян В.Е., Саркисян А.А. Применение волоконно-оптических кабелей для построения высокоскоростной системы передачи цифровой информации // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. техн. наук. - 1998. – Т.51, <sup>1</sup>3.
- Terzian H. Optimization and Control in Automated Design // 13 th World Congress International Federation of Automatic Control. - 1996, San Francisco, USA, P. 151-156.
- **Թերզյան Հ.** Ավտոմատացված նախագծման համակարգերի տեսություն. Երևան։ Լոս Անջելես, Աթենք NTUA Press, 1995. – 444 p.
- Манукян Э.Н. и др. Об одном методе формирования лингвистических моделей в экспертных системах // Сб. трудов "Электроника и связь" ~. 2, Киев, 1998 (Киевский политехнический институт).
- 43. **Киракосян Г.Т.** Автоматизированное проектирование динамической схемы утилизации промышленных отходов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1999. Т.52, № 3. С. 363 368.
- 44. **Pogossian E.** Focusing Management Strategy Provision Simulation // Proceedings of the 3d International Conference in Computer Science and Information Technologies. Yerevan, 2001.
- 45. Палян А.Х., Палян А.А. Сравнительная оценка методов доступа к файлам в Windows 2000 FSTB conference. Yerevan, 2001.
- 46. Арешян Г.Л. Провалы напряжений и токи при пуске асинхронного двигателя от автономного синхронного генератора // Известия НАН РА и ГИУА. Серия техн. наук - 2000. - Т. 53, № 3.
- 47. **Арешян Г.Л.** Демпфирующий эффект тонкого стального диска: Докл.НАН РА. 1997. -Т.97, № 2.
- Алексеевский В.В. и др. Исследование оптического канала передачи для диагностики роторов крупных электрических машин // Известия АН АрмССР. Серия техн. наук. – 1985. - Т.38, N6. - С.31-36.
- Kazarian E.W. The Programm of Simulation of Converters with Flat Collectors // EuroSun` 96, Freiburg Germani. Abstraktbuch. - P.37-38.
- Давидян Ж.Д. Импульсный пуск синхронных двигателей // Электрические станции. 1998. -№ 10. - С.46-50.
- Кардашян Г.А. Расширение диапазона точного измерения магнитных параметров ферромагнитных материалов // Метрология. - 1997. - №11. – С. 25-30.
- 52. **Кардашян Г.А.** Определение коэрцитивной силы остаточного магнетизма в переменном магнитном поле // Докл. НАН Армении. 1998. Т. 98, №2. С.132-136.
- 53. **Диланян Э.М., Варпетян В.С.** и др. Комбинированная энергетическая установка для электромобиля. A.c 855857, СССР ,1981.
- 54. **Карапетян А.А., Мирзабекян Ж.М.** Расчет и исследование электрического поля кабеля с параллельно расположенными жилами без металлической оболочки // Известия НАН РА и ГИУА. Серия техн. наук. 1998. Т.51, № 2. С.195-202.
- 55. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. К проблеме синтеза пассивного четырехполюсника РА // Известия НАНА РА и ГИУА. Серия техн. наук. – 1999. - Т.52, N23. - С. 340 - 345.
- 56. Арамян М.А. Расчет потенциальных полей и средних параметров дисперсных систем регулярных структур с различными формами включений // Электричество. – 1997. - № 2. -С.64-69.
- 57. Акопян Р.Е., Берберян Г.В. Многоканальная РТС для целей диагностики мощных гидрогенераторов // Матер.Всес. конф. "Разработка, создание и внедрение систем технической диагностики турбогидрогенераторов". - Киев, 1982. - С.24-28.
- Мамиконян Б.М. Особенности построения узкопредельных измерителей температуры с использованием термопреобразователей сопротивления: Доклады НАН РА. – 1999. - №1. -С.56-63.
- 59. **Мамиконян Б.М.** Исследование емкостной измерительной цепи при питании биполярным импульсным напряжением: Доклады НАН РА. 2000. N3. C. 228-236.
- Способ регулирования емкостного датчика давления: Патент РФ N 21799710 от 20.02.2002 / В.Р. Варданян.

- Варданян В.Р. Взрывобезопасные датчики давления по сбору и передаче информации в диспетчерский пункт по радиоканалу // Измерительная техника. – 2002. - № 4.
- 62. Манукян Н.В., Агбалян С.Г., Карапетян Г.Х. и др. Износостойкий антифрикционный порошковый материал на основе железа // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1998. - Т.50, № 1. - С. 154-160.
- Овсепян Г.С. и др. Исследование обрабатываемости металлокерамических материалов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1998. - Т. 50, № 2.
- 64. **Sagatelian E.A., Petrosian A.A.** Character and danger of radiation provoked by Earthquake (December 1988, Spitak Armenia) International. Seminar, Main issues of disaster medicine and importance of moral- psychological factor in major disasters. Collection of Theses.- Yerevan, 1997.
- 65. Сулейманян С.А., Абрамян М.С. О методике подсчета среднего содержания полезных компонентов на Меградзорском золоторудном месторождении // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. техн. наук. 2000. Т.53, № 2. С. 175 180.
- 66. Петросян А.С. Механические свойства титана и его сплавов, полученных порошковой металлургией // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т.56, N1. С. 41-45.
- 67. Агабалян Ю.А. Теория и практика оптимального освоения недр. М.: Недра, 1994. 174 с.
- 68. **Сартсян Л.Е.** и др. Исследование катодных анодов для процессов электрорафинирования меди // Информационные технологии и управление. 2002. № 3. С.120-124.
- 69. Агбалян С.Г. и др. Порошковые композиционные материалы, упрочненные волокнами // Порошковая металлургия. – 2001. - № 11- 12. - С. 66-72.
- 70. **Тер-Азарьев И.А.** Определение рациональных параметров роликовых резцов для резания природного камня // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1996. Т.49, № 2.
- 71. **Джангулян Э.** Оптимальное отношение длины режущего параметра к площади грунтовой стружки // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1999. –Т.52, № 2.
- 72. Марухян К.В., Бурначян Г.А., Марухян В.З. Некоторые особенности эксплуатации НПК энергоблоков 200 МВт Разданской ГРЭС // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1995. Т.48, № 2, С. 97-100.
- 73. Кулоян Л.Т., Мхитарян А.Л. Об оценке энергетической эффективности малых комбинированных установок // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. техн. наук. – 2002. - Т.55, N1. - С. 59-62.
- 74. Хачатрян В.С., Тамразян М.Г. Математическая модель установившегося режима эквивалентированной электроэнергетической ситемы и ее реализация // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1998. - Т. 51, № 1.
- 75. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество. 1991. N 1. С. 6-13.
- Акопян С.Г. Об одном методе расчета потокораспределения установившегося режима электроэнергетической системы // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. - Т.53, №3.- С. 340-346.
- 77. **Геворкян А.А., Оганесян Л.С., Худавердян А.Г.** Эксплуатация реакторной установки АЭС.-Ереван: Мецамор, 2002. – 385 с.
- Григорян Л. и др. Выбор оптимального числа и мощности агрегатов малых ГЭС // Сб. мат. науч. конф. ГИУА. – 1999. - С.96-98.
- 79. Мартиросян В.А., Погосян М.М. и др. Термодинамика процессов восстановления хлоридов водородом // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1998. - Т. 51, №3.
- Panossian J.R. Solar energy research and utilization in Armenia // Proceeding of Symposium 91 " The economic Restructuring of Armenia" Los Angels, 1991. - P. 185-186.
- Паносян Ж.Р., Аракелян А.О., Енгибарян Е.В., Берберян С.Е. Технология изготовления эффективных солнечных фотоэлектрических панелей // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. –1998. - Т.51. - С. 165-170.
- 82. Варданян Р.Р., Клячкин Л.Е., Суханов В.Л. Четный магнитный фотоэффект в фотодиодах // ФТП. - 1990. - Т.24, № 3.

- Vardanyan R.R., Novikov V. Complex Methods for measurement of solar cells physical parameters // Proc. of 13 th European PVSE Conf, Nice, 23-27 oct. 1995.
- 84. Melikyan A., Minassian H., Guerra A., Wu . On the Theory of Relaxations of Electrons Excited by Laser Pulses in Thin Metallic Films // Applied Physics B. 1999.
- Aboyan A., Sarafyan M. X-Ray Interferometric Structural Distortions in Silicon Crystals. Crystal Research and Technology. - 1994. - V 29.
- 86. Sahakyan A. Two-particle correlations in finite low dimensional Hubburd- like lattices // Physica В. 1995.- Р.206-207, Джрбашян М.М., Закарян В.С. Классы и граничные свойства функций, мероформных в круге. – М.: Физмат, 1993.- 224 с. Захарян В.С. Оценка роста для мероморфных функций класса N // Изв.АН Арм. ССР, Математика, 1988. - Т.23, № 2. - С. 189-192.
- Арутюнян В.А. Размерный эффект Штарка и внутризонные переходы в полупроводниковом сферическом слое // Физика твердого тела. – 2003. - Т.45. - С.1280-1284.
- 88. Джрбашян М.М., Захарян В.С. Классы и граничные свойства функций, мероморфных в круге. - М.: Физмат, 1993. – 224с.
- 89. Захарян В.С. Задачи Дирихле и Риммана-Гильберта для эллиптических уравнений в многосвязных областях // Известия НАН РА. Серия Математика.- 2000 Т.35, № 6.
- 90. Tovmasyan N.E. Boundary value problems for partial differential equations and applications in electrodynamics.- World Scientific, 1994.
- Tovmasyan N.E. Non Regular Differential Equations and Calculations of Electromagnetic Fields. World Scientific. - 1998.
- 92. Айрапетян Г.М., Петросян В.Ш. Задача Гильберта для полуплоскости в смысле L<sup>1</sup> сходимости // Известия НАН РА и ГИУА. Серия Математика. 1998. Т. 33, № 5, 1998.
- Возоян Ш.Е. О восстановлении синхронизации логических схем // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 1997 - Т. 50, № 2.
- 94. **Мирзоян В.А.** Об одном классе подмногообразий с параллельной фундаментальной формой высшего порядка // Известия вузов. Математика. 1998. № 6. С. 46-57.
- Аракелян Г.С. Некоторые классы многомерных три-тканей, у которых поверхности одного семейства принадлежат поверхностям другого семейства // Вестник МГУ. – 1981. - № 2. -С.13-17.
- Петросян В.Т., Мелконян М.М., Шагоян А.Г. Прогнозирование и экономическая экспертиза в менеджменты // Материалы Межд. конф. НАН РА, 1999.
- 97. Սարինյան Ռ. Արդի հայ տնտեսագիտության տեսություն // Ճարտարագետ. Երևան 2003. 232 էջ.
- 98. Тунян В.Г. Карабахский конфликт. Ереван, ГИУА, 1999. –100 с.
- 99. Гаспарян Ю.А. Семья и церковь как единая система регуляции народных традиций и обычаев.- С.-П.: Петрополис, 2002. 204 с.
- 100. Թարոյան Կ.Չ. Արևմտյան Հայաստանը, արևմտահայերի սոցիալ քաղաքական վիճակը և ազատագրական պայքարը սուլթանական թուրքիայի բռնապետության դեմ 1978-1908 թթ. -Երևան, Գիտություն, 2001. - 445 էջ։
- 101. Геворкян А.Т. Иносказания Платона. Ереван : Айастан, 1987. 195 с.
- 102. **Միրզաբեկյան Ձ.Մ.** Ակնարկներ հնդկահայ գրականության և մշակույթի պատմության.-Երևան, 2000.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

*Հ*SԴ 539.374

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

#### Գ.Լ.ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Հ.ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Գ.ՀԱՍՐԱԹՅԱՆ

#### ՆՅՈՒԹԻ ԴԵՖՈՐՄԱՅՄԱՆ ԳՐԱՖԻԿԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊՎԱԾ ՄԵԹՈԴ

Բերված է նյութի դեֆորմացման գրաֆիկի աստիձանային ֆունկցիայով մոտարկման գործակիցների որոշման ալգորիթմը՝ հիմք ընդունելով նյութի ձգման գրաֆիկից հեշտությամբ որոշվող՝ վզիկի առաջացման պահին նյութի պայմանական մեխանիկական բնութագրերը։ Թվային հաշվարկները կատարվել են գրականությունից [2] վերցրած նյութերի՝ պողպատ 45-ի և պողպատ 40x-ի տվյալների օգտագործմամբ։ Մոտարկված դեֆորմացման գրաֆիկների և փորձով ստացված իրական գրաֆիկների համեմատությունը ցույց է տալիս վերջիններիս մեծ ձշտությունը միջին և մեծ պլաստիկ դեֆորմացիաների դեպքում։

*Առանցքային բառեր.* լոգարիթմական դեֆորմացիա, իրական լարում, տեխնոլոգիական խնդիրներ։

Պլшимիկության տեսության խնդիրների լուծման համար անհրաժեշտ է ունենալ նյութի ամենակարևոր մեխանիկական բնութագրերից մեկը՝ դեֆորմացման գրաֆիկը։ Դա լարումների ( $\delta$ ) և լոգարիթմական դեֆորմացիաների ( $\varepsilon$ ) ինտենսիվությունների միջև եղած ֆունկցիոնալ կապն է՝  $\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i)$ , որը կախված չէ լարվածային վի*մ*ակի տեսակից։ Քանի որ նմուշի առանցքային ձգման դեպքում մինչև վզիկի առաջանալը  $\sigma_i$ -ն հավասար է իրական լարմանը՝

$$\sigma_i = \sigma_h = F/A \,, \tag{1}$$

իսկ  $\square$ ն նյութի ծավալային լոգարիթմական դեֆորմացիայի բացակայության  $(\overline{e}_0 = 0)$  դեպքում հավասար է առանցքային լոգարիթմական դեֆորմացիային՝

$$\varepsilon_i = \overline{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon), \tag{2}$$

ապա մինչև վզիկի առաջանալը նյութի դեֆորմացման գրաֆիկը համընկնում է նյութի ձգման իրական գրաֆիկի հետ  $(\sigma_i - \overline{\varepsilon})$  [1]: (1) և (2) բանաձևերում *F*-ը նմուշը ձգող ուժն է, *A*-ն՝ նմուշի լայնական հատույթի ընթացիկ մակերեսը, իսկ *D*-ը՝ առանցքային հարաբերական դեֆորմացիան։

Պլաստիկ դեֆորմացիաների դեպքում հաշվարկների պարզեցման համար նյութի դեֆորմացման գրաֆիկը մոտարկում են, այսինքն՝ փոխարկում են պարզ մաթեմատիկական տեսք ունեցող կորերով, որոնք բավականին մեծ ձշտությամբ համընկնում են փորձարարական արդյունքների հետ։ Մասնավորապես, նյութի դեֆորմացման գրաֆիկը մոտարկում են հետևյալ տեսք ունեցող աստիձանային ֆունկցիայով.

$$\sigma_i = \sigma_h = B \varepsilon_i^m, \qquad (3)$$

որտեղ *B*-ն և *m*-ը փորձնական տվյալների մշակման հետևանքով ստացված գործակիցներ են։

Աշխատանքի նպատակն է՝ (3) բանաձևով նյութի դեֆորմացման գրաֆիկի մոտարկումն իրականացնել՝ օգտագործելով գործնականում մեծ կիրառություն ունեցող և նյութի ձգման գրաֆիկից հեշտությամբ որոշվող [2] վզիկի առաջացման պահին նյութի հետևյալ պայմանական մեխանիկական բնութագրերը. առանցքային հարաբերական դեֆորմացիան (Հկզ) և ժամանակավոր դիմադության լարումը (Ժղ)՝

$$\sigma_{\rm dn} = F_{\rm max}/A_0$$
,

որտեղ *F*<sub>max</sub> -ն առավելագույն ձգող ուժն է, *A*<sub>0</sub>-ն` նմուշի լայնական հատույթի սկզբնական մակերեսը, որը, ծավալի անփոփոխ մնալու պայմանի հիման վրա արտահայտվում է լայնական հատույթի ընթացիկ մակերեսով և հարաբերական առանցքային դեֆորմացիայով.

$$A = A_0 / (1 + \varepsilon): \tag{4}$$

*A*-ի արժեքը տեղադրելով (1) բանաձևի մեջ՝ կստանանք.

$$\sigma_{\rm h} = \sigma(1 + \varepsilon), \tag{5}$$

որտեղ  $\sigma = F/A_0$  - ն ընթացիկ պայմանական լարումն է։

(5)-րդ բանաձևը գրենք վզիկի առաջացման պահի համար.

$$\sigma_{\mathfrak{h}(\mathfrak{q}\mathfrak{q})} = \sigma_{\mathfrak{d}\mathfrak{n}} (1 + \mathcal{E}_{\mathfrak{q}\mathfrak{q}}):$$
(6)

Այնուհետև (2) բանաձևով կապ ենք ստեղծում *Ա*վզ-ի և լոգարիթմական դեֆորմացիայի միջև.

$$\overline{\varepsilon}_{uq} = \ln(1 + \varepsilon_{uq})$$

որտեղից

$$1 + \mathcal{E}_{\mathsf{u}\mathsf{q}} = e^{\bar{\mathcal{E}}_{\mathsf{u}\mathsf{q}}} : \tag{7}$$

Վերջինս տեղադրելով (6)-ի մեջ` կստանանք.

$$\sigma_{\mathfrak{h}(\mathfrak{q}\mathfrak{q})} = \sigma_{\mathfrak{d}\mathfrak{q}} e^{\varepsilon_{\mathfrak{q}\mathfrak{q}}} : \tag{8}$$

Այժմ, հաշվի առնելով (1)-ը և (2)-ը, (3) բանաձևը գրենք վզիկի առաջացման կետի համար.

$$\sigma_{\mathrm{h}(\mathrm{l}\mathrm{q})} = B\overline{\varepsilon}_{\mathrm{l}\mathrm{q}}^{m}$$

որի մեջ տեղադրելով (8)-ը՝ կստանանք.

$$\sigma_{d\eta} e^{\overline{\varepsilon}_{lq}} = B \overline{\varepsilon}_{lq}^{m} :$$
(9)

Բաժանելով (3)-ը (9)-ի, կաստանանք.

$$\frac{\sigma_{i}}{\sigma_{\rm dq}e^{\bar{\varepsilon}_{\rm lq}}} = \left(\frac{\varepsilon_{i}}{\bar{\varepsilon}_{\rm lq}}\right)^{m},$$

որտեղից

$$\boldsymbol{\sigma}_{i} = \boldsymbol{\sigma}_{d\eta} e^{\overline{\varepsilon}_{ijq}} \left( \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{i}}{\overline{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ijq}} \right)^{m} :$$
 (10)

Ձևափոխենք (10)-ը հետևյալ տեսքի.

$$\sigma_{i} = \sigma_{d\eta} e^{\overline{\varepsilon}_{lqq}} \overline{\varepsilon}_{lqq}^{-m} \varepsilon_{i}^{m},$$
203

որը, համեմատելով (3)-ի հետ և հաշվի առնելով (7)-ը, կստանանք.

$$B = \sigma_{d\eta} e^{\overline{\varepsilon}_{lq}} \overline{\varepsilon}_{lq}^{-m} = \sigma_{d\eta} (1 + \varepsilon_{lq}) \overline{\varepsilon}_{lq}^{-m}$$
(11)

m-ի որոշման համար օգտվում ենք պայմանական լարումների գրաֆիկի  $\sigma$ *ɛ*(նկ.1), [2] հետևյալ կարևոր առանձնահատկությունից, վզիկի առաջանալու պահին, երբ  $\sigma = \sigma_{\theta\eta}$ , այն ունի առավելագույն արժեք։



Նկ.1. Նյութերի պայմանական լարումների գրաֆիկները

2μωμωμή μρε 
$$\sigma = \sigma_{dq}$$
,  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ : (12)

(5)-ից հետևում է, որ  $\sigma = \frac{\sigma_h}{1+\varepsilon}$ , որը դիֆերենցելով ըստ  $\varepsilon$ -ի և հաշվի առնելով (12)-ը, կունենանք [1]. երբ  $\sigma$  =  $\sigma_{
m dq}$  ,

$$\frac{d\sigma_{\rm h}}{d\varepsilon} = \sigma_{\rm dn} \, (13)$$

(3)-ն ածանցելով ըստ  ${\cal E}$  -ի` կստանանք.

$$\frac{d\sigma_{\mathfrak{h}}}{d\varepsilon} = Bm\varepsilon_i^{m-1}\frac{d\varepsilon_i}{d\varepsilon},\qquad(14)$$

որտեղ, համաձայն (2)-ի,

 $\frac{d\varepsilon_i}{d\varepsilon} = \frac{1}{1+\varepsilon}:$ Վերջինս տեղադրելով (14)-ի մեջ՝ կստանանք.

$$\frac{d\sigma_{\mathsf{h}}}{d\varepsilon} = Bm\varepsilon_i^{m-1}\frac{1}{1+\varepsilon},\tag{15}$$

որը  $\sigma = \sigma_{\rm dq}$  և  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\rm dq}$  կոորդինատներ ունեցող կետի համար կունենա հետևյալ տեսքը.

$$\frac{d\sigma_{\rm h}}{d\varepsilon} = Bm\overline{\varepsilon}_{\rm uq}^{m-1} \frac{1}{1+\varepsilon_{\rm uq}} : \qquad (16)$$

Համատեղ լուծելով (13)-ը, (16)-ը և հաշվի առնելով (11)-ը, կստանանք.

$$m = \overline{\mathcal{E}}_{uq} : \tag{17}$$

(11)-ը և (17)-ը տեղադրելով (3) մեջ և հաշվի առնելով (7)-ը՝ կստանանք.

$$\boldsymbol{\sigma}_{i} = \boldsymbol{\sigma}_{h} = \boldsymbol{\sigma}_{dn} \left( 1 + \boldsymbol{\varepsilon}_{uq} \right) \boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}^{-\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}} \boldsymbol{\varepsilon}_{i}^{\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}} = \boldsymbol{\sigma}_{dn} \boldsymbol{\varepsilon}^{\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}} \left( \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_{i}}{\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}} \right)^{\boldsymbol{\overline{\varepsilon}}_{uq}}$$
(18)

Նշենք, որ նյութի դեֆորմացման գրաֆիկի աստիձանային մոտարկման այս բանաձևը համընկնում է [3]-ում բերված բանաձևի հետ։

Οգտագործելով [2]-ում բերված պողպատ 45-ի (Η<sub>RB</sub>=83) և պողպատ 40X-ի (Η<sub>RB</sub>=95) պայմանական լարումների գրաֆիկները (նկ. 1ա և բ)՝ վերոհիշյալ մեթոդով կատարենք այդ նյութերի դեֆորմացման գրաֆիկների մոտարկում աստիձանային ֆունկցիայով։ Գրաֆիկներից պողպատ 45-ի և պողպատ 40X-ի համար համապատասխանաբար ստանում ենք.  $\epsilon_{lq1}$ =0.13,  $\sigma_{dq1}$ =620 ՄՊա և  $\epsilon_{lq2}$ =0.1,  $\sigma_{dq2}$ =825 ՄՊա: (17) և (2) բանաձներից հետևում է, որ

$$m_1 = \overline{\varepsilon}_{dq1} = \ln(1 + \varepsilon_{dq1}) = \ln 1.13 = 0.125$$
 u  $m_2 = \ln 1.1 = 0.095$ :

$$B_1 = \sigma_{d\eta 1} (1 + \varepsilon_{dq 1}) \overline{\varepsilon}_{dq 1}^{-m} = 620 \cdot 1.13 \cdot 0.125^{-0.125} = 911 \text{ UMu}$$
$$B_2 = 825 \cdot 1.1 \cdot 0.095^{-0.095} = 1137 \text{ UMu}:$$

Աղյուսակ

		Պողս	լատ 45	Պողպատ 40X		
ε	$\overline{\mathcal{E}}$	$\sigma_{h}[2]$	op(19)	$\sigma_{h}[2]$	<i>西</i> 加(20)	
			բասաձս		բասաձս	
0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.0125	0.0124	384.709	530.247	596.644	751.141	
0.0250	0.0247	466.019	574.824	696.085	798.997	
0.0375	0.0368	524.272	605.123	745.805	831.025	
0.0500	0.0488	565.534	625.715	795.525	852.579	
0.0625	0.0606	597.087	643.493	830.329	871.051	
0.0750	0.0723	621.359	657.157	852.704	885.168	
0.0875	0.0839	643.204	668.950	872.592	897.298	
0.1000	0.0953	662.621	680.145	887.508	908.764	
0.1125	0.1066	679.612	689.341	899.938	918.151	
0.1250	0.1178	694.175	698.320	909.882	927.288	
0.1375	0.1288	706.311	705.863	917.340	934.942	
0.1500	0.1398	716.019	713.363	924.798	942.533	
0.1625	0.1506	723.301	720.270	932.256	949.508	
0.1750	0.1613	728.155	726.195	939.714	955.479	
0.1875	0.1719	730.583	732.190	949.658	961.508	
0.2000	0.1823	730.583	737.380	957.116	966.719	

Հետևաբար, պողպատ 45-ի և պողպատ 40X-ի մոտարկված դեֆորմացման գրաֆիկները կունենան հետևյալ տեսքը.

$$\boldsymbol{\sigma}_{i1} = 911 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{i1}^{0.125}, \tag{19}$$

$$\sigma_{i2} = 1137 \cdot \varepsilon_{i2}^{0.095} :$$
 (20)

Աղյուսակում և նկ.2-ում բերված են պողպատ 45-ի և պողպատ 40X-ի փորձնական իրական կորերի  $(\sigma_{\rm h} - \varepsilon)$  [2] և (19), (20) բանաձներով մոտարկված նյութերի դեֆորմացման գրաֆիկների տվյալները։





Աստիձանային ֆունկցիայով մոտարկված նյութերի դեֆորմացման գրաֆիկների համեմատությունը փորձնական ( $\sigma_{\rm p} - \varepsilon$ ) կորերի հետ ցույց է տալիս, որ միջին (մինչև վզիկի առաջանալը) և մեծ (վզիկի առաջանալուց հետո) պլաստիկ դեֆորմացիաների դեպքում տվյալները բավականին մեծ ձշտությամբ համընկնում են։ Հետևաբար, պլաստիկության տեսության տեխնոլոգիական խնդիրներ լուծելիս, երբ նյութը ենթարկվում է միջին և մեծ պլաստիկ դեֆորմացիաների, (19) և (20) բանաձների կիրառումը հնարավորություն կտա հաշվի առնել նյութի իրական հատկությունները և այդպիսով բարձրացնել ստացված արդյունքների ձշտությունը։

Ինչ վերաբերում է փոքր պլաստիկ դեֆորմացիաների դեպքում գրաֆիկների տարբերությանը, դա հոսունության հարթակի գոյության հետևանք է և այդ դեպքում անհրաժեշտ է օգտագործել իրական լարումների գրաֆիկների մոտարկման այլ ձևեր [1]:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Պետրոսյան Գ.Լ. Կիրառական պլաստիկության տեսություն, դասախոսությունների տեքստեր / ՀՊՃՀ. - Երևան, 2002. – 31 էջ։
- 2. Пономарев С.Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. М.: Машгиз, 1958. 974 с.
- Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.06.02։

#### Г.Л. ПЕТРОСЯН, Г.Г. ХАЧАТРЯН, Л.Г. АСРАТЯН МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Приведен алгоритм аппроксимации диаграммы деформирования материала степенной функцией на основе легко определяемых из диаграммы растяжения условных механических характеристик материала при образовании шейки. Численные расчеты выполнены с использованием данных материалов Сталь 45 и 40х, взятых из источника [2]. Сравнение аппроксимированных диаграмм деформирования с действительными диаграммами, полученными опытным путем, показало их высокую точность при средних и больших пластических деформациях.

#### G.L. PETROSSYAN, H.H. KHACHATRYAN, L.G. HASRATYAN MODIFIED METHOD OF MATERIAL STRAIN DIAGRAM PARAMETER DETERMINATION

An algorithm for material strain diagram approximation by a power function based on conditional mechanical properties which are easily determined from the tension diagram at necking is presented. Using the data of steel 45 and 40x the numerical calculations are performed. The comparison of approximated strain diagrams with the real ones obtained experimentally has shown their high precision under average and great plastic deformation.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 621. 81. 002. 22

МАШИНОСТРОЕНИЕ

#### М. Г. СТАКЯН, А. О. ОГАНЕСЯН, А. Р. ДЕМИРХАНЯН

#### СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ДОЛГОВЕЧНОСТЯМ

#### Сообщение 1. Проверка нормальности распределения статистик вариационных рядов долговечностей

Выполнен статистический эксперимент, в котором использованы результаты массовых испытаний на усталость валов из конструкционных сталей. Из общей совокупности данных ( $n_o = 600$ ) по 6 уровням перенапряжений  $\sigma_i$  генерированы 4800 отдельных выборок долговечностей, варьируя их объем в пределах  $n_v = 20...100$  с шагом  $\Delta n_v = 10$  (проведено  $\nu = 8$  серий испытаний, частота генераций u = 100 на каждом уровне  $\sigma_i$  в каждой серии). Произведена комплексная проверка нормальности распределения основных статистик выборок и, в частности, порога чувствительности  $N_{oi}$ . Получены эмпирические функции распределения  $N_{oi}$  для каждого уровня  $\sigma_i$ .

*Ключевые слова:* испытания на усталость, статистический эксперимент, порог чувствительности, логарифмически нормальное распределение.

Известны расчетные и графические процедуры проверки соответствия результатов механических испытаний логарифмически нормальному закону распределения [1, 2]. Совершенствование расчетных методик привело к выявлению отклонений от логарифмически нормального распределения, которые значительны на низких уровнях перенапряжений, в зоне длительного предела выносливости, представляющей практический интерес. Это, в первую очередь, относится к высоконапряженным элементам конструкций и кинематических цепей машин, а также технологического оборудования (валы, зубчатые колеса, подшипники, муфты и др.), для которых важнейшим показателем надежности является обеспечение расчетного срока их службы с заданной вероятностью безотказной работы. На этой основе разработана методика разделения из циклической долговечности валов порога чувствительности N<sub>оі</sub>, до достижения которого практически невозможно развитие усталостных микротрещин [1]. В последних исследованиях [3, 4] предложена трехуровневая оптимизационная процедура для устранения отклонений от нормального закона распределения путем минимизации коэффициентов  $\mathbf{S}_{\mathbf{k}}$  $E_k$ эмпирической функции нормального асимметрии и эксцесса распределения.

Точное определение порога чувствительности N<sub>оі</sub> связано с большими трудностями экспериментального характера – проведением массовых испытаний на

усталость валов с вариацией факторов, влияющих на показатели сопротивления усталости валов. Подобные единичные серии массовых испытаний были проведены еще в 50-70-ые годы прошлого столетия, но и они не охватили весь спектр возможных воздействий и не выявили полные интервалы вероятных значений долговечностей. Между тем, многочисленными исследованиями [5, 6] показана необходимость:

 а) установления закона распределения порога чувствительности N<sub>oi</sub> и его связи с объемом испытаний;

б) изучения изменения статистик величины  $N_{
m oi}$  от действия ряда факторов.

Подобное исследование подразумевает организацию нескольких серий массовых испытаний, которые потребовали бы значительных затрат средств и времени, что на данном этапе нецелесообразно. Решение этой задачи возможно проведением статистического (виртуального) эксперимента, максимально приближенного к реальным условиям работы валов передаточных механизмов.

Для повышения точности и достоверности полученных данных разработана методика статистического эксперимента [7], согласно которой случайный поиск и формирование отдельных выборок производятся из общей совокупности данных, полученных в результате реальных массовых испытаний. Для обеспечения сходимости результатов генерацию отдельных выборок повторяют в несколько десятков раз, и после каждой серии экспериментов определяют основные статистики вариационных рядов.

1. Общая часть. Рассмотрим схему статистического эксперимента (табл. 1), в которой приняты следующие обозначения: уровни перенапряжений  $\sigma_i - i = \overline{1, m}$ , m = 6; объемы общей совокупности данных (циклические долговечности валов) и генерируемых выборок –  $n_o = 100$ ,  $n_1, n_2, n_3, \ldots, n_v, \ldots, n_1$ ,  $v = \overline{1, 1}$ , 1 = 8,  $n_v = 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20$ ; количество повторных выборок на каждом уровне  $\sigma_i - u_i = u = \text{const} = 100$ ,  $k = \overline{1, u}$ .

	аблица	1											
$\boldsymbol{\sigma}_{i}$	$\sigma_1$					•••	$\sigma_{i}$						
u <sub>i</sub>	1	1 $u_i = const = 100$					1		u <sub>i</sub> =	const	=100		
$n_{\nu}$	n <sub>0</sub>	$\mathbf{n}_1$		$n_{\nu}$		$\mathbf{n}_1$		n <sub>0</sub>	$\mathbf{n}_1$		$n_{\nu}$		$\mathbf{n}_1$

			Продолх	кение та	бл. 1					
	$\sigma_{\rm m}$									
 1		$u_i = const = 100$								
 n <sub>0</sub>	<b>n</b> <sub>1</sub>		$n_{\nu}$		n <sub>1</sub>					

При этом количество расчетных процедур таково: на каждом i-ом уровне –  $l \cdot u = 800$ , на всех уровнях –  $m \cdot l \cdot u = 4800$ , с учетом расчетов при  $n_o - m \cdot l \cdot u + m = 4806$ .

Предварительно определяют статистики вариационных рядов и суммарной долговечности  $\sum_{j=1}^{n_o} N_{ij}$  на каждом уровне  $\sigma_i$  для общей совокупности (  $n_o$  =100 ):

$$\overline{\mathbf{x}}_{io} = \sum_{j=1}^{n_o} \mathbf{x}_{ij} / n_o, \quad \mathbf{s}_{io}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n_o} (\mathbf{x}_{ij} - \overline{\mathbf{x}}_{io})^2, \quad \mathbf{v}_{io} = \mathbf{s}_{io} / \overline{\mathbf{x}}_{io}, \quad (1)$$

где  $j = \overline{l, n_o}$ ,  $x_{ij} = lg N_{ij}$ , а  $lg \sum_{j=l}^{n_o} N_{ij}$  обозначают:  $lg \sum N_{io}$ .

							1 40/
i	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{io}}$ ,	$s_{io}^2$ ,	V <sub>io</sub> ,	$\sum_{n_o}^{n_o} N$	$lg \sum N_{io}$	N <sub>oio</sub>	X <sub>oio</sub>
	$\overline{\mathbf{x}}'_{io}$	s'2	$v'_{io}$	$\sum_{j=1}^{j} 1^{j}$			
1	$\overline{\mathrm{X}}_{\mathrm{1o}}$ ,	$s_{10}^2$ ,	V <sub>10</sub> ,		$lg \sum N_{10}$	N <sub>olo</sub>	X <sub>olo</sub>
	$\overline{\mathbf{x}}'_{10}$	$s_{10}^{'2}$	<b>v</b> <sub>10</sub> '	$\sum_{j=1}^{j} IN_{1j}$			
2	$\overline{\mathrm{X}}_{\mathrm{2o}}$ ,	$\mathbf{s}_{2\mathrm{o}}^2$ ,	V <sub>20</sub> ,	$\sum^{n_{o}} N$	$lg \sum N_{2o}$	$N_{o2o}$	X <sub>o2o</sub>
	$\overline{x}'_{2o}$	$s_{20}^{\prime 2}$	$v'_{2o}$	$\sum_{j=1}^{j} 1N_{2j}$			
3	$\overline{\mathbf{X}}_{30}$ ,	$s_{3o}^{2}$ ,	V <sub>30</sub> ,	$\sum^{n_o} N$	$lg \sum N_{3o}$	N <sub>o3o</sub>	X <sub>o3o</sub>
	$\overline{\mathbf{x}}'_{3o}$	s'2 <sub>30</sub>	v' <sub>30</sub>	$\sum_{j=1}^{1} {}^{1} {}^{3} {}^{j}$			
÷	÷	:	:	:	:	:	÷
i	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{io}}$ ,	$\mathbf{s}_{\mathrm{io}}^2$ ,	V <sub>io</sub> ,	$\sum^{n_o} N$	$lg \sum N_{io}$	N <sub>oio</sub>	X <sub>oio</sub>
	$\overline{\mathbf{x}}'_{io}$	$s_{io}^{\prime 2}$	$v'_{io}$	$\sum_{j=1}^{1} \mathbf{v}_{ij}$			
÷	:		:	:	:	:	÷
m	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{mo}}$ ,	$\mathbf{s}_{\mathrm{mo}}^{2}$ ,	$\boldsymbol{v}_{mo}$ ,	$\sum^{n_o} N$	$lg \sum N_{mo}$	N <sub>omo</sub>	X <sub>omo</sub>
	$\overline{\mathbf{x}}'_{\mathrm{mo}}$	$s'_{mo}^2$	v' <sub>mo</sub>	$\sum_{j=1}^{n} m_j$			

Таблица 2

Согласно методике [8] определяют порог чувствительности  $N_{oio}$  на каждом уровне  $\sigma_i$  при  $n_o = 100$ :  $x_{oio} = lg N_{oio}$ , затем составляют новые вариационные ряды с вычетом  $N_{oio}$ :  $x'_{ij} = lg N'_{ij} = lg (N_{ij} - N_{oio})$  и аналогично (1) определяют статистики новых рядов:  $\overline{x}'_{io}$ ,  $s'_{io}^2$ ,  $v'_{io}$ .

На данном этапе расчетов составляют исходную таблицу статистик при  $\rm n_{_{\rm O}}=100$ , которая является исходной (табл. 2).

2. Статистические расчеты на і -ом уровне перенапряжений  $\sigma_i$ . Согласно [7] производят генерацию отдельной выборки объемом  $n_v$ , составляют вариационный ряд, аналогично (1) определяют основные статистики, суммарную долговечность и порог чувствительности  $N_{oik}$ , производят модификацию этого ряда с учетом  $N_{oik}$  и рассчитывают новые статистики:

$$\overline{\mathbf{x}}_{ik} = \sum_{j=1}^{n_{\nu}} \mathbf{x}_{kj} / n_{\nu}, \quad s_{ik}^{2} = \frac{1}{n_{\nu} - 1} \sum_{j=1}^{n_{\nu}} (\mathbf{x}_{kj} - \overline{\mathbf{x}}_{ik})^{2}, \quad \mathbf{v}_{ik} = s_{ik} / \overline{\mathbf{x}}_{ik},$$

$$\overline{\mathbf{x}}_{ik}' = \sum_{j=1}^{n_{\nu}} \mathbf{x}_{kj}' / n_{\nu}, \quad s_{ik}'^{2} = \frac{1}{n_{\nu} - 1} \sum_{j=1}^{n_{\nu}} (\mathbf{x}_{kj}' - \overline{\mathbf{x}}_{ik}')^{2}, \quad \mathbf{v}_{ik}' = s_{ik}' / \overline{\mathbf{x}}_{ik}',$$
(2)

где  $\mathbf{x}_{kj} = \lg \mathbf{N}_{kj} - \mathbf{j}$ -й член вариационного ряда,  $\mathbf{j} = \overline{\mathbf{1}, \mathbf{n}_{v}}$ ,  $\mathbf{k} = \overline{\mathbf{1}, \mathbf{u}}$ , a  $\lg \sum_{j=1}^{n_{v}} \mathbf{N}_{kj}$ 

обозначают:  $\lg \sum N_{_{ik}}$  .

Повторяют расчетные процедуры u раз и определяют обобщенные статистики для всех вариационных рядов выборки  $\mathbf{n}_{\mathrm{v}}$  :

а) для генерированных рядов –

$$\begin{split} \overline{\mathbf{x}}_{i\nu} &= \sum_{k=1}^{u} \overline{\mathbf{x}}_{ik} / \mathbf{u} , \quad \mathbf{s}_{xi\nu}^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\overline{\mathbf{x}}_{ik} - \overline{\mathbf{x}}_{i\nu})^{2} , \quad \mathbf{v}_{xi\nu} = \mathbf{s}_{xi\nu} / \overline{\mathbf{x}}_{i\nu} ,\\ \mathbf{s}_{i\nu}^{2} &= \sum_{k=1}^{u} \mathbf{s}_{ik}^{2} / \mathbf{u} , \quad \mathbf{s}_{s_{i\nu}^{2}}^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\mathbf{s}_{ik}^{2} - \mathbf{s}_{i\nu}^{2})^{2} , \quad \mathbf{v}_{s_{i\nu}^{2}}^{2} = \mathbf{s}_{s_{i\nu}^{2}} / \mathbf{s}_{i\nu}^{2} ,\\ \mathbf{v}_{i\nu} &= \sum_{k=1}^{u} \mathbf{v}_{ik} / \mathbf{u} , \quad \mathbf{s}_{vi\nu}^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\mathbf{v}_{ik} - \mathbf{v}_{i\nu})^{2} , \quad \mathbf{v}_{vi\nu} = \mathbf{s}_{vi\nu} / \mathbf{v}_{i\nu} , \quad (3) \\ \mathrm{lg} \sum \mathbf{N}_{i\nu} &= \sum_{k=1}^{u} \mathrm{lg} \sum \mathbf{N}_{ik} / \mathbf{u} , \quad \mathbf{s}_{\mathrm{lg} \Sigma N_{i\nu}}^{2} = \frac{1}{u-1} (\mathrm{lg} \sum \mathbf{N}_{ik} - \mathrm{lg} \sum \mathbf{N}_{i\nu})^{2} , \\ \mathbf{v}_{\mathrm{lg} \Sigma N_{i\nu}} &= \mathbf{s}_{\mathrm{lg} \Sigma N_{i\nu}} / \mathrm{lg} \sum \mathbf{N}_{i\nu} ; \end{split}$$

б) то же, с учетом порога чувствительности –

$$\begin{split} \overline{x}_{iv}' &= \sum_{k=1}^{u} \overline{x}_{ik}' / u, \qquad s_{xiv}'^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\overline{x}_{ik}' - \overline{x}_{iv}')^{2}, \qquad v_{xiv}' = s_{xiv}' / \overline{x}_{iv}', \\ s_{iv}'^{2} &= \sum_{k=1}^{u} s_{ik}'^{2} / u, \qquad s_{siv}'^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (s_{ik}'^{2} - s_{iv}'^{2})^{2}, \qquad v_{siv}' = s_{siv}' / s_{iv}', \\ v_{iv}' &= \sum_{k=1}^{u} v_{ik}' / u, \qquad s_{viv}'^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (v_{ik}' - v_{iv}')^{2}, \qquad v_{viv}' = s_{viv}' / v_{iv}', \\ \overline{x}_{oiv} &= \sum_{k=1}^{u} x_{oik} / u, \qquad s_{xoiv}^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (x_{oik} - \overline{x}_{oiv})^{2}, \qquad v_{xoiv}' = s_{xoiv} / \overline{x}_{oiv}. \end{split}$$

По результатам расчетов (3) и (4) составляют статистическую таблицу (табл.

3).

Таблица З

k	Вариационные ряды X <sub>kj</sub>	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{ik}}$ ,	$s_{ik}^2$ ,	V <sub>ik</sub> ,	$lg \sum N_{ik}$	$\log^{n_{v}} N_{\cdots}$	X <sub>oik</sub>
	и $x'_{kj}$ , $j = \overline{1, n_v}$ , $k = \overline{1, u}$	$\overline{\mathbf{x}}'_{ik}$	$s_{ik}^{\prime 2}$	$v'_{ik}$		$\sum_{j=1}^{1} \sum_{k_j}$	
1	$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1j}, \dots, x_{1nv}$ , $x'_{11}, x'_{12}, \dots, x'_{1i}, \dots, x'_{1nv}$	$\overline{x}_{i1}$ , $\overline{x}'_{i1}$	$s_{i1}^2$ , $s_{i1}'^2$	$v_{i1}$ , $v_{i1}'$	$lg \sum N_{i1}$	$lg\sum_{j=1}^{n_\nu}N_{1j}$	X <sub>oi1</sub>
2	$\mathbf{x}_{21}, \mathbf{x}_{22}, \dots, \mathbf{x}_{2j}, \dots, \mathbf{x}_{2nv}$ $\mathbf{x}_{21}', \mathbf{x}_{22}', \dots, \mathbf{x}_{2j}', \dots, \mathbf{x}_{2nv}'$	$\overline{\mathbf{X}}_{i2}$ , $\overline{\mathbf{X}}'_{i2}$	$s_{i2}^2$ , $s_{i2}'^2$	V <sub>i2</sub> , V <sub>i2</sub>	$lg \sum N_{i2}$	$lg\sum_{j=1}^{n_{\nu}}N_{2j}$	x <sub>oi2</sub>
3	$x_{31}, x_{33}, \dots, x_{3j}, \dots, x_{3nv}$	$\overline{\mathbf{X}}_{i3}$ , $\overline{\mathbf{X}}'_{i2}$	$s_{i3}^2$ , $s_{i2}^{\prime 2}$	V <sub>i3</sub> , V <sub>i2</sub>	$lg \sum N_{i3}$	$lg\sum_{j=1}^{n_{\nu}}N_{3j}$	x <sub>oi3</sub>
: k	$X_{31}, X_{32}, \dots, X_{3j}, \dots, X_{3nv}$ : $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{3nv}$	:	:	:	$\frac{1}{2}$ N	: 	: x .,
	$\mathbf{x}_{k1}^{'}, \mathbf{x}_{k2}^{'}, \dots, \mathbf{x}_{kj}^{'}, \dots, \mathbf{x}_{knv}^{'}$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{ik}}$ , $\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{ik}}^{\prime}$	${s_{ik}^2}$ , ${s_{ik}'^2}$	$v_{ik}$ , $v_{ik}^{\prime}$	is it is	$lg\sum_{j=1}N_{kj}$	OIK
: u	: x <sub>u1</sub> , x <sub>u2</sub> ,, x <sub>uj</sub> ,, x <sub>unv</sub>	:	:	•	$\frac{1}{\log \sum N_{in}}$	$\frac{1}{2}$	: X <sub>oiu</sub>
	$x'_{u1}, x'_{u2}, \dots, x'_{uj}, \dots, x'_{unv}$	$\overline{\mathrm{x}}_{\mathrm{iu}}$ , $\overline{\mathrm{x}}'_{\mathrm{iu}}$	$s_{iu}^2$ , $s_{iu}'^2$	$v_{iu}$ , $v_{iu}'$	- <u> </u>	$\lim_{j=1} N_{uj}$	

ценные параметры	средние	$\overline{x}_{i\nu}$ , $\overline{x}'_{i\nu}$	$s_{iv}^2$ , $s_{iv}^{\prime 2}$	$v_{i\nu}$ , $v'_{i\nu}$	$lg \sum N_{iv}$	x̄ <sub>οiν</sub>
	дисперсии	$s_{xiv}^2$ , $s_{xiv}'^2$	$s_{s_{iv}^{2}}^{2}$ , $s_{s_{iv}^{2}}^{\prime 2}$	$s_{viv}^2$ , $s_{viv}^{\prime 2}$	$s^2_{lg\sum N_{i\nu}}$	s <sup>2</sup> <sub>xoiv</sub>
0606	коэффициенты вариации	$v_{xiv}$ , $v'_{xiv}$	$v_{s_{iv}^2}, v_{s_{iv}^2}$	V <sub>viv</sub> , V' <sub>viv</sub>	$V_{lg\sum N_{iv}}$	V <sub>xoiv</sub>

Производят однофакторный дисперсионный анализ вариационных рядов. Для этого проверяют однородность дисперсий  $s_{ik}^2$  и  $s_{ik}'^2$  по критерию Кочрена ( $n_1 = n_2 = n_3 = ... = n_k = ... = n_u = n_v$ ):

$$G_{\max} = s_{ik\max}^2 / \sum_{k=1}^{u} s_{ik}^2 \le G_{\max,\alpha}, \quad G_{\max} = s_{ik\max}^{\prime 2} / \sum_{k=1}^{u} s_{ik}^{\prime 2} \le G_{\max,\alpha}, \quad (5)$$

где  $\,G_{_{max,\alpha}}\,$  – критическое значение  $\,G_{_{max}}\,$  при  $\,\alpha=0,05$  ,  $\,k=n_{_{\rm V}}-1$  .

Если  $G_{\max} \leq G_{\max,\alpha}$ , то  $s_{ik}^2$  и  $s_{ik}'^2$  осредняют и определяют обобщенные дисперсии  $s_{iv}^2$  и  $s_{iv}'^2$ . Определяют дисперсии между вариационными рядами и внутри рядов (остаточную):

$$s_{I}^{2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\overline{x}_{ik} - \overline{x}_{iv})^{2}, \qquad s_{I}^{\prime 2} = \frac{1}{u-1} \sum_{k=1}^{u} (\overline{x}_{ik}^{\prime} - \overline{x}_{iv}^{\prime})^{2},$$

$$s_{II}^{2} = \frac{1}{u(n_{v}-1)} \sum_{k=1}^{u} \sum_{j=1}^{n_{v}} (x_{kj} - \overline{x}_{ik})^{2}, \quad s_{II}^{\prime 2} = \frac{1}{u(n_{v}-1)} \sum_{k=1}^{u} \sum_{j=1}^{n_{v}} (x_{kj}^{\prime} - \overline{x}_{ik}^{\prime})^{2}.$$
(6)

Проверяют гипотезу однородности выборочных средних  $\overline{x}_{ik}$  и  $\overline{x}'_{ik}$  по критерию Фишера – F :

$$\begin{split} F &= s_{I}^{2} / s_{II}^{2} \leq F_{I-\alpha} \,, \quad F = s_{I}^{\prime 2} / s_{II}^{\prime 2} \leq F_{I-\alpha} \,, \end{split} \tag{7}$$
где  $F_{I-\alpha}$  – критическое значение  $F$  при  $\alpha = 0,05$  ,  $k_{1} = u - 1$  ,  $k_{2} = u \big( n_{v} - 1 \big).$ 

Если  $F \leq F_{1-\alpha}$ , принимают гипотезу однородности и определяют обобщенные дисперсии:

$$s_{\nu}^{2} = \frac{1}{un_{\nu} - 1} \sum_{k=1}^{u} \sum_{j=1}^{n_{\nu}} \left( x_{kj} - \overline{x}_{i\nu} \right)^{2}, \quad s_{\nu}^{\prime 2} = \frac{1}{un_{\nu} - 1} \sum_{k=1}^{u} \sum_{j=1}^{n_{\nu}} \left( x_{kj}^{\prime} - \overline{x}_{i\nu}^{\prime} \right)^{2}, \quad (8)$$

которые используют для расчета доверительных границ генеральных средних  $a_v$ ,  $a_v'$  и генеральных дисперсий  $\sigma_v^2$ ,  $\sigma_v'^2$ :

$$\overline{x}_{i\nu} - \frac{s_{\nu}t_{\alpha,k}}{\sqrt{un_{\nu}}} < a_{\nu} < \overline{x}_{i\nu} + \frac{s_{\nu}t_{\alpha,k}}{\sqrt{un_{\nu}}}, \quad \frac{s_{\nu}^{2}(un_{\nu}-1)}{\chi_{P_{1}}^{2}} < \sigma_{\nu}^{2} < \frac{s_{\nu}^{2}(un_{\nu}-1)}{\chi_{P_{2}}^{2}}, \\ \overline{x}_{i\nu}' - \frac{s_{\nu}'t_{\alpha,k}}{\sqrt{un_{\nu}}} < a_{\nu}' < \overline{x}_{i\nu}' + \frac{s_{\nu}'t_{\alpha,k}}{\sqrt{un_{\nu}}}, \quad \frac{s_{\nu}'^{2}(un_{\nu}-1)}{\chi_{P_{1}}^{2}} < \sigma_{\nu}'^{2} < \frac{s_{\nu}'^{2}(un_{\nu}-1)}{\chi_{P_{2}}^{2}},$$

$$(9)$$

где  $t_{\alpha,k}$  – квантиль распределения Стьюдента при  $\alpha$  = 0,05 , k =  $un_{\nu}$  –1;  $\chi^2_{P_1}$  ,  $\chi^2_{P_2}$  – квантили распределения Пирсона при  $P_1$  = 0,05 ,  $P_2$  = 0,95 , k =  $un_{\nu}$  –1.

3. Проверка "нулевой" гипотезы соответствия нормальному распределению статистик вариационных рядов. Составляют вариационные ряды  $\overline{x}_{ik}$ ,  $s_{ik}^2$ ,  $v_{ik}$ ,  $\lg \sum N_{ik}$  и  $\overline{x}'_{ik}$ ,  $s_{ik}'^2$ ,  $v'_{ik}$ ,  $x_{0ik}$  и выполняют комплексную проверку "нулевой" гипотезы их нормальности распределения по критериям согласия  $\lambda$ ,  $\chi^2$ ,  $\omega^2$  [3].

Если "нулевая" гипотеза подтверждается, рассчитывают параметры уравнения медианной функции распределения и ее доверительных границ:

$$X_{Pi\nu} = \overline{X}_{i\nu} + z_P s_{Xi\nu}, \quad X_{Pi\nu}^{(B, H)} = \overline{X}_{i\nu} \pm \frac{t_\beta s_{Xi\nu}}{\sqrt{n}}$$

где приняты обозначения:  $\overline{X}_{i\nu} = \overline{x}_{i\nu}, s_{i\nu}^2, v_{i\nu}, lg \sum N_{i\nu}$  и  $\overline{x}'_{i\nu}, s_{i\nu}'^2, v'_{i\nu}, \overline{x}_{0i\nu};$  $s_{Xi\nu} = s_{xi\nu}, s_{s_{i\nu}^2}^2, s_{\nui\nu}, s_{lg \sum N_{i\nu}}$  и  $s'_{xi\nu}, s'_{s_{i\nu}^2}, s'_{\nui\nu}, s_{0i\nu};$   $Z_P$  – квантиль нормального распределения:  $t_{\beta}$  – квантиль уровня  $\beta$  нецентрального распределения Стьюдента [6].

Расчетные процедуры дополняют графической проверкой нормальности распределения [3].

Указанные расчетные и графические процедуры повторяют для каждой из выборок  $n_1, n_2, n_3, \ldots, n_\nu, \ldots, n_1, \nu = \overline{1,1}$  на данном уровне  $\sigma_i$  без учета и с учетом порога чувствительности  $N_{oik}$ .

В результате статистического эксперимента составляют сводную таблицу расчетов для данного уровня  $\sigma_i$ ,  $\nu = \overline{1,1}$  (табл. 4).

#### Таблица 4

ν	n.,	Выборочные средние			В	выборочн	ые	Выборочные			
	v				дисперсии			коэффициенты			
								1	вариации	1	
		$\overline{x}_{i\nu}$ ,	$s_{xi u}^2$ ,	$v_{xiv}$ ,	$s_{i\nu}^2$ ,	$s_{s^2iv}^2$ ,	$V_{s^2i\vartheta}$ ,	$\boldsymbol{v}_{i\nu}$ ,	$s_{vi\nu}^2$ ,	$\boldsymbol{v}_{viv}$ ,	
		$\overline{\mathbf{x}}'_{i\nu}$	$s'^2_{xi\nu}$	$v'_{xiv}$	$s'^2_{i\nu}$	$s_{s^2iv}^{\prime 2}$	$v'_{s^2i\nu}$	$v'_{i\nu}$	$s'^2_{viv}$	$v'_{viv}$	
1	$\mathbf{n}_1$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{i1}}$ ,	$s_{xi1}^2$ ,	V <sub>xi1</sub> ,	$\mathbf{s}_{\mathrm{i1}}^2$ ,	$s_{s^2i1}^2$ ,	V <sub>s<sup>2</sup>i1</sub> ,	$\mathbf{v}_{\mathrm{i1}}$ ,	$s_{vi1}^2$ ,	$v_{vi1}$ ,	
		$\overline{\mathbf{x}}'_{i1}$	$s_{xi1}^{\prime 2}$	$v'_{xi1}$	$s'^{2}_{i1}$	$s'^{2}_{s^{2}i1}$	v'_{s^{2}i1}	$\mathbf{v}'_{i1}$	$s_{vi1}^{\prime 2}$	$v'_{vi1}$	
2	$n_2$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{i}2}$ ,	$s_{xi2}^2$ ,	$v_{xi2}$ ,	$s_{i2}^2$ ,	$s_{s^2i2}^2$ ,	$V_{s^2i2}$ ,	$\mathbf{v}_{i2}$ ,	$s_{vi2}^2$ ,	$v_{vi2}$ ,	
		$\overline{x}'_{i2}$	$s_{xi2}^{\prime 2}$	v' <sub>xi2</sub>	$s_{i2}^{\prime 2}$	$s_{s^2i2}^{\prime 2}$	v'_{s^{2}i2}	$v'_{i2}$	$s_{vi2}^{\prime 2}$	$v'_{vi2}$	
3	$n_3$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathbf{i}3}$ ,	$s_{xi3}^2$ ,	$v_{xi3}$ ,	$s_{i3}^2$ ,	$s_{s^2i3}^2$ ,	V <sub>s<sup>2</sup>i3</sub> ,	$\mathbf{v}_{\mathrm{i3}}$ ,	$s_{\rm vi3}^2$ ,	$v_{vi3}$ ,	
		$\overline{x}'_{i3}$	$s_{xi3}^{\prime 2}$	v' <sub>xi3</sub>	s' <sup>2</sup> <sub>i3</sub>	$s_{s^2i3}^{\prime 2}$	v'_{s^{2}i3}	<b>v</b> ' <sub>i3</sub>	$s_{vi3}^{\prime 2}$	v' <sub>vi3</sub>	
:	÷	÷	:	÷	:	÷	÷	:	÷	÷	
ν	$n_{\nu}$	$\overline{x}_{i\nu}$ ,	$s_{xiv}^2$ ,	$\boldsymbol{v}_{xi\nu}$ ,	$s_{i\nu}^2$ ,	$s^2_{s^2i\nu}$ ,	$V_{s^2i\vartheta}$ ,	$v_{i\nu}$ ,	$s_{vi\nu}^2$ ,	$\boldsymbol{v}_{vi\nu}$ ,	
		$\overline{x}'_{i\nu}$	$s'^2_{xiv}$	v' <sub>xiv</sub>	$s'^2_{iv}$	$s_{s^2iv}^{\prime 2}$	v' <sub>s<sup>2</sup>iv</sub>	$v'_{iv}$	$s'^2_{viv}$	$v'_{viv}$	
:	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	
1	n <sub>1</sub>	$\overline{x}_{il}$ ,	$\mathbf{s}_{\mathrm{xil}}^2$ ,	V <sub>xil</sub> ,	$\mathbf{s}_{\mathrm{il}}^2$ ,	$s_{s^2il}^2$ ,	$v_{s^2il}$ ,	V <sub>il</sub> ,	$s_{vil}^2$ ,	$\mathbf{v}_{\mathrm{vil}}$ ,	
		$\overline{\mathbf{x}}'_{\mathrm{il}}$	$s_{xil}^{\prime 2}$	$v'_{xil}$	$s_{il}^{\prime 2}$	$s_{s^2il}^{\prime 2}$	$v'_{s^2il}$	$v'_{il}$	$s'^2_{vil}$	$v'_{vil}$	

					Пр	одолжение <u>т</u> абл. 4		
ν	Суммари	ные долговеч	ности	Пороги чувствительности				
	$lg \sum N_{iv}$	$s^2_{lg \sum N_{i\nu}}$	$v_{lg \sum N_{i\nu}}$	$\overline{\mathbf{X}}_{oiv}$	$s_{xoiv}^2$	V <sub>xoiv</sub>		
1	$lg \sum N_{i1}$	$s^2_{lg \sum N_{il}}$	$v_{lg \sum N_{i1}}$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{oil}}$	s <sup>2</sup> <sub>xoi1</sub>	V <sub>xoi1</sub>		
2	$lg \sum N_{i2}$	$s^2_{lg \sum N_{i2}}$	$v_{lg \sum N_{i2}}$	$\overline{\mathbf{x}}_{\mathrm{oi2}}$	$s_{xoi2}^2$	V <sub>xoi2</sub>		
3	$lg \sum N_{i3}$	$s^2_{lg \sum N_{i3}}$	$v_{\lg \sum N_{i3}}$	$\overline{\mathbf{X}}_{\mathrm{oi3}}$	$s^2_{xoi3}$	V <sub>xoi3</sub>		
: v	$\frac{1}{\log \sum N_{iv}}$	$\vdots \\ s^2_{lg \sum N_{iv}}$	: V <sub>lg∑Niv</sub>	: Ta <sub>oiv</sub>	: s <sup>2</sup> <sub>xoiv</sub>	: V <sub>xoiv</sub>		
: 1	$\frac{1}{2}$ lg $\sum N_{il}$	$: s_{\lg \sum N_{il}}^2$	: $v_{lg \sum N_{il}}$	: Ta <sub>oil</sub>	$\frac{1}{s_{xoil}^2}$	: V <sub>xoil</sub>		

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Когаев В.П., Махутов М.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справ. – М.: Машиностр., 1985. -223 с.
- Стакян М.Г., Оганесян Л.Г., Манукян Г.А. Комплексная программа проверки нормальности распределения по критериям согласия // Алгоритмы и программы: Инф. бюл. ВНИТИЦентр, ГФАП СССР, ЦИФ. – 1989. -No2.- С. 15.
- Стакян М.Г., Демирханян А.Р. Модифицированный метод проверки нормальности распределения результатов механических испытаний // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. – Т.53. – No3. – С. 271-280.
- Стакян М.Г., Демирханян А.Р. Применение преобразующих функций для приведения результатов механических испытаний нормальному закону распределения // Сб. н.-т. ст.: Информационные технологии и управление. – Ереван, 2000. – Т.1. – С. 89-94.
- 5. **Серенсен С.В.** Усталость материалов и элементов конструкций: Избр. тр., в 3-х т. Киев: Наук. думка, 1985: Т.1. 256 с.; Т.2. 256 с.; Т.3. 232 с.
- Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справ. М.: Машиностр., 1985. – 232 с.
- Стакян М.Г., Демирханян А.Р., Согомонян А.А. Постановка оптимальных испытаний на усталость. Сообщ. 1. Расчетная методика и алгоритм статистического эксперимента // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2002. – Т.55, No1. – С. 5-10.
- Հովհաննիսյան Ա.Հ. Հոգնածային կորի հավասարումը "զգայության շեմի" հաշվառմամբ // Հոդվ. ժող. "Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ և կառավարում". – Երևան, 2002. – Հ.5. – Էջ. 101-107.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.01.2002.

#### Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Հ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա. Ռ. ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ ՋԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՇԵՄԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԸՍՏ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ Հաղորդում 1. Երկարակեցությունների փոփոխակային շարքերի վիձակագրերի նորմալ բաշխման ստուգումը

հրականացված է վիճակագրական փորձարկում, որում օգտագործվել են կառուցվածքային պողպատներից պատրաստված լիսեռների զանգվածային հոգնածային փորձարկումների արդյունքները։ Տվյալների ընդհանուր համախմբից ( $n_o = 600$ ), ըստ  $\sigma_i$  գերլարումների 6 մակարդակների, ստեղծվել են երկարակեցությունների 4800 առանձին ընտրանքներ, որոնց ծավալները փոխվել են  $n_v = 20...100$ -ի սահմաններում՝  $\Delta n_v = 10$  քայլով (կատարված են  $\nu = 8$  փորձարկման խմբաքանակներ, յուրաքանչյուր խմբաքանակում և գերլարումների մակարդակով ընտրանքների ստեղծման համախությունը 100 է)։ Կատարված է ընտրանքների վիճակագրերի, մասնավորապես,  $N_{oi}$  զգայնության շեմի նորմալ բաշխման համալիր ստուգում, ստացվել են  $N_{oi}$ -ի փորձառական բաշխման ֆունկցիաները։

#### M. G. STAKYAN, A. H. HOVHANNISYAN, A. R. DEMIRKHANYAN STATISTICAL INVESTIGATION OF THRESHOLD SENSITIVITY DUE TO DURABILITY

## Information 1. Normal distribution testing of variational series for durability statics

A statistical experiment using the results of mass fatigue experiments of shafts, made of constructional steels is performed. From the general totality of data ( $n_{\rm o}=600$ ), due to the 6 levels of  $\sigma_i$  overstresses, 4800 separate samples of durability varying their scope within the limits of  $n_{\nu}=20\ldots 100$  at a walk  $\Delta n_{\nu}=10$  ( $\nu=8$  testing series are created, generation frequency u=100 on each level of  $\sigma_i$  in each series) are developed. Integrated testing of normal distribution of basic statistics and, in particular, threshold sensitivity  $N_{oi}$  is carried out. Empirical functions of distribution  $N_{oi}$  are obtained for each level of  $\sigma_i$ .
# ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

ረSጉ 691.870.001.24

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

# **Է.Հ. ՋՀԱՆԳՈՒԼՅԱՆ**

# ԷՔՄԿԱՎԱՏՈՐԻ ՀԵՆԱՀԱՐԹԱԿԻ ՊՏՏՄԱՆ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԱԳՈՒՅՆ (Tmin) ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ընդհանրացված են հետազոտությունների արդյունքում բացահայտված որոշակի վերլուծական և փորձառական օրինաչափություններ, որոնք հնարավորություն են ընձեռում հաշվարկելու պարբերական գործողության էքսկավատորի աշխատանքային ցիկլի տևողության նվազագույն արժեքը, ինչը հանգեցնում է արտադրողականության բարձրացմանը։

**Առանցքային բառեր**. թափառք, իներցիա, ստատիկ դիմադրություն, համաչափ ցիկլ։

Ինչպես հայտնի է, պարբերական գործողության էքսկավատորների աշխատանքային ցիկլի ընդհանուր տևողության 65...70%-ը կազմում են պտտական շարժումները, ուստի դրանց ձշգրիտ որոշումը կարևոր նշանակություն ունի էքսկավատորի հաշվարկի համար։ Էքսկավատորի պտույտի լրիվ ցիկլը բաղկացած է երկու հիմնական պտտական շարժումներից՝ ա) լիքը շերեփի պտույտից՝ բեռնաթափման նպատակով, բ) դատարկ շերեփի հետադարձ պտույտից՝ նորից լցնելու համար։

Պտտական շարժման լրիվ ցիկլը՝

$$T = t_1 + t_2 = t_1 + t_1 + t_1 + t_1 + t_2 + t_2 + t_2 + t_2 + t_2 + t_1 + t_2 +$$

որտեղ էւ-ը լիքը շերեփի պտույտի տևողությունն է, էշ-ը՝ դատարկ շերեփի պտույտի տևողությունը, է՛ւ-ը և է՛շ-ը՝ լիքը և դատարկ շերեփների համապատասխան պտույտների տևողությունը թափառքի ընթացքում, է՞ւ-ը և է՞շ-ը՝ լիքը և դատարկ շերեփների համապատասխան պտույտների տևողությունը հավասարաչափ շարժման ընթացքում, է՞՛ւ-ը և է՞՛շ-ը՝ լիքը և դատարկ շերեփների համապատասխան պտույտների տևողությունը արգելակման ընթացքում։

Քանի որ բոլոր տարրերն առանձին-առանձին անկյունային ( $\omega$ ) արագության ֆունկցիա են, ուստի լրիվ պտույտի տևողությունը նույնպես կլինի անկյունային արագության ֆունկցիա

$$T = F(\boldsymbol{\omega}): \tag{1}$$

Ակնհայտ է, որ թե լիքը, թե դատարկ շերեփների պտույտները ըստ շարժման բնույթի բաղկացած են միատեսակ տարրերից՝ թափառքից, հավասարաչափ (կայունացված) շարժումից և արգելակումից։

Քննարկենք յուրաքանչյուր տարրին բնորոշ դիմադրությունների մոմենտները։

*Թափառք։* Շարժումն ապահովվում է շարժիչով, որը հաղթահարում է № ստատիկ և M₁ իներցիոն դիմադրությունների մոմենտները՝

$$M' = M_0 + M_1$$
: (2)

*Հավասարաչափ շարժում։* Շարժիչը հաղթահարում է միայն M<sub>0</sub> ստատիկ դիմադրությունների մոմենտը՝

$$\mathbf{M}^{"}=\mathbf{M}_{0}: \tag{3}$$

*Դանդաղեցում*։ Ապահովվում է ոչ թե շարժիչով, այլ էքսկավատորի պտտվող մասի զանգվածների իներցիայով, որը հաղթահարում է M₀ ստատիկ դիմադրության մոմենտը՝

$$M^{"'} = M_0 + M_2$$
: (4)

Մտատիկ դիմադրության M<sub>0</sub> մոմենտն ընդգրկում է հետևյալ դիմադրությունները. հենարանային պտտվող մասերի շփում, օդի և քամու ազդեցություն և, որ պակաս կարևոր չէ, պտտման առանցքի ոչ ուղղաձիգություն։ Հենարանային պտտվող գլանվակների գլորման դիմադրության M<sub>0</sub>՝ մոմենտը՝

$$M_{0} = 0.01 \frac{QR}{D} (d_{0}\mu + 2f_{0}), \ u.u.,$$
(5)

որտեղ Q-ն հենարանային շրջանակի վրա ազդող բեռնվածքն է, D-ն՝ գլանվակի արտաքին տրամագիծը, do-ն՝ գլանվակի լիսեռիկի տրամագիծը,  $\mu$ -ն՝ գլանվակի վռանի և լիսեռիկի միջև եղած շփման գործակիցը ( $\mu$  = 0,05...0,1), fo-ն՝ գլորման շփման գործակիցը (fo=0,05...0,1 *uu*), R-ը՝ պտտման հենարանային օղագոտու միջին շառավիղը։

Վերլուծված չափման M՛օ մոմենտը վերաբերում է կոնական գլանվակներին։ Գլանային գլանվակների դեպքում, հաշվի առնելով գլանվակների երկայնական սահքը, անհրաժեշտ է այդ մոմենտի արժեքը կրկնապատկել։

Oդի և քամու դիմադրության Mঁ մոմենտը՝ բերված պտտման առանցքին, կարելի է որոշել հետևյալ փորձառական արտահայտություններով.

$$M_0 = 0.0014 \sum F_i \rho_i n^2$$
 (6)

կամ

$$M_0 = q \sum F_i \rho_i , \qquad (7)$$

որտեղ F<sub>i</sub>-ն պտտվող մասերի այն մակերեսներն են, որոնք դրսևորում են առագաստային ազդեցություն,  $u^{2}$ ,  $\rho_{i}$ - ն՝ այդ մակերեսների ծանրության կենտրոնների հեռավորությունները պտտման առանցքից, u, ո-ը՝ պտտվող հենահարթակի պտուտաթվերը, *պտ/րոպ*, q-ն՝ քամու տեսակարար ուժը (q = 150...400 ն/մ<sup>2</sup>):

Պտտման առանցքի ուղղաձիգությունից առաջացող դիմադրության M<sup>™</sup>օ մոմենտը՝ նույնպես բերված պտտման առանցքին, ունի հետևյալ տեսքը.

$$M_0 = \sum G_i \rho_i \sin \alpha , \qquad (8)$$

որտեղ G⊢ն պտտվող առանձին մասերի կշիռներն են, *կգ, α*-ն` պտտվող լիսեռի առանցքի թեքության անկյունը ուղղաձիգի նկատմամբ, աստիձան։

Ունենալով ստատիկ մոմենտը կազմող առանձին դիմադրությունների մոմենտների արժեքները՝ կարող ենք գրել.

$$M_0 = M_0' + M_0'' + M_0'''$$
: (9)

Մտատիկ դիմադրությունների մոմենտների գումարելիներից վերջին՝ №՞ և M₀՞՝ դիմադրությունները, բավականին փոքր արժեքների պատՃառով, մոտավոր հաշվարկների ժամանակ սովորաբար անտեսվում են [1]։ *Իներցիոն դիմադրությունների Mı մոմենտը*։ Ինչպես հայտնի է, սա պտտվող մարմինների՝  $Y = \int \rho^2 dm$  իներցիոն մոմենտների և  $\varepsilon = \frac{\partial \omega}{dt}$  արագացման արտադրյալն է.

$$\mathsf{M}_{1} = \sum Y_{i} \varepsilon_{i} = Y_{1} \varepsilon_{1} + Y_{2} \varepsilon_{2} + \dots + Y_{i} \varepsilon_{i} :$$
(10)

Այս արտահայտության մեջ առաջին գումարելիին հաջորդող գումարելիների գումարը կազմում է առաջինի 15...20%-ը [1]։ Տվյալ դեպքում պտտվող մասերի առաջացրած իներցիոն դիմադրությունների M<sub>1</sub> մոմենտը՝

$$M_1 = (1.15...1.25) Y_{\mathcal{E}}$$
(11)

 Իներցիոն դիմադրությունների M<sub>1</sub> մոմենտը, որը հաղթահարում է ամբողջ համակարգի իներցիան և պտտեցնում հենահարթակը, ազդում է ինչպես պտտվող հենահարթակի, այնպես էլ չպտտվող հենարանային մասի վրա։ Հենահարթակի պտույտը արդյունք է այն բանի, որ պտտվող մոմենտն ավելի փոքր է, քան հենարանային մասի և հենման հարթության՝ գետնի միջև ունեցած կառչման M<sub>3</sub> մոմենտը՝  $M_1 < M_3$ :

Ակնհայտ է, որ էքսկավատորի և հենման հարթության միջև հպման դիմադրության M<sub>3</sub> մոմենտի մեծությունը կախված է հենման  $\mu$  գործակցից ( $\mu \leq 0,25$ ), հենման հարթության L երկարությունից, B լայնությունից և D անկյունագծից։ Երկթրթուր էքսկավատորի համար (նկ.1) այն որոշվում է հետևյալ հաջորդականությամբ [1].

$$M_{3} = \frac{1}{12} \mu q \left( 2BLD + 2.3B^{3} \lg \frac{B}{D-L} + 2.3L^{3} \frac{L}{D-B} \right), \quad (12)$$

$$M_{3}^{"} = \frac{1}{12} \mu q \left( 2B_{0}LD_{0} + 2.3B_{0}^{3} \lg \frac{B_{0}}{D_{0} - L} + 2.3L^{3} \frac{L}{D_{0} - B_{0}} \right),$$
(13)

$$M_3 = M_3' - M_3''$$
: (14)



Նկ. Թրթուրների և հենման հարթության հպման մոմենտի որոշման սխեմա Հաշվի առնելով ստատիկ M<sub>0</sub> մոմենտի հաստատուն լինելը՝ կարող ենք հավաստել, որ հաստատուն կլինեն նաև  $M_1 = M - M_0$  իներցիոն մոմենտը և անկյունային  $\mathcal{E}$  արագացումը։

Հետևաբար, թափառքի է՝ ժամանակը՝

$$t' = \int_{0}^{\omega} \frac{d\omega}{d\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \int_{0}^{\omega} d\omega = \frac{\omega}{\varepsilon}$$
(15)

կամ

$$t' = \frac{(1.15...1.25)\omega Y}{M_{\perp}}, \ l' :$$
 (16)

Թափառքի lpha անկյունը՝

$$\alpha' = \int_{0}^{\omega} \frac{\omega d\omega}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \int_{0}^{\omega} \omega d\omega = \frac{\omega^{2}}{2\varepsilon}$$
(17)

կամ

$$\alpha' = \frac{(1.15...1.25)\omega^2 Y}{2M_1}, nunp:$$
 (18)

Համանմանորեն կարող ենք գրել, որ արգելակման է՝՝ ժամանակը՝

$$t''' = \frac{(1.15...1.25)\omega Y}{M_1''}, \ l,$$
(19)

արգելակման  $lpha^{''}$  անկյունը՝

$$\alpha^{'''} = \frac{(1.15...1.25)\omega^2 Y}{M_1^{'''}}, nunq:$$
(20)

Նկատի ունենալով, որ հավասարաչափ շարժման t' ժամանակը հավասար է ընդհանուր t ժամանակի և t' թափառքի ու t''' արգելակման ժամանակների գումարի տարբերությանը՝ t'' = t-('t' + t''), ինչպես նաև այն, որ t= $\frac{\alpha}{\omega}$ , հավասարաչափ շարժման համար կարող ենք գրել.

$$t'' = \frac{\alpha - \alpha' - \alpha'''}{\omega} = \frac{\alpha}{\omega} - \frac{(1.15...1.25)\omega Y}{2M_1} - \frac{(1.15...1.25)\omega Y}{2M_1''}, \quad (21)$$

$$\alpha'' = \alpha - \frac{(1.15...1.25)\omega^2 Y}{2M_1} - \frac{(1.15...1.25)\omega^2 Y}{2M_1''}$$
(22)

Համապատասխան արժեքները տեղադրելով T-ի հավասարության մեջ և 1.15...1.25-ը նշանակելով ինչ-որ Po գործակցով՝ կստանանք.

$$T = \frac{\omega P_0 Y_1}{M_1'} + \frac{\alpha}{\omega} - \frac{\omega P_0 Y_1}{2M_1'} - \frac{\omega P_0 Y_1}{2M'''} + \frac{\omega P_0 Y_1}{M_1'''} + \frac{\omega P_0 Y_2}{M_1'''} + \frac{\alpha}{\omega} - \frac{\omega P_0 Y_2}{2M_1} - \frac{\omega P_0 Y_2}{2M_1''} + \frac{\omega P_0 Y_2}{M_1'''} + \frac{\omega P_0 Y_2}{M_1'''},$$
(23)

որտեղ Y1-ը և Y2-ը՝ հենահարթակի իներցիոն մոմենտներն են համապատասխանաբար լիքը և դատարկ շերեփների դեպքում։

Պտտման մեխանիզմների համաչափ ցիկլի դեպքում թափառքի և արգելակման իներցիոն դիմադրությունների մոմենտները հավասար են.

$$M_1 = M_1 = M_1$$

Օգտվելով այս պայմանից և կատարելով T-ի հավասարման որոշ ձևափոխություններ` կարող ենք գրել.

$$T = \frac{\omega P_0 (Y_1 + Y_2)}{M_1} + \frac{2\alpha}{\omega}:$$
(24)

Համապատասխան հետազոտություններն ու վերլուծումները [1] պարզել են, որ M\_0=  $(1-\psi)M$ , որտեղ  $\psi$ -ն գործակից է ( $\psi=0.95...0.98$ ), M-ը՝ շարժիչի լրիվ մոմենտր։

ւտը. Իներցիոն դիմադրությունների Mւ մոմենտը` Mı = M – Mօ*ৠ* 

$$\mathbf{M}_{1} = \mathbf{M} - \mathbf{M}_{0} \boldsymbol{\psi} : \tag{25}$$

Հայտնի է նաև, որ շարժիչի М մոմենտը՝

$$M = \frac{102N\eta}{\omega},$$
 (26)

որտեղ N-ը շարժիչի հզորությունն է,  $\mathit{h}\mathit{A}\mathit{m}$ ,  $\eta$ -ն՝ շարժիչի պտտման մեխանիզմի փոխանցման ՕԳԳ - ն, ուստի

$$M_{1} = \frac{102N\eta\psi}{\omega}:$$
 (27)

M – ի արժեքը տեղադրելով T – ի հավասարման մեջ՝ կստանանք.

$$\Gamma = \frac{\omega^2 P_0(Y_1 + Y_2)}{102N\eta\psi} + \frac{2\alpha}{\omega} = \omega^2 A + \frac{2\alpha}{\omega}, \qquad (28)$$

$$A = \frac{P_0(Y_1 + Y_2)}{102N\eta\psi} = const,$$
 (29)

որտեղ

կամ

$$\frac{dT}{d\omega} = 2A\omega_0 - \frac{2\alpha}{\omega_0^2} = 0, \qquad \omega_0 = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{A}} = \sqrt[3]{\frac{102N\eta\psi}{P_0(Y_1 + Y_2)}} : \qquad (30)$$

N-ի փոխարեն տեղադրելով  $rac{M_1\omega}{102N\eta\psi}$ , կստանանք.

A = 
$$\frac{P_0(Y_1 + Y_2)}{M_1\omega_0}$$
  $\omega_0^3 = \frac{\alpha M_1\omega_0}{P_0(Y_1 + Y_2)}$  (31)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha M_1}{P_0(Y_1 + Y_2)}} : \tag{32}$$

Նախկինում ստացած T – ի արտահայտության մեջ տեղադրելով  $\omega$  - ի արժեքը՝ կստանանք.

$$T = \frac{\alpha M_1}{P_0(Y_1 + Y_2)} \cdot \frac{P_0(Y_1 + Y_2)}{M_1 \omega_0} + \frac{2\alpha}{\omega_0} = \frac{3\alpha}{\omega_0} = 3\alpha \sqrt{\frac{P_0(Y_1 + Y_2)}{\alpha M_1}}$$
(33)

կամ

$$T_{\min} = 3 \frac{\sqrt{P_0 (Y_1 + Y_2) \alpha}}{M_1}, \ q!:$$
(34)

Այս վերլուծություններից բխում են հետևյալ սահմանումները.

1) պտտման տևողության նվազագույն արժեքն ապահովվում է M<sub>1</sub> – ի մեծ արժեքների դեպքում, բայց, ինչպես վերը պարզաբանվեց, M<sub>1</sub> – ի մեծացումը սահմանափակվում է M<sub>3</sub> – ով,

2)  $T_{\min} - h$  ենթարմատային արտահայտության մյուս մեծությունների հաստատուն արժեքների դեպքում ցիկլի տևողությունը փոփոխվում է պտտման  $\alpha$ անկյանը համեմատ, ուստի տևողության նվազագույն արժեքը պահպանելու համար անհրաժեշտ է փոխել պտտման  $\omega_0$  արագությունը, ասել է թե՝ ունենալ պտտման մի քանի արագություններ։

### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Джангулян Э.А. Землеройные машины.- Ереван: Луйс, 1978. - 341с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.07.02։

### Э. А. ДЖАНГУЛЯН

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ ЭКСКАВАТОРА

Обобщены аналитические и эмпирические закономерности, выявленные в результате соответствующих исследований, что дает возможность рассчитать минимальное значение продолжительности рабочего цикла экскаватора периодического действия, позволяющего повысить производительность экскаватора.

## E.H. JANGULYAN

# MINIMUM VALUE DETERMINATION OF EXCAVATOR PLATFORM DURATION

Analytical and empiric regularities reveales as a result of corresponding studies are generalized. This enables to calculate the minimum value of running excavator cycle with periodical action and increase excavator capacity.

*Հ*SԴ 621.01

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

### Ռ.Պ. ՋԱՎԱԽՅԱՆ, Հ.Ս. ԱՐՉՈՒՄԱՆՅԱՆ

# ՕՔՍԻԳԵՆԱՏՈՐԻ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ ԱՐՅԱՆ ՀՈՍՔԻ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿՈՐԵՆ ՆԵՐԿԱՅԱՑՈՒՄԸ

Մաթեմատիկորեն ներկայացվում են արյան հոսքի ծավալային արագության վրա արյան արհեստական շրջանառության (ԱԱՇ) սարքում օգտագործվող մեմբրանային օքսիգենատորի ազդեցության փորձարարական տվյալների մշակման արդյունքները։ Սահմանվում են ԱԱՇ պոմպով մղվող արյան ստուգանմուշային հոսքի ծավալային արագության՝ ժամանակից կախման պարամետրերը և հավասարումը, որոնք անհրաժեշտ են ԱԱՇ պոմպի նախագծման համար։

**Առանցքային բառեր.** արյան արհեստական շրջանառություն, պոմպ, մեմբրանային օքսիգենատոր, արյան հոսքի ծավալային արագություն, ձևափոխիչ ֆունկցիա, կոռելյացիա, բազմանդամ։

Վերջին տարիներին սրտի վիրահատությունները գործնականում կատարվում են արյան արհեստական շրջանառության (ԱԱՇ) մեթոդի կիրառմամբ։ Այդ պատձառով խիստ կարևոր է ժամանակակից պահանջները բավարարող ԱԱՇ ապահովող սարքերի նախագծումը՝ մասնավորապես արյան *ընդհատուն հոսք* և **ֆիզիոլոգիականին մոտ** *օրենքով փոփոխվող* արյան հոսքի ծավալային արագություն (ԱՀԾԱ) ապահովող ԱԱՇ պոմպի նախագծումը։ Վերջինս իրագործելու համար խիստ կարևոր է առկա գործնական և հետազոտական-փորձարարական տվյալների հիման վրա **պոմպ –** *օքսիգենատոր – հիվանդ – պոմպ* փակ շղթայի մաթեմատիկական մոդելի մշակումը՝ մասնավորապես ներկայումս լայն կիրառում գտած մեմբրանային օքսիգենատորի՝ ԱՀԾԱ-ի վրա ունեցած ազդեցության և հիվանդի անոթային համակարգ մղվող ԱՀԾԱ-ի միջինացված ստուգանմուշային կորի [1] մաթեմատիկական ներկայացումը։

Oգտվենք օքսիգենատորի մուտքում (V) և ելքում  $(V^*)$  ԱՀԾԱ-ների փորձարարական հայտնի տվյալներից [2]։ Հետագա հաշվարկների հարմարության և տարբեր հիվանդների համար պահանջվող  $V^*(t)$  կորերի նույնականացման համար օգտվենք չափողականություն չունեցող

$$v_i = \frac{V_i}{V_m}$$
  $u$   $v_i^* = \frac{V_i^*}{V_m}$   $(i = 1...40)$  (1)

հարաբերական արագություններից, որոնցում  $V_m$ -ը օքսիգենատորի մուտքում և ելքում արյան հոսքի ծավալային միջին արագությունն է, որը  $T_g$  տևողությամբ մեկ ցիկլի ընթացքում մղած արյան Q հայտնի ծավալի միջոցով որոշվում է հետևյալ բանաձևով.

$$V_{\rm m} = Q/T_{\rm g} = \int_{0}^{T_{\rm g}} V(t) dt / T_{\rm g}$$
:

Նկ. 1-ում բերված են օքսիգենատորի մուտքում (V) և ելքում  $(V^*)$  արյան հոսքի ծավալային արագություններից (1) բանաձևերով ստացված հարաբերական  $v_i(T_i)$  և  $v_i^*(T_i)$  (i = 1...40) արագությունների և "սփլայն-ֆունկցիայի" օգնությամբ ստացված [3, 4] համապատասխան միջարկումային կորերը։



Undund opuhqtumnn úndun v U2OU-h l opuhqtumnnhg nnin thun ni hhdmunh munfulh hmumhuhu (unnu) úndun v U2OU-h úhru v =  $F(v^*)$  whuh filighnum hmumulum numumulum, hmuch muutind  $(v_i, v_i^*)$  (i = 1...40) hnrawnunulum wijulten (uh. 2) úts gridwsnifiud muutuulunulus qsuihu hnraynulum filighnum filighnum R = 0.9304, with armult sign harbinghnu hmumulum hmumulum oquilten hunful hunful (13, 4]:

Այդ նպատակով  $X = v^*$  և Y = v նշանակումներով դիտարկենք  $\psi(Y) = a \cdot \phi(X) + b$  (2)

տիպի ոչ գծային կախումը, ուրa-ն և b-ն հաստատուններ են, իսկ  $\psi(Y)$ -ը և  $\phi(X)$ -ը՝ ձևափոխիչ մոնոտոն ֆունկցիաներ, որոնցով կատարվում է (X, Y)

փորձարարական տվյալների այնպիսի ձևափոխում, որը հանգեցնում է  $\psi(\phi)$  գծային կապի։

Նշանակելով  $X_i^* = \phi(X_i), Y_i^* = \phi(Y_i)$  (i = 1...40) և որպես ձևափոխիչ ֆունկցիաներ դիտարկելով

$$\psi(z) = \begin{bmatrix} z^{-3}, z^{-2}, z^{-1}, z, z^2, z^3, e^{-3 \cdot z}, e^{-2 \cdot z}, e^{-z}, e^{z}, e^{2 \cdot z}, e^{3 \cdot z} \end{bmatrix}$$
  

$$\psi(z) = \begin{bmatrix} z^{-3}, z^{-2}, z^{-1}, z, z^2, z^3, e^{-3 \cdot z}, e^{-2 \cdot z}, e^{-z}, e^{z}, e^{2 \cdot z}, e^{3 \cdot z} \end{bmatrix}, z = X, Y$$

ֆունկցիաները, հարթեցման մեթոդի կիրառմամբ կստանանք (2) տիպի ոչ գծային ֆունկցիաներ ( $12 \times 12 = 144$  դեպք), որոնցից երեք լավագույն ֆունկցիաների (նկ. 2) համար ստացված արդյունքները բերված են աղյ. 1-ում, որտեղ

							<u>D</u>
Ν	a	b	$\Delta_{ m min}$	R	$\psi(z)$	$\varphi(z)$	Ստացված ֆունկցիաները
1	1.1243	-0.8382	23.0341	0.9355	Z	$z^2$	$V = 1.1243 \cdot (V^*)^2 - 0.8382$
2	0.7164	-1.5586	60.8478	0.9318	Z	e <sup>z</sup>	$V = 0.7164 \cdot e^{V^*} - 1.5586$
3	2.0343	-1.0179	8.1904	0.9304	Z	Z	$V = 2.0343 \cdot V^* - 1.0179$
	а	b	$\Delta_{ m min}$	R	$\psi(z)$	$\phi(z)$	Ստացված ֆունկցիաները
1	1.1243	-0.8382	23.0341	0.9355	Z	$z^2$	$V = 1.1243 \cdot (V^*)^2 - 0.8382$
2	0.7164	-1.5586	60.8478	0.9318	Z	e <sup>z</sup>	$V = 0.7164 \cdot e^{V^*} - 1.5586$
3	2.0343	-1.0179	8.1904	0.9304	Z	Z	$V = 2.0343 \cdot V^* - 1.0179$
	а	b	$\Delta_{ m min}$	R	$\psi(z)$	$\varphi(z)$	Ստացված ֆունկցիաները
1	1.1243	-0.8382	23.0341	0.9355	Z	$z^2$	$V = 1.1243 \cdot (V^*)^2 - 0.8382$
2	0.7164	-1.5586	60.8478	0.9318	Z	e <sup>z</sup>	$V = 0.7164 \cdot e^{V^*} - 1.5586$
3	2.0343	-1.0179	8.1904	0.9304	Z	Z	$V = 2.0343 \cdot V^* - 1.0179$

 $\Delta_{\min} = \min \sum_{i=0}^{m} [F(X_i) - Y_i]^2$ -ն քառակուսային շեղման նվազագույն արժեքն է։

Աղյուսակ 1



Աղ. 2-ում բերված են  $(v_i, v_i^*)$  (i = 1...40) փորձարարական տվյալների համար հայտնի մեթողներով [3, 4] ստացված երեք լավագույն՝

$$\left(\mathbf{a}\cdot\left(\mathbf{v}^*\right)^{\mathbf{b}}+\mathbf{c},\right)$$
(3)

$$\mathbf{v} = \mathbf{F}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{v}^*) = \left\{ \mathbf{a} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{b} \cdot \mathbf{v}^*} + \mathbf{c} \right\}$$
(4)

$$\left(a \cdot \sin\left(v^* + b\right) + c\right)$$
(5)

ֆունկցիաների a,b,c հաստատուն գործակիցների,  $\Delta_{\min}$  նվազագույն քառակուսային չեղման և կոռելացման R գործակցի արժեքները։

l	<i>L</i> ញ្ញារបាយ	42

Ν	а	b	с	$\Delta_{ m min}$	R	Բանաձև
1	1.6597	1.4016	-1.0067	0.319	0.9477	(3)
2	2.8175	0.4664	-3.7879	0.3652	0.9398	(4)
3	-2.6752	14.3791	1.5642	0.2942	0.9518	(5)

Աղ. 3-ում բերված են  $(v_i, v_i^*)$  (i = 1...40) փորձարարական տվյալների համար հայտնի մեթոդներով [3, 4] ստացված

$$\mathbf{v} = \mathbf{P}_{n}(\mathbf{a}, \mathbf{v}^{*}) = \mathbf{a}_{0} + \mathbf{a}_{1} \cdot \mathbf{v}^{*} + \dots + \mathbf{a}_{n} \cdot (\mathbf{v}^{*})^{n}, \quad \mathbf{n} = 2...5$$
(6)

բազմանդամների  $a_0, a_1, \ldots, a_n$  հաստատուն գործակիցների,  $\Delta_{\min}$  նվազագույն քառակուսային շեղման և կոռելացման R գործակցի արժեքները։

Unining 3	3
-----------	---

Ν	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	$\Delta_{ m min}$	R	Բանաձև	
2	-0.9566	0.9093	0.6457	-	-	-	0.3458	0.9431		
3	-1.2071	0.0561	3.2782	-1.1612	-	-	0.2505	0.9591	(6)	
4	-0.9939	-0.0862	1.0811	1.5946	-0.8441	-	0.2347	0.9618	(0)	
5	-0.8531	-0.7412	-0.1753	6.7724	-5.1516	1.0616	0.2252	0.9634		
	a <sub>0</sub>	$a_1$	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	$\Delta_{\min}$	R	Բանաձև	
2	a <sub>0</sub> -0.9566	a <sub>1</sub> 0.9093	a <sub>2</sub> 0.6457	a <sub>3</sub> -	a <sub>4</sub> -	a <sub>5</sub>	$\Delta_{ m min}$ 0.3458	R 0.9431	Բանաձև	
2	a <sub>0</sub> -0.9566 -1.2071	a <sub>1</sub> 0.9093 0.0561	a <sub>2</sub> 0.6457 3.2782	a <sub>3</sub> - -1.1612	a <sub>4</sub> - -	a <sub>5</sub> - -	$\Delta_{\rm min}$ 0.3458 0.2505	R 0.9431 0.9591	Բանաձև	
2 3 4	a <sub>0</sub> -0.9566 -1.2071 -0.9939	a <sub>1</sub> 0.9093 0.0561 -0.0862	a <sub>2</sub> 0.6457 3.2782 1.0811	a <sub>3</sub> - -1.1612 1.5946	a <sub>4</sub> - - -0.8441	a <sub>5</sub> - -	$\Delta_{\rm min}$ 0.3458 0.2505 0.2347	R 0.9431 0.9591 0.9618	Բանաձև (6)	

Uwnpu բերված են  $(v_i, v_i^*)$  (i = 1...40) փորձարարական տվյալների,  $v = F(a, b, c, v^*)$  մոտարկող ֆունկցիաների (նկ. 3ա) և  $v = P_n(a, v^*)$  բազմանդամների (նկ. 3բ) գրաֆիկները։



Վերլուծելով ստացված արդյունքները՝ կարելի է հանգել հետևյալ եզրակացություններին.

 Հաշվի առնելով ներկայումս կիրառվող մեմբրանային օքսիգենատորների բազմաթիվ տարատեսակների առկայությամբ պայմանավորված հնարավոր փորձարարական տվյալների բազմազանությունը՝ ստացված գծային և (2) - (5) տիպի ոչ գծային կոռելյացիոն ֆունկցիաները որոշակի մոտավորությամբ կարելի է կիրառել արյան հոսքի ծավալային արագության վրա օքսիգենատորի ազդեցության նկարագրման համար։

2. Գծային և (2)-(5) տիպի ոչ գծային կոռելյացիոն ֆունկցիաների համեմատ (6) տիպի մոտարկող բազմանդամները, չնայած պահանջվող մեծ թվով հաշվարկային գործողությունների կատարման անհրաժեշտությանը, ապահովում են ավելի մեծ Ճշտություն։

Նկար 4-ում և 5-ում բերված են մեմբրանային օքսիգենատորի՝ ԱՀԾԱ-ի վրա ունեցած ազդեցությունը (նկ. 1) մաթեմատիկորեն ներկայացնող համապատասխանաբար ոչ գծային կոռելյացիոն (աղյ. 1, նկ. 2),  $\mathbf{V} = \mathbf{F}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{V}^*)$  տիպի ֆունկցիաների (աղյ. 2, նկ. 3ա) և  $\mathbf{V} = \mathbf{P}_n(\boldsymbol{a}, \mathbf{V}^*)$  բազմանդամների (աղյ. 3, նկ. 3բ) դեպքում արյան ընդհատուն և ֆիզիոլոգիականին մոտ օրենքով փոփոխվող ԱՀԾԱ [1] ապահովող ԱԱՇ պոմպից պահանջվող ԱՀԾԱ կորերը, որոնք բավարարում են մեկ ցիկլի ընթացքում օքսիգենատոր մտնող և դուրս եկող արյան քանակների հավասարության հետևյալ պայմանը՝



Վելուծելով ստացված արդյունքները և հաշվի առնելով ապահովվող Ճշտությունն ու ֆունկցիայի պարզությունը` որպես ԱՀԾԱ-ի վրա մեմբրանային օքսիգենատորի ունեցած ազդեցությունը մաթեմատիկորեն ներկայացնող և օքսիգենատորի մուտքում ու ելքում արյան ցիկլային քանակների հավասարության (7) պայմանը բավարարող ֆունկցիա նպատակահարմար է հետևյալ ֆունկցիան.

$$V = 0.9493 \cdot e^{0.5972 \cdot V} - 0.9503, \tag{8}$$

իսկ որպես ԱԱՇ պոմպից պահանջվող ԱՀԾԱ կոր՝ բանաձև (8)-ին համապատասխանող նկ. 6-ի 2 կորը։



### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Արզումանյան Հ. Ս.** Արյան բնական հոսքի ծավալային արագության տիպային կախվածության մաթեմատիկական ներկայացումը // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողով։ Նյութերի ժողովածու, Հատոր I, 2002.(Էջ 221-222:
- 2. Власов В. М., Капичев З. Р., Мулер А. Л., Суллинг Г. А., Лай Р. Х. // Мед. Техника.-1989.-№ 1.- С. 21-26.
- 3. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики.(М.: Наука, 1970.-664с.
- 4. **Эберт К., Эдерер Х.** Компьютеры.(М.: Мир, 1988.(416с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 23.01.2003.

# Р.П. ДЖАВАХЯН, О.С. АРЗУМАНЯН МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА КРОВИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОКСИГЕНАТОРА

Математически представлены результаты обработки экспериментальных данных по влиянию применяемого в аппарате искусственного кровообращения (АИК) мембранного оксигенатора на объемную скорость потока крови. Установлены параметры эталонной зависимости указанной скорости от времени и ее уравнения, необходимые для проектирования насоса АИК.

#### R. P. JAVAKHYAN, H. C. ARZUMANYAN MATHEMATICAL PRESENTATION OF THE BLOOD FLOW RATE IN VIEW OF OXYGENATOR INFLUENCE

Results of processing experimental data of influence of membrane oxygenator used in the artificial blood circulation device on blood flow rate are presented mathematically. Parameters of sample dependence of the blood flow rate on time and its equation, necessary for designing an artificial blood circulation device pump are established.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК669.255:621.91

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

### С.Г. АГБАЛЯН, А.М. СТЕПАНЯН, Г.Б. МАНУКЯН

# ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКОВОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Исследованы закономерности изменения фазового и структурного состояния, а также свойства порошковой быстрорежущей стали, полученной экструзией, в зависимости от условий аустенизации и отпуска. Выявлено, что при аустенизации растворение специальных карбидов происходит на 45...55°C ниже температуры аустенизации стандартных сталей, а при отпуске основной упрочняющей фазой являются карбиды М<sub>6</sub>C и MC. Показано, что порошковая сталь Р6М5-П более склонна к перегреву, что приводит к отрицательным структурным изменениям.

*Ключевые слова:* карбид, аустенит, сегрегация, отпуск, закалка, твердость, прочность.

Как известно [1-6], важным резервом повышения свойств быстрорежущей стали является порошковая технология.

По своим механическим и эксплуатационным свойствам порошковая быстрорежущая сталь имеет преимущества перед быстрорежущей сталью обычного производства. Однако, чтобы реализовать эти преимущества, необходимо правильно выбрать режимы термической обработки. Для этого важно знать структурные, фазовые и свойственные особенности порошковой быстрорежущей стали.

Целью настоящей работы является выявление и изучение закономерностей изменения фазового и структурного состояния, а также свойств порошковой быстрорежущей стали, полученной из распыленных порошков P6M5 методом экструзии, в зависимости от условий аустенизации и отпуска.

Эксперименты проводили на порошковой (Р6М5-П) и стандартной (Р6М5) быстрорежущих сталях диаметром 20 *мм* и высотой 30 *мм*.

Как известно [3], температуры магнитных и фазовых превращений в порошковых и литых сталях совпадают, а карбидных превращений в порошковых сталях на 45...55°С ниже, чем в литых. Так, в Р6М5-П температура растворения карбида М<sub>23</sub>С<sub>6</sub> равна 940...1100°С, а в литой стали - 985...1150°С, М<sub>6</sub>С и МС соответственно составляют 1160 и 1210°С.

Экспериментально выявлено, что при аустенизации стали P6M5-П до 1260°С происходит растворение примерно 2,7%(мас.) карбидов MC(VC) и 6,6%(мас.) карбидов M<sub>6</sub>C, которые активно идут до температуры аустенизации 1220°С. Растворение карбида MC до 1260°С происходит практически с одинаковой интенсивностью. В соответствии с характером растворения карбида MC твердый раствор стали с повышением температуры аустенизации равномерно обогащается ванадием и углеродом. Обогащение твердого растворению карбида M<sub>6</sub>C, практически

прекращается при 1220°С. В интервале 1220...1260°С состав твердого раствора стали Р6М5-П остается почти постоянным по суммарной легированности твердого раствора.

В процессе аустенизации стали Р6М5-П, кроме растворения карбидов в твердом растворе, происходят изменения химического состава этих карбидов. Вследствие полного растворения хромистого карбида М<sub>23</sub>С<sub>6</sub> содержание хрома в карбидном осадке уменьшается в 5...6 раз. В стали Р6М5-П после закалки 1185°С и в стали Р6М5 после 1200°С в твердом растворе находится около 50...60% общего содержания вольфрама и молибдена. При закалке в твердый раствор переходит также 1% ванадия. Однако вследствие увеличения карбидов М<sub>6</sub>С и особенно МС (за счет полного растворения карбидов М<sub>23</sub>С<sub>6</sub>) содержание вольфрама, молибдена и ванадия в карбидном осадке возрастает (табл.1).

Таблица 1

леги	легирующих элементов после закалки (13–1160 С, 1–6 С/ММ)									
Марка	Карбидный	М6С,	МС, Содержание легирующих							
стали	осадок, вес.%	%	%	элементов в карбидном осадке, %						
				W	Мо	V	Cr			
Р6М5П	18,3	65,5	34,5	63,0	56,3	23,5	69,2			

# Количество карбидных фаз и содержание в них $(t = 1180^{\circ}C_{\circ} = 7.8 c/m)$

Следует отметить, что при одинаковой температуре закалки все основные характеристики порошковых быстрорежущих сталей выше, чем у литых (рис.1).



Рис.1. Влияние температуры закалки на прочность при изгибе (σ<sub>из</sub>), ударную вязкость (КС) и красностойкость (625 ч., HRC) быстрорежущих сталей

Это объясняется различием структуры литых и порошковых сталей (рис.2). В порошковой стали зерно однородное и мельче - 11...12 баллов (ГОСТ 5639-82), в литой стали - крупнее и неоднородное: вблизи скоплений карбидов - 10 баллов, вдали от них - 8...9 баллов. В литой стали наблюдаются сегрегации карбидов,

строчечность, имеются грубые первичные (ледебуридные) карбиды. В порошковой стали карбиды дисперсные и равномерно распределенные в объеме матрицы.



Рис.2. Микроструктура быстрорежущей стали после закалки оптимальными режимами: а - Р6М5П, б - Р6М5

После оптимальных условий аустенизации у Р6М5-П начало мартенситного превращения примерно 180°С, а остаточный аустенит 39%; у Р6М5 - соответственно 196°С и 29% [2,5]. Это объясняется тем, что твердый раствор стали Р6М5-П более легированный, чем стали Р6М5. Причиной этому является наличие в структуре мелких и равномерно распределенных в матрице карбидов (рис.3), которые в температурном интервале аустенизации более интенсивно растворяются в матрице.

Повышенная легированность матрицы приводит к понижению температуры





Рис. 3. Микроструктура быстрорежущей стали после изотермического отжига: а - P6M5-П, б - P6M5

мартенситного превращения и, безусловно, увеличению количества остаточного аустенита в закаленной стали. У порошковой стали остаточный аустенит более устойчив, чем у стандартной, и превращается только после отпуска выше 500°С. При выдержке 500...600°С из аустенита выделяются углерод и легирующие элементы, снижая степень легированности стали. Это, как и в случае диффузионного процесса, зависит от выдержки. Чем больше время выдержки, тем больше обедняется аустенит и меньше становится период решетки [1], при охлаждении обедненный аустенит превращается в мартенсит. С другой стороны, установлено, что всем рекомендуемым условиям отпуска соответствует предварительное превращение 1...2% (об.)

остаточного аустенита, т.е. условием осуществления отпуска является предварительное изотермическое превращение первых порций остаточного аустенита при минимальных температуре и длительности [3]. Исследование показало, что такие условия отпуска определяются образованием в остаточном аустените химических неоднородностей типа кластеров, наличие которых деблокирует структурные дефекты и соответственно способствует прохождению мартенситного превращения в максимальном объеме. В стали Р6М5-П 1...2% остаточного аустенита изотермически превращается в мартенсит при 560°С в течение 18...41 мин. Прежде этим превращением объяснялся эффект вторичного твердения.

Непосредственно после закалки в стали Р6М5-П, наряду с аустенитом, карбидами М<sub>6</sub>С, МС и мартенситом со структурой двух видов (дислокационной и двойникованной), наблюдаются карбиды цементитного типа в виде пластинок длиной 10 *нм*. Цементит образуется, вероятно, в процессе самоотпуска мартенсита в основном с дислокационной структурой.

При отпуске 200°С в 1 ч мартенсит распадается с образованием карбида цементитного типа со структурой, аналогичной структуре закаленной стали. После отпуска 350°С в 1 ч, наряду с карбидами цементитного типа, наблюдаются частицы с орторомбической решеткой и параметрами, близкими к табличным, с разной ориентировкой и размерами в зависимости от места выделения: в двойникованном мартенсите пластины длиной 10...25 *нм*. При отпуске 500°С и выше карбиды железа имеют структуру равновесного цементита. С увеличением температуры отпуска до 580°С в 1 ч в стали еще встречается цементит. Образование карбидов железа при отпуске не сказывается на параметрах решеток аустенита и мартенсита. После стандартного отпуска при 560°С в структуре присутствуют цементит в виде пластин длиной 100 *нм*, равноосные карбиды типа МС размером 5...10 *нм*, иглообразные карбиды типа М<sub>2</sub>С длиной 15...25 *нм* и возможно М<sub>23</sub>С<sub>6</sub>. При отпуске 600°С и выше в стали Р6М5-П проходят процессы рекристаллизации и коагуляции игольчатых карбидов типа М<sub>2</sub>С до размеров 20...30 *нм* и глобулярных - до 40...100 *нм*.

С увеличением температуры часового отпуска состав твердого раствора обедняется легирующими элементами [5]. При этом суммарная легированность твердого раствора в интервале температур 580...640°С изменяется незначительно. Отмечается практическое постоянство количества карбидов при отпуске 500...600°С. Уменьшение параметров решетки аустенита и мартенсита начинается лишь при 500°С и выше; при 580...600°С период решетки  $\alpha$ - фазы снижается почти до соответствующего значения отожженной стали. Показано, что присутствие высокодисперсного карбида М<sub>6</sub>С в быстрорежущей стали обнаруживается после завершения изотермического превращения остаточного аустенита и уменьшения периода решетки  $\alpha$ - фазы до значений, близких к отожженному состоянию в области значительного падения твердости стали, потери ее эксплуатационных свойств. Размеры выделенных специальных высокодисперсных карбидов в стали Р6М5-П и при длительном отпуске сохраняются существенно (в несколько раз) меньше по сравнению с Р6М5.

Из вышеизложенного следует, что основной упрочняющей фазой при отпуске являются карбиды М<sub>6</sub>С и МС. В табл. 2 дано количество карбидных фаз и содержание в них легирующих элементов после отпуска Р6М5-П.

Таблица 2

Марка	Карбидный	M6C,	MC,	Содержание легирую		ирующ	их
Стали	вес.%	70	70	элементов в кароидном осадке,			цке, 70
				W	Мо	Cr	V
Р6М5П	7,8	82,5	17,5	53,7	41,7	4,4	61,3

# Количество карбидных фаз и содержание в них легирующих элементов после отпуска (560°С,1 ч 3 раза)

Экспериментально показано, что быстрорежущие стали при растяжении разрушаются практически с нулевой пластичностью [6,7], причем плоскость разрушения, в которой находится трещина, перпендикулярна действующему напряжению и образует прямой излом, а зона пластической деформации у вершины трещины значительно меньше ее критической длины. Характер разрушения близко связан с режимами термической обработки, т.е. с температурой и способом закалки и отпуска. У порошковых быстрорежущих сталей это выражается более сильно, так как у них узкий интервал закалочных температур, например, Р6М5-П-1180...1190°С. При закалке выше 1200°С разрушающее напряжение понижается (рис.4), причем у стали Р6М5-П гораздо быстрее, чем у стали Р6М5. Снижение разрушающего напряжения с повышением температуры нагрева под закалку сопровождается изменением механизма разрушения: при t<sub>зак</sub><1200<sup>0</sup>С оно развивается по телу зерна, а при t<sub>зак</sub>> 1200°С – по его границам. После термической обработки по оптимальным режимам, т.е. закалки с температурой от 1180...1220°С и стандартного отпуска 560°С в 1 ч по 3 раза, в обеих сталях наблюдаются практически одинаковые процентные значения вязкого разрушения и вязкого скола: примерно 10 и 80% соответственно. Основное различие этих сталей после оптимальных условий закалки заключается в том, что в порошковой стали Р6М5-П при равноосном чашечном изломе примерно в 1,5 раза больше размер фасеток при меньшем размере аустенита, в то время как в стали Р6М5 при большой дисперсности чашечного излома наблюдается волокнистость, грубая полосчатость [2]. При этом отношение размера зерна аустенита к размеру фасетки в стали Р6М5-П в среднем в 2 раза ниже по сравнению со сталью Р6М5, соответственно и энергоемкость распространения трещин (трещиностойкость) в порошковой стали ниже.

Особенностью микроизломов стали Р6М5-П, закаленной с температур выше оптимальной, с повышенной склонностью к разрушению является наличие большого количества участков с неметаллическими включениями, растрескивание с расслоением и плены.

Следовательно, во время закалки при оптимальных температурах аустенизации, обеспечивающих высокие значения ударной вязкости и прочности, когда вероятность зарождения трещин мала, порошковая сталь должна иметь эксплуатационные свойства выше, чем сталь традиционного способа производства. Однако перегрев при аустенизации стали порошкового способа производства ведет к более значительным отрицательным структурным изменениям и, как следствие, к облегченному разрушению.



Рис. 4. Разрушающее напряжение (<sub>р</sub> после стандартного отпуска (при 560°С 3 раза по 1 ч) в зависимости от температуры нагрева под закалку

Увеличение продолжительности выдержки при нагреве под закалку от 1 до 3 *мин* приводит к появлению на границах зерен зон локального оплавления. Эти зоны обычно появляются на стыке границ зерен. При повышении температуры закалки до 1240°С зоны локального оплавления трансформируются в поры размером 20...25 *мкм*, сравнимые с размером зерна. Размер зерна при закалке от 1240°С соответствует 8 баллам.

Из вышеизложенного следует, что для получения высоких механических и технологических свойств порошковых быстрорежущих сталей необходимо оценить не только правильность выбора режима термической обработки, контролируя балл зерна, но и структуру и полученные при этом свойства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
- Купалова И.К. Фазовый состав, структура и свойства быстрорежущих сталей // Металловедение.- 2000.-№12.- С. 34-44.
- 3. Ский Д.А., Андреянова Л.Н., Дерябина В.И. Термическая обработка, структура и свойства порошковых быстрорежущих сталей 10Р6М5-МП и Р6М5К5-МП // МиТОМ.-1991.-№8.-С. 27-29.
- 4. **Адаскин А.М.** Особенности вольфрамомолибденовой стали Р6М5: Методическая разработка/ Ин.-т пов. квалиф. рук. работ. и спец. Минстанкопрома.-М., 1975.–56 с.
- 5. Агбалян С.Г. Разработка и исследование технологии изготовления протяжного инструмента из порошков быстрорежущих сталей: Автореф. дис. ... к.т.н. Киев, 1984. 24 с.
- 6. **Кремнев Л.С.** Особенности разрушения инструментальных материаллов //МиТОМ.-1994.-№4.-С. 17-22.
- 7. **Тойдорова К.С., Забильский В.В., Кремнев Л.С.** Фрактографический и Оже-электронное исследование механизма разрушения стали Р6М5 //МиТОМ.-1993.-№4.-С.20-23.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 28.04.2002.

### Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Մ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Գ.Բ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

## ԱՐԱԳԱՀԱՏ ՓՈՇԵՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՖԱԶԱՅԻՆ ԿԱԶՄԸ, ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ուսումնասիրված են էքստրուզիոն եղանակով ստացված արագահատ փոշեպողպատների ֆազային և կառուցվածքային փոփոխությունների օրինաչափությունները՝ կախված աուստենիտի առաջացման և արձակման պայմաններից։ Պարզվել է, որ աուստենիտի առաջացման ժամանակ հատուկ կարբիդները լուծվում են ավելի ցածր ջերմաստիձաններում (45...55°C-ով), քան ստանդարտ պողպատներում, իսկ արձակման ժամանակ հիմնական ամրացնող ֆազերը M<sub>6</sub>C և MC կարբիդներն են։ Փոշեպողպատներն ավելի են հակված գերտաքացման, ինչը հանգեցնում է կառուցվածքային բացասական փոփոխությունների և, որպես հետևանք, հեշտ քայքայման։

## S.G. AGHBALYAN, A.M. STEPANYAN, G.B. MANUKYAN

### PHASE COMPOSITION, STRUCURE AND PROPERTIES OF HIGH-SPEED POWDER STEELS

Modification regularities of phase and structural states as well as properties of powder high-speed steels obtained by extrusion in terms of austenization and temper conditions are investigated. It is revealed that during austenization special carbide dissolution takes place for  $45-50^{\circ}$ C lower than in standard steels, and during tempering the basic strengthening phases are the M<sub>6</sub>C and MC carbides. It is shown that the powder steel P6M5- $\Pi$  is more susceptible to superheating than standard steels resulting in negative structural changings and easy destruction.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 537.531

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

# А.О. АБОЯН

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОПОГРАФИЯ ШАГОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

Предложен метод шагового сканирования, свободный от всех недостатков, присущих известным методам проекционного топографирования. Данный метод регистрирует рентгенодифракционное изображение с большим разрешением и без искажений.

*Ключевые слова*: кристалл кремния, интерферометр, муар, топограмма, несовершенство кристаллов, сканирование, кинематическое и динамическое рассеяние.

#### 1. Введение

Как известно, рентгенодифракционное изучение несовершенств кристаллов, применяемых в науке, технике и производстве полупроводниковых приборов, является одной из актуальнейших задач физики твердого тела. Оно особенно важно в области материаловедения при создании материалов с заранее заданными свойствами.

Эффективность этих исследований в основном обусловлена правильностью и однозначностью интерпретации (расшифровки) регистрирован-ных дифракционных изображений несовершенств кристаллов – правильным описанием реального состояния решетки кристалла.

Несомненно, для правильной и однозначной расшифровки рентгенодифракционных изображений, зарегистрированных для прямого наблюдения несовершенств в кристаллах, необходимо:

1. Точно установить, при каких первичных пучках (плоские, цилиндрические и сферические волны, узкие, широкие и  $\delta$  – образные пучки), каких кристаллах (тонкий, толстый, плоскопараллельная пластинка, трапециевидный образец) и каких кристаллических системах (интерферометры и неинтерферометрические кристаллические системы) какие создаются дефекты (несовершенства) и изображения.

2. Выбрать (разработать) рентгенодифракционную методику исследования несовершенств, дающую возможно большое разрешение при данном образце.

3. При регистрации не искажать информации, содержащейся в волнах, дифрагированной в исследуемых кристаллах.

Основная задача рентгеноинтерферометрических методов исследования несовершенств кристаллов сводится к получению интерферометрических дифракционных изображений несовершенств кристаллов с большим разрешением и их однозначной интерпретации. Из-за большой чувствительности интерферометрических дифракционных картин [1,2] к любым незначительным деформациям кристаллической решетки эти картины сильно осложняются, и поэтому их однозначные интерпретации порой чрезмерно затрудняются, что приводит к потере интереса к таким исследованиям.

Следовательно, для повышения эффективности интерферометрических исследований несовершенств кристаллов необходимо разработать новые методы, облегчающие расшифровку дифракционных картин.

Цель настоящей работы - разработка метода получения рентгеновских проекционных топограмм несовершенств кристаллов кремния с большим разрешением и их регистрация без искажения.

# 2. Метод получения рентгеновских проекционных топограмм с большим разрешением

Известен метод проекционной топографии [3], заключающийся в том, что лентообразный пучок рентгеновского монохроматического излучения направляют под углом Брэгга на отражающие плоскости кристалла для получения полного дифракционного изображения исследуемой части кристалла. Пленка и образец параллельно и синхронно сканируются относительно падающего пучка с сохранением величины угла Брэгга (рис. 4а).

Однако этот метод, нашедший широкое применение в исследованиях несовершенств кристалла, при всех своих преимуществах тем не менее обладает существенным недостатком: в случае, когда линии – изображения дислокации или интерференционной полосы, полученные от интерферометров, перпендикулярны направлению сканирования и имеют большую плотность, картины этих изображений (полос) при сканировании на проекционной топограмме исчезают. Действительно, при сканировании образец и пленка совместно смещаются относительно первичного пучка, а на пленке линии дифракционного изображения смещаются в направлении сканирования, и при их больших плотностях они могут налагаться друг на друга, в результате чего структура дифракционной картины исчезает.

В этом можно убедиться и с помощью экспериментов. Рассмотрим следующие частные случаи.



1. Допустим, что интерференционные полосы – параллельные линии, направленные вдоль сканирования. Тогда, независимо от их плотности на проекционной топограмме, они сохраняются (рис. 1). Как на секционной (рис. 1а), так и на проекционной (рис. 1б) топограмме горизонтальные полосы хорошо видны.



Рис. 3. Муаровые картины с вертикальными полосами с малыми периодами: а – секционная топограмма; б – проекционная топограмма; в – шаговая топограмма

2. Рассмотрим случай, когда полосы дифракционного изображения перпендикулярны направлению сканирования. При этом необходимо различать большие и малые периоды полос.

При большом расстоянии между полосами (малая плотность) как на секционных, так и на проекционных топограммах сохраняются интерференционные полосы (рис. 2a, б), а при малых расстояниях (большая плотность) муаровые полосы, полученные на секционных топограммах (рис. 3a), исчезают на проекционных (сканирование) топограммах (рис. 3б).

3. В случае, когда полосы расположены под углом 
$$0 < \beta < \frac{\pi}{2}$$
, где  $\beta$  –

угол между полосами и направлением сканирования, контраст полос на проекционных топограммах уменьшается в зависимости от их угла и периода.

Следовательно, можно однозначно считать доказанным, что на обычных проекционных топограммах получаются изображения не всех дислокаций и не всех интерференционных полос.

Задачей исследования является предложение способа получения рентгеновских проекционных топограмм с большим разрешением (метод проектирования), при котором на проекционной топограмме запечатлеваются все полосы дифрагированного пучка независимо от их плотности и направления.

Указанная цель достигается с помощью шагового синхронно-поступательного движения образца и рентгеновской пленки относительно первичного падающего пучка.

В [4, 5] также обсужден вопрос проекционной топографии и предложены новые методы сканирования. В работе [4] указывается, что в методе Ланга образец и пластинка перемещаются всегда параллельно поверхности образца, а пластинка всегда перпендикулярна дифрагированному пучку (рис. 4а), поэтому искажения на

фотографиях или различное увеличение между горизонтальным и вертикальным направлениями в большинстве случаев неизбежны. Во избежание этих недостатков метода Ланга [3] авторы этой работы предлагают сканирование образца и пластинки (пленки) производить в разных направлениях (рис.4б,в).



Брэгга, где К – кристалл, ФП - фотопластинка

Однако этот метод сканирования, устраняя недостатки, обусловленные направлениями сканирования образца и пластинки, оставляет в силе недостатки, связанные с непрерывным сканированием. В работе [5] предлагается шаговое сканирование, причем кристалл и фотопластинка перемещаются с одинаковыми шагами, равными ширине дифрагированного (отраженного) пучка, что, как мы увидим ниже, имеет недостатки.

В излагаемой работе предлагается метод сканирования, свободный от всех недостатков перечисленных методов проекционного топографирования. В данном методе реализованы следующие модификации эксперимента:



Рис. 5. Дифрагирующие области кристалла при данной ширине первичного пучка. *АВВ*<sub>1</sub>'*A*<sub>1</sub> - дифрагирующая область пучка 1; *BCC*<sub>1</sub>'*B*<sub>1</sub>' - дифрагирующая область пучка **2**; *BB*<sub>1</sub>*B*<sub>1</sub>' - недифрагирующая зона

1. Сканирование образца и пластинки совершается в разных направлениях – кристалл перемещается параллельно самому себе, а пластинка – перпендикулярно дифрагированному (отраженному) пучку.

2. Сканирование шаговое: ширины шагов кристалла и пластинки разные – ширина шага кристалла равна ширине первичного пучка, а пластинки – ширине дифрагированного (отраженного) пучка (рис. 5).

Казалось бы, при сканировании образца (кристалла) с шагом, равным ширине первичного пучка, области кристалла, подобные  $BB_1B'_1$  (рис. 5), проектируются дважды, и, независимо от скорости перемещения пластинки, картины таких областей на ней получаются дважды. Однако нетрудно убедиться, что дифракционно проектируемыми зонами кристалла являются только области, облучаемые первичными пучками, т.е. дифракционно проектируемой зоной для пучка 1 является область  $ABB'_1A_1$ , а для пучка 2 – область  $BCC'_1B'_1$  (рис. 5). В этом можно убедиться на основании следующих соображений.

Мы здесь должны различать кинематическое и динамическое рассеяние. Как известно, при кинематическом рассеянии рентгеновских лучей в рассеиваемом объеме не происходит многократных отражений – отраженный в этом объеме один раз пучок больше не отражается и выходит из кристалла (рис. 6а).



Рис. 6. Схема дифракции: а – схема кинематического рассеяния; б – схема динамического рассеяния

Лучи, отраженные (дифрагированные) в объеме  $ABB'_{1}A_{1}$ , облучаемом первичным пучком (первым пучком на рис. 5), выходят из кристалла через зону  $BB_{1}B'_{1}$  без дальнейшей дифракции (отражения). Таким образом, область  $BB_{1}B'_{1}$ является как бы недифрагирующей зоной для пучков, дифрагированных в объеме  $ABB'_{1}A_{1}$ . Следовательно, характер распределения интенсивности пучков, дифрагированных в объеме  $ABB'_{1}A_{1}$  вследствие прохождения через указанную недифрагирующую зону, при кинематическом рассеянии не меняется, а может только ослабляться вследствие поглощения. Как видно из рис. 5, часть недифрагирующей зоны первого пучка входит в дифрагирующую зону второго пучка и т.д.

Таким образом, при шаговом сканировании, когда ширина шага перемещения образца равна ширине первичного пучка, а ширина шага пластинки ширине дифрагированного пучка, ни одна часть кристалла дифракционно повторно не проектируется и не исключается из дифракционного проектирования. При динамическом рассеянии рентгеновских лучей в кристалле происходят многократные отражения, и энергия дифрагированных волн течет по направлению отражающих плоскостей (рис.6б). Как видно из этого рисунка, при симметричном отражении ширины первичного падающего и дифрагированного пучков одинаковы, тогда шаги сканирования образца и пластинки также могут быть одинаковыми. При несимметричных динамических отражениях шаги перемещения образца и пластинки могут отличаться в зависимости от степени асимметричности отражения и семейства отражающих плоскостей.

При интерферометрических исследованиях в большинстве случаев реализуется симметрично-динамическое рассеяние, поэтому ширины первичного и дифрагированного пучков равны, и, следовательно, в таких случаях могут быть одинаковыми и шаги перемещения образца (интерферометра) и пластинки.

В преимуществах предложенного метода шагового сканирования можно убедиться на основании результатов наших опытов (рис.7).



Рис. 7. Проекционная и шаговая топограммы смешанной муаровой картины: а – проекционная топограмма; б – шаговая топограмма

На рис. 7а,б показаны проекционная и шаговая топограммы смешанной муаровой картины, полученной от одного и того же трехкристального интерферометра (излучение  $CuK_{\alpha}$ , отражение 220). Причем на обычной проекционной топограмме муаровые полосы почти не видны, кроме нижней части топограммы (рис. 7а), между тем как на шаговой топограмме получалась муаровая картина. Это объясняется тем, что муаровые полосы перпендикулярны направлению движения (сканирования) пленки, и их плотность достаточно велика (период мал), о чем было сказано выше. Следует обратить внимание и на рис. 3в. На секционной топограмме (рис. 3а) хорошо видны полосы смещения, полученные от двухкристального интерферометра (излучение  $MoK_{\alpha}$ ), которые при непрерывном сканировании исчезают (рис. 3б), а при шаговом четко видны (рис. 3в).

Таким образом, предложенный способ обеспечивает получение топограмм с большим разрешением и возможностью наблюдения на них любого несовершенства исследуемого кристалла.

Здесь интересно обсудить вопрос секционных и проекционных топограмм, применяемых при визуализации рентгеновских дифракционных изображений несовершенств (дефектов) в кристаллах. При этом необходимо иметь в виду следующее обстоятельство: основным преимуществом методов визуализации рентгенодифракционных изображений кристаллов (наблюдение их на мониторе телевизора) является быстрота реализации этого процесса, что дает возможность исследовать быстропротекающие процессы структурных изменений. Эффективность таких быстродействующих методов обеспечивается тем, что на экране монитора достаточно долгое для исследования время сохраняется изображение одного и того же достаточно широкого участка кристалла.

При инерционных видиконах это можно осуществить с помощью сканирования – получением проекционных топограмм, что несколько уменьшает возможности исследования быстропротекающих структурных процессов (слишком быстрые процессы, происходящие быстрее инерции видикона, невозможно проследить).

При безынерционных видиконах проекционные топограммы невозможно получить – секционные топограммы на экране монитора моментально исчезают. В таких случаях необходимо увеличить ширину первичного пучка без уменьшения разрешения и произвести шаговое сканирование первичного пучка. Здесь важно отметить, что для получения изображения несовершенств кристаллов на экране монитора удобно сканировать первичный пучок, оставив неподвижными видикон и все остальные приспособления. Наконец, отметим, что в рассматриваемых случаях при инерционном видиконе сканированием первичного пучка на экране получается проекционная топограмма участков кристалла, а при безынерционном видиконе сканированием широкого первичного пучка - секционная топограмма с шириной, достаточной для исследования. В последнем случае для исследования участка кристалла с размерами, равными размерам входного окна видикона, необходимо произвести секционное сканирование первичного пучка.

Как правило, в случае фотографической регистрации для получения проекционной топограммы при неподвижных первичном падающем пучке и ограничивающих щелях синхронно сканируют кристалл и фотопластинку, однако с таким же успехом можно при неподвижных кристалле и фотопластинке синхронно сканировать первичный пучок с экранами.

Таким образом, на основании результатов исследований можно прийти к следующим выводам:

1. Доказано, что обычные методы сканирования не всегда дают истинную картину несовершенств кристаллов, часто видимость дифракционных картин несовершенств кристаллов падает до нуля. Секционные дифракционные картины несовершенств кристаллов при сканировании часто исчезают - в случае, когда направление сканирования перпендикулярно интерференционным линиям, период которых мал, на проекционных топограммах эти линии становятся невидимыми.

2. Предложен метод получения рентгеновских дифракционных изображений несовершенств кристаллов с большим разрешением. Метод основан на принципе шагового сканирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абоян А. О. Исследование полей деформации в кристалле-анализаторе рентгеновского интерферометра, подвергнутого ионной имплантации // Изв. НАН РА Физика. -2000.-Т.4, № 4. – С. 212-219.
- **2.** Абоян А. О. Рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных дефектов в монокристаллах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. –2000. Т.66, № 6. С.22-24.
- Lang A. R. The Projection Topography: a New Method in X-Ray Diffraction Microradiography // Acta Cryst. – 1959. – Vol. 12. – P. 249-250.
- **4**. **Yoshimatsu M., Shibata A., Kohra K.** A modification of the Scanning X-Ray Topographic Cameras (Lang's Method) // Advances in X-Ray Analysis. –1966. –Vol.9 P. 14-22.
- Andersen A. L., Gerward L. X-Ray Step Scanning Topography // Phys. Stat. Sol. (a). –1974. Vol.23. - P. 537-542.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.12.2002.

### Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ

# ՔԱՅԼԱՅԻՆ ՏԵՍԱԾՐՄԱՆ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՏԵՂԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆ

Առաջարկված է պրոյեկցիոն տեղագրության հայտնի մեթոդներին բնորոշ բոլոր թերություններից զերծ քայլային տեսածրման մեթոդ, որը ռենտգենադիֆրակցիոն պատկերը գրանցում է մեծ լուծաչափությամբ և առանց աղավաղումների։

## A.H. ABOYAN

# X-RAY STEP SCANNING TOPOGRAPHY

A method of step-by-step scanning, free from all the deficiencies inherent in the known methods of projection topography is proposed. The proposed method allows one to detect high resolution, undistored X-ray diffraction pictures.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 541.183.2.678

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

# А.О. ТОНОЯН, А.Э. БАГДАСАРЯН, Л.С. МАНУКЯН, Н.Н. КИРАКОСЯН, Л.Х. АСРАТЯН, Э.С. ВОСКАНЯН, С.П. ДАВТЯН

# НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАНО-КОМПОЗИЦИЙ

Предлагается новый подход получения полимерных нано-композиций, заключающийся в том, что для деагломерации нано-частиц в исходную реакционную среду добавляются поверхностно активные вещества (ПАВ). Показано, что при радикальной полимеризации акриламида (ААм) в присутствии воды добавки ПАВ, деагломерируя наночастицы, приводят к формированию типичных мицеллярных структур, которые сохраняются и после получения растворенного в воде полиакриламида. Показано также, что структура нано-композиций, полученных на основе нано-добавок FeO, SiO<sub>2</sub> и YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> в кристаллическом полиакриламиде, зависит от теплового режима полимеризации (изотермический, фронтальный, адиабатический и сканирующий).

*Ключевые слова:* полимеризация, нано-композиции, мицеллярные структуры.

**Введение.** Гибридные или полимерные нано-композиции, проявляя синергизм своих исходных компонентов, отличаются превосходными свойствами: механической прочностью, термостабильностью, термохимической стойкостью, электропроводностью, оптической прозрачностью [1-5] и др. [6-10].

В настоящее время разработаны разные способы получения полимерных нано-композиций, из которых наибольшее распространение нашли:

- золь-гель метод;
- интерколяция полимеров и нано-частиц металлов и их оксидов в слоистые структуры неорганической природы;
- полимеризация различных мономеров в присутствии неорганических нанодобавок.

В литературе существенно больше работ [11-28] по первым двум методам получения нано-композиций различного назначения. Этим методам уделяется большое внимание ученых. Это связано с тем, что при получении полимерных нано-композиций третьим способом возникают технологические сложности, связанные с агломерацией нано-частиц в исходной реакционной среде, нарушением их равномерного распределения по объему полимерной матрицы, что приводит, в конечном итоге, к ухудшению свойств получаемых материалов. С точки зрения моделирования различных свойств получаемых нано-композиций и их практического применения, представляет большой интерес изыскание методов деагломерации мелкодисперсной фазы в соответствующей реакционной среде, выделения необходимых по размерам и однородности фаз и исследования свойств полученных на их основе композиционных материалов. В этой связи признанная несостоятельной теория Оствальда - дисперсиодология, предполагающая примат

размеров частиц над всеми остальными свойствами многофазных дисперсных систем, приобретает особую значимость с точки зрения получения композиционных материалов как полимерных, так и любой другой природы. Имеется в виду не игнорирование таких важных процессов, как адсорбция, взаимодействие частиц дисперсного наполнителя и полимерного связующего и, в конце концов, возможность чисто химического взаимодействия между ними, а, при равных условиях, исследование влияния стабилизированных размеров дисперсной фазы порошкообразных добавок на свойства полученных полимерных композиционных материалов. С этой целью интересным является выделение и стабилизация соответствующих фаз с разной степенью дисперсности и исследование влияния размеров дисперсного наполнителя на конечные свойства полученного композиционного материала. Причем немаловажен поэтапный переход от наноразмерных наполнителей, являющихся, по существу, ультрадисперсными, к мезо- и крупнодисперсным фракциям, использование отдельно выделенной фазы в качестве наполнителя и сравнение свойств полученных композиционных полимерных материалов. Естественно, что свойства, придаваемые нано-размерными добавками, светорассеяние, микротвердость, электропроводность, такими как особая кристаллическая структура и др., с увеличением размеров наполнителя будут претерпевать определенные изменения, вплоть до их полного исчезновения и, возможно, появления других.

Данная работа направлена на развитие методов получения полимерных нанокомпозиций радикальной полимеризацией в присутствии нано-частиц разной природы (FeO, SiO<sub>2</sub>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-х</sub>,). При этом особое внимание будет уделено разработке методов деагломерации и равномерного распределения нано-добавок в исходной реакционной среде и в получаемых полимерных нано-композициях. С этой целью будут использованы различные поверхностно-активные вещества (ПАВ) для разных реакционных сред. Необходимо отметить, что использование ПАВ позволяет также из мелкодисперсных порошков непосредственно в реакционной среде выделить необходимые мезо- и ультрадисперсные фракции седиментацией, т.е. варьированием вязкости, температуры и времени обработки исходной реакционной среды.

**1. Экспериментальная часть.** Акриламид и пероксид бензоила (ПБ) очищали двукратной перекристаллизацией из насыщенных растворов этилового спирта. Полимеризацию акриламида под действием ПБ проводили в водных средах с добавками нано-размерных FeO, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> и SiO<sub>2</sub> в присутствии и в отсутствие поверхностно-активных веществ.

В качестве ПАВ использовали сульфонат натрия (C12H25OSO3Na) и алкил сульфонат натрия (C15H31SO3Na).

Исходные полимеризационные среды и полученные полимерные композиции исследовались на люминесцентном микроскопе ЛЮМАМ-И4 на просвет в поляризованном свете.

#### 2. Обсуждение результатов

2.1. Действие ПАВ на нано-частицы и мелкодисперсные порошки неорганической природы. Для проверки действия ПАВ на процессы деагломерации нано- размерных частиц и определения характера их распределения по объему в исходной реакционной массе и в конечной полимерной матрице проводилась серия опытов без и с добавками ПАВ. В первом случае в среду акриламид-вода добавлялось 10% (массовых от мономера) нано-размерных FeO, которые после длительного перемешивания пробы исследовались на микроскопе ЛЮМАМ. Оказалось, что время и интенсивность перемешивания в отсутствие ПАВ (комнатная температура) не приводят к заметной деагломерации нано-частиц FeO.

На рис.1а для примера приведен снимок одного из образцов для системы<sup>1</sup> акриламид + вода (20%) + инициатор (3%)+ FeO (10%), где четко видно неоднородное распределение нано-частиц FeO по объему исходной реакционной среды.





После полимеризации при 60°С агломерированное состояние нано-частиц FeO в полимере практически соответствует исходному. Картина противоположная при добавке в эту же систему 5% ПАВ. Из рис. 16 видно, что наличие в системе ПАВ приводит к формированию неких образований, которые равномерно распределены по объему исходной реакционной среды. Как будет показано в дальнейшем, представленные на рис.1б образования являются типичными мицеллярными структурами, формирование и возникновение которых связано с взаимодействием ПАВ с поверхностью нано-частиц. Полимеризация исходной среды не нарушает заданное распределение.

Далее добавки ПАВ были использованы для выделения из мелкодисперсных неорганических порошков (YBa2Cu3O7-х, SiO2-размерами менее микрон) мезо- или ультрадисперсной фракции методами седиментации. С этой целью в той же системе, кроме нано-частиц FeO, использовали мелкодисперсные порошки пероксидной керамики, оксида кремния и ПАВ в тех же пропорциях. После интенсивного перемешивания реакционные среды отстаивались при 20°C в течение 5-6 часов, далее пробы образцов исследовались на микроскопе. В обоих случаях наблюдаются образования типа рис.16.



Рис. 2. Текстура исходной реакционной смеси для системы ААм + вода + инициатор + ультрадисперсный YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (а) и та же система при увеличении в 100 раз (б)

Для примера на рис.2а представлен снимок реакционной среды для мелкодисперсного порошка YBa2Cu3O7-х, полученного при том же увеличении, что и данные на рис.1. 100-кратное увеличение наблюдаемых на рис.2а образований показывает, что, действительно, в исходной реакционной среде образуются типичные мицеллярные структуры (рис.26) с разными средними размерами. Наблюдаемое на рис.26 различие размеров мицелл, по всей вероятности, определяется размерами частиц пероксидной керамики, вокруг которых формируются ядра, а сами частицы мелкодисперсной керамики являются агрегатами мицеллярных образований. С течением времени (из-за естественного осаждения наиболее крупных образований) размеры мицелл уменьшаются, и их распределение становится более равномерным. При этом на скорость седиментации достаточно сильно влияет температура среды. Так, повышение температуры на 5...6°С приводит к быстрому осаждению более крупных мицеллярных образований, что позволяет регулировать и выделять лишь необходимые для дальнейшей полимеризации мезо- или ультрадисперсные фракции добавок YBa2Cu3O7-х или SiO2. Таким образом, использование ПАВ позволяет не только деагломерировать, но и непосредственно в исходной реакционной среде выделить необходимую фракцию добавок неорганических мелкодисперсных порошков. Далее для полимеризации полученный коллоидный раствор отделялся от осадка простым декантированием, и для увеличения вязкости среды - стабилизации исходной реакционной массы, содержащей частицы нано-размеров, в среду добавлялось 10% полиакриламида от массы мономера. Полученная смесь заполимеризовывалась при температуре 45...50°С. Снимки образцов после полимеризации полностью идентичны рис.26, поэтому здесь не приводятся. Как и в случае добавок нано-частиц FeO, после удаления воды из полимера мицеллярные структуры исчезают, и в поле зрения микроскопа появляются новые образования (рис.3), форма и структура которых зависят от способа полимеризации (рис.За,б,в,г).



Рис. З. Влияние способа полимеризации: изотермика (а), фронт (б), адиабатика (в) и сканирующий режим (г) на структуру нано-композиций на основе полиакриламида

Наблюдаются структуры как типа многогранников, напоминающие сотовые (рис.За), слоистые (рис.Зб), так и другие (рис.Зв,г). Образования типа многогранников для полимерных нано-композиций с оптическими свойствами, полученные на основе полиметилметакрилата и нано- размерных SiO<sub>2</sub>, были предложены в работе [29]. Интересно отметить, что добавки воды приводят к растворению кристаллического полимера и, независимо от способа получения нанокомпозиций (рис.За,б,в,г), к восстановлению мицеллярных структур с размерами, соответствующими размерам исходной реакционной среды. Это говорит как о возможности регулирования размеров наполнителя в получаемых нанокомпозициях, так и об обратимости данной коллоидной системы мономер + ПАВ + + твердая среда ⇔полимер, что позволяет, исходя из свойств обратимых коллоидных систем, в отличие от необратимых, синтезировать нано-композиции с достаточно высоким содержанием ультрадисперсных добавок с заданными размерами.

2.2. Использование ПАВ для синтеза полимер-полимерных нанокомпозиций. Для синтеза полимер-полимерных нано-композиций были использованы мелкодисперсные порошки полиметилметакрилата (ПММ) и поливинилбутирала (ПВБ). Оказалось, что и в этом случае использование ПАВ позволяет получить коллоидные растворы с мицеллярными образованиями, которые для ПММ и ПВБ представлены на рис.4 а, б соответственно. При этом температурно-временная обработка исходных реакционных сред позволяет из смеси ААм + вода + + инициатор + мелкодисперсные порошки полимера выделить мезоили ультрадисперсные фракции. Необходимо также добавить, что образование мицеллярных структур, как и прежде, имеет обратимый характер.



Рис. 4. Мицеллярные структуры для исходной реакционной среды ААм + вода + инициатор + ультрадисперсный ПММ (а) и ПВБ (б) соответственно

Это указывает на то, что молекулы ПАВ в безводных системах, по всей вероятности, взаимодействуя с поверхностью нано-частиц по типу водородных связей, покрывают их равномерным слоем. Для понимания влияния подобного капсулирования нано-частиц на конечные свойства получаемых нано-композиций необходимо провести комплексное исследование различных свойств синтезируемых материалов, что является предметом наших дальнейших исследований. Однако здесь можно полагать, что выбор ПАВ, по крайней мере, позволит целенаправленно регулировать отдельные свойства синтезируемых полимерных нано- композиций.

Таким образом, на основе полученных результатов можно заключить, что использование ПАВ позволяет:

- из мелкодисперсных порошков органической и неорганической природы выделить мезо- или ультрадисперсную фракции;
- получить гибридные полимерные и полимер-полимерные нанокомпозиции с достаточно равномерным распределением нано-добавок по объему полимерной матрицы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Nardo N.J.Di. Nanoscale characterization of Surfaces and Interfaces. VCH. Weinheim, 1994.
- Ruhre E.M., Evans A.G., Ashby M.F., Hizth J.P. Metal Ceramic Interfaces, Pergamon Press, Oxford, 1990.
- 3. Lemmon J.P., Lerner M.M. // Chem. Mater.-1994.-V.6.-P.207.
- 4. Lan T., Kaviratna P.D., Pinnavaia T.J. // Chem. Mater.-1994.-V.6.- P.1395.
- 5. Nicoud J.F. // Science.-1994.-V.263.-P.636.
- 6. Schollhorn R. // Chem. Mater.-1996.-V.8.-P.1747.
- 7. Высоцкий В.В., Ралдугин В.И. // Коллоид. журн.-1996.- N 98.- С.312.
- 8. Загаевский В.Э. // Докл. АН. -1998.-Т.363.-С.42.
- 9. Yoshida M., Lal M., Kumar N.D., Prasad P.N. // J. Mater. Sci.-1997.-N32.- P.4047.
- 10. Yoshiki Chujo and Ryo Tamaki // MRS Bulleten.- 2001.-V.26.-N5.-P.389.

- Mc. Carthy D.W., Mark J.E., Schaefer D.W. // J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys.-1998.-V.36.-P.1167.
- Mc. Carthy D.W., Mark J.E., Clarson S.L., Schaefer D.W. // J. Polym. Sci., Part B, Polym. Phys.-1998.-V.36.-P.119.
- 13. Голубко Н.В., Яновская М.И., Прутченко С.Г., Оболонкова Е.С. // Неорг. материалы.-1998.-N34.- С.1115.
- 14. Gurran M.D., Gedris T.E., Stiegman A.E. // Chem. Mater.-1998.-V.10.-P.1604.
- 15. Калинин С.В., Лукашин А.В., Томашевич К.В., Кнотько А.В., Никифоров М.П.,. Стефанович С.Ю, Вертегел А.А., Третьянов Ю.Д. // Докл. АН.-1999.-Т.364.- С.207.
- 16. Brust M., Bethell D., Schiffrin S.J., Hangmuir, 1998.- N14.- P.5425.
- Shanchez C., Alonso B., Chapusot F., Fibot F., Audebert P. // J. Sol-Gel Sci. technol.-1994.-N.2.- P.161.
- 18. Juangvanich N., Mauritz K.A. // J. Appl. Polym. Sci.-1998.-V.67.-P.1799.
- 19. Кострелев Г.В., Митрофанов М.Ю., Грузинская Е.А. и др. // Журн. прикл. химии.-1999.-N72.-C.488.
- 20. Mchorotra V., Giannelis E.P., Ziolo R.F., Rogalskyj P. // Chem. Mater.- 1992.-V.4.-P.20.
- 21. Messersmith P.B., Giannetlis E.P. // J. Polym. Sci., Part A, Polym. Chem.-1995.-V.33.-P.1047.
- 22. Hild A., Seguaris J.M., Narres H.D., Schwuger M. Colloid Surf. A.-1997.- N123.-P.515.
- Wang L., Brazis P., Rocci M., Kannowurf C.R., Kanatzidis M.G. // Chem. Mater.-1998.-V.10.-P.1998.
- 24. Sanchez C. and Lebean B. // MRS Bulleten/May 2001.- V.26.-N5.-P.377.
- 25. Douglas A. Loy, Cuest Editor // MRS Bulleten/May 2001.- V.26.- N5.- P.364.
- Tonoyan A.O., Davtyan S.P., Martirosian S.A., Mamalis A.G. // J. of Materials Processing Technology.-2001.-V.108.-P.201.
- 27. Давтян С.П., Тоноян А.О., Айрапетян С.М. // Хим. журн. Армении.- 2002.-Т.55.-N 4.-С.17.
- Айрапетян С.М., Тоноян А.О., Аракелова Э.Р. // Высокомолек. соед.- 2001.-Т.43А.-N10.-С.1814.
- 29. Clement Sanchez and Benedicte Lebeau // MRS BULLETIN/MAY 2001.-V.26.-N5.-P.377.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.02.2002.

### Ա.Հ. ՏՈՆՈՅԱՆ, Ա.Է. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Լ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ն.Ն. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Լ.Խ. ՀԱՍՐԱԹՅԱՆ, Է.Ս. ՈՍԿԱՆՅԱՆ, Ս.Ղ. ԴԱՎԹՅԱՆ

### ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ՆԱՆՈ-ԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՆՈՐ ՄՈՏԵՑՈՒՄՆԵՐ

Առաջարկվում է նանո-կոմպոզիցիաների ստացման նոր մոտեցում, հիմնված այն հանգամանքի վրա, որ մակերեսային ակտիվ նյութերի (ՄԱՆ) հավելումները սկզբնական ռեակցիոն միջավայրին, հանգեցնում են նանո-մասնիկների դեագլոմերացման։ Ցույց է տրված, որ ակրիլամիդի ռադիկալային պոլիերացումը ջրային միջավայրերում ՄԱՆ-ի առկայությամբ ուղեկցվում է տիպիկ միցելյար ստրուկտուրաների ձևավորմամբ, որոնք պահպանվում են նաև պոլիմերացումից հետո։ Ցույց է տրված նաև, որ FeO, SiO<sub>2</sub>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-</sub> <sup>\*</sup> նանո-մասնիկների առկայությամբ ստացված նանո-կոմպոզիցիաների ստրուկտուրային կառուցվածքը որոշվում է պոլիմերացման գործընթացի ջերմային ռեժիմներով (իզոթերմային, *մ*ակատային, ադիաբատ և տեսածրվող)։

### A.O. TONOYAN, A.E. BAGHDASARYAN, L.S. MANUKYAN, N.N. KIRAKOSSYAN, L.KH. HASRATYAN, E.S. VOSKANYAN, S.P. DAVTYAN

# THE NEW APPROACHES OF POLYMER NANO- COMPOSITIONS OBTAINMENT

A new approach of polymer nanocomposites production, where for the deagglomeration of nano-particles in the initial reacting media the surfactants are added, is proposed. It is shown that during the acryl amide radical polymerization in the presence of water the additives of surfactants deagglomerating the nano-particles result in formation of typical micellar structures, which are well preserved even in the water solution of polyacrylamide. It is also shown that the structure of obtained nanocomposites based on polyacrylamide and nano- additives such as FeO, SiO<sub>2</sub>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub> O<sub>7-x</sub> depends on the regimes of polymerization (isothermal, frontal, adiabatic, scanning).

### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

*Հ*Sጉ 621.762; 789-977

ՆՅՈՒԹԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

# Ս.Գ. ՄԱՄՅԱՆ

# ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ ԼԱՎԱՐԿՎԱԾ ՄԱԿՐՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՍԱՀՄԱՆՄԱՆ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ

Մշակված է բարձր համախականության հոսանքի սարքերի կիրառմամբ ջերմային մշակման մանապարհով համալիր մեխանիկական հատկությունների բարձրացման բոլորովին նոր մոտեցում. հատկությունների փոփոխական՝ ընդհատ ռացիոնալ բաշխում ըստ դետալի ծավալի՝ հաշվի առնելով սահմանային բեռնվածությունների տակ առաջացած լարման էպյուրները։

**Առանցքային բառեր.** ամրություն, հոգնածություն, պլաստիկություն, լարման էպյուր, ԲՀՀ մխում, ԲՀՀ արձակում։

Հիմնվելով քայքայման մեխանիզմի և վերջինիս հետ կապված կոնստրուկցիոն ամրության բարձրացման ուղիների վերլուծության վրա՝ կարելի է կատարել հետևյալ ընդհանրացումները. ա) բացակայում են կոնստրուկցիոն ամրության բարձրացման նպատակով միկրո- և մակրոկառուցվածքների ձևավորման խնդրի լուծման համատեղ մոտեցումներ, բ) ներկայումս չի իրագործվում նյութի նախագծման խնդիրների լուծում՝ կախված արտաքին ուժերի ազդեցության տակ մեքենամասերում և կոնստրուկցիաներում առաջացած ներքին լարումների բաշխումից (բաշխման էպյուրներ) և քայքայման մեխանիզմի բնույթից։

Նշված ուղղություններով տարվող հետազոտական աշխատանքները մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում, և, անկասկած, ունեն գիտագործնական մեծ նշանակություն։

Կոմպոզիցիոն նյութերին նվիրված գրականության մանրամասն ուսումնասիրությունը հանգեցնում է այն եզրակացության, որ կոմպոզիցիոն նյութերն ավելի ձիշտ կլիներ դասակարգել առաջին հերթին՝ կախված բաղադրիչ մասերի չափերի գործոնից, ավելի ստույգ՝ միկրոկառուցվածքի նկատմամբ նրանց ունեցած համաչափությունից, ըստ որի կարելի է տարբերել միկրոկոմպոզիցիոն և մակրոկոմպոզիցիոն նյութեր։ Մակրոկոմպոզիտների նախագծման ժամանակ պետք է հաշվի առնել արտաքին ուժերի ազդեցության տակ շինածոյում առաջացած ներքին լարումների էպյուրը և ընդհանրապես զանազան հատկությունների պահանջարկը մակրոտեղամասերում։

Ուսումնասիրության հիմնական նպատակն է՝ մշակել հուսալի բարձրամուր շերտավոր կոմպոզիտների և ընդհանրապես մակրոկոմպոզիտների ստացման արդյունավետ համակցված տեխնոլոգիաներ՝ համատեղելով փոշեմետալուրգիայի, ԲՀՀ մխման և ջերմամեխանիկական մշակման առանձնահատկություններն ու հնարավորությունները։

Բարձր համախականության հոսանքով ինդուկցիոն տաքացմամբ մխումը և արձակումը հնարավորություն են տալիս պահանջվող ձևով կարգավորել կարծրության և պլաստիկության բաշխումն ըստ պատրաստի շինածոյի ծավալի։ Այս տեխնոլոգիան լայնացնում է փոշեմետալուրգիայի և ջերմամեխանիկական մշակման համատեղմամբ բարձրամուր ֆունկցիոնալ մակրոկոմպոզիտների
ստացման [ 1, 3 ] հնարավորությունները` հատկապես ժառանգական բարձր ջերմաստիձանային ջերմամեխանիկական մշակման ժամանակ։

Հետազոտվել են միջին ածխածնային ցածր լեգիրված փոշեպողպատներ։ Քվազիշերտավոր կոմպոզիտների ստացման ներկայացվող տեխնոլոգիան կարող է կիրառվել հեծանների, լիսեռների, ատամնանիվների և այլ մեքենամասերի հոգնածային ամրության, ինչպես նաև որակի (Ճշտության դաս) բարձրացման համար։ Աշխատանքի էությունն այն է, որ ծակոտկեն նախապատրաստվածքներից ԲՋՋՄՄ կիրառմամբ [ 1, 2 ] ստացված կիսաֆաբրիկատները ենթարկվում են միջանկյալ փափկեցնող բարձր արձակման (t = 450 – 650 °C և  $\tau$  = 20 րոպե), որը թույլ է տալիս անհրաժեշտության դեպքում իրագործել վերջնական մեխանիկական մշակում։ Այնուհետև, օգտվելով որոշակի խտությամբ ԲՀՀ միման և արձակման հնարավորություններից, ապահովվում է կարծրության և ամրության լավարկված բաշխում ունեցող եռաշերտ քվազիկոմպոզիտային պողպատի ստացում [4]։

Նշված ջերմամշակումից հետո D տրամագծով լիսեռի՝ ըստ ընդլայնական հատույթի կարծրության ու ամրության բաշխման սխեմաները բերված են նկ. 1 – ում և նկ. 2 – ում։



Նկ.1. Կարծրության բաշխումն ըստ լիսեռի հատույթի

Հատկությունների նման բաշխումն ըստ հատույթի մոտավորապես համապատասխանում է սահմանային բեռնվածությունների ազդեցությամբ շինածոյի վրա առաջացած ներքին լարումների բաշխմանը [5]։ Առավելագույն ստատիկ ամրության հետ մեկտեղ շինածոն ձեռք է բերում մածուցիկության լրացուցիչ պաշար, որը և մեծացնում է նրա հոգնածության սահմանը։ ԲՀՀ արագ տաքացումը թույլ է տալիս պահպանել ԲՋՋՄՄ ամրացման էֆեկտը, այսինքն՝ միաժամանակ իրականացվում է ԺԲՋՋՄՄ։ Արդյունքում ապահովվում է մանրահատ, խիստ զարգացած պոլիգոնացված ենթակառուցվածք, և բարձր մեխանիկական հատկությունների համալիր։



Նկ.2. Ամրության սահմանի բաշխումն ըստ լիսեռի հատույթի

Lhubnh մhջուկի, ԲՀՀ տաքացմամբ նախնական ջերմամշակված շերտի և մակերևութային մխված շերտի համապատասխան կարծրություններն ու ամրությունները նշանակված են՝ H<sub>1</sub>; H<sub>2</sub>; H<sub>3</sub> և  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ : Համապատասխան շերտերի լավարկված խորությունները նշանակված են S<sub>1</sub> և S<sub>2</sub> տառերով։ Ըստ հատույթի ամրության բաշխման կորերը կառուցվել են կարծրության բաշխման կորերի օգնությամբ՝ ընդունելով, որ  $\sigma_B = KH$ : Նկ.2 –ում բերված է նաև շինածոյի վրա սահմանային բեռնվածությունների ներգործության ժամանակ կտրվածքում առաջացած լարումների էպյուրը։ Նման պայմաններում ջերմամշակմամբ ստացված առավելագույն ամրություն ունեցող շինածոյում առաջանում են ամրության կամ համեմատական սահմանին հավասար լարումներ։

Հատույթի ծանրության E կենտրոնը, մակերևութային շերտի ԲՀՀ մխումից և արձակումից հետո կարծրությունը ցույց տվող A կետի հետ միացնող AE ուղիղը կարծրության իդեալական բաշխման գիծն է։ Նման բաշխման դեպքում ստացվում է լիսեռի առավելագույն ամրություն ծռման և ոլորման ժամանակ՝ առավելագույն մածուցիկության պաշարի պայմաններում։

Կարծրության իդեալական բաշխում ըստ լիսեռի հատույթի հնարավոր չէ, սակայն տաքացման ժամանակակից մեթոդները թույլ են տալիս առավելագույն չափով մերձենալ նման բաշխմանը՝ կիրառելով հատույթի՝ ըստ շերտերի ամրացման տեխնոլոգիա։ Ըստ որում՝ ինչքան մեծ է շերտերի թիվը, այնքան կարծրության բաշխումը մոտ է իդեալականին, սակայն, արդյունավետության տեսանկյունից ելնելով, աշխատանքում ընտրված է երկշերտ ԲՀՀ ջերմամշակում։

Կարծրության իդեալական բաշխման դեպքում ամրության սահմանի բաշխումն ըստ հատույթի համապատասխանում է A<sub>1</sub>E<sub>1</sub> գծին (նկ.2), ինչպես նաև՝ շինածոյի վրա սահմանային բեռնվածությունների ազդեցության տակ առաջացած լարվածությունների էպյուրին։ Օգտվելով կարծրության բաշխման իդեալական կորից և ստացված կարծրության H<sub>1</sub>; H<sub>2</sub> և H<sub>3</sub> արժեքներից, կարելի է որոշել շերտերի լավարկված S<sub>1</sub>; S<sub>2</sub> խորությունները։

Ոլորման և ծռման ժամանակ կլոր լիսեռի հատույթում առավելագույն լարումներն առաջանում են արտաքին կետերում, որոնք հավասարաչափ են հեռացված կտրվածքի ծանրության կենտրոնից, այդ պատձառով ոլորման և ծռման ժամանակ լավարկված ամրացման խորությունները ամենալարված կետերի համար նույնն են [5]։ Ամրացվող շերտերի խորությունների փոխհարաբերության ընտրության հիմնավորումը դիտարկված է ընդհանուր դեպքի համար, երբ ձողն ունի կամավոր հատույթ ( նկ.3 )։



Ընդունենք, որ ոլորող մոմենտներից հատույթում ամենամեծ լարումն առաջանում է A կետում։ Միացնելով A կետը O ծանրության կենտրոնի հետ՝ (AO = R) A կետից տանենք ուղղահայաց AO – ին և ստացված ուղղի վրա որոշակի մասշտաբով տեղադրենք H<sub>1</sub>; H<sub>2</sub> և H<sub>3</sub> կետերը։ Միացնելով A<sub>3</sub> և O կետերը՝ կստանանք AA<sub>3</sub>O եռանկյունին, որում A<sub>3</sub>O կողմը, ինչպես և AE հատվածը նկ.1 – ում, A կետի համար ըստ ձողի հատույթի կարծրության իդեալական բաշխումը բնութագրող գիծն է։

Համապատասխան կառուցումներից հետո ստացվում են AA<sub>3</sub>O – ին նման A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>A<sub>2</sub>՝ և A<sub>1</sub>A<sub>3</sub>A<sub>1</sub>՝ եռանկյունները։ Ելնելով եռանկյունների նմանությունից` կարելի է գրել`

 $H_3 / H_3 - H_1 = R / S_1$  yuu  $S_1 = R \cdot (H_3 - H_1) / H_3$ ,

 $H_3 / H_3 - H_2 = R / S_2$  yuu  $S_2 = R \cdot (H_3 - H_2) / H_3$ :

Ընդունենք, որ ձողի վտանգավոր հատույթում ծռման մոմենտի ազդեցության տակ ամենամեծ լարումներն առաջանում են B կետում, իսկ զրոյի հավասար լարումները՝ BO<sub>1</sub> չեզոք գծի վրա։ Դժվար չէ նույն մոտեցմամբ ապացուցել, որ նշված օրինաչափությունները պահպանվում են։ Ծռման և լարման տակ աշխատող կամավոր հատույթով հեծանի ամրացվող շերտերի լավարկված խորությունների որոշման համար ստացված հարաբերակցությունները համանման են։

Առաջարկվող ջերմամշակման տեխնոլոգիական սխեման բերված է նկ.4 – ում։

Հաշվի առնելով պողպատի մակնիշն ու մեքենամասի աշխատանքային պայմանները, հիմնվելով տեղեկատվական (նորմատիվային) տվյալների վրա, սահմանում են ամրացվող շերտերի և միջուկի կարծրությունները։ Օգտվելով վերը նշված հարաբերակցություններից՝ որոշում են Տւ lı S2 արժեքները։ Համապատասխան խորություններին հասնում են տրանսֆորմատորի հզորության, հոսանքի հաձախականության և ժամանակի կարգավորման ձանապարհով [ 5 ]։



Նկ. 4. Ամրացնող ջերմամշակում

Նշված տեխնոլոգիայի արդյունավետությունն ուսումնասիրվել է փոշեպողպատ 40X – ից պատրաստված հոգնածային փորձարկման նմուշների վրա։

Ջերմային մշակման ռեժիմները և փորձարկման տվյալները բերված են աղյուսակ 1-ում և 2 – ում։

#### Աղյուսակ 1

մակերևութային մշակման ռեժիմները									
Ջեր-	Ջերմամշակման	Գեներա-	Տաքացման	Տաքացման					
մամշակ-	օպերացիաները	տորից	ժամանակը,	ջերմաս-					
ման		սպառվող	րոպե	տիՃանը,∘Ը					
եղանակը		հզորությունը							
Առա- ջարկվող	1) 6 մմ խորությամբ նախնական ամրացնող ջերմամշակում ԲՀՀ մխում ԲՀՀ արձակում 2) ԲՀՀ մակերևութային մխում արձակում	43 12 155 -	0.43 0.5 0.016 60	900 380 960 180					
Մովո- րական մակե- րև- ութային մխում	1) Նախնական ծավալային ամրացնող մշակում մխում արձակում 2) ԲՀՀ մակերևութային մխում արձակում	- - 155 -	40 60 0.016 60	850 350 960 180					

Որոշակի խորությամբ նախնական ամրացնող ջերմամշակման և ԲՀՀ

Հոգնածային փորձարկումներն իրականացվել են 20 մմ բանվորական տրամագիծ ունեցող հարթ նմուշների վրա ծռման ժամանակ՝ պտտմամբ, УИМП – 20 մեքենայի վրա, որպես բազա ընդունվել է 5 •  $10^7$  ցիկլ։ Նկատվել է  ${f \sigma}_{_{-1}}$  ի աճ` 700... 900 ሆՊա:

Աղյուսակ 2

Ջերմա-	Նախ	ւնական	Մակերևո	ւթային	Մի-	Հոգնածու-		
մշակման	ջերմ	ամշակ-	մխումից և		ջուկի	թյան		
եղանակը	մամբ ս	ւմրացված	արձակումից հետո		կարծ-	սահմանը,		
	շերտը		ստացված շերտը		րու- թյունը, HRC	<b>σ</b> 1, <i>υ</i> ηш		
	շերտի	շերտի	շերտի	շերտի				
	խորու-	կարծ-	խորու-	կարծրու-				
	թյունը,	րությունը,	թյունը,	թյունը,				
	น์น์	HRC	น์น์	HRC				
Առա-	5.8 –	48 - 50	1.8 –	59 – 60	24 - 26	900		
ջարկվող	6.0		2.0					
Սովո-			1.8 –	59 - 60	40 - 42	700		
րական			2.0					

Նմուշնե	ւրի ջերվ	<mark>նամշակմ</mark>	ան և հ	ոգնան	ծային	փորձ	արկմա՝	ն արդյ	ունքն	երը

Աղյուսակ 3

Ատամնանիվների դեֆորմացիաների չափումների արդյունքները մշակման տարբեր եղանակներից հետո [5]

Ջերմա-	Դետ-	Նոմինալ արժեքներից ամենամեծ շեղումները, մկմ										
մշակման	ալի											
եղանակը	համա											
	րը											
		Ատամնւ	սպսակի	Միջառա	նցքային	Քա	յլի					
		2ເມການເ	լղային	Smi	փի	սահմանային						
		խփո	ումը	տատան	ումները	շեղումները						
		մինչև	ջերմա-	մինչև	ջերմա-	մինչև	ջերմա-					
		ջերմա-	մշակու-	ջերմա-	մշակու-	ջերմա-	մշա-					
		մշակումը	մից	մշակումը	մից	<b>մ</b> 2ɯ-	կումից					
			հետո		հետո	կումը	հետո					
Առա-	1	29	58	41	53	13	19					
ջարկվող	2	22	40	38	46	19	17					
2 1 1 1 1	3	25	38	30	47	9	15					
	4	27	46	32	54	9	22					
	5	24	40	28	46	13	19					
Սովորա-	6	24	123	38	190	10	105					
նան	7	28	110	36	176	11	98					
1	8	28	80	30	95	9	67					
	9	27	115	35	203	10	47					
	10	38	103	40	221	12	63					

Կարծրության ռացիոնալ բաշխումն ըստ սահմանային բեռնվածության առաջացրած լարվածության էպյուրի ոչ միայն մեծացնում է հոգնածային սահմանը, այլև նվազագույնի է հասցնում ջերմային մշակման ժամանակ առաջացած դեֆորմացիաները։ Համեմատության համար աղյուսակ 3 – ում բերված են պողպատ 45X – ից պատրաստված ատամնանիվների (տրամագիծը՝ 120 մմ, մոդուլը՝ 6 մմ, պսակի լայնությունը՝ 30 մմ ) դեֆորմացիաների չափման արդյունքները տարբեր ջերմամշակումներից հետո։

Այսպիսով, ձևավորվում է ամրացնող ջերմամշակման բոլորովին նոր մոտեցում` հատկությունների փոփոխական ընդհատ ռացիոնալ բաշխում ըստ դետալի ծավալի` հաշվի առնելով սահմանային բեռնվածությունների ազդեցության տակ առաջացած լարման էպյուրները։ Այս ուղղությամբ մեծ անելիքներ ունեն ինչպես մետաղագետները, այնպես էլ նյութերի դիմադրությունն ուսումնասիրող գիտնականները։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Бернштейн
   М.Л.,
   Саклинский
   В.И.,
   Мамян
   С.Г.
   Высокотемпературное

   термомеханическое
   упрочнение
   конструкционных
   сталей
   //
   Повышение

   конструкционной прочности
   сталей и сплавов:
   Сб. тр. М., 1970. С.126-133.
   С.126-133.
- Мамян С. Г. Исследование влияния последеформационной выдержки на структуру и свойства металлопорошковых сталей // Структурообразование при горячей деформации: Материалы Всесоюз. конф. – М., 1991. – С.76-80.
- Mamian S. G. Creation of High Strenght Quasi Composites and alloys of a New Class //New processes and Aplication Experience. –Materials of the Congress. – Moscow, 1990.-P.196 - 201.
- 4. Шепеляковский К. 3. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. М.: Машиностроение,1972. С.162-164.
- 5. А. с. 1276673А1 СССР. Способ термической обработки изделий Бедяко М.Н., А. И. Тарарук, А. И. Гордиенко, Г.А. Семенюк // Открытые изобретения. Опубл. в Б.И. №46. 1986.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.06.2002։

#### С.Г. МАМЯН

### ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПУТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ

Разработан новый подход повышения комплекса механических свойств путем термической обработки с использованием установки ТВЧ: переменное дифференцированное рациональное распределение свойств по объему детали с учетом эпюр внутренних напряжений, образующихся под предельными нагрузками.

#### S.G. MAMYAN FATIGUE STRENGTH INCREASE BY DETERMINING OPTICAL MACROSTRUCTURE

A new method of increasing the mechanical property complex by means of heat treatment using a high frequency current setup is elaborated. Variable differentiated rational distribution of properties according to the detail size paying attention to the epures of internal stresses formed under ultimate loads is given.

# ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 553.637: 66.01.113

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

#### М.А. ПОГОСЯН, А.Г. АМБАРЦУМЯН, К.А. КОСТАНЯН

# ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ВЫСОКОКРЕМНЕЗЕМИСТЫХ СТЕКОЛ

На примере высококремнеземистого стекла (ВКС) БАГ-2 изучено влияние отжига на термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Показано, что характер изменения ТКЛР отожженных и неотожженных ВКС аналогичен характеру изменения ТКЛР обычных стекол.

*Ключевые слова*: отжиг, температурный коэффициент линейного расширения, высококремнеземистое стекло.

Термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) является одним из важнейших технологических и структурно-чувствительных свойств стекол, в том числе и для высококремнеземистых, которые используются для изготовления оболочек ламп высокоинтенсивных источников света (ВИС).

Поскольку высококремнеземистые стекла имеют низкий ТКЛР, при их производстве в электрической гарнисажной печи прямого нагрева (ЭГППН) в виде штабиков или трубок в дальнейшем они не отжигаются. Таким образом, стекла получаются в закаленном состоянии. Впоследствии их свойства изучают без предварительного отжига.

Целью данной работы является выявление влияния отжига на ТКЛР высококремнеземистых стекол на примере стекла БАГ-2, имеющего состав в масс.%: SiO<sub>2</sub> - 96,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3,0; B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 0,8; R<sub>2</sub>O + RO - 0,2.

В литературе вопросу измерения ТКЛР различных стекол в зависимости от степени их отжига посвящено много исследований, которые обобщены в [1]. Эти исследования показывают, что в большинстве случаев ТКЛР отожженных стекол выше ТКЛР этих же стекол в закаленном состоянии. Теоретическое обоснование этого явления довольно сложно, так как для стеклообразного состояния в строгом виде нельзя применять теорию теплового расширения жидкостей и твердых тел. Однако для понимания происходящих процессов можно воспользоваться ее упрощенными принципами с соответствующей корректировкой относительно особенностей стеклообразного состояния.

Известно, что на каждую пару атомов или ионов, связанных друг с другом химическими связями, действуют силы притягивания или отталкивания. При любых стабильных условиях эти силы находятся в определенном равновесии.

По мере возрастания энергии атома растет амплитуда его колебаний. Следовательно, возрастание полной энергии (или температуры) атома приводит к тому, что среднее расстояние между атомами увеличивается. Применительно к кристаллу или, с известными допущениями, к стеклу это означало бы, что с возрастанием энергии (температуры) они непременно будут расширяться, что и наблюдается на практике.

Таким образом, в самом упрощенном варианте можно считать, что термическое расширение – это результат увеличения термических колебаний атомов и увеличения расстояния между ними.

Исходя из этого, следует, что любое твердое тело, имеющее определенное строение, которое не изменяется в результате термического воздействия, должно иметь определенную и конкретную величину коэффициента (объемного или линейного) расширения.

Анализ литературных данных и результаты многочисленных измерений показали, что ТКЛР стекол, в частности переходных, зависит от тепловой предыстории измеряемого образца. Как уже было отмечено [1], в большинстве случаев ТКЛР отожженных стекол выше ТКЛР закаленных стекол.

Исследования на примере переходного стекла БАГ-2 показали, что ТКЛР закаленного стекла всегда ниже или равен ТКЛР отожженного стекла.

На рисунке приведены кривые расширения стекла БАГ-2, закаленного и отожженного в различных условиях. Эти кривые являются средними, полученными в результате 3-5 измерений образцов, предварительно подготовленных при одних и тех же условиях.



2 – БАГ-2 – отожженное при 1600 С в течение 1 часа, –  $\alpha_{20-300} = 10.8 \cdot 10^{-7} \ rpa \pi^{-1}$ ; 3 – БАГ-2 – отожженное при 1600 С в течение 4 часов, –  $\alpha_{20-300} = 10.8 \cdot 10^{-7} \ rpa \pi^{-1}$ 

Как видно из рисунка, образец неотожженного стекла (кривая 1) имеет ТКЛР 9,8·10<sup>-7</sup> $K^{-1}$  в интервале 20...300°*C*, далее при температуре 600°*C* удлинение образца принимает отрицательное значение, и, начиная с 800...850°*C*, это значение резко снижается. Аналогичный характер изменения ТКЛР наблюдается у образца стекла БАГ-2, отожженного при температуре 1600°*C* в течение 1 часа (кривая 2),

однако соответствующие изменения смещены на 100...120°С в сторону высоких температур. Кроме того, в этом случае его ТКЛР на одну единицу выше по сравнению с ТКЛР неотожженного стекла, что подтверждает, что ТКЛР отожженных стекол несколько выше ТКЛР неотожженных стекол. Однако здесь непонятным остается характер кривой расширения, так как после температуры 950...1000°С удлинение образца принимает резко отрицательный характер. Согласно [2], такой характер кривой расширения связан с проявлением границ зоны отжига стекол. Соглашаясь с положениями и выводами авторов работы [2] относительно дилатометрического проявления температурных зон отжига стекол, в данном случае не можем полностью отнести наблюдаемую аномалию к этому явлению. И если исходить из этого, то повторение характера кривой расширения стекла, отожженного при 1600°С, связано с тем, что эта температура выше, чем сама граница отжига. Разница же ТКЛР отожженных и неотожженных стекол объясняется тем, неотожженных образцах фиксируется что, вероятно, в структура высококремнеземистых стекол. При измерении ТКЛР такого образца расширение несколько задерживается в связи с релаксацией структуры.

Расширение образца стекла, отожженного при температуре  $800^{\circ}C$  в течение 4 часов (согласно работе [2]) (кр. 3, рис.), протекает иначе, чем при вышеизложенных случаях. Характер изменения расширения при низких температурах соответствует характеру изменения неотожженного стекла. Даже изменение знака удлинения не происходит до температуры  $1050...1070^{\circ}C$ , затем наблюдается сжатие образца. К сожалению, возможности кварцевых дилатометров ограничены температурой  $1000...1100^{\circ}C$ , поэтому невозможно проследить за изменением удлинения образца до размягчения. Однако надо отметить, что 4-часовой отжиг стекла при температуре нижней границы зоны отжига, согласно [2], уже смещает температуру сжатия образца в зону высоких температур. То есть, даже при низких для переходных стекол температурах отжига ( $800^{\circ}C$ ), когда структура стекла достаточно жестка, она очень далека от температур размягчения. При этом достаточно медленно происходит процесс отжига, и структура приближается к своему равновесному состоянию.

Таким образом, проведенное исследование показало, что характер изменения ТКЛР отожженных и неотожженных высококремнеземистых стекол аналогичен характеру изменения ТКЛР обычных стекол. Разница лишь в том, что отклонения обычного хода дилатометрических кривых смещены в сторону более высоких температур. К сожалению, кварцевые дилатометры не позволяют снять всю кривую расширения до размягчения тугоплавких высококремнеземистых стекол, и тем самым невозможно определить верхнюю границу температур отжига.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Мазурин О.В. и др. Тепловое расширение стекла. Л.: Наука, 1969. -215 с.
- Геодакян Дж.А., Костанян К.А., Меликян А.О. Дилатометрическое определение границ зоны отжига промежуточных стекол // Электронная техника. Сер. Материалы.- 1980. - Вып 5.- С. 93-99.

НПП Материаловедения, ГИУА. Материал поступил в редакцию 09.07.2002.

#### Մ.Ա. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Գ.ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ, Կ.Ա. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

## ԹՐԾՄԱՆ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱՐՁՐՍԻԼԻԿԱՏԱՅԻՆ ԱՊԱԿԻՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴԱՐՁԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՅԻ ՎՐԱ

Միլիկահողի մեծ քանակություն պարունակող ԲԱԳ-2 տիպի ապակու օրինակի վրա ուսումնասիրված է թրծաթողման ազդեցությունը վերջինիս ջերմային ընդարձակման գործակցի վրա։ Ցույց է տրված, որ թրծաթողման ապակու ջերմային ընդարձակման գործակիցը հավասար կամ մի փոքր մեծ է չթրծաթողված ապակու ջերմային ընդարձակման գործակցից։ Ընդարձակման կորի ոչ սովորական ընթացքի շեղման միջոցով որոշված է ԲԱԳ-2 ապակու թրծման ներքին սահմանի ջերմաստիձանը։

#### M.A. POGHOSSYAN, A.G. HAMBARDZUMYAN, K.A. KOSTANYAN

#### INFLUENCE OF ANNEALING ON HIGH-SILICEOUS GLASS LETC

The influence of annealing on glass LETC is studied on an example of high – siliceous glass  $BA\Gamma$ -2. It is shown that LETC of annealed glasses is a little higher or equal to LETC of unannealed ones.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 621.762.620.179.1

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

#### Г.А. ТУМАНЯН

# ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ПРИ ЭКСТРУЗИИ

На основе анализа литературных источников установлено, что зависимость пористости при горячей экструзии заготовки от коэффициента вытяжки, давления при экструзии ( $\rho$ ), предела текучести порошка  $\delta$ т), температуры при экструзии (T), угла матрицы ( $\alpha$ ) и начальной пористости ( $\theta$ ) до настоящего времени получена экспериментальным путем, что связано с большими трудозатратами. Представлена формула, позволяющая аналитическим путем оценить пористость при экструзии.

*Ключевые слова*: горячая экструзия, коэффициент вытяжки, предел текучести, пористость.

Для выявления закономерности процесса деформирования пористых тел при горячей экструзии необходимо определить условия равновесия и неразрывности протекания процессов при горячей экструзии пористых материалов.

До настоящего времени эти процессы были изучены экспериментально, что связано с большими трудозатратами. Данная работа посвящена выявлению возможности теоретического обоснования процесса при горячей экструзии, что позволяет расчетным путем оценить зависимость пористости порошковых тел при горячей экструзии от коэффициента вытяжки ( $\lambda$ ), давления при экструзии (p), предела текучести порошка ( $\sigma_{T}$ ), температуры при экструзии (T), угла матрицы ( $\alpha$ ) и начальной пористости заготовки ( $\theta_{0}$ ).

Сложность теоретического исследования процесса деформирования порошковых тел, обусловленная переменным объемом тела, вызывает необходимость создания и изучения расчетной модели.

Цель данной работы - на основе большого количества экспериментальных данных представить обобщенное аналитическое выражение, позволяющее оценить изменение пористости тела в процессе горячей экструзии с учетом параметров экструзии.

Рассмотрим процесс экструзии цилиндрического порошкового тела, приняв сферическую систему координат (r,  $\alpha$ ,  $\varphi$ ), начало которой находится в вершине конуса между образующими матрицы  $\alpha_{\rm m} \leq 60^{\circ}$ . Считая, что скорости движения в очаге деформации направлены по радиусу r, найдем поле скоростей движения частиц сплава:

$$V_r = V_r(r), \ V_{\alpha} = 0, \ V_{\omega} = 0.$$
 (1)

Допуская, что на верхней границе очага деформации (r=b) скорости движения всех точек не зависят от угла деформации, получим

$$\mathbf{V}_0 \mathbf{F}_k = -\mathbf{V}_r \mathbf{F}_r, \qquad (2)$$

где  $V_0$  – скорость деформирования;  $F_k$  – площадь контейнера (заготовки);  $F_r=2\pi r^2(1-\cos\alpha)$ – площадь сферической поверхности шарового сегмента радиуса r [1].

Тогда радиальная скорость будет

$$V_{\rm r} = \frac{V_0 R_{\rm H}^2}{2r^2 (1 - \cos \alpha)}.$$
 (3)

Геометрическим местом точек, имеющих одинаковую радиальную скорость движения, будут поверхности шаровых сегментов. Начало зоны деформирования ограничивается сегментом радиуса r=b, конец – сегментом радиуса r=c.



Рис. Схема течения материала при экструзии

Пористость определяется как отношение объема пор  $V_{\pi}$  к объему пористого тела  $V_{T}\colon$ 

$$\theta = V_{\pi} / V_{T} . \tag{4}$$

Учитывая, что объем вещества  $V_B = V_T - V_\pi$ , где

$$V_{\rm B} = G / \rho; \quad V_{\rm T} = G / \rho_{\rm T}, \tag{5}$$

из (1) следует

$$\theta = \frac{V_{\rm T} - V_{\rm B}}{V_{\rm T}} = 1 - \frac{V_{\rm B}}{V_{\rm T}} = 1 - \frac{G/\rho}{G/\rho_{\rm T}} = 1 - \frac{\rho_{\rm T}}{\rho};$$

$$\rho_{\rm T} = \rho(1 - \theta) \,, \tag{6}$$

где  $\rho_{\rm T}$  - плотность пористого тела;  $\rho$  – плотность вещества (компетентного материала); G – масса вещества.

Чтобы установить закономерность при горячей экструзии композиционных материалов, необходимо учесть условия равновесия и неразрывности, приведенные в [2].

Уравнение равновесия имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_{\rm r}}{\partial \rm r} + 2 \frac{\sigma_{\rm r} - \sigma_{\phi}}{\rm r} = 0, \qquad (7)$$

а уравнение неразрывности :

$$\varepsilon_{\rm r} + 2\varepsilon_{\phi} = \varepsilon = \frac{1}{1 - \theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + V_{\rm r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right).$$
 (8)

Уравнения для нормальных напряжений при экструзии однородных цилиндрических тел имеют вид [3]

$$\sigma_{\rm r} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{\rm T} [2n \ln \frac{a}{r} + C_{\rm 1}]; \ \sigma_{\alpha} = \sigma_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_{\rm T} [2n \ln \frac{a}{r} + C_{\rm 2}],$$
(9)  
$$C_{\rm 1} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\cos \alpha_{\rm m}}{2 - \cos \alpha_{\rm m}}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \ln |\cos \alpha_{\rm m} - 1.5 + \sqrt{\cos^2 \alpha_{\rm m}} - 3\cos \alpha_{\rm m} + 2| + 2.177 + \frac{1}{\sqrt{3}} + \sqrt{2} \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_{\rm m}}{2 - \cos \alpha_{\rm m}}},$$
(10)  
$$C_{\rm 2} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\cos \alpha_{\rm m}}{2 - \cos \alpha_{\rm m}}} + \frac{3}{\sqrt{2}} \ln |\cos \alpha_{\rm m} - 1.5 + \sqrt{\cos^2 \alpha_{\rm m}} - 3\cos \alpha_{\rm m} + 2| + 1.122 +$$

+ 2,177 + 
$$\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_{\rm m}}{2 - \cos \alpha_{\rm m}}},$$

где  $\mathbf{n}, \, \mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$  – расчетные коэффициенты.

Внося в дифференциальное уравнение равновесия (7) уравнение нормальных напряжений (9), получим

$$\frac{\partial \sigma_{\rm r}}{\partial r} = -\frac{2\sigma_{\rm r}}{r} \left(1 - \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{\rm r}}\right),$$

$$\frac{\partial \sigma_{\rm r}}{\sigma_{\rm r}} = -2 \left(1 - \frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_{\rm r}}\right) \frac{\partial r}{r} = -2 \left(1 - \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{\rm T}[2n\ln\frac{a}{r} + C_{2}]}{\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{\rm T}[2n\ln\frac{a}{r} + C_{1}]}\right) \frac{\partial r}{r} =$$

$$= -\frac{C_{1} - C_{2}}{n \left(\ln\frac{a}{r} + \frac{C_{1}}{2n}\right)} \frac{\partial r}{r},$$

$$265$$
(11)

$$\int \frac{\partial \sigma_{r}}{\sigma_{r}} = \frac{C_{1} - C_{2}}{n} \int \frac{d\left(\ln \frac{a}{r} + \frac{C_{1}}{2n}\right)}{\ln \frac{a}{r} + \frac{C_{1}}{2n}} = \ln \sigma_{r} = \frac{C_{1} - C_{2}}{n} \ln \left[\ln \frac{a}{r} + \frac{C_{1}}{2n}\right] + C.$$
(12)

При r = b  $\sigma_r = p$ , где  $\rho$  – давление при экструзии.

Из формулы (12) определим величину С:

$$C = \ln p - \left(\frac{C_1 - C_2}{n}\right) \ln \left(\frac{a}{b} + \frac{C_1}{2n}\right).$$

Подставляя значение постоянной величины "С" в (12), получим

$$\ln \sigma_{\rm r} = \ln \frac{2n}{\sqrt{3}} \sigma_{\rm T} \left[ \ln \frac{a}{r} + \frac{C_1}{2n} \right] =$$

$$= \left( \frac{C_1 - C_2}{n} \right) \ln \left( \ln \frac{a}{r} + \frac{C_1}{2n} \right) - \left( \frac{C_1 - C_2}{n} \right) \ln \left( \ln \frac{a}{b} + \frac{C_1}{2n} \right) + \ln p.$$
(13)

Решив уравнение (13), получим

$$\left\{\frac{2n}{\sqrt{3}}\frac{\sigma_{T}}{P}\left[\ln\frac{a}{b}+\frac{C_{1}}{2n}\right]^{\frac{C_{1}-C_{2}}{n}}\right\}^{\frac{1}{C_{1}-C_{2}-1}} - \frac{C_{1}}{2n} = \ln a - \ln r, \quad (14)$$

1

где a – параметр, постоянная величина, любое значение которого удовлетворяет вышеприведенным уравнениям. В нашем случае  $R_{\rm H}$  – постоянная величина, поэтому принимаем  $a = R_{\rm H}$  (см. рис.).

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\varepsilon_{r} + 2\varepsilon_{\phi} = \varepsilon = \frac{1}{1-\theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + V_{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right)$$

Кинематические соотношения, определяющие компоненты тензора скоростей деформации, имеют вид

$$\varepsilon_{\rm r} = \partial V_{\rm r} / \partial r; \ \varepsilon_{\phi} = V_{\rm r} / r,$$
  
$$\frac{\partial V_{\rm r}}{\partial r} + \frac{2V_{\rm r}}{r} = \varepsilon = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V_{\rm r}).$$
 (15)

Последнее равенство можно представить в виде

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 V_r \right) = \varepsilon r^2.$$

Интегрируя его с учетом независимости  $\epsilon$  от r, получим

$$\int d(r^2 V_r) = \varepsilon \int r^2 dr; r^2 V_r = \varepsilon \frac{r^3}{3} + C, \text{ при } r = b, V_r = V_0,$$
$$b^2 V_0 = \varepsilon \frac{b^3}{3} + C; C = b^2 V_0 - \varepsilon \frac{b^3}{3},$$

$$r^{2}V_{r} = \epsilon \frac{r^{3}}{3} + b^{2}V_{0} - \epsilon \frac{b^{3}}{3} = b^{2}V_{0} + \frac{\epsilon}{3}(r^{3} - b^{3}).$$

Подставив значение (3) в данное уравнение, получим

$$r^{2} \frac{V_{0}R_{H}^{2}}{2r^{2}(1-\cos\alpha)} = b^{2}V_{0} + \frac{\varepsilon}{3}(r^{3}-b^{3}),$$

$$\frac{V_{0}R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)} = b^{2}V_{0} + \frac{\varepsilon}{3}(r^{3}-b^{3}),$$

$$\varepsilon = \frac{3V_{0}\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)} - b^{2}\right]}{r^{3}-b^{3}},$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1-\theta}\left(\frac{\partial\theta}{\partial t} + V_{r}\frac{\partial\theta}{\partial r}\right).$$
(16)

Так как пористость не зависит от радиуса  $\partial \theta / \partial r = 0$ ,  $\varepsilon = \left(\frac{1}{1-\theta}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t}$ , то 7/1

$$\int \varepsilon dt = -\int \frac{\partial (1-\theta)}{1-\theta}; \quad \varepsilon t = -\ln(1-\theta) + C \quad \text{при } t=0, \quad \theta = \theta_0 - \text{ начальная пористость,}$$
$$-\varepsilon t = \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta}\right). \tag{17}$$

$$-\varepsilon t = \ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right). \tag{17}$$

Подставив значение  $\epsilon$  в (16), получим

$$\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_{0}}\right) = -\frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)}-b^{2}\right]}{r^{3}-b^{3}}, \quad (18)$$

$$r^{3}-b^{3} = -\frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)}-b^{2}\right]}{\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_{0}}\right)}, \quad (18)$$

$$\ln r = \ln\left\{b^{3}-\frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)}-b^{2}\right]}{\frac{\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_{0}}\right)}{3}}\right\}. \quad (19)$$

Подставив значение lnr в (14), получим

$$3\left\{ \left[ \frac{2n}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{T}}{p} \left( \ln \frac{a}{b} + \frac{C_{1}}{2n} \right)^{\frac{C_{1}-C_{2}}{n}} \right]^{\frac{1}{C_{1}-C_{2}}{n}-1} - \frac{C_{1}}{2n} \right\} = 3\ln a - \ln \left[ b^{3} - \frac{3V_{0}t \left[ \frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)} - b^{2} \right]}{\ln \left( \frac{1-\theta}{1-\theta_{0}} \right)} \right],$$
$$3\left\{ \left[ \frac{2n}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{T}}{p} \left( \ln \frac{a}{b} + \frac{C_{1}}{2n} \right)^{\frac{C_{1}-C_{2}}{n}} \right]^{\frac{1}{C_{1}-C_{2}}{n}-1} - \frac{C_{1}}{2n} \right\}.$$

Обозначив последнее выражение через А, после преобразований получим

$$\frac{a^{3}}{b^{3} - \frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1 - \cos\alpha)} - b^{2}\right]}{\ln\left(\frac{1 - \theta}{1 - \theta_{0}}\right)} = e^{A},$$

$$\frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1 - \cos\alpha)} - b^{2}\right]e^{A}}{\ln\left(\frac{1 - \theta}{1 - \theta_{0}}\right)} = b^{3}e^{A} - a^{3},$$

$$\ln\left(\frac{1 - \theta}{1 - \theta_{0}}\right) = \frac{3V_{0}t\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1 - \cos\alpha)} - b^{2}\right]e^{A}}{b^{3}e^{A} - a^{3}}.$$
(20)

Выделяя элементарный объем, ограниченный сферическими поверхностями с радиусами r и r+dr и конической поверхностью матрицы (рис.), получим значение элементарного объема  $dV = 2\pi(1 - \cos \alpha)r^2 dr$ :

$$V = \int_{c}^{b} 2\pi (1 - \cos \alpha) r^{2} dr = 2\pi (1 - \cos \alpha) \frac{r^{3}}{3} = 2\pi (1 - \cos \alpha) \frac{(b^{3} - C^{3})}{3}.$$
 (21)

Применяя известное уравнение постоянства массы (кусочный метод), получим  $\pi R_{\rm H}^2 V_0 t \rho (1 - \theta_0) = \frac{2\pi}{3} (1 - \cos \alpha) (b^3 - c^3) \rho (1 - \theta_0)$ . Из полученного уравнения определим значение  $V_0 t$ :

$$V_0 t = \frac{\frac{2}{3}(1 - \cos \alpha)(b^3 - c^3)}{R_H^2}.$$
 (22)

Подставляя значение V<sub>o</sub>t в (20), получим

$$\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_{0}}\right) = \frac{2(1-\cos\alpha)(b^{3}-c^{3})\left[\frac{R_{H}^{2}}{2(1-\cos\alpha)}-b^{2}\right]e^{A}}{R_{H}^{2}[b^{3}e^{A}-a^{3}]}$$

Переходя от сферических координат к декартовым, где

$$b = R_{\rm H} / \sin \alpha; \ c = R_{\rm k} / \sin \alpha; \ \lambda = \frac{R_{\rm H}^2}{R_{\rm K}^2}$$

после преобразований получим

$$\ln\left(\frac{1-\theta}{1-\theta_0}\right) = \frac{\left|\left(1-\frac{2}{1+\cos\alpha}\right)\right|\left(\lambda\sqrt{\lambda}-1\right)e^A}{\lambda\sqrt{\lambda}\left(e^A-\sin^3\varphi\right)},$$
(23)

$$\theta = 1 - (1 - \theta_0)e \frac{\left| \left(1 - \frac{2}{1 + \cos \alpha}\right) \right| (\lambda \sqrt{\lambda} - 1)e^A}{\lambda \sqrt{\lambda} (e^A - \sin^3 \alpha)}.$$
 (24)

Из формулы (24)  $|(1 - \frac{2}{1 + \cos \alpha})|$  берется только их положительное

значение.

Для определения коэффициента "n" используем известную формулу дифференциального уравнения [4]:

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}\alpha} = \frac{\mathrm{n}}{\cos 2\Psi} - \frac{1}{2}\mathrm{ctg}\alpha \cdot \mathrm{tg}2\Psi - \sqrt{3} \;. \tag{25}$$

Компоненты тензора скорости деформации, выраженные через интенсивность скорости деформации  $\gamma$ , определяются в виде [4]

$$\varepsilon_{\rm r} = \frac{2}{\sqrt{3}} \gamma \cos 2\psi; \ \varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_{\varphi} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \gamma \cos 2\psi; \ \gamma_{\rm (r,\alpha)} = \gamma \sin 2\psi.$$
 (26)

Компоненты скорости деформации и радиальная скорость связаны зависимостями [4]

$$\varepsilon_{r} = \frac{\partial V_{r}}{\partial r}; \ \varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_{\varphi} = \frac{V_{r}}{r}; \ 2\gamma(r,\alpha) = \frac{1}{r}\frac{\partial V_{r}}{\partial r}$$

$$\frac{\gamma \sin 2\psi}{\gamma \frac{2}{\sqrt{3}} \cos 2\psi} = \frac{\gamma_{(r,\alpha)}}{\varepsilon_r} = \frac{\frac{1}{2r} \frac{\partial V_r}{\partial \alpha}}{\frac{\partial V_r}{\partial r}} = \frac{\sqrt{3}}{2} tg 2\psi.$$
(27)

Вводя в данное уравнение радиальное значение скорости Vr (3), получим

$$tg 2\psi = \frac{\sin \alpha}{2\sqrt{3}(1 - \cos \alpha)},$$

$$2\psi = \arctan\left[\frac{1}{2\sqrt{3}}\left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \lambda}\right)\right],$$

$$\frac{2d\psi}{d\alpha} = \frac{\frac{d}{d\alpha}\left[\frac{1}{2\sqrt{3}}\left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}\right)\right],}{1 + \left[\frac{1}{2\sqrt{3}}\left(\frac{\sin \alpha}{1 - \cos \alpha}\right)\right]^{2}.$$
(28)

Таблица

Зависимость пористости при горячей экструзии заготовки от коэффициента вытяжки ( $\lambda$ ), давления при экструзии (р), предела текучести порошка ( $\sigma_T$ ), температуры экструзии, угла

		1			1	( 0)		
Темпе-	Коэф-	Давление	Предел	Началь-	Пористость образца			
ратура	фициент	экструзии	текучести	ная	после			
экстру-	вытяжки,	Р, <i>МПа</i>	$\sigma_{T}$ ,	порис-		экстру	зии, %	
зии,	λ		$M\Pi_2$	тость,				
T, ℃			101114	$oldsymbol{ heta}_0$ ,%				
					при угле матрицы <b>Ω</b> , <i>град</i>			рад
					экспериме	ентальные	расчетны	е данные
					данные			
					55°	60°	55°	60°
	2	87,5	25,83	25	7,8	4,45	8	4,3
	4	162,5	25,83	25	1,9	0,2	1,95	0,15
1100	6	200	25,83	25	0,3	0	0,31	0
	8	240	25,83	25	0	0	0	0

матрицы (  $\pmb{\alpha}$  ) и начальной пористости (  $\pmb{\theta}_0$  )

Полученное дифференциальное уравнение дает возможность определить коэффициент "n":

$$\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}\alpha} = -\frac{\sqrt{3}}{(13-11\cos\alpha)}.$$

Подставив значения  $tg2\psi, cos\,2\psi$  ,  $d\psi/\,d\alpha\,$  в (25), определим коэффициент "n".

Экспериментальные данные о пористости получены на спеченных заготовках железного порошка ПЖ2М [5, 6]. В приведенной таблице значения пористости,

полученые экспериментальным и аналитическим путем, показывают, что разброс находится в пределах 5 ... 7%.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными показывает, что выведенная формула реально описывает процесс экструзии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Павлов В.А., Кипарисов С.С., Щербина В.В. Обработка давлением порошков цветных металлов. М.: Металлургия, 1977. 176 с.
- Штерн М.Б., Сердюк Г.Г. и др. Феноменологические теории прессования порошков. Киев.: Наукова думка, 1982. – 140 с.
- Манукян Н.В., Агбалян С.Г., Туманян Г.А. и др. 1. Напряженно-деформированное состояние при экструзии разнородных материалов // Порошковая металлургия, – 1991. -№9. – С. 23-28.
- 4. Соколовский В.В. Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.
- 5. Манукян Н.В. Технология порошковой металлургии. Ереван: Айастан. 232 с.
- Саркисян Ш.Э. Исследование процессов экструзии и разработка технологии получения беспористых, металлокерамических материалов: Дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 1971. – 155 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.02. 2003.

#### **ዓ.Հ. ԹበՒՄԱՆՑԱՆ**

#### ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ԱՌԱՋԱՑԱԾ ԼԱՐՎԱԾԱ -ԴԵՖՈՐՄԱՅՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ ՕՐԻՆԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Գրականության աղբյուրների վերլուծության հիման վրա ընդունված է, որ տաք արտամղված նախապատրաստվածքի ծակոտկենության կախումը արտամղման գործակցից ( $\lambda$ ), արտամղման ձնշումից (p), մետաղյա փոշիների հոսունության սահմանից ( $\sigma_{\rm T}$ ), արտամղման ջերմաստիձանից (T), մատրիցի անկյունից ( $\alpha$ ) և նախապատրաստվածքի նախնական ծակոտկենությունից մինչև այժմ ստացվում էր փորձնական եղանակով, ինչը շատ աշխատատար է։ Աշխատանքում ներկայացված է բանաձև, որը հնարավորություն է տալիս վերլուծական եղանակով որոշելու ծակոտկենությունն արտամղման ժամանակ։

#### G.H. TUMANYAN

# STRESS – STRAIN STATE MECHANISM OF POROUS BODIES DURING EXTRUSION

Based on the literature analysis it is established that the dependence of hot extrusion bar porosity on drawing coefficient, extrusion pressure (p), powder flow limits ( $\sigma_{_T}$ ), extrusion temperature (T), angle of matrix ( $\alpha$ ) and initial porosity ( $\theta_{_0}$ ) so far has been obtained experimentally that leads to great labour expenses. A formula permitting to appreciate extrusion porosity analytically is given.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 621.311.1.001.24

ЭНЕРГЕТИКА

#### В.С. ХАЧАТРЯН, Н.П. БАДАЛЯН, А.Г. ГУЛЯН

# ВЫБОР СОСТАВА УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ Р-U И Р-Q ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод расчета установившейся ЭЭС, когда станционные узлы могут быть одновременно типа P-U и P-Q. Рассматривается случай, когда пассивная часть системы задается в Y-Z форме. Полученные системы уравнений позволяют решить поставленную задачу при любой сложности ЭЭС.

*Ключевые слова:* модель, система, матрица, режим, узел, мощность, нагрузка, параметр.

В настоящее время при решении разнообразных практических задач [1, 2] весьма перспективными становятся гибридные модели установившегося режима электроэнергетической системы (ЭЭС).

Гибридные математические модели обеспечивают:

- а) высокую эффективность для ЭЭС, в которой R>X;
- б) решение задачи для существующих утяжеленных режимов;
- в) сходимость решения соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений при выборе любых начальных значений зависимых режимных параметров;
- г) решение поставленной задачи для ЭЭС, состоящей из ветвей с продольными конденсаторами.

В связи с этим большое значение приобретает вопрос обеспечения решения задачи расчета установившегося режима ЭЭС для случая, когда независимые станционные узлы одновременно могут быть как типа P-Q, так и типа P-U.

Настоящая работа посвящена решению данной задачи с точки зрения выбора состава нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС.

Для изложения материала принимается следующая система индексов:  $m(n)=0,1,2,...,\Gamma$ , где  $\Gamma$  '– число станционных узлов типа P-Q, узел с индексом "0" выбирается в качестве базисного, который является узлом типа  $U - \Psi_U$ ;

k(  $\ell$ )=Г'+1, Г'+2,..., Г'+Г", где Г' – число станционных узлов типа P-U; Г= Г'+Г"– общее число независимых станционных узлов; i,(j) = Г+1, Г+2,..., Г+Н, где H – число нагрузочных узлов.

На основании вышеприведенной системы индексов уравнение состояния ЭЭС можно представить в следующем виде [1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\underline{\mathbf{n}}} \\ \vdots \\ \dot{\mathbf{U}}_{i0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\underline{\mathbf{n}},\underline{\mathbf{n}}} & \mathbf{Y}_{\underline{\mathbf{n}},\ell} & \dot{\mathbf{A}}_{\underline{\mathbf{n}},j} \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{\underline{\mathbf{k}},\underline{\mathbf{n}}} & \mathbf{Y}_{\underline{\mathbf{k}},\ell} & \dot{\mathbf{A}}_{\underline{\mathbf{k}},j} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{i,n} & \dot{\mathbf{B}}_{i,\ell} & \mathbf{Z}_{i,j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{\underline{\mathbf{n}}\underline{\mathbf{0}}} \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{j} \end{bmatrix}.$$
(1)

Матричное уравнение (1) в алгебраической форме имеет вид

$$\dot{I}_{m} = \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell} \dot{U}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{m,j} \dot{I}_{j}, \qquad (2)$$

$$\dot{I}_{k} = \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{k,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{k,\ell} \dot{U}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{k,j} \dot{I}_{j}, \qquad (3)$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{i0} = \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{\mathbf{B}}_{i,n} \dot{\mathbf{U}}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{\mathbf{B}}_{i,\ell} \dot{\mathbf{U}}_{\ell 0} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} Z_{i,j} \dot{\mathbf{I}}_{j} , \qquad (4)$$

или

$$\dot{I}_{m} = \dot{I}_{Bm} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n} \dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell} \dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{m,j} \dot{I}_{j} , \qquad (5)$$

$$\dot{I}_{k} = \dot{I}_{bk} + \sum_{n=1}^{l^{-}} Y_{k,n} \dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{l} Y_{k,\ell} \dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{k,j} \dot{I}_{j}, \qquad (6)$$

$$\dot{U}_{i} = \dot{U}_{bi} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{B}_{i,n} \dot{U}_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,\ell} \dot{U}_{\ell} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} Z_{i,j} \dot{I}_{j} , \qquad (7)$$

где

$$\begin{split} \dot{I}_{\text{Bm}} &= -\sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{m,n} \dot{U}_0 - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{m,\ell} \dot{U}_0, \\ \dot{I}_{\text{Bk}} &= -\sum_{n=1}^{\Gamma'} Y_{k,n} \dot{U}_0 - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} Y_{k,\ell} \dot{U}_0, \\ \dot{U}_{\text{Bi}} &= \left( 1 - \sum_{n=1}^{\Gamma'} \dot{B}_{i,n} - \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \dot{B}_{i,\ell} \right) \dot{U}_0. \end{split}$$
(8)

Выражение (8) можно написать в следующей компактной форме: г

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathsf{Bm}} = -\sum_{t=1}^{\mathsf{I}} \mathbf{Y}_{\mathsf{m},t} \mathbf{U}_{0} ,$$
  
$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathsf{Bk}} = -\sum_{t=1}^{\mathsf{\Gamma}} \mathbf{Y}_{\mathsf{k},t} \mathbf{U}_{0} ,$$
  
$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathsf{Bi}} = \left(1 - \sum_{t=1}^{\mathsf{\Gamma}} \dot{\mathbf{B}}_{\mathsf{i},t}\right) \mathbf{U}_{0} .$$
(9)

Умножая уравнение (5) на  $\hat{U}_m$ , (6) – на  $\hat{U}_k$  а (7) – на  $\hat{I}_k$ , для узловых активных и реактивных мощностей получим

$$P_{m} = P_{Fm} + U_{m} \sum_{n=1}^{r} [g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})]U_{n} + U_{m} \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{r} [g_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})]U_{\ell};$$
(10)

$$Q_{m} = Q_{5m} + U_{m} \sum_{n=1}^{\Gamma'} [g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})]U_{n} + U_{m} \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} [g_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})]U_{\ell};$$

$$P_{k} = P_{5k} + U_{k} \sum_{n=1}^{\Gamma'} [g_{k,n} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) + b_{k,n} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})]U_{n} + U_{k} \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} [g_{k,\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) + b_{k,\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})]U_{\ell};$$

$$Q_{k} = Q_{5k} + U_{k} \sum_{n=1}^{\Gamma'} [g_{k,n} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) - b_{k,n} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})]U_{n} + U_{k} \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} [g_{k,n} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) - b_{k,n} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})]U_{\ell};$$
(13)
$$+ U_{k} \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} [g_{k,\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) - b_{k,\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})]U_{\ell};$$

$$P_{i} = P_{\mathsf{b}i} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left[ R_{i,j} \left( I'_{i} I'_{j} + I''_{i} I''_{j} \right) + R_{i,j} \left( I''_{i} I'_{j} - I'_{i} I''_{j} \right) \right];$$
(14)

$$Q_{i} = Q_{\mathrm{b}i} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left[ X_{i,j} \left( I_{i}' I_{j}' + I_{i}'' I_{j}'' \right) - R_{i,j} \left( I_{i}'' I_{j}' - I_{i}' I_{j}'' \right) \right].$$
(15)

Здесь

$$P_{\text{5m}} = p_{\text{5m}} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{mj} \cos \Psi_{Uj} + N_{mj} \sin \Psi_{Uj}) U_{m},$$

$$Q_{\text{5m}} = q_{\text{5m}} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{mj} \sin \Psi_{Uj} - N_{mj} \cos \Psi_{Uj}) U_{m},$$

$$P_{\text{5k}} = p_{\text{5k}} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{kj} \cos \Psi_{Uj} + N_{kj} \sin \Psi_{Uj}) U_{k},$$

$$Q_{\text{5k}} = q_{\text{5k}} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{kj} \sin \Psi_{Uj} - N_{kj} \cos \Psi_{Uj}) U_{k},$$
(16)

где

$$p_{Bm} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left( g_{m,t} \cos \Psi_{Um} + b_{m,t} \sin \Psi_{Um} \right) U_0 U_m,$$

$$q_{Bm} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left( g_{m,t} \sin \Psi_{Um} - b_{m,t} \cos \Psi_{Um} \right) U_0 U_m,$$

$$p_{Bk} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left( g_{k,t} \cos \Psi_{Uk} + b_{m,t} \sin \Psi_{Uk} \right) U_0 U_k,$$

$$q_{Bk} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} \left( g_{k,t} \sin \Psi_{Uk} - b_{k,t} \cos \Psi_{Uk} \right) U_0 U_k.$$
(17)

С другой стороны, величины  $P_{\rm Ei}$ ,  $Q_{\rm Ei}$ , входящие в выражения (14), (15) соответственно, определяются в виде

$$P_{\mathrm{bi}} = p_{\mathrm{bi}} + \sum_{t=1}^{\Gamma} (T'_{it} \cos \Psi_{\mathrm{Ut}} + T''_{it} \sin \Psi_{\mathrm{Ut}}) U_{0},$$

$$Q_{\mathrm{bi}} = q_{\mathrm{bm}} + \sum_{t=1}^{\Gamma} (T'_{it} \sin \Psi_{\mathrm{Ut}} - T''_{it} \cos \Psi_{\mathrm{Ut}}) U_{0}.$$
(18)

Величины  $\,p_{\,{\rm Б}i}\,$  и  $\,q_{\,{\rm B}i}$  , входящие в (18), определяются в виде

$$p_{\mathsf{b}i} = \mathbf{I}_{i}' \mathbf{U}_{0} - \sum_{t=1}^{\mathsf{\Gamma}} \left( \mathbf{B}_{i,t}' \mathbf{I}_{i}' + \mathbf{B}_{i,t}'' \mathbf{I}_{i}'' \right) \mathbf{U}_{0},$$

$$q_{\mathsf{b}i} = -\mathbf{I}_{i}'' \mathbf{U}_{0} + \sum_{t=1}^{\mathsf{\Gamma}} \left( \mathbf{B}_{i,t}' \mathbf{I}_{i}'' + \mathbf{B}_{i,t}'' \mathbf{I}_{i}' \right) \mathbf{U}_{0}.$$
(19)

С другой стороны,  $L_{mj}\,,\,N_{mj}\,,\,L_{kj}\,$  и  $\,N_{kj}\,,$  фигурирующие в выражениях (16), определяются в виде

$$L_{mj} = A'_{m,j}I'_{j} - A''_{m,j}I''_{j},$$
  

$$N_{mj} = A'_{m,j}I''_{j} - A''_{m,j}I'_{j},$$
(20)

$$L_{kj} = A'_{k,j}I'_{j} - A''_{k,j}I''_{j},$$
  

$$N_{kj} = A'_{k,j}I''_{j} - A''_{k,j}I'_{j},$$
(21)

И

$$T'_{it} = B'_{i,t}I'_{i} + B''_{i,t}I''_{i},$$
  

$$T''_{it} = B'_{i,t}I''_{i} + B''_{i,t}I'_{i}.$$
(22)

Представим (10)-(15) в следующем виде:

$$\begin{cases} \Phi_{pm} = P_{m} - \left[ P_{Bm} + \phi_{pm} (U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell}) \right] = 0, \\ \Phi_{qm} = Q_{m} - \left[ Q_{Bm} + \phi_{qm} (U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell}) \right] = 0; \end{cases}$$
(23)

$$\begin{cases} \Phi_{pk} = P_{k} - \left[ P_{\mathsf{F}k} + \phi_{pk} \left( U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell} \right) \right] = 0, \\ \Phi_{qk} = Q_{k} - \left[ Q_{\mathsf{F}k} + \phi_{qk} \left( U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell} \right) \right] = 0; \end{cases}$$

$$(24)$$

$$\begin{cases} \Phi_{pi} = P_{i} - \left[ P_{Ai} + \phi_{pi} \left( I'_{j}, I''_{j} \right) \right] = 0, \\ \Phi_{qi} = Q_{i} - \left[ Q_{Ai} + \phi_{qi} \left( I'_{j}, I''_{j} \right) \right] = 0. \end{cases}$$
(25)

На основании (10)-(15) и (23)-(25) нетрудно установить выражения функций  $\phi_{pm}$ ,  $\phi_{qm}$ ,  $\phi_{pk}$ ,  $\phi_{qk}$ ,  $\phi_{pi}$  и  $\phi_{qi}$ , входящих в последние системы уравнений.

Для станционных узлов типа P-Q, которые обозначены индексом m(n), искомыми режимными параметрами являются модули ( $U_m$ ,  $U_n$ ) и аргументы ( $\Psi_{Um}$ ,  $\Psi_{Un}$ ) комплексных напряжений. Для станционных узлов типа P-U, которые обозначены индексом k( $\ell$ ), искомыми режимными параметрами являются реактивные мощности ( $Q_k$ ,  $Q_\ell$ ) и аргументы комплексных напряжений ( $\Psi_{Uk}$ ,  $\Psi_{U\ell}$ ). Для нагрузочных узлов с индексами i(j), поскольку заданы активные и реактивные мощности, искомыми режимными параметрами являются составляющие ( $I'_i$ ,  $I''_i$ ) комплексных токов.

Анализ выражения реактивной мощности (13) показывает, что если известны модули и аргументы комплексных мощностей станционных узлов типа P-Q и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-U, то можно установить ее численное значение.

Окончательно можно определить численные значения реактивных мощностей станционных узлов типа P-U. В силу этого из системы уравнений (24) можно исключить уравнение реактивной мощности  $\Phi_{qk}$  станционного узла типа P-

U. В результате получается следующий состав уравнений для определения искомых режимных параметров установившегося режима ЭЭС:

$$\Phi_{pm}(U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell}) = 0, 
\Phi_{qm}(U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell}) = 0,$$
(26)  

$$\Phi_{pk}(U_{n}, \Psi_{Un}; U_{\ell}, \Psi_{U\ell}) = 0, 
\Phi_{pi}(I'_{j}, I''_{j}) = 0, 
\Phi_{qi}(I'_{i}, I''_{i}) = 0.$$
(27)

Учитывая, что модуль напряжения  $U_\ell$  задан как напряжение станционного узла типа P-U, системы уравнений (26) можно представить в виде

$$\Phi_{pm} \left( \mathbf{U}_{n}, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell} \right) = 0,$$
  

$$\Phi_{qm} \left( \mathbf{U}_{n}, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell} \right) = 0,$$
  

$$\Phi_{pk} \left( \mathbf{U}_{n}, \Psi_{Un}; \Psi_{U\ell} \right) = 0.$$
(28)

В системе искомыми режимными параметрами являются модули и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q и аргументы комплексных напряжений станционных узлов типа P-U

В системе уравнений (27) искомыми режимными параметрами являются составляющие комплексных типов нагрузочных узлов.

Как системы уравнений (28), так и системы уравнений (27) решаются методом первого порядка или Ньютона-Рафсона.

Рекуррентное выражение Ньютона-Рафсона применительно к системе уравнений (28) имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{n} \\ \mathbf{\Psi}_{Un} \\ \mathbf{\Psi}_{Ul} \end{bmatrix}^{\mathsf{N}+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{n} \\ \mathbf{\Psi}_{Un} \\ \mathbf{\Psi}_{Ul} \end{bmatrix}^{\mathsf{N}} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_{m}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_{m}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_{m}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{ul}} & \frac{\partial \Phi_{$$

Частные производные, входящие в матрицу Якоби, определяются нижеприведенными выражениями:

- при одинаковых индексах, т.е. когда n=m (  $\ell$  =k):

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_{m}} = -\left\{\frac{\partial P_{Am}}{\partial U_{m}} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})\right]U_{\ell}\right\};$$
(30)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_{m}} &= -\left\{ \frac{\partial Q_{Bm}}{\partial U_{m}} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[ g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_{n} + \right. \\ &+ \left. \sum_{\ell = \Gamma' + 1}^{\Gamma} \left[ g_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_{\ell} \right\}; \end{aligned}$$
(31)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Um}} &= -\left\{ \frac{\partial P_{Em}}{\partial \Psi_{Um}} - U_m \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[ g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n - \\ &- U_m \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[ g_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) - b_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \end{aligned}$$
(32)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Um}} &= -\left\{ \frac{\partial Q_{Bm}}{\partial \Psi_{Um}} + U_m \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[ g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \right] U_n + \\ &+ U_m \sum_{\ell = \Gamma' + 1}^{\Gamma} \left[ g_{m,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) + b_{m,\ell} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell}) \right] U_\ell \right\}; \end{aligned}$$
(33)

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_{k}} = -\left\{\frac{\partial P_{bk}}{\partial U_{k}} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{k,n}\cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) + b_{k,n}\sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})\right]U_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{k,\ell}\cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) + b_{k,\ell}\sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})\right]U_{\ell}\right\};$$
(34)

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_{k}} = -\left\{\frac{\partial Q_{Bk}}{\partial U_{k}} + \sum_{n=1}^{\Gamma'} \left[g_{k,n} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un}) - b_{k,n} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{Un})\right]U_{n} + \sum_{\ell=\Gamma'+1}^{\Gamma} \left[g_{k,\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) - b_{k,\ell} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{U\ell})\right]U_{\ell}\right\};$$
(35)

- при разных индексах, т.е. когда n(m (
$$\ell \neq k$$
):  

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_{n}} = -\left\{\frac{\partial P_{\text{Em}}}{\partial U_{n}} + U_{m}\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]\right\}; (36)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_{n}} = -\left\{\frac{\partial Q_{Bm}}{\partial U_{n}} + U_{m}\left[g_{m,n}\sin\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right) - b_{m,n}\cos\left(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}\right)\right]\right\}; \quad (37)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{Un}} = -\left\{\frac{\partial P_{Em}}{\partial \Psi_{Un}} - U_m \left[g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n\right\}; (38)$$

~

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} = -\left\{\frac{\partial Q_{Bm}}{\partial \Psi_{Un}} + U_m \left[g_{m,n}\cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n}\sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un})\right]U_n\right\}; (39)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_{\ell}} = -\left\{\frac{\partial P_{bk}}{\partial U_{\ell}} + U_{k}\left[g_{k,\ell}\cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) + b_{k,\ell}\sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right)\right]\right\}; \quad (40)$$
$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} = -\left\{\frac{\partial P_{bk}}{\partial \Psi_{U\ell}} - U_{k}\left[g_{k,\ell}\sin\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right) - b_{k,\ell}\cos\left(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}\right)\right]U_{\ell}\right\}. \quad (41)$$

С другой стороны,

$$\frac{\partial P_{\text{Em}}}{\partial U_{\text{m}}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{\text{m,t}} \cos \Psi_{\text{Um}} + b_{\text{m,t}} \sin \Psi_{\text{Um}}) U_{0} + \sum_{j=\bar{A}+1}^{M} (L_{\text{m,j}} \cos \Psi_{\text{Uj}} + N_{\text{m,j}} \sin \Psi_{\text{Uj}}) U_{\text{m}}; (42)$$
$$\frac{\partial Q_{\text{Em}}}{\partial U_{\text{m}}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{\text{m,t}} \sin \Psi_{\text{Um}} - b_{\text{m,t}} \cos \Psi_{\text{Um}}) U_{0} + \sum_{j=\bar{\Gamma}+1}^{M} (L_{\text{m,j}} \sin \Psi_{\text{Uj}} - N_{\text{m,j}} \cos \Psi_{\text{Uj}}) U_{\text{m}}; (43)$$

$$\begin{split} &\frac{\partial P_{Em}}{\partial \Psi_{Um}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{m,t} \sin \Psi_{Um} - b_{m,t} \cos \Psi_{Um}) U_0 U_m - \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{m,j} \sin \Psi_{Uj} - N_{m,j} \cos \Psi_{Uj}) U_m; (44) \\ &\frac{\partial Q_{Em}}{\partial \Psi_{Um}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{m,t} \cos \Psi_{Um} + b_{m,t} \sin \Psi_{Um}) U_0 U_m - \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{m,j} \cos \Psi_{Uj} - N_{m,j} \sin \Psi_{Uj}) U_m; (45) \\ &\frac{\partial P_{Ek}}{\partial U_k} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{k,t} \cos \Psi_{Uk} + b_{k,t} \sin \Psi_{Uk}) U_0 + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{k,j} \cos \Psi_{Uj} + N_{k,j} \sin \Psi_{Uj}); (46) \\ &\frac{\partial P_{Ek}}{\partial \Psi_{Uk}} = \sum_{t=1}^{\Gamma} (g_{k,t} \sin \Psi_{Uk} - b_{k,t} \cos \Psi_{Uk}) U_0 U_m - \sum_{j=\Gamma+1}^{M} (L_{k,j} \sin \Psi_{Uj} - N_{k,j} \cos \Psi_{Uj}) U_k. (47) \\ &\text{Затем определяем} \end{split}$$

$$\frac{\partial P_{\text{Bm}}}{\partial U_{n}} = 0; \quad \frac{\partial Q_{\text{Bm}}}{\partial U_{n}} = 0; \quad \frac{\partial P_{\text{Bm}}}{\partial \Psi_{\text{Un}}} = 0; \quad \frac{\partial Q_{\text{Bm}}}{\partial \Psi_{\text{Un}}} = 0; \quad \frac{\partial P_{\text{Bk}}}{\partial U_{\ell}} = 0; \quad \frac{\partial Q_{\text{Bk}}}{\partial \Psi_{U\ell}} = 0.$$
(48)

В результате выражения частных производных при различных индексах принимают более упрощенный вид:

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_{n}} = -U_{m} \Big[ g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \Big],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_{n}} = -U_{m} \Big[ g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \Big],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} = U_{m} \Big[ g_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) - b_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \Big],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} = -U_{m} \Big[ g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \Big],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{Un}} = -U_{m} \Big[ g_{m,n} \cos(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) + b_{m,n} \sin(\Psi_{Um} - \Psi_{Un}) \Big] U_{n},$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{Un}} = -U_{k} \Big[ g_{k,\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) + b_{k,\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) \Big],$$
(49)
$$(50)$$

$$\frac{\partial U_{\ell}}{\partial U_{\ell}} = -U_{k} [g_{k,\ell} \cos(\Upsilon_{Uk} - \Upsilon_{U\ell}) + U_{k,\ell} \sin(\Upsilon_{Uk} - \Upsilon_{U\ell})],$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{U\ell}} = U_{k} [g_{k,\ell} \sin(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell}) + U_{k,\ell} \cos(\Psi_{Uk} - \Psi_{U\ell})].$$

Рекуррентное выражение Ньютона-Рафсона применительно к системе уравнений (27) имеет такой же вид, что и (23) в [2]. Однако выражение частных производных, входящих в матрицу Якоби настоящей статьи, совершенно отличается от (36) и (39), приведенных в [2]:

– при одинаковых индексах, т.е. когда j=i:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_{i}'} = -\left[\frac{\partial P_{\text{Bi}}}{\partial I_{i}'} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left(R_{i,j}I_{j}' - X_{i,j}I_{j}''\right)\right],$$

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I_{i}''} = -\left[\frac{\partial P_{\text{Bi}}}{\partial I_{i}''} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left(R_{i,j}I_{j}'' + X_{i,j}I_{j}'\right)\right],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_{i}'} = -\left[\frac{\partial Q_{\text{Bi}}}{\partial I_{i}'} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left(X_{i,j}I_{j}' + R_{i,j}I_{j}''\right)\right],$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I_{i}''} = -\left[\frac{\partial Q_{\text{Bi}}}{\partial I_{i}'} + \sum_{j=\Gamma+1}^{M} \left(X_{i,j}I_{j}' - R_{i,j}I_{j}''\right)\right],$$
(51)

- при разных индексах, т.е. когда j≠ i:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_{j}} = -\left(R_{i,j}I'_{i} + X_{i,j}I''_{i}\right), \qquad \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I''_{j}} = -\left(R_{i,j}I''_{i} - X_{i,j}I'_{i}\right), 
\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_{j}} = -\left(X_{i,j}I'_{i} - R_{i,j}I''_{i}\right), \qquad \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_{j}} = -\left(X_{i,j}I''_{i} + R_{i,j}I'_{i}\right).$$
(52)

Частные производные  $\partial P_{\mathrm{bi}}/\partial I'_{i}$ ,  $\partial P_{\mathrm{bi}}/\partial I''_{i}$ ,  $\partial Q_{\mathrm{bi}}/\partial I'_{i}$  и  $\partial Q_{\mathrm{bi}}/\partial I''_{i}$  определяются нижеприведенными выражениями:

$$\frac{\partial P_{B}}{\partial I'_{i}} = \left(1 - \sum_{t=1}^{\Gamma} B'_{i,t}\right) U_{0} + \sum_{t=1}^{\Gamma} \left(B'_{i,t} \cos \Psi_{Ut} - B''_{i,t} \sin \Psi_{Ut}\right) U_{0}, 
\frac{\partial P_{Bi}}{\partial I''_{i}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} B''_{i,t} U_{0} + \sum_{t=1}^{\Gamma} \left(B''_{i,t} \cos \Psi_{Ut} + B'_{i,t} \sin \Psi_{Ut}\right) U_{0}, 
\frac{\partial Q_{Bi}}{\partial I'_{i}} = -\sum_{t=1}^{\Gamma} B''_{i,t} U_{0} + \sum_{t=1}^{\Gamma} \left(B'_{i,t} \sin \Psi_{Ut} + B''_{i,t} \cos \Psi_{Ut}\right) U_{0}, 
\frac{\partial Q_{Bi}}{\partial I'_{i}} = \left(1 - \sum_{t=1}^{\Gamma} B'_{i,t}\right) U_{0} + \sum_{t=1}^{\Gamma} \left(B''_{i,t} \sin \Psi_{Ut} - B'_{i,t} \cos \Psi_{Ut}\right) U_{0}.$$
(53)

Имея аналитические выражения частных производных, входящих в матрицу Якоби, а также других величин и устанавливая их численные значения, можно перейти к организации итерационного процесса для расчета установившегося режима конкретных ЭЭС.

Основная суть вычислительного алгоритма заключается в том, что при итерационном решении численных задач соответствующим образом осуществляется обмен информацией между подсистемами Y(Z) и Z(Y). Итерационный процесс считается завершенным, если искомые режимные параметры принимают численные значения требуемой или необходимой точности.

В качестве критерия сходимости решения систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима выбираются величины небалансов активных и реактивных мощностей соответствующих узлов:

$$\left| \mathbf{P}_{\lambda} - \left( \mathbf{P}_{\mathsf{F}\lambda} \boldsymbol{\varphi}_{\mathsf{p}\lambda} \right) \right| \leq \Delta \mathbf{P}_{\lambda} ,$$

$$\left| \mathbf{Q}_{\lambda} - \left( \mathbf{Q}_{\mathsf{F}\lambda} \boldsymbol{\varphi}_{\mathsf{p}\lambda} \right) \right| \leq \Delta \mathbf{Q}_{\lambda} ,$$

$$(54)$$

где  $\lambda m$ , k, i,  $\Delta P_{\lambda}$  и  $\Delta Q_{\lambda}$  характеризуют точность получения численных значений искомых режимных параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Хачатрян В. С., Этмекчян Э. А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество.-1991.-№1.- С. 6-13.
- 2. Хачатрян В. С., Бадалян Н. П., Хачатрян К. В., Гулян А.Г. Решение систем гибридных уравнений установившегося режима ЭЭС при смешанном типе станционных узлов //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т 54, №2.- С.210-217.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 9.08.2002.

#### Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ն.Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՅՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱԶՄԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ P-Ս ԵՎ P-Q ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Առաջարկվում է ԷԷՀ-ի կայունացված ռեժիմի հաշվարկի նոր մեթոդ խառը տիպի կայանային հանգույցների համար, երբ վերջիններս միաժամանակ P-U և P-Q տիպի են։ Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ համակարգի պասիվ մասը տրվում է Y-Z տեսքով։ Ստացված հավասարումների համակարգը հնարավորություն է տալիս խնդիրը լուծել ԷԷՀ-ի ցանկացած բարդության դեպքում։

#### V.S. KHACHATRYAN, N.P. BADALYAN, A.G. GHULYAN EQUATION COMPOSITION SELECTION OF ELECTRIC POWER STATION STEADY-STATE MODE FOR P-U, P-Q TYPES OF STATIONAL UNITS

A calculation method of electric power station (EPS) steady-state mode when stational units can be simultaneously of the P-U and P-Q types is proposed. A case is considered when the system's passive part is given in the Y-Z form. The equation systems obtained permit to solve the given problem at any complexity of EPS.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 621.318.3+621.384.64

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

# Г.Л. АРЕШЯН

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЛИНЕЙНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Дается описание конструкции электромагнитного линейно-вращательного ускорителя. Разработаны основы теории такого ускорителя. Представлены аналитические формулы действующих на разгоняемое тело тягового аксиального усилия и электромагнитного момента вращения, дифференциальные уравнения движения разгоняемого тела и методы их приближенного решения.

*Ключевые слова:* ускоритель, электромагнитный, линейный, вращательный, теория.

#### 1. Описание конструкции и принцип действия

Электромагнитный линейно-вращательный ускоритель [1] состоит из диэлектрической трубы, на наружную поверхность которой намотана правосторонняя, либо левосторонняя спиралевидная трехфазная обмотка с постоянно-переменным шагом спиралей h и соединенная в звезду или в треугольник.

Обмотка данной фазы может быть односторонней, когда ее начало находится у одного края трубы, а конец – у другого края, и двусторонней, когда ее начало и конец находятся у одного края трубы. В этом случае обратный провод наматывается спиралевидно, и его витки располагаются между витками прямо идущего провода. Обмотка данной фазы может быть также одно- и многоходовой. Число ходов предопределяет число пар полюсов обмотки "p". Говоря иначе, трехфазная обмотка имеет "p" пар полюсов, равное числу нитей спиралевидной обмотки данной фазы, начинающихся в начальном сечении трубы. Все три фазы обмотки должны быть идентичными друг другу (по числу ходов, односторонности или двусторонности, числу и величине шагов спиралей и т.д.).

Секции многоходовой обмотки данной фазы могут быть соединены последовательно, либо в параллель.

На диэлектрическую трубу с трехфазной обмоткой после изоляции плотно, без зазора надета металлическая труба из электротехнической стали для усиления магнитного поля во внутренней полости диэлектрической трубы. Труба из электротехнической стали может быть массивной, либо многослойно намотанной из тонкой электротехнической ленты.

Внутри диэлектрической трубы в начальной ее части расположено металлическое цилиндрическое тело, которое подлежит разгону. Тело имеет возможность свободно передвигаться во внутренней полости трубы за счет малого зазора между поверхностями тела и трубы. Металлическое тело состоит из стального сердечника и металлического неферромагнитного (медь, алюминий) покрытия.

При подключении обмотки ускорителя к источнику трехфазного тока частотой  $f_o$  возникают два типа магнитодвижущих сил (МДС): линейно бегущая вдоль трубы МДС с линейной синхронной скоростью  $V_c = 2 f_o \tau \ (\textit{m/c})$ и МДС, вращающаяся вокруг продольной оси трубы с синхронной скоростью вращения  $n_c = \frac{60 \cdot f_o}{p} \ \textit{об/мин}$  (где  $\tau \ (\textit{m})$  – полюсное деление, равное половине шага спирали

h (*м*),  $\tau = 0.5$ h, р - число пар полюсов обмотки).

В соответствии с МДС возникают линейно бегущая и вращательная составляющие магнитного поля. Магнитный поток, сцепленный с трехфазной обмоткой, замыкается в пределах двух полюсных делений, проходя через ферромагнитную трубу, ферромагнитное разгоняемое тело и через два зазора с  $\mu = \mu_0$ . Величина зазора равна расстоянию по радиусу между внешней ферромагнитной цилиндрической поверхностью разгоняемого тела и внутренней цилиндрической поверхностью ферромагнитной трубы.

В металле разгоняемого тела переменное линейно-вращательное магнитное поле индуцирует вихревые токи, взаимодействие которых с исходным полем создает линейные и вращательные электромагнитные усилия. В результате тело разгоняется линейно и вращательно и покидает ускоритель, приобретая определенной величины линейную  $0,5mV^2$  и вращательную  $0,5J\omega^2$  кинетические энергии. Левовитковое или правовитковое вращение тела в полете предопределяется левосторонней, либо правосторонней намоткой трехфазной обмотки. Необходимо отметить, что электромагнитные линейные и вращательные усилия действуют и на неподвижную часть ускорителя (на трехфазную обмотку и внешнюю металлическую трубу), что необходимо учитывать при разработке его конструкции.

#### 2. Тяговое аксиальное электромагнитное усилие, действующее на разгоняемое тело

Расположим статор ускорителя в неподвижной правовитковой системе координат XYZ следующим образом:

- плоскость сечения начала труб ускорителя совмещаем с началом координат и плоскостью XOY. Ось ОХ направлена вертикально вверх;
- центральную ось труб ускорителя совмещаем с осью OZ. В системе координат XYZ используем также цилиндрическую систему координат r, φ, z (x = r cos φ; y = r sin φ).

Центральная продольная ось цилиндрического разгоняемого тела радиуса  $R_{_{\rm 0}}$  совпадает с осью OZ .

В воздушном зазоре ускорителя имеем бегущее вдоль оси OZ и вращающееся вокруг этой же оси магнитное поле. Задаем радиальную составляющую индукции бегущего поля в зазоре в виде

$$B_{r} = B_{m} \sin\left(\omega_{o} t - \pi \frac{z}{\tau}\right) = B_{m} \sin\left(\omega_{o} t - \eta\right), \qquad (2.1)$$

где  $\omega_{_{o}} = 2\pi f_{_{o}}; \ \tau$ - полюсное деление;  $\eta = \pi \frac{z}{\tau}$ .

На длине dz в разгоняемое тело от этой индукции попадает магнитный поток, равный

$$d\Phi_{\rm r} = 2\pi R_{\rm a} B_{\rm r} dz \,. \tag{2.2}$$

Разность магнитных потоков, проходящих через сечения XOY при z и z = dz в направлении оси Z, должна равняться потоку  $d\Phi_r$  уравнения (2.2), т.е.

$$\Phi_{z}(z+dz) - \Phi_{z}(z) = d\Phi_{r}.$$
(2.3)

Задавая

$$\Phi_z(z) = \pi R_a^2 B_z(z); \quad \Phi_z(z+dz) = \pi R_a^2 B_z(z+dz),$$
 (2.4)

обозначая

$$dB_z(z) = B_z(z+dz) - B_z(z)$$
 (2.5)

и подставляя в (2.3) уравнения (2.2), (2.4) и (2.5), получаем

$$\pi R_a^2 \cdot dB_z = 2\pi R_a B_r dz . \qquad (2.6)$$

С учетом (2.1) получаем

$$dB_{z} = \frac{2}{R_{a}} B_{m} \sin\left(\omega_{o}t - \pi \frac{z}{\tau}\right) dz. \qquad (2.7)$$

Интегрируя, имеем

$$B_{z} = B_{m} \frac{2\tau}{\pi R_{a}} \cos(\omega_{o} t - \eta). \qquad (2.8)$$

Окончательно продольный магнитный поток, проходящий через сечения при Z разгоняемого тела, когда тело неподвижно, имеет вид [см.уравнение (2.4)]

$$\Phi_{z}(z) = \pi R_{a}^{2} B_{z} = B_{m} 2\tau R_{a} \cos(\omega_{o} t - \eta).$$
(2.9)

ЭДС в нитевидном замкнутом контуре окружности  $2\pi R_a$  в сечении при z равна

$$\varepsilon_{\varphi} = -\frac{\partial \Phi_{z}}{\partial t} = \omega_{o} B_{m} 2\tau R_{a} \sin(\omega_{o} t - \eta). \qquad (2.10)$$

Усредненная плотность тока  $\dot{i}_{\omega}(z)$  (*A/м*):

$$i_{\varphi} = \omega_{o} B_{m} \frac{2\tau R_{a}}{q} \sin(\omega_{o}t - \Psi - \eta), \qquad (2.11)$$

где q[Bm/A] - модуль удельного комплексного сопротивления материала разгоняемого тела с учетом скин-эффекта;  $\Psi$  - фазовый угол комплексного сопротивления  $\dot{q}$  [2].

Электромагнитное усилие от взаимодействия внешнего поля по (2.1), направленного радиально, и плотности тока по (2.11) будет направлено по оси Z и равно

$$f_{z} = 2\pi R_{a}B_{p}i_{\phi} = \omega_{o}B_{m}^{2} \frac{4\pi\tau R_{a}^{2}}{q}\sin(\omega_{o}t - \eta)\sin(\omega_{o}t - \Psi - \eta). \quad (2.12)$$

После преобразования произведения синусов получаем электромагнитное усилие на единицу аксиальной длины разгоняемого тела

$$f_{z} = f_{m} \left[ \cos \Psi - \cos \left( 2\omega_{o}t - \Psi - 2\eta \right) \right], \qquad (2.13)$$

где обозначено

$$f_{\rm m} = \omega_{\rm o} B_{\rm m}^2 \frac{2\pi\tau R_{\rm a}^2}{q} \,. \tag{2.14}$$

Пусть начало и конец сечений цилиндра разгоняемого тела находятся в точках  $Z_1$  и  $Z_2 = Z_1 + \ell_o$ , где  $\ell_o$  – аксиальная длина разгоняемого тела. Тогда полное аксиальное электромагнитное усилие, действующее на разгоняемое тело по всей длине, будет равно

$$F_{z} = \int_{Z_{1}}^{Z_{1}+\ell_{o}} f_{z}(z)dz = f_{m} \int_{Z_{1}}^{Z_{1}+\ell_{o}} \left[ \cos \Psi - \cos \left( 2\omega_{o}t - \Psi - 2\pi \frac{z}{\tau} \right) \right] dz,$$
  

$$F_{z} = \ell_{o}f_{m} \cos \Psi - \frac{\tau}{2\pi} f_{m} [\sin (2\omega_{o}t - \Psi - 2\eta_{1} - 2\eta_{o}) - (2.15) - \sin (2\omega_{o}t - \Psi - 2\eta_{1})],$$

где обозначено

$$\eta_1 = \pi \frac{Z_1}{\tau}, \qquad \eta_o = \pi \frac{\ell_o}{\tau}.$$
 (2.16)

Постоянная составляющая аксиального электромагнитного усилия на неподвижное разгоняемое тело равна

$$F_{cp} = F_m \cos \Psi; \qquad F_m = \ell_o \cdot f_m = \omega_o B_m^2 \frac{2\pi \ell_o \tau R_a^2}{q}.$$
(2.17)

Переменная составляющая двойной частоты уравнения (2.15) при длине тела  $\ell_{\rm o}=\tau$  становится равной нулю. При  $\ell_{\rm o}\neq\tau$  она равна

$$F_{\sim} = -\frac{\tau}{\pi} f_{m} \left( \sin \eta_{o} \right) \cos \left( 2\omega_{o} t - \Psi - \eta_{o} - 2\eta_{1} \right).$$
(2.18)

При движении тела со скоростью V , меньшей линейной синхронной скорости  $V_c = 2\tau f_o$ , составляющие усилий зависят от величины линейного скольжения тела, равной

$$S = (V_c - V)/V_c$$
 (2.19)

Движение металлического разгоняемого тела в линейно-бегущем магнитном поле ускорителя представляет собой движение массивной части (ротора)

асинхронного линейного двигателя. Линейные усилия асинхронного линейного двигателя в общем случае хорошо аппроксимируются формулой Клосса

$$F(S) = \frac{2F_{\rm m}}{S/S_{\rm m} + S_{\rm m}/S}.$$
 (2.20)

Для асинхронных двигателей с металлическим массивным стальным ротором и медным или алюминиевым покрытием величина максимального момента  $M_{\rm m}$  и соответствующее ему скольжение  $S_{\rm m}$  лежат в тормозной зоне при  $S_{\rm m}>1$  [3]. Поэтому в первом приближении для диапазона рабочих скольжений  $0\leq S\leq 1$  принимаем вместо уравнения (2.20) уравнение вида

$$\mathbf{F}(\mathbf{S}) = \mathbf{S}\mathbf{F}_{\mathbf{n}},\tag{2.21}$$

где  $F_n$  – линейное пусковое усилие при неподвижном теле, когда S = 1.

В соответствии с уравнением (2.21) получаем из (2.17) и (2.18) для разгоняемого движущегося тела в ускорителе линейные усилия вида

$$F_{cp}(S) = SF_{m} \cos \Psi = S\omega_{o}B_{m}^{2} \frac{2\pi\ell_{o}\tau R_{a}^{2}}{q} \cos \Psi, \qquad (2.22)$$

$$F_{\sim}(S) = -S\frac{\tau}{\pi}f_{m}(\sin\eta_{o})\cos(2\omega_{o}t - \Psi - \eta_{o} - 2\eta), \qquad (2.23)$$

где  $\eta = \pi \frac{Vt}{\tau} = var$ .

Фазовый угол комплексного удельного сопротивления  $\Psi$  плавно возрастает от  $\Psi = 0$  до  $\Psi = \frac{\pi}{4}$  эл.град. при изменении S от нуля до  $S = \infty$ . При больших частотах  $Sf_o$ , когда глубина проникновения электромагнитной волны в движущееся тело  $\varepsilon$  мала по сравнению с  $R_a$ , т.е. когда  $\varepsilon/R_a <<1$ , можно принимать  $\Psi = \pi/4$ , а модуль комплексного удельного сопротивления

$$q = \sqrt{2} \cdot \rho \,. \tag{2.24}$$

При малых частотах можно принять  $q \approx \rho$ , где  $\rho$  (*Ом(м)* - материал металлического покрытия разгоняемого тела и  $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{\omega \mu \mu_o/2\rho}}$  [2].

Если глубина проникновения  $\epsilon$  при  $f_{o}(S=1)$  захватывает, кроме слоя покрытия, также часть стального материала внутреннего сердечника движущегося тела, то величину  $\rho$  необходимо рассчитать, исходя из эквивалентного сопротивления этих двух слоев, которые включены в параллель.

#### 3. Электромагнитный момент вращения, действующий на разгоняемое тело

Зададим в той же системе координат (см. 2) радиальную составляющую вращающего поля в зазоре в виде (угол  $\phi$  отсчитывается в электрических градусах  $\phi = p\phi_{a}$ )

$$B_{r}(\phi) = B_{m} \sin(\omega_{o}t + \phi). \qquad (3.1)$$

Магнитный поток через замкнутый контур с аксиальными сторонами длиной  $\ell_{o}$  и двумя дугами длиной  $\tau_{B}$  на торцах цилиндрического неподвижного тела будет равен

$$\Phi_{\rm r} = B_{\rm m} \ell_{\rm o} \frac{R_{\rm a}}{p} \int_{\varphi_{\rm l}}^{\varphi_{\rm l}+\pi} \sin(\omega_{\rm o}t + \varphi) d\varphi, \qquad (3.2)$$

где полюсное деление для вращающегося магнитного поля  $\,\tau_{_B}\,$ равно

$$\tau_{\rm B} = \pi R_{\rm a} / p \,. \tag{3.3}$$

Интегрируя, получаем

$$\Phi_{\rm r} = 2B_{\rm m}\ell_{\rm o}\frac{R_{\rm a}}{p}\cos(\omega_{\rm o}t + \phi_{\rm 1}).$$
(3.4)

ЭДС в таком контуре равна

$$\varepsilon = -\frac{\partial \Phi_{p}}{\partial t} = 2\omega_{o}B_{m}\frac{\ell_{o}R_{a}}{p}\sin(\omega_{o}t + \phi_{1}).$$
(3.5)

Плотность тока на единицу длины в таком контуре будет

$$i_{z} = 2\omega_{o}B_{m}\frac{\ell_{o}R_{a}}{q_{z}p}\sin(\omega_{o}t + \varphi_{1} - \Psi_{z}), \qquad (3.6)$$

где q<sub>z</sub> [*Ом(м*] – модуль удельного комплексного сопротивления материала разгоняемого тела с учетом скин-эффекта;  $\Psi_z$ - фазовый угол комплексного сопротивления.

Направленное по угловой координате электромагнитное усилие от взаимодействия внешнего поля по уравнению (3.1) и тока  $\dot{i}_z$ , текущего аксиально по одной стороне контура длиной  $\ell_o$ , будет равно

$$f_{\phi_1} = \ell_o B_r i_z = 2\omega_o B_m^2 \frac{\ell_o^2 R_a}{q_z p} \sin(\omega_o t + \phi_1) \sin(\omega_o t + \phi_1 - \Psi_z)$$

или

$$f_{\phi_1} = \omega_0 B_m^2 \frac{\ell_0^2 R_a}{q_z p} [\cos \Psi_z - \cos(2\omega_0 t - \Psi_z + 2\phi_1)].$$
(3.7)

Электромагнитное усилие от другой стороны контура, расположенного при  $\phi_2 = \phi_1 + \pi$  и обтекаемого током  $i_z$  в обратном по сравнению с предыдущей стороной контура направлении, будет

$$f_{\varphi_2} = -\ell_o B_r(\varphi_1 + \pi)i_z = -2\omega_o B_m^2 \frac{\ell_o^2 R_a}{q_z p} \sin(\omega_o t + \varphi_1 + \pi)\sin(\omega_o t + \varphi_1 - \Psi_z),$$
  
$$f_{\varphi_2} = 2\omega_o B_m^2 \frac{\ell_o^2 R_a}{q_z p} \sin(\omega_o t + \varphi_1)\sin(\omega_o t + \varphi_1 - \Psi_z),$$

т.е.  $f_{\phi_1} = f_{\phi_2}$  .

Сила от двух сторон контура при  $\,\phi_{1}\,$  и (  $\phi_{1}+\pi$  ) будет

$$f_{\phi} = f_{\phi_1} + f_{\phi_2} = 2\omega_0 B_m^2 \frac{\ell_o^2 R_a}{q_z p} \left[ \cos \Psi_z - \cos(2\omega_0 t - \Psi_z + 2\phi_1) \right].$$
(3.8)

Момент вращения от одного контура:

$$m_{\phi} = R_{a}f_{\phi} = 2\omega_{o}B_{m}^{2}\frac{\ell_{o}^{2}R_{a}}{q_{z}p}\left[\cos\Psi_{z} - \cos(2\omega_{o}t - \Psi_{z} + 2\phi_{1})\right].$$
 (3.9)

Момент вращения от всех плотностей токов на участке  $\tau_{_B}$ , т.е. на участке  $\phi_{_l} \le \phi \le \phi_l + \pi$ , будет

$$M_{\varphi}(\tau_{\rm B}) = \int_{\varphi_{\rm I}}^{\varphi_{\rm I}+\pi} m_{\varphi} R_{\rm a} d\varphi.$$

Количество таких участков на половине цилиндрической поверхности тела равно р (числу пар полюсов). Поэтому окончательно полный электромагнитный момент вращения, приложенный к телу, будет равен

$$M_{\varphi} = pM_{\varphi}(\tau_{\rm B}) = p \int_{\varphi_{\rm I}}^{\varphi_{\rm I}+\pi} m_{\varphi} R_{\rm a} d\varphi. \qquad (3.10)$$

Подставляя в (3.10) выражение (3.9) и проведя интегрирование, получим

$$M_{\varphi} = \omega_{o} B_{m}^{2} \frac{2\ell_{o}^{2} R_{a}^{3}}{q_{z}} \bigg[ \pi \cos \Psi_{z} - \frac{1}{2} \sin (2\omega_{o} t - \Psi_{z} + 2\varphi_{1}) \bigg|_{\varphi_{1}}^{\varphi_{1} + \pi} \bigg]$$

Переменная составляющая с двойной частотой пропадает, и электромагнитный момент вращения, приложенный к неподвижному телу, равен  $M_{\varphi} = M_{\rm m} \cos \Psi_{\rm z}$ , (3.11)

где

$$M_{m} = \omega_{o} B_{m}^{2} \frac{2\pi \ell_{o}^{2} R_{a}^{3}}{q_{z}}.$$
 (3.12)

При вращении тела со скоростью <br/>п $(\it of/muh)$ меньшей, чем синхронная скорость вращения магнитного пол<br/>я $n_c=60 f_o/p$ , вводим скольжение вращения
$$S_{\rm B} = (n_{\rm c} - n)/n_{\rm c}$$
 (3.13)

Электромагнитный момент вращения, приложенный к вращающемуся телу со скольжением  $S_{\scriptscriptstyle B}$ , будет равен

$$M_{\varphi}(S_{\scriptscriptstyle B}) = S_{\scriptscriptstyle B}M_{\scriptscriptstyle m}\cos\Psi_z. \tag{3.14}$$

Формула (3.14) соответствует моменту вращения асинхронного двигателя со сплошным металлическим ротором [3]. Модуль удельного комплексного сопротивления  $q_z$  [см.уравнение (3.13)] и фазовый угол  $\Psi_z$  должны вычисляться в зависимости от частоты ЭДС и тока в рассмотренном контуре, т.е. от частоты  $f_v = S_v f_o$ . (3.15)

# разгоняемого тела

Дифференциальное уравнение линейного движения имеет вид

$$m\frac{dV}{dt} = F_{_{\rm SM}} - F_{_{\rm TP}}, \qquad (4.1)$$

где m (*кт*) – масса тела;  $F_{_{\rm ЭM}}$  - электромагнитное усилие тяги вдоль оси;  $F_{_{\rm TP}}$  - тормозящее усилие:

$$F_{_{\rm SM}} = F_{_{\rm cp}}(S) + F_{_{\sim}}(S),$$
 (4.2)

где  $F_{cp}(S)$  - по уравнению (2.22),  $F_{\infty}(S)$  - по (2.23);

$$F_{\rm rp} = k_{\rm o} V^{\rm d} \,, \tag{4.3}$$

 $k_o$  – коэффициент аэродинамического лобового сопротивления, вычисляемый в зависимости от формы и размеров тела;  $d = 1, 3 \dots 3$  - степень зависимости лобового сопротивления от скорости.

Если пренебречь пульсациями двойной частоты в электромагнитном усилии, получим

$$m\frac{dV}{dt} = \left(1 - \frac{V}{V_o}\right)F_n - k_oV^d, \qquad (4.4)$$

где [см.уравнение (2.22)]

$$F_{n} = \omega_{o} B_{m}^{2} \frac{2\pi \ell_{o} \tau R_{a}^{2}}{q} \cos \Psi.$$
(4.5)

Поскольку  $V_c = 2f_o \tau$  и  $\tau$  разные на разных участках статорной обмотки, кроме того, величины q и  $\Psi$  зависят от частоты скольжения  $f = Sf_o$ , то уравнение (4.4) существенно нелинейно, и решение должно определяться численными методами.

В случае разгона на участке с постоянными полюсными делениями, когда  $\tau = \tau_i = \text{const}$ , и пренебрегая также изменениями q и  $\Psi$ , т.е. считая на этом участке  $F_n = \text{const}$ , уравнение (4.4) можно записать для дискретного времени ( $t = n\Delta t$ , n = 0, 1, 2, ...) в виде

$$V(n) = V(n-1) = \frac{F_n \Delta t}{m} - \frac{F_n \Delta t}{m V_c} V(n-1) - \frac{k_o \Delta t}{m} [V(n-1)]^d, \qquad (4.6)$$

где  $\Delta t$  – постоянный квант времени.

Уравнение (4.6) приводится к виду, удобному для расчета:

$$V(n) = V_{o} + a_{1}V(n-1) - a_{2}[V(n-1)]^{d}, \qquad (4.7)$$

где

$$\mathbf{V}_{o} = \frac{\mathbf{F}_{n}\Delta t}{\mathbf{m}}; \quad \mathbf{a}_{1} = \left(1 - \frac{\mathbf{F}_{n}\Delta t}{\mathbf{m}\mathbf{V}_{c}}\right); \quad \mathbf{a}_{2} = \frac{\mathbf{k}_{o}\Delta t}{\mathbf{m}}.$$
(4.8)

Причем V(-1)=0, либо  $V(-1)=V_k$ , где  $V_k-$  конечная скорость из расчета на предыдущем участке с другим  $\tau_i$  и другой синхронной скоростью  $V_{c_i}=2f_{\rm o}\tau_i$ .

Аналогичным образом для квантования времени можно численно решить уравнение (4.1), когда учитываются составляющая  $F_{\sim}(S)$  и изменение q и  $\Psi$  в зависимости от частоты.

При переходе тела на другой участок с другим  $au_i$  эти решения последовательно сшиваются. В итоге получается решение V(t) для разгона тела по всей длине статора ускорителя.

Дифференциальное уравнение вращательного движения имеет вид

$$J\frac{dn}{dt} = M_{_{\mathcal{P}M}} - M_{_{Tp}}, \qquad (4.9)$$

где J – момент инерции тела относительно оси OZ;  $M_{_{3M}}$  - электромагнитный момент вращения, полученный в разделе 3 и равный рассчитанному по уравнению (3.14);  $M_{_{TD}}$  - тормозной момент вращения.

В первом приближении  $M_{_{TP}}$  можно принять равным постоянной величине

$$M_{\rm Tp} = M_{\rm Tp}^{\rm o} = {\rm const} \,. \tag{4.10}$$

Записывая M<sub>эм</sub> в виде [см.уравнения (3.14) и (3.12)]

$$\mathbf{M}_{_{\mathcal{Y}M}} = \mathbf{S}_{_{B}}\mathbf{M}_{n} = \left(1 - \frac{n}{n_{c}}\right)\mathbf{M}_{n}, \qquad (4.11)$$
$$2\pi\ell^{2}\mathbf{P}^{3}$$

$$M_{n} = \omega_{o} B_{m}^{2} \frac{2\pi \ell_{o} K_{a}}{q_{z}} \cos \Psi_{z}, \qquad (4.12)$$

получаем уравнение

$$J\frac{dn}{dt} = \left(1 - \frac{n}{n_c}\right) M_n - M_{Tp}^o, \qquad (4.13)$$
$$n_c = 60 f_o / \beta. \qquad (4.14)$$

где

В отличие от линейного разгона в этом случае по всей длине статора ускорителя величина полюсного деления вращения  $\tau_{_B}$  не изменяется. При изменении скольжения  $S_{_B}$  изменяется частота  $f_{_B} = S_{_B} f_{_O}$ , что приводит к изменению величин  $q_z$  и  $\Psi_z$  в выражении (4.12).

Ввиду зависимости  $M_n$  от частоты и скорости n уравнение (4.13) является нелинейным и должно решаться численными методами. В одном частном случае, когда можно пренебречь изменением  $M_n$  и считать эту величину постоянной, уравнение (4.13) допускает аналитическое решение. В этом случае представим его в виде

$$dn/dt + b_1 n = b_0$$
, (4.15)

где

$$b_1 = M_n / Jn_c; \quad b_o = (M_n - M_{nh}^o) / J.$$
 (4.16)

Решение имеет вид

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{n}_{o} + \mathbf{n}_{1} \left( 1 - e^{-\mathbf{b}_{1} \cdot t} \right), \tag{4.17}$$

где

$$n_1 = b_o / b_1$$
, (4.18)

 $\mathbf{n}_{_{\mathrm{o}}}-$  начальная скорость вращения при ~t=0.

Если момент сопротивления вращению  $\,M_{_{\rm Tp}}\,$ зависит от скорости вращения

$$M_{_{TP}} = k_{_{B}} n^{d_{_{B}}},$$
 (4.19)

тогда решение (4.9) может быть определено из дискретного уравнения, в котором  $t = k\Delta t$ , k = 0,1,2,...:

$$n(k) = n_{o} + c_{1}n(k-1) - c_{2}[n(k-1)]^{d_{a}}, \qquad (4.20)$$

где

$$n_{o} = \frac{M_{n}\Delta t}{J};$$
  $c_{1} = \left(1 - \frac{M_{n}\Delta t}{Jn_{c}}\right);$   $c_{2} = \frac{k_{B}\Delta t}{J}.$  (4.21)

Причем

$$n(-1) = 0. (4.22)$$

#### Заключение

Для запатентованной новой конструкции ускорителя разработаны основы теории электромагнитного линейно-вращательного ускорителя.

Описаны конструкция и принцип действия нового типа электромагнитного линейно-вращательного ускорителя металлического тела. Показано, что за счет трехфазной спиралевидной обмотки статора в ускорителе генерируются бегущее вращающееся относительно аксиальной оси аксиально и одновременно цилиндрического статора электромагнитное поле. В результате взаимодействия этого поля с индуктированными в металлическом теле электрическими токами возникают линейные тяговые и вращательные усилия, которые разгоняют тело. Тело, покидая ускоритель, имеет кинетическую энергию линейного И вращательного движения. Получены аналитические выражения электромагнитных линейных и вращательных усилий, действующих на разгоняемое массивное металлическое цилиндрическое тело. Показано, что дифференциальные уравнения, описывающие линейное и вращательное движение разгоняемого тела, являются существенно нелинейными, которые решаются численно. Полученные аналитические результаты могут быть использованы при проектировании новых ускорителей, а также для проведения поверочных расчетов уже готовых ускорителей при определении динамических параметров тела в момент, когда оно покидает ускоритель.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Агаронян Г.Н., Арешян Г.Л., Мирзабекян Г.М. Ускоритель линейный электромагнитный. Заявка на патент N P20020121 от 1.07.2002 г.
- 2. Физические основы электротехники / Под ред. К.М.Поливанова (§10.8. Электромагнитное поле в проводящей среде. С.263). М.: ГЭИ, 1950.
- 3. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины (§48.4 и §48.5. Асинхронные двигатели с массивным и с полым немагнитными роторами. С.466). М.: Энергия, 1980.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.11.2002.

## Գ.Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԳԾԱՅԻՆ ՊՏՏԱԿԱՆ ԱՐԱԳԱՅՈՒՅՉԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՀԻՄՈՒՆՔՆԵՐԸ

Տրվում է գծային պտտական արագացուցչի կառուցվածքի նկարագրությունը։ Մշակված են նման արագացուցչի տեսության հիմունքները։ Տրվում են թափառքվող մարմնի վրա ազդող ձգման աքսիալ Ճիգի և պտտման էլեկտրամագնիսական մոմենտի անալիտիկ բանաձևերը։ Տրվում են թափառքվող մարմնի շարժման դիֆերենցիալ հավասարումները և դրանց մոտավոր լուծման մեթոդները։

#### G.L. ARESHIAN PRINCIPLES OF ELECTROMAGNETIC LINEARLY-ROTATING ACCELERATOR THEORY

A description of electromagnetic linearly rotating accelerator theory is proposed. The principles of such an accelerator theory are developed. Analytical formulas of axle traction force and electromagnetic torque acting on an accelerating body, as well as differential equations of accelerating body motion and the methods of their approximate solution are presented.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 621.315.2

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## Ж.М. МИРЗАБЕКЯН, В.К. КАЗАРЯН

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДЫМ НЕМАГНИТНЫМ ТЕЛАМ

Разработана теория расчета импульсного магнитного поля для передачи ускорения твердым немагнитным телам при условии ограничения скорости тела от теплового поля. Даются окончательные формулы для расчета электромагнитных и конструктивных параметров индукционных катушек, триготронов и электрические схемы замещения.

*Ключевые слова*: импульсные магнитные поля, ускорение, индукционные катушки, емкость, летательное тело, триготрон.

Импульсные магнитные поля находят все более широкое применение в различных областях науки, техники и обороны. Это обусловлено отчасти тем, что их генерирование осуществляется значительно более простыми методами, чем постоянных полей, а современная диагностическая техника, обладающая необходимым временным разрешением, позволяет использовать эти поля без серьезных экспериментальных затруднений.

Целью настоящей работы является создание сильного импульсного магнитного поля для передачи ускорения и определенной ударной силы немагнитному твердому телу. Исследования проводились в основном на немагнитных материалах, для чего был рассчитан, изготовлен и испытан соответствующий магнитный ускоритель. Созданная нами установка состояла из емкостного накопителя, серии индукционных катушек, триготронных разрядников и пускорегулирующих и измерительных аппаратур.

Схема катушек ускорителя приведена на рис.1. Летательное тело представляет собой голый алюминиевый цилиндр 4, толщина стенки которого намного меньше его диаметра. Поскольку длина летательного тела почти равна индуктору 2, распределение плотности тока по длине тела разное. Следовательно, можно считать, что летательное тело представляет собой систему LR контуров, которые связаны друг с другом жесткими связями (его деформацией пренебрегаем).

Триготроны, зажигаясь в разные промежутки времени, дают возможность разрядить конденсаторы на индукторы, порождая по длине ускорителя бегущее магнитное поле, которое, в свою очередь, ускоряет летательное тело (рис.2).

Для описания летательного вида ускорения был использован метод расчета цепей с сосредоточенными параметрами. Соответствующая электрическая схема замещения ускорителя приводится на рис.3, для которой можно написать, что

$$U_{1R_1} + U_{1L_1} + U_{1M_{21}} = U , \qquad (1)$$

$$U_{2R_2} + U_{2L_2} + U_{2M_{21}} + U_{2M_{21}} = 0, \qquad (2)$$

$$U_{3R_2} + U_{3L_2} + U_{3M_{22}} = 0, (3)$$

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} = U , \qquad (4)$$

$$R_{2}i_{2} + L_{2}\frac{di_{2}}{dt} + M_{12}\frac{di_{1}}{dt} + M_{23}\frac{di_{3}}{dt} = 0, \qquad (5)$$

$$R_{3}i_{3} + L_{3}\frac{di_{3}}{dt} + M_{23}\frac{di_{2}}{dt} = 0, \qquad (6)$$

где R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> - активные сопротивления; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> - коэффициенты самоиндукции обмоток индуктора, внутреннего металлического цилиндра и летательного тела; M<sub>12</sub> - коэффициент взаимоиндукции между индуктором и внутренним металлическим цилиндром; M<sub>23</sub> - коэффициент взаимоиндукции между внутренним металлическим цилиндром и летательным телом. В этой задаче M<sub>12</sub>=M<sub>21</sub>, M<sub>23</sub>=M<sub>32</sub>, a M<sub>13</sub>=M<sub>31</sub> $\approx$  0.

Поскольку и индуктор, и летательное тело нагреваются, то можно написать, что

$$R_{1}(t) = R_{10} + D_{1} \int_{0}^{t} i_{1}^{2}(t) R_{1}(t) dt , \qquad (7)$$

$$R_{1}(t) = R_{10} + D_{1} \sum_{j=1}^{n} \left[ I_{1j}^{2}(t_{j}) R_{1j}(t_{j}) \Delta t_{j} \right],$$
(8)

$$R_{2}(\ell,t) = R_{20} + \left[ D_{2} \int_{0}^{t} I_{2}^{2}(\ell,t) R_{2}(\ell,t) dt \right] [d\ell]^{2}, \qquad (9)$$

$$\frac{R_{2i}(\ell_i, t)}{\Delta \ell_i^2} = \frac{R_{20}}{\Delta \ell_i^2} + \left[ D_2 \sum_{K=1}^n \left[ I_{2ki}(\ell_i, t) R_{2ik}(\ell_i, t) \Delta t \right] \right],$$
(10)

где D1 и D2 - коэффициенты теплоотдачи индуктора и летательного тела, 1/А<sup>2</sup>с.



Рис.1.

1- катушка, намотанная медной проволокой; 2- металлический каркас из двух половинок; 3 - прорез по длине каркаса; 4 -летательное тело





 $R_1=2\cdot 10^3 O_M$ ,  $C_1=10^{-3} \Phi$ ,  $L=10^{-6} \Gamma_H$ ,  $R_2=27\cdot 10^{-6} O_M$ ,  $C_2=5\cdot 10^{-10} \Phi$ , W - высоковольтный источник питания (U =4·10<sup>3</sup>B), Tr - триготронный разрядник



Рис.3

Далее в соответствии со вторым законом Ньютона для уравнения летательного тела в катушке с цилиндрическим якорем из двух половинок можно написать

$$-m\frac{d^2x}{dt^2} + i_2 \int_0^{t_0} i_3 \frac{dM}{dx} = 0.$$
(11)

Здесь сопротивлением воздуха пренебрегаем, поскольку оно на несколько порядков меньше ускоряющой силы.

Формулы (1)-(11) представлены только для первого каскада ускорителя. Однако они действительны и для остальных каскадов. Только необходимо менять предварительные условия решения интегрально-дифференциальных уравнений.

Геометрические параметры первого каскада ускорителя следующие: внутренний радиус катушки  $r_1=5,5\cdot10^{-3}$ *м*, толщина медной проволоки обмотки  $a=3\cdot10^{-3}$ *м*, внутренний радиус летательного цилиндра  $r_1=5\cdot10^{-3}$ *м*, толщина его стенки  $a_1=1\cdot10^{-3}$ *м*. Тогда соответственно получим

 $R_1=43\cdot 10^{-4}$  *Ом*,  $R_2=6\cdot 10^{-5}$  *Ом*,  $R_3=2\cdot 10^{-3}$  *Ом*.  $L_1=(_0(r_1(r_1-a_1))^{1/2}\cdot f(k))$ , где  $K=4\cdot r_1\cdot r_2/(h^2+(r_1+r_2)^2)$ , h - расстояние между центрами контуров,  $L_1=0,068\cdot 10^{-7}$  *Гн*,

$$\begin{split} & L_{2} = (_{0}(r_{2}(r_{2}-a_{2}))^{1/2} \cdot f(k) = 0.063 \cdot 10^{-7} \ \varGamma_{H}, \ L_{3} = (_{0}(r_{3}(r_{3}-a_{3}))^{1/2} \cdot f(k) = 0.06 \cdot 10^{-7} \ \varGamma_{H}, \\ & M_{12} = (_{0} \cdot (r_{1} \cdot r_{2})^{1/2} \cdot f(k) = 0.062 \cdot 10^{-7} \ \varGamma_{H}. \end{split}$$

В нашем случае h=0 (расстояние между кругами) [4,6], тогда M23=M32(0.058  $\cdot$  10 $^7$  Гн, M31=M13(0.

Решая эту систему, можно получить скорость летательного тела в каждый момент времени V(t), ток индуктора  $i_1(t)$ , плотность тока летательного тела  $I_2(t, \ell)$ . Все эти решения проводились на ЭВМ.

Так, например, если каждому каскаду передается 7.000 Дж энергии, среднее значение ускорения а=10<sup>6</sup>  $M/c^2$  и коэффициент полезного действия 30%, то скорость тела в первом каскаде будет 320 M/c, а для i-го каскада:

$$V_i = \sqrt{\frac{2\Delta E}{m} + V_{i-1}^2} = \sqrt{(320^2) + V_{i-1}^2} = V_i \sqrt{i} , \qquad (12)$$

время ускорения:

$$t_1 = \frac{V_1}{a}\sqrt{n} \,. \tag{13}$$

С помощью выведенных выражений рассчитаны на ЭВМ основные предварительные параметры полета летательного тела (табл. 1). Как следует из этих данных, длительность ускорения очень мала  $\approx 1,5$  *мс*.

Поэтому можно принять, что в каждом каскаде при данной длительности времени ускорение колебания тока в индукторе (синусоид с затухающей амплитудой) длится на порядок, равный одному периоду.

При этих условиях можно получить частоту колебания тока в данном каскаде. Приращение частоты тока объясняется тем, что тело, набирая скорость, проходит через данный индуктор (длина индуктора во всех каскадах одинаковая) на более короткий промежуток времени. Следовательно, необходимо увеличить скорость потока энергии.

Рассчитывается также, что при таком магнитном поле можно придать летательному телу энергию в заданном пределе. Здесь снова принимается, что электрическое сопротивление тела равно нулю. Поскольку это тело является идеальным диамагнитным материалом, магнитный поток в задней и боковых сторонах остается неизменным, т.е.  $\Phi = \Phi_1 = \Phi_2$ .

Тогда энергия совпадающей занимаемой точки летательного тела равняется

$$\Delta W = W_1 - W_2, \tag{14}$$

$$W_1 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \ell \,\omega (R^2 - a^2) \,, \tag{15}$$

$$W_2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \ell \, \omega R^2 \,, \tag{16}$$

$$\Delta W = \frac{\pi \ell B_0 a^2}{2\mu_0 (1 - \frac{a}{R})^2}.$$
(17)

С другой стороны,

$$\Delta W = \Delta E_i - \frac{mV^2}{2} - \frac{\rho_m QV^2}{2} - \frac{\rho_m V^2}{2} \ell n (R^2 + a^2).$$
(18)

Следовательно,

$$B_0 = V(\frac{R}{a} - \frac{a}{R})\sqrt{\mu_0 \rho_m}, \qquad (19)$$

где V – скорость тела;  $B_0$  – индукция летательного тела;  $\rho_M$  – плотность летательного тела .

Подставляя в (19) V=300 м/с и учитывая, что летательное тело из алюминия, получим В0=20  $T\ell$ .

Для получения максимального коэффициента полезного действия при видоизменении энергии целесообразно, чтобы индуктивности индуктора и летательного тела были бы одного порядка.

Нижний предел индуктора ограничивается значениями внутренней индуктивности конденсаторов и соединительных проводов. Индуктивность индуктора должна быть по крайней мере в 10 раз больше суммарного значения индуктивностей остальных устройств.

Учитывая это условие, выбирается индуктивность ~ 10<sup>-6</sup> *Гн*. В этом случае величина тока, который создает магнитное поле в пределах 20 *Гн*, будет равной

$$I = \sqrt{\frac{2W}{L_1}} = 230 \cdot 10^3 A.$$
 (20)

Емкость конденсаторов каждого каскада и их рабочие напряжения рассчитываются по формулам

$$C = \frac{1}{4N^2 I^2 L},$$
 (21)

$$U=N\Phi_{m}2(\mu , \qquad (22)$$

где f – частота тока; L – индуктивность индуктора; N – число витков катушки индуктора;  $\Phi_m$  - амплитудное значение магнитного потока.

Расчетные величины С и Um для 10 каскадов приводятся в табл.1.

Потраченная средняя мощность при движении летательного тела в первом  $\Delta E$ 

каскаде будет 
$$P = \frac{\Delta L}{\Delta f} \approx 54 \cdot 10^3 BT$$
, а в последнем каскаде  $P \approx 100 \cdot 10^3 BT$ .

Таблица 1

N/N	С, <i>тФ</i>	Uт, <i>кВ</i>
1	1,3	2,3
2	1,7	5,7
3	1,1	7
4	0,9	7,9
5	0,55	10,2
6	0,52	10,5
7	0,48	10,9
8	0,38	12,2
9	0,31	13
10	0,28	14,4
		1

Условия ограничения скорости тела от теплового нагрева. Поскольку процесс ускорения очень короткий (10<sup>-3</sup> *c*) и летательное тело не соприкасается с окружающей средой, то без особой погрешности можно считать, что тепловая энергия полностью идет на увеличение температуры тела, т.е.

$$\Delta Q = \Delta W , \qquad (23)$$

$$\Delta W = \int_{0}^{t} I_{2}^{2} \frac{P_{t}}{S_{2}} dt \quad \text{M} \quad \rho_{t} = \rho_{0} (1 + \beta \theta) \quad , \tag{24}$$

где  $\rho_t$  — удельное сопротивление летательного тела;  $\rho_0$  — удельное сопротивление при 20  ${}^{o}C$ ; S<sub>2</sub> — площадь поперечного сечения тела;  $\beta$  — коэффициент зависимости сопротивления тела от температуры;  $\theta$  — разность температур;

$$\frac{\rho_t}{\rho_0} = 1 + \frac{\beta}{S_2} \int_0^t t_2^2 \rho dt$$
 (25)

или

$$\frac{1}{\rho_t} = \frac{d}{dt} (\rho / \rho_0) = \frac{\beta}{S_2} i_2^2 .$$
(26)

Поскольку

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m}i_{1}i_{2}\frac{dM}{dX} = \frac{1}{m}\frac{L_{2}}{M}i_{2}^{2}\frac{dM}{dX}$$
(27)

и L2i2=Mi1,

$$dV = \frac{1}{m} \frac{L_2}{M} \frac{S_2}{\rho_0 \beta} \frac{dM}{dX} d(\ell nK), \qquad (28)$$

то

$$\Delta V = \frac{L_2 S_2}{m} \frac{d(\ell n K)}{dX} A, \qquad M = K \sqrt{L_1 L_2}, \qquad (29)$$

где К - коэффициент связи;  $L_2 \approx 10^{-8}$  Гн - приблизительная индуктивность летательного тела;  $m \approx 0,2$  кг.  $\gamma_{Sm}^{A\ell} \approx 0,028$  мк,  $OM \cdot M$   $\rho_m = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, поэтому получим  $\Delta V \approx 1,0$  км/с.



Рис. 4

На основании проведенных расчетов и исследований спроектирована конструкция индукционных катушек и триготронов для двух каскадов ускорителя и разработана технология их изготовления. Собраны также конденсаторные батареи с соответствующими параметрами, смонтированные на площадке. Проведены испытания и измерены скорости полета (рис 4).

Предварительные расчеты электромагнитного индукционного ускорителя проведены для 10 каскадов, где летательное диамагнитное тело весом 150 *гр* должно набрать скорость 1000 *м/с*.

Результаты окончательных расчетных величин параметров летательного тела приведены в табл. 2.

Ν	Vn,	$\Delta$ T <sub>n</sub> ,	fn ,	Сп,	$U_k$
	м/с	$\Delta$ мл/с	кГц	$_{M\!\varPi.} \varPhi$	кВ
1	320	0,62	1,6	1,3	2,3
2	452,5	0,25	4,0	1,7	5,7
3	554	0,2	4,9	1,1	7,0
4	640	0,18	5,5	0,9	7,9
5	715,5	0,14	7,1	0,55	10,2
6	784	0,136	7,3	0,52	10,5
7	846,6	0,132	7,6	0,48	10,9
8	905	0,118	8,5	0,39	12,2
9	960	0,106	9,4	0,31	13
10	1000	0,1	10	0,28	14,4

Таблица 2

Здесь  $V_n$  — скорость летательного тела в конце n-го каскада;  $\Delta T_n$  — время ускорения тела в данном каскаде;  $f_n$  — частота тока в цепи (RLC) n-го каскада;  $C_n$  — емкость накопителя n-го каскада;  $U_n$  — начальное напряжение зарядки n-го емкостного накопителя.

Величина импульсного магнитного поля во всех индуктивных катушках равна 20 *Тл.* Вначале изготовлен ускоритель для одного каскада, где емкость накопителя равна  $10^{-3} \, \varPhi$  и напряжение зарядки  $4 \cdot 10^3 \, B$ . Индуктивность катушки диаметром 4,5 *см.*  $10^{-6} \, H$ . В этой цепи в качестве коммутационного элемента был принят триготронный разрядник.

Электрическая схема электромагнитного ускорителя приведена на рис 2. В результате испытаний скорость полета летательного тела в первом каскаде составляла 200 *м/c*, а во втором – 390 *м/c*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Том К.** Теория гиперзвукового электромагнитного ускорителя. В кн: Техника гиперзвуковых исследований: Сб. ст. 1-е изд.-М.: Мир, 1964.-524 с.
- 2. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-400 с.
- 3. IEEE TRANSACTION ON «MAGNETICS» January 1991.- V. 27, N<sup>0</sup> 1. A publication of the IEEE magnetics society.
- 4. **Тамм А.** Основы теории электричества: Пособие для вузов . 10-е изд.- М.: Госэнергоиздат.- 1989.-256 с.
- 5. Калантаров П.Л., Цейтлик Л.Р. Расчет индуктивностей: Справ. пособие. –1-е изд.- Л. : Мир, 1955. 365 с.
- 6. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники.-М.: Энергия.- 1989.-445с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 22.12.2001.

## Ժ.Մ. ՄԻՐՉԱԲԵԿՅԱՆ, Վ.Կ. ՂԱՉԱՐՅԱՆ ՈՉ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈւՄ ՀԱՂՈՐԴՈՂ ԷԼԷԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉ

Մշակվել են իմպուլսային մագնիսական դաշտում պինդ, ոչ մագնիսական մարմիններին արագացում հաղորդելու հաշվարկային տեսությունը և առաջացող ջերմային դաշտում վերջիններիս արագության սահմանափակման պայմանները։ Տրված են ինդուկցիոն կոՃերի, տրիգոտրոնների էլեկտրամագնիսական ու կառուցվածքային պարամետրերի հաշվարկի վերջնական բանաձները և փոխարինման սխեմաները։

## Zh.M. MIRZABEKYAN, V.K. GHAZARYAN ELECTROMAGNETIC PULSE ACCELERATOR FOR ACCELERATION TRANSMISSION TO SOLID NON-MAGNETIC BODIES

The theory of pulse magnetic field calculation for acceleration transmission to solid non-magnetic bodies under conditions of body velocity limitation from the thermal field is developed. The final formulas and electric replacement circuits for the calculation of electromagnetic and constructive parameters of induction coils, trigotrons are given.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК.621.3.061

#### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## Г. Д. АКОПДЖАНЯН, В.С. САФАРЯН

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМ

На основании алгебры структурных чисел получена общая формула для определения входных сопротивлений и передаточных функций по напряжению однородной цепной схемы.

*Ключевые слова*: четырехполюсник, напряжение, структура, цепная схема.

Известно, что однородные электрические цепи с распределенными параметрами могут быть представлены каскадно-соединенными одинаковыми симметричными четырехполюсниками (однородной цепной схемой). При исследовании и расчете таких схем практический интерес представляет нахождение передаточных функций (по напряжению и току) между различными ступенями цепной схемы (рис. 2).

Имеются простые соотношения, определяющие передаточные функции всей цепной схемы с n элементами  $(U_{n+1}/U_1)$  [1]. Интерес представляет также определение передаточных функций типа  $U_{_{i+1}}/U_{_1}$  (i = 1, ..., n), т.е. с выхода i-го элемента к входу цепной схемы.

В настоящей статье выводится общая формула для определения передаточных функций по напряжению от выхода любого і-го элемента к входу однородной цепной схемы, работающей в режиме холостого хода.

Алгеброй структурных чисел для определения коэффициента передачи четырехполюсника (рис. 1) по напряжению получена формула [2]

$$K_{u} = \frac{U_{b}}{U_{a}} = \left(\frac{Z_{b} - Z_{ba}}{Z_{a}}\right)^{1/2},$$
(1)

где  $Z_a$  и  $Z_b$  - входные сопротивления четырехполюсника со стороны входных (a, a') и выходных (b, b') зажимов при холостом ходе;  $Z_{ba}$  - входное сопротивление со стороны выходных зажимов при короткозамкнутых входных зажимах.



Отметим, что формула (1), выраженная через сопротивления холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника, позволяет решить задачу, не интересуясь внутренним строением четырехполюсника.

Рассмотрим цепную схему, состоящую из n одинаковых симметричных звеньев, в режиме холостого хода (рис. 2).





Объединив первые (1,...,i) и отдельно последующие (i+1,...,n) одинаковые симметричные четырехполюсные элементы в единые четырехполюсники, приведем схему, представленную на рис.2, к каскадному соединению двух симметричных четырехполюсников (рис. 3).



Рис. 3

Применив формулу (1) к схеме на рис. 3, будем иметь

$$K_{ui}^{2} = \frac{U_{i+1}^{2}}{U_{1}^{2}} = \frac{\frac{Z_{ia}Z_{(n-i)a}}{Z_{ia} + Z_{(n-i)a}} - \frac{Z_{iab}Z_{(n-i)a}}{Z_{iab} + Z_{(n-i)a}}}{Z_{na}} = \frac{Z_{(n-i)a}}{Z_{na}} \left( \frac{Z_{ia}}{Z_{ia} + Z_{(n-i)a}} - \frac{Z_{iab}}{Z_{iab} + Z_{(n-i)a}} \right),$$
(2)

где  $Z_{ia}$  - входное сопротивление первого четырехполюсника (рис. 3, слева) в режиме холостого хода;  $Z_{iab}$  - входное сопротивление первого четырехполюсника в режиме короткого замыкания;  $Z_{(n-i)a}$  - входное сопротивление второго четырехполюсника;  $Z_{na}$  - входное сопротивление всей цепной схемы (рис. 3).

Отметим, что в выражении (2) первые индексы у сопротивлений  $(Z_{ia}, Z_{(n-i)a})$ означают количество четырехполюсников (рис. 2), объединенных в одном (рис. 3).

Для сопротивлений  $Z_{ia}$  и  $Z_{iab}$  можно записать следующие рекуррентные соотношения [2]:

$$Z_{ia} = \frac{Z_{(i-1)a} + Z_{ab}}{Z_{(i-1)a} + Z_{a}} Z_{a}, \quad Z_{iab} = \frac{Z_{(i-1)ab} + Z_{ab}}{Z_{(i-1)ab} + Z_{a}} Z_{a}, \quad i = \overline{1, n},$$
(3)

где  $Z_{ab} = Z_{1ab}$ ,  $Z_a = Z_{1a}$ , т.е. являются соответствующими входными сопротивлениями одного четырехполюсника (рис. 2).

Из соотношений (3) нетрудно получить

$$Z_{ia}Z_{iab} = Z_a Z_{ab} = Z_c^2, \qquad (4)$$

где Z<sub>c</sub> - характеристическое сопротивление четырехполюсника.

Рассматривая цепную схему с бесконечным числом симметричных четырехполюсников (i $\to\infty$ ), получим  $Z_{_{\infty a}}=Z_{_{\infty ab}}=Z_{_c}$ .

Докажем справедливость соотношения (4). Для этого воспользуемся методом математической индукции. Покажем, что выражение (4) имеет место при i = 2. Исходя из (3), напишем

$$Z_{2a} = \frac{Z_a + Z_{ab}}{Z_a + Z_a} Z_a = \frac{Z_a + Z_{ab}}{2},$$
$$Z_{2ab} = \frac{Z_{ab} + Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_a} Z_a = \frac{2Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_a} Z_a.$$

Умножив эти равенства, получим

$$\mathbf{Z}_{2a}\mathbf{Z}_{2ab} = \mathbf{Z}_{a}\mathbf{Z}_{ab} \,.$$

Приняв, что равенство (4) имеет место при (i-1), покажем, что оно будет иметь место также при i:

$$\begin{split} Z_{ia} Z_{iab} &= \frac{\left(Z_{(i-1)a} + Z_{ab}\right) \left(Z_{(i-1)ab} + Z_{ab}\right)}{\left(Z_{(i-1)a} + Z_{a}\right) \left(Z_{(i-1)ab} + Z_{a}\right)} Z_{a}^{2} = \\ &= \frac{Z_{(i-1)a} Z_{(i-1)ab} + Z_{(i-1)a} Z_{ab} + Z_{ab} Z_{(i-1)ab} + Z_{ab}^{2}}{Z_{(i-1)a} Z_{(i-1)ab} + Z_{(i-1)a} Z_{a} + Z_{a} Z_{(i-1)ab} + Z_{a}^{2}} Z_{a}^{2} = \\ &= \frac{Z_{ab} \left(Z_{a} + Z_{(i-1)a} + Z_{(i-1)a} + Z_{ab} + Z_{ab}\right)}{Z_{a} \left(Z_{ab} + Z_{(i-1)a} + Z_{(i-1)ab} + Z_{a}\right)} Z_{a}^{2} = Z_{a} Z_{ab} \,. \end{split}$$

Далее определим коэффициент передачи при  $n\to\infty$ . Учитывая при этом очевидные соотношения

$$\lim_{n \to \infty} \frac{\mathcal{L}_{(n-i)a}}{Z_{na}} = 1, \quad \lim_{n \to \infty} Z_{(n-i)a} = \lim_{n \to \infty} Z_{(n-i)ab} = Z_c,$$

из (2) получим

$$K_{ui}^{2} = \frac{Z_{ia}}{Z_{ia} + \sqrt{Z_{a}Z_{ab}}} - \frac{Z_{iab}}{Z_{iab} + \sqrt{Z_{a}Z_{ab}}} = \frac{\sqrt{Z_{a}Z_{ab}}(Z_{ia} - Z_{iab})}{2Z_{a}Z_{ab} + \sqrt{Z_{a}Z_{ab}}(Z_{ib} + Z_{iab})} =$$

$$= \frac{Z_{ia} - Z_{ib}}{2\sqrt{Z_a Z_{ab}} + Z_{ia} + Z_{iab}} = \frac{Z_{ia} - Z_{iab}}{\left(\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}\right)^2} = \frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}}.$$

Таким образом, при  $n\to\infty$  коэффициент передачи определится из соотношения

$$K_{ui}^{2} = \frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}}.$$
 (5)

Воспользуясь методом математической индукции, можно также доказать,

$$\frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}} = \left(\frac{\sqrt{Z_a} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_a} + \sqrt{Z_{ab}}}\right)^i.$$
(6)

При i = 2 имеем

что

$$\frac{\sqrt{Z_{2a}} - \sqrt{Z_{2ab}}}{\sqrt{Z_{2a}} + \sqrt{Z_{2ab}}} = \frac{\sqrt{\frac{Z_a + Z_{ab}}{2}} - \sqrt{\frac{2Z_{ab}}{Z_a + Z_{ab}}}}{\sqrt{\frac{Z_a + Z_{ab}}{2}} + \sqrt{\frac{2Z_{ab}}{Z_a + Z_{ab}}} Z_a} = \frac{Z_a + Z_{ab} - 2\sqrt{Z_a Z_{ab}}}{Z_a + Z_{ab} + 2\sqrt{Z_a Z_{ab}}} = \left(\frac{\sqrt{Z_a} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_a} + \sqrt{Z_{ab}}}\right)^2.$$

Считая, что соотношение (6) имеет место при i, докажем, что оно будет иметь место также при i+1:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{Z_{(i+1)a}} - \sqrt{Z_{(i+1)ab}}}{\sqrt{Z_{(i+1)a}} + \sqrt{Z_{(i+1)ab}}} &= \frac{\sqrt{\frac{Z_{ia} + Z_{ab}}{Z_{ia} + Z_{a}}} Z_{a} - \sqrt{\frac{Z_{iab} + Z_{ab}}{Z_{iab} + Z_{a}}} Z_{a}}{\sqrt{\frac{Z_{ia} + Z_{ab}}{Z_{ia} + Z_{a}}} Z_{a}} &= \\ &= \frac{\sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{ia}Z_{a} + Z_{iab}Z_{a} + Z_{iab}Z_{a}}}{\sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{ia}Z_{a} + Z_{iab}Z_{a}}} - \sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{ia}Z_{a} + Z_{iab}Z_{ab}}} \\ &= \frac{\sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{ia}Z_{a} + Z_{iab}Z_{ab}} - \sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{iab}Z_{ab}} + \sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{iab}Z_{ab}}}{\sqrt{2Z_{a}Z_{ab} + Z_{ia}Z_{a} + Z_{iab}Z_{ab}}} = \\ &= \frac{\left(\sqrt{Z_{ia}Z_{a}} + \sqrt{Z_{iab}Z_{a}} + \sqrt{Z_{iab}Z_{ab}}}\right) - \left(\sqrt{Z_{ia}Z_{ab}} + \sqrt{Z_{iab}Z_{a}}\right)}{\sqrt{Z_{ia}Z_{a}} + \sqrt{Z_{iab}Z_{ab}}} + \sqrt{Z_{iab}Z_{ab}}} = \\ &= \frac{\sqrt{Z_{ia}}\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right) - \sqrt{Z_{iab}}\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)}{\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{iab}}}\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)} = \frac{\left(\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}\right)\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)}{\left(\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{ab}}\right)\left(\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{ab}}\right)} = \\ &= \left(\frac{\sqrt{Z_{a}}}{\sqrt{Z_{ia}}}\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right) + \sqrt{Z_{iab}}\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)}{\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{ab}}}\right) = \frac{\left(\sqrt{Z_{a}}}{\sqrt{Z_{a}}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)}{\left(\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}\right)} = \\ &= \left(\frac{\sqrt{Z_{a}}}{\sqrt{Z_{a}}} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_{a}}}\right)^{i} \frac{\sqrt{Z_{a}}}{\sqrt{Z_{a}}} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_{a}}} = \left(\frac{\sqrt{Z_{a}}}{\sqrt{Z_{a}}} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_{a}}}\right)^{i+1}. \end{aligned}$$

Таким образом, при  $n \to \infty\,$ коэффициент передачи определится по формуле

$$\mathbf{K}_{\mathrm{ui}} = \mathbf{C}^{\mathrm{i}/2},\tag{7}$$

где 
$$C = \frac{\sqrt{Z_a} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_a} + \sqrt{Z_{ab}}}$$
.

Рассматривая совместно соотношения (4) и (6), будем иметь

$$\begin{cases} Z_{ia} Z_{iab} = Z_{c}^{2}, \\ \frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}} = C^{i}. \end{cases}$$
(8)

Решая их относительно Z<sub>ia</sub> и Z<sub>iab</sub>, получим

$$Z_{ia} = \frac{1 + C^{i}}{1 - C^{i}} Z_{c}, \qquad (9)$$

$$Z_{iab} = \frac{1 - C^{i}}{1 + C^{i}} Z_{c}.$$
 (10)

Пользуясь выражениями (9) и (10), формулу (2) представим в виде

$$K_{ui} = \frac{1 + C^{n-1}}{1 + C^n} C^{\frac{i}{2}}.$$
 (11)

Таким образом, получены соотношения, определяющие входные сопротивления (9) и (10) и коэффициенты передачи (11) с любых і -ых пар зажимов однородной цепной схемы, выраженные через параметры одного четырехполюсника.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981. 522 с.
- 2. **Беллерт С., Возняцки Г.** Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел. М.: Мир, 1972. 332 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 8.03.2002.

## Գ.Դ. ՀԱԿՈԲՋԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ ՀԱՄԱՍԵՌ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅԱՆ ՇՈՒՐՋ

Կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի կիրառմամբ ստացված են համասեռ շղթայական սխեմայի մուտքային դիմադրությունների և լարման փոխանցման ֆունկցիաների որոշման ընդհանուր բանաձներ։

## G. D. HAKOBJANYAN, V. S. SAFARYAN ON HOMOGENEOUS CHAIN CIRCUIT STUDIES

Based on algebra of structural numbers the general formulas for definition input resistances and transfer functions on homogeneous chain circuit stress are obtained.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 620.179.14(088.8)

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## В.Б. НЕРСИСЯН

# РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ В НЕМ ПРОВОДЯЩЕГО НЕМАГНИТНОГО ЛИСТА

Исследуются некоторые электромагнитные параметры в воздушном зазоре вихретокового преобразователя при наличии в нем проводящего немагнитного листа. Получено выражение для вектора магнитного потенциала как в проводящем листе, так и в воздушном зазоре. Определены электрические и магнитные напряженности полей в этих средах.

*Ключевые слова*: электромагнитные параметры, вектор магнитного потенциала, плотность вихревых токов.

Одной из основных задач в вихретоковых преобразователях (ВТП) является определение закономерностей взаимодействия электромагнитного поля с проводящим немагнитным листом, расположенным в рабочем зазоре магнитной цепи. Магнитное поле в рабочем зазоре магнитной цепи броневой конструкции [1] в случае отсутствия в нем проводящего немагнитного листа однородно. При этом магнитное поле в зоне контроля в цилиндрической системе координат ( $\rho$ ,  $\phi$ , z) описывается уравнением

$$\vec{B}(\rho) = \begin{cases} \vec{B}_0 & \text{при } \rho \le \mathsf{R}, \\ 0, & \text{при } \rho \le \mathsf{R}, \end{cases}$$
(1)

где R – радиус эквивалентного круга сечения рабочего зазора преобразователя.

На рисунке показан рабочий зазор магнитной цепи, для которого справедливо условие (1). Здесь проводящий немагнитный лист толщиной h с удельной электрической проводимостью  $\gamma$  находится в кусочно–однородном, поперечно–осесимметричном, изменяющемся по гармоническому закону магнитном поле.

$$\dot{\mathbf{B}} = \operatorname{rotA} = \boldsymbol{\mu}_0 \dot{\mathbf{H}} \,. \tag{2}$$

Для последовательности изложения приведем известный переход от уравнений Максвелла к уравнению Гельмгольца для вектор-потенциала поля.



Рис. Рабочий зазор ВТП с проводящим немагнитным листом

Уравнения Максвелла в Международной системе единиц СИ запишем в виде

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \gamma \vec{E}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \end{cases}$$
(3)

В рассматриваемом случае внешним источником является вектор индукции  $\vec{B}_0$ , который представляется синусоидальным и заданным по условию (1).

Поскольку мы рассматриваем изотропную среду, параметры которой при синусоидальных воздействиях не зависят от напряженности полей, то уравнения (3) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \dot{H} = (\gamma + j\omega\varepsilon_{0}\varepsilon)\dot{E}, \\ \operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \end{cases}$$

$$(4)$$

Подставляя (2) в (3), получим

$$\operatorname{rot}\left(\dot{\mathrm{E}}+\mathrm{j}\omega\dot{\mathrm{A}}\right)=0.$$

Поскольку ротор градиента любого скаляра тождественно равен нулю, величину в скобках можно приравнять градиенту некоторого скаляра  $\psi$ , играющего роль скалярного потенциала электрического поля. Тогда

$$\dot{\mathbf{E}} = -\left(\operatorname{grad} \boldsymbol{\psi} + \mathbf{j}\boldsymbol{\omega}\dot{\mathbf{A}}\right). \tag{5}$$

Заменяя Ни Ė в первом уравнении (4) с учетом (2) и (5), после элементарных преобразований получим

$$\nabla^{2}\dot{A} + k^{2}\dot{A} = \operatorname{grad}\left[\left(\mu_{0}\gamma + j\omega\varepsilon\varepsilon_{0}\mu_{0}\right)\psi + \operatorname{div}\dot{A}\right], \qquad (6)$$

где  $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon - j \omega \mu_0 \gamma.$ 

Поскольку вектор - потенциал Å задан с точностью до градиента некоторого скаляра, а потенциал - с точностью до постоянной величины, имеется возможность получить [2]

$$\left(\mu_{0}\gamma + j\omega\varepsilon_{0}\varepsilon\mu_{0}\right)\psi + \operatorname{div}\dot{A} = 0.$$

Учитывая последнее равенство и выражение (6), получим искомое уравнение Гельмгольца для вектор-потенциала электромагнитного поля

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} + k^2 \dot{\mathbf{A}} = 0.$$
 (7)

Поле в воздушном промежутке преобразователя можно считать квазистационарным в том смысле, что волновыми процессами можно пренебречь. Это упрощение вполне оправдано, так как размеры ВТП и исследуемых листов обычно много меньше длины волны в воздухе, а потери на излучение по сравнению с потерями в ВТП в исследуемом листе малы. В проводящем листе будем рассматривать только те волновые процессы, которые обусловлены наличием проводимости, т.е. так же, как и в воздухе, токами смещения (пропорциональными  $\omega \varepsilon_0 \varepsilon$ ) пренебрегаем. Для металлов такое упрощение не вызывает сомнений. Таким образом, пренебрегая величиной  $\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0$ , по сравнению с  $\omega \mu_0 \gamma$ , в выражении для  $k^2$  получим

$$k^2 = -j\omega\mu_0\gamma . \tag{8}$$

Естественно, что для воздуха k = 0.

Обратный переход от вектор-потенциала к напряженностям электрических и магнитных полей проводится по известным формулам (3(.

Осуществим расчет электромагнитного поля в немагнитном проводящем листе, расположенном в рабочем зазоре ВТП (см. рис.).

Как было отмечено, магнитное поле в зоне контроля однородно и изменяется по синусоидальному закону:  $B_0(t) = B_m \sin \omega t$ . Электромагнитное поле в системе, показанной на рисунке, описывается уравнением (7). Пусть проводящий немагнитный лист расположен горизонтально, тогда нормаль плоскости листа направлена по оси z цилиндрической системы координат  $\rho$ ,  $\phi$ , z и совпадает с осью магнитной системы. Началом координат примем  $\rho = R$  и z = d для верхней среды и z = -d-h для нижней среды.

В силу осевой симметрии задачи вектор–потенциал имеет только  $\varphi$ –ю компоненту и от угла  $\varphi$  не зависит, т.е.  $\dot{A} = \dot{A}_{_{\odot}}$ .

В цилиндрических координатах уравнение (7) с учетом этого обстоятельства примет следующий вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \dot{A}}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial z^2} - \left( \frac{1}{\rho} - k^2 \right) \dot{A} = 0.$$
(9)

Это уравнение второго порядка в частных производных. В соответствии с методикой, изложенной в [3], его можно решить, применяя интегральное преобразование Фурье–Бесселя с ядром в виде функции Бесселя первого порядка. Формула преобразования имеет вид

$$\dot{A}^{*} = \int_{0}^{\infty} \rho J_{1}(\lambda \rho) \dot{A}(\rho, z) d\rho , \qquad (10)$$

где  $\lambda$  – параметр преобразования.

Å\*.

Применяя это преобразование к обеим частям уравнения (9), получим

$$\frac{d^2 A^*}{dz^2} - q^2 \dot{A}^* = 0, \qquad (11)$$

где  $\dot{A}^*$  является функцией только от координаты  $z\,;\,\,q^2=\lambda^2+k^2\,.$ 

Уравнение (11) является обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка. Общее решение этого уравнения известно и может быть представлено в следующем виде:

$$\dot{A}^* = \frac{\mu_0}{2q} (e^{qz} C_p + e^{-qz} C_n), \qquad (12)$$

где  $C_p$  и  $C_n$  - величины, не зависящие от z и определяемые из граничных условий.

Граничные условия для вектор-потенциала известны [4] и выражаются в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{z}) \mid_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_{\mathrm{m}}} &= \mathbf{A}_{\mathrm{m}+1}(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{z}) \mid_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_{\mathrm{m}}}; \\ \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial \mathbf{A}_{\mathrm{m}}}{\partial \mathbf{z}} \mid_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_{\mathrm{m}}} &= \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial \mathbf{A}_{\mathrm{m}+1}}{\partial \mathbf{z}} \mid_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_{\mathrm{m}}}. \end{aligned}$$
(13)

Эти условия остаются справедливыми и для преобразованных величин

Используя общее решение (12), запишем выражения для вектор-потенциала в каждой области рабочего зазора (см. рис.).

1. Для верхнего полупространства z > 0 (область I) преобразованный векторный потенциал представляется как  $\dot{A}_1^* = \dot{A}_0^* + \dot{A}_{BUX1}^*$ . Здесь  $\dot{A}_0^*$ ,  $\dot{A}_{BUX1}^* -$  преобразованный векторный потенциал первичного магнитного поля, обусловленного токами возбуждения; преобразованный векторный потенциал от вихревых токов в полосе. Определим их в отдельности.

Так как векторный потенциал имеет только  $\phi$ -ю компоненту, то в рассматриваемом случае симметрии для индукции в рабочем воздушном зазоре ВТП запишем

$$\dot{\mathbf{B}}_0 = \operatorname{rot}_{\varphi} \dot{\mathbf{A}} = \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_p}{\partial z} - \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_z}{\partial \rho}.$$

Одновременно можно положить  $\dot{A}_p=0$  и найти  $\dot{A}_z$  из последнего уравнения

$$\dot{B}_0 = -\frac{\partial \dot{A}_z}{\partial \rho} \ .$$

Следовательно,

$$\dot{A}_{z} = -\int_{0}^{R} \dot{B}_{0} d\rho = -\dot{B}_{0} R$$
,

где  $B_0$  – комплекс действующего значения магнитной индукции в зоне контроля.

Таким образом, на основании (10) преобразованный векторный потенциал первичного магнитного поля будет [5]

$$\dot{A}_0^* = \int_0^\infty \rho J_1(\lambda \rho) \dot{A}_z d\rho = -\dot{B}_0 R \int_0^\infty \rho J_1(\lambda \rho) d\rho = -\frac{\dot{B}_0 R^2}{\lambda} J_1(\lambda \rho).$$

Теперь определим  $\dot{A}^*_{\rm BUX1}$ , воспользуясь общим решением (12). Учитывая, что  $\mu_0, \gamma=0$ , т.е. q= $\lambda$  и z > 0, получим

$$\dot{\mathbf{A}}_{\mathrm{BHX1}}^* = \frac{\mu_0}{2\lambda} \mathrm{e}^{-\lambda z} \mathrm{C}_1^1 \; .$$

В результате для преобразованного векторного потенциала области I будем иметь

$$\dot{A}_1^* = -\frac{\dot{B}_0 R^2}{\lambda} J_1(\lambda R) + \frac{\mu_0}{2\lambda} e^{-\lambda z} C_1^1 .$$
<sup>(14)</sup>

2. Для проводящего слоя (область II), учитывая, что магнитная индукция внешнего поля в области 0 < z < –h равна нулю, получим

$$\dot{A}_{2}^{*} = -\frac{\mu_{0}}{2q_{2}} \left( C_{1}^{2} e^{q_{2}z} + C_{2}^{2} e^{-q_{2}z} \right).$$
(15)

3. Для нижнего полупространства (область III), учитывая, что  $\mu_3 = \mu_0$ ,  $\gamma = 0$ , т.е.  $q = \lambda$ , получим

$$\dot{A}_{3}^{*} = \dot{A}_{0}^{*} + \dot{A}_{\text{BMXIII}}^{*} = -\frac{\dot{B}_{0}R^{2}}{\lambda}J_{1}(\lambda R) + \frac{\mu_{0}}{2\lambda}e^{\lambda z}C_{2}^{3}.$$
 (16)

В выражении (16) учтено, что

$$\dot{A}^*_{\text{BUXIII}} = \frac{\mu_0}{2\lambda} e^{\lambda z} C_2^3.$$

 ${\rm \dot{A}}^*_{\rm BUXIII}$  получено из общего решения (12) с учетом того, что если  $z\to -\infty$ , то поле должно быть ограниченным.

Для отыскания постоянных интегрирования, используя граничные условия (13), получим следующие уравнения:

$$\dot{A}_{1}^{*} = \dot{A}_{2}^{*}; \quad \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial A_{1}^{*}}{\partial z} = \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial A_{2}^{*}}{\partial z} \quad \text{при} \quad z = 0.$$

$$\dot{A}_{2}^{*} = \dot{A}_{3}^{*}; \quad \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial \dot{A}_{2}^{*}}{\partial z} = \frac{1}{\mu_{0}} \frac{\partial \dot{A}_{3}^{*}}{\partial z} \quad \text{при} \quad z = -h.$$
(17)

Подставляя выражения (14) - (16) в (17), получим

٢

$$\begin{cases} -\frac{\dot{B}_{0}R^{2}}{\lambda}J_{1}(\lambda R) + \frac{\mu_{0}}{2\lambda}C_{1}^{1} = \frac{\mu_{0}}{2q_{2}}(C_{1}^{1} + C_{2}^{2}), \\ -C_{1}^{1} = C_{1}^{2} - C_{2}^{2}, \\ \frac{b}{2q_{2}}(C_{1}^{2}e^{-q_{2}h} + C_{2}^{2}e^{q_{2}h}) = -\frac{\dot{B}_{0}R^{2}}{\lambda}J_{1}(\lambda R) + \frac{\mu_{0}}{2\lambda}e^{-\lambda z}C_{2}^{3}, \\ C_{1}^{2}e^{-q_{2}h} - C_{2}^{2}e^{q_{2}h} = e^{-\lambda h}C_{2}^{3}. \end{cases}$$
(18)

Решая полученную систему уравнений (18), получим коэффициенты интегрирования в виде

$$\begin{cases} C_{1}^{2} = \frac{2\dot{B}_{0}R^{2}}{\mu_{0}}q_{2}\frac{(q_{2}-\lambda)-(q_{2}+\lambda)e^{q_{2}h}}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}}J_{1}(\lambda R), \\ C_{2}^{2} = -\frac{2\dot{B}_{0}R^{2}}{\mu_{0}}q_{2}\frac{(q_{2}+\lambda)-(q_{2}-\lambda)e^{-q_{2}h}}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}}J_{1}(\lambda R), \end{cases}$$
(19)  
$$C_{1}^{1} = \frac{2\dot{B}_{0}R^{2}}{\mu_{0}}q_{2}\frac{(q_{2}-\lambda)(e^{-q_{2}h}-1)+(q_{2}+\lambda)(e^{q_{2}h}-1)}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}}J_{1}(\lambda R), \end{cases}$$
(29)  
$$C_{2}^{3} = \frac{2\dot{B}_{0}R^{2}}{\mu_{0}}q_{2}\frac{(q_{2}-\lambda)(e^{-q_{2}h}-1)+(q_{2}+\lambda)(e^{q_{2}h}-1)}{[(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}}]e^{-\lambda h}}J_{1}(\lambda R).$$

С учетом значения  $C_1^1$  перепишем выражение (14) для преобразованного вектор-потенциала в верхнем полупространстве:

$$\dot{A}_{1}^{*} = \left[q_{2} \frac{(q_{2} - \lambda)(e^{-q_{2}h} - 1) + (q_{2} + \lambda)(e^{q_{2}h} - 1)}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} e^{-\lambda z} - 1\right] \frac{\dot{B}_{0} R^{2}}{\lambda} J_{1}(\lambda R) \cdot (20)$$

Выражение (15) для преобразованного вектор–потенциала в проводящем листе с учетом коэффициентов  $C_1^2$  и  $C_2^2$  примет вид

$$A_{2}^{*} = \dot{B}_{0} R^{2} \frac{\left[(q_{2} - \lambda) - (q_{2} + \lambda)e^{q_{2}h}\right] \left[e^{q_{2}z} + e^{-q_{2}(z+h)}\right]}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} J_{1}(\lambda R).$$
(21)

Для нижнего полупространства на основе (16) для преобразованного векторпотенциала получим

$$\dot{A}_{3}^{*} = \left\{ \frac{e^{\lambda(z+h)} \left[ (q_{2} - \lambda)(e^{-q_{2}h} - 1) + (q_{2} + \lambda)(e^{q_{2}h} - 1) \right]}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} q_{2} - 1 \right\} \times \frac{\dot{B}_{0} R^{2}}{\lambda} J_{1}(\lambda R).$$
(22)

Истинное значение поля для каждой области найдем с помощью обратного преобразования Фурье–Бесселя:

$$\dot{A} = \int_{0}^{\infty} \dot{A}^{*} (\lambda \rho) J_{1} (\lambda \rho) \lambda d\lambda.$$
(23)

1. Для верхнего полупространства:

$$\dot{A}_{1} = \dot{B}_{0} R^{2} \int_{0}^{\infty} \left[ q_{2} \frac{(q_{2} - \lambda)(e^{-q_{2}h} - 1) + (q_{2} + \lambda)(e^{q_{2}h} - 1)}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} e^{-\lambda z} - 1 \right] \times$$

$$\times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho) d\lambda.$$
(24)

2. Для проводящего листа:

$$\dot{A}_{2} = B_{0}R^{2}\int_{0}^{\infty} \frac{\left[(q_{2} - \lambda) - (q_{2} + \lambda)e^{q_{2}h}\right]\left[e^{q_{2}z} + e^{-q_{2}(z+h)}\right]}{(q_{2} + \lambda)^{2}e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} \times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho)\lambda d\lambda.$$
(25)

3. Для нижнего полупространства:

$$A_{3} = B_{0}R^{2} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{e^{\lambda(z+h)} \left[ (q_{2} - \lambda)(e^{-q_{2}h} - 1) + (q_{2} + \lambda)(e^{q_{2}h} - 1) \right]}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} q_{2} - 1 \right\} \times$$

$$\times J_{1}(\lambda R) \quad J_{1}(\lambda \rho) d\lambda.$$
(26)

Напряженности электрического и магнитного полей можем найти, воспользуясь выражениями для вектор–потенциала, имеющего только  $\varphi$ –ю компоненту и не зависящего от угла [2].

1. Для верхнего полупространства:

$$\dot{E}_{1} = -j\omega \dot{B}_{0}R^{2}\int_{0}^{\infty} \left[ q_{2} \frac{(q_{2}-\lambda)(e^{-q_{2}h}-1) + (q_{2}+\lambda)(e^{q_{2}h}-1)}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h} - (q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} e^{-\lambda z} - 1 \right] \times$$
(27)  
$$\times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho) d\lambda;$$
$$\dot{H}_{1\rho} = \frac{\dot{B}_{0}R^{2}q_{2}}{\mu_{0}}\int_{0}^{\infty} \left[ \frac{(q_{2}-\lambda)(e^{-q_{2}h}-1) + (q_{2}+\lambda)(e^{q_{2}h}-1)}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h} - (q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} e^{-\lambda z} \lambda \right] \times$$
$$\times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho) d\lambda.$$
(28)

2. Для проводящего листа:

$$\dot{E}_{2} = -j\omega\dot{B}_{0}R^{2}\int_{0}^{\infty} \frac{\left[(q_{2}-\lambda)-(q_{2}+\lambda)e^{q_{2}h}\right]\left[e^{q_{2}z}+e^{-q_{2}(z+h)}\right]}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} (29) \\ \times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho)\lambda d\lambda; \\ \dot{H}_{2\rho} = \frac{\dot{B}_{0}R^{2}q_{2}}{\mu_{0}}\int_{0}^{\infty} \frac{\left[(q_{2}-\lambda)-(q_{2}+\lambda)e^{q_{2}h}\right]\left[e^{-q_{2}(z+h)}-e^{q_{2}z}\right]}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} (30) \\ \times J_{1}(\lambda R) J_{1}(\lambda \rho)\lambda d\lambda .$$

3. Для нижнего полупространства:

$$\dot{\mathbf{E}}_{3} = -j\omega\dot{\mathbf{B}}_{0}\mathbf{R}^{2}\int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{e^{\lambda(z+h)} \left[ (q_{2} - \lambda)(e^{-q_{2}h} - 1) + (q_{2} + \lambda)(e^{q_{2}h} - 1) \right]}{(q_{2} + \lambda)^{2} e^{q_{2}h} - (q_{2} - \lambda)^{2} e^{-q_{2}h}} q_{2} - 1 \right\} \times$$

$$\times \mathbf{J}_{1}(\lambda \mathbf{R}) \mathbf{J}_{1}(\lambda \rho) d\lambda.$$
(31)

$$\dot{H}_{3\rho} = -\frac{\dot{B}_{0}R^{2}q_{2}\lambda}{\mu_{0}}\int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{e^{\lambda(z+h)} \left[ (q_{2}-\lambda)(e^{-q_{2}h}-1) + (q_{2}+\lambda)(e^{q_{2}h}-1) \right]}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h} - (q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} \right\} \times (32)$$
$$\times J_{1}(\lambda R) \ J_{1}(\lambda \rho) d\lambda.$$

Плотность вихревых токов J в листе определяется из уравнения

$$\dot{J} = -j\omega\gamma \dot{A}_2$$
,

которое с учетом (25) принимает вид

$$\dot{\mathbf{J}} = -j\omega\gamma \ \dot{\mathbf{B}}_{0}\mathbf{R}^{2}\int_{0}^{\infty} \frac{\left[(q_{2}-\lambda)-(q_{2}+\lambda)e^{q_{2}h}\right]\left[e^{q_{2}z}+e^{-q_{2}(z+h)}\right]}{(q_{2}+\lambda)^{2}e^{q_{2}h}-(q_{2}-\lambda)^{2}e^{-q_{2}h}} \times J_{1}(\lambda\mathbf{R}) \ J_{1}(\lambda\rho)\lambda d\lambda.$$
(33)

По результатам вычислений на ЭВМ несобственных интегралов (27) - (31) проведен анализ распределения плотности вихревых токов в листе, составляющих вектора индукции магнитного поля, создаваемого щелевым ВТП в рассматриваемых областях, в зависимости от частоты изменения магнитного поля, толщины и электрофизических параметров контролируемого изделия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нерсисян В.Б. Расчет вихретокового преобразователя с учетом скорости движущейся токопроводящей неферромагнитной полосы // Электрические и магнитные поля в неоднородных средах и цепях: Межвуз. тематич. сб. науч. тр. по электротехнике.- Ереван, 1988. - С.83-88.
- 2. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны.-М.: Сов. радио, 1956. 662с.
- 3. Кошляков М.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики.- М.: Физматгиз, 1962. 767с.
- 4. **Гринберг Г.А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 728с.
- 5. **Смайт В.** Электростатика и электродинамика/ Пер. со второго американского издания А.В. Гапонова, М.А. Миллера. М.: Изд-во иностранной литературы, 1954. 604 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.12.2001.

#### Վ.Բ. ՆԵՐՍԻՍՑԱՆ

## ՄՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽԻՉԻ ՕԴԱՅԻՆ ԲԱՑԱԿՈՒՄ ՈՉ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԹԻԹԵՂԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿ

Կատարվել է օդային բացակում հաղորդիչ թիթեղի առկայության դեպքում էլեկտրամագնիսական դաշտի հաշվարկ, որոշվել են մագնիսական և էլեկտրական լարվածություններն ինչպես թիթեղում, այնպես էլ թիթեղի վերին և ներքին կիսատարածություններում։ Որոշվել են նաև թիթեղում մրրկային հոսանքների խտության բաշխման օրինաչափությունները։

#### V.B. NERSISSYAN

#### ELECTROMAGNETIC FIELD CALCULATION IN THE RUNNING CLEARANCE OF MAGNETIC EDDY- CURRENT TRANSFORMER IN THE PRESENCE OF CONDUCTING NON-MAGNETIC SHEET

Certain electromagnetic parameters in the air gap of on eddy-current transformer in the presence of a non-magnetic sheet are studied, Maxwell's equations in cylindric coordinates expressed by a magnetic vector potential are written. The equation obtained is solved by Fourier-Bessel tranform. The result was an expression for magnetic vector potential both in the conducting sheet and air gap. Electric and magnetic field voltages in these media are determined

## ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 519.95

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### М.А. ЕСАЯН, А.А. АРАКЕЛЯН, С.А. МИНАСЯН, Г.П. МЕЛИКЯН

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Предлагается динамическая модель задачи распределения энергетических ресурсов (РЭР) в регионе, имеющем разнообразные секторы производства: промышленность, сельское хозяйство, а также секторы, объединяющие транспорт и связь, бытовые услуги, торговлю, науку и образование.

*Ключевые слова:* энергия, ресурсы, спрос, потребление, баланс.

Задача распределения ресурсов, в частности энергетических, является одной из актуальных проблем, решаемых в области исследования операций [1-3]. Естественно, что эта задача логически может быть включена в область оптимального управления. Несмотря на большое количество работ в области оптимального распределения ресурсов, проблема управления энергетическими ресурсами и их распределения между секторами экономики требует более углубленного описания и, следовательно, создания эффективных методов решения. Полагаем, что задача распределения энергетических ресурсов основана на следующих двух аргументах:

первый состоит на знаниях и опыте специалистов, занятых производством электроэнергии и ее сбытом;

второй определяется сложностью и динамической природой факторов, определяющих проблему распределения энергетических ресурсов, основанную на обеспечении баланса между спросом и потреблением, и управления динамикой изменения точки равновесия.

Несмотря на различия между этими утверждениями, тем не менее покажем, что создание модели, адекватно описывающей процесс распределения энергетических ресурсов в многосекторном производстве, является возможным. Более того, модель, приведенная в данной работе, позволяет решить задачи принятия решений планирования и получения оптимальных траекторий достижения планируемого состояния спроса/предложения.

Таким образом, задача, решаемая в данной работе, может быть сформулирована как задача поддержки принятия решений распределения энергетических ресурсов между секторами производства и является развитием подходов [4,5].

**Динамическая модель РЭР.** Динамическая модель РЭР рассматривает следующие секторы производства: промышленность, сельское хозяйство, а также секторы, объединяющие торговлю, транспорт и связь, бытовые услуги и др. Обозначим их в дальнейшем соответственно через i,a,o. В качестве видов энергетических ресурсов рассмотрим электроэнергию, получаемую от тепловых электростанций, гидроэлектростанций и атомных станций.

Виды электрической энергии обозначим через 1,2,3 соответственно.

В качестве факторов, определяющих условие равновесия, рассмотрим уравнение равновесия между спросом и его предложением.

#### Индексы, переменные и параметры.

Рассмотрим плановый период, обозначив его через [to,T].

Обозначим переменные через:

Q<sup>D</sup>(t) - спрос на электроэнергию в момент времени t€ [t₀,T];

Q<sup>D</sup><sub>i</sub>(t)- спрос промышленности на электроэнергию в момент времени t€ [to,T];

Q<sup>D</sup><sub>a</sub>(t)- спрос сельского хозяйства на электроэнергию в момент времени t€ [to,T];

 $Q^{\mathrm{D}}_{\mathrm{o}}(t)$ - спрос остальных секторов производства на электроэнергию в момент времени t€[t₀,T];

Q<sup>D</sup>f(t)- экспортируемые объемы электроэнергии в момент времени t€ [to,T];

G(t)- валовый внутренний продукт в момент времени t€[t₀,T];

Gi(t)- продукция промышленности в момент времени t€[to,T];

G<sub>а</sub>(t)- продукция сельского хозяйства в момент времени t€[t<sub>0</sub>,T];

G₀(t)- продукция остальных секторов производства в момент времени t€ [t₀,T] ;

Q<sup>S</sup>(t)- предложение электроэнергии в момент времени t€[t<sub>0</sub>,T];

Q<sup>S</sup>1(t)- предложение электроэнергии ТЭЦ в момент времени t€[to,T];

Q<sup>S</sup><sub>2</sub>(t)- предложение электроэнергии ГЭС в момент времени t€[t₀,T];

Q<sup>s</sup><sub>3</sub>(t)- предложение электроэнергии атомными станциями в момент времени

t€[t₀,T].

Обозначим управления через:

внутреннего продукта(ВВП);

одну единицу их продукции;

единицу промышленной продукции;

единицу экспортируемой продукции;

одну единицу сельскохозяйственной продукции;

φі=Q<sup>D</sup>i/Q<sup>D</sup> - доля спроса электроэнергии промышленностью;

φа=Q<sup>D</sup>a/Q<sup>D</sup> - доля спроса электроэнергии сельским хозяйством;

φ₀=Q<sup>D</sup>₀/Q<sup>D</sup> - доля спроса электроэнергии остальными секторами;

 $\phi_f = Q^{D}_f / Q^{D}$  - доля экспортируемой электроэнергии;

η:=Gi/G - доля промышленной продукции;

η<sub>а</sub>=G<sub>а</sub>/G - доля продукции сельского хозяйства;

ψ=Q<sup>D</sup>/G - спрос электроэнергии, приходящейся на одну единицу валового

ψі=Q<sup>D</sup>і/Gі - спрос электроэнергии промышленностью, приходящейся на одну

ψ<sub>a</sub>=Q<sup>D</sup><sub>a</sub>/G<sub>a</sub> - спрос электроэнергии сельским хозяйством, приходящейся на

ψ<sub>0</sub>=Q<sup>D</sup><sub>0</sub>/G<sub>0</sub> - спрос электроэнергии остальными секторами, приходящейся на

ψ<sub>f</sub>=Q<sup>D</sup><sub>f</sub>/G<sub>f</sub> - спрос на экспортируемую электроэнергию, приходящуюся на одну

λ=Q<sup>D</sup>/Q<sup>S</sup> - доля спроса электроэнергии относительно ее предложения;

316

η<sub>0</sub>=G<sub>0</sub>/G - доля продукции остальных секторов;

η<sub>f</sub>=G<sub>f</sub>/G - доля продукта, получаемого от экспортируемой электроэнергии;

µ=Q<sup>s</sup>/G - доля предложения электроэнергии относительно ВВП;

G1(t) - продукция ТЭЦ в момент времени t€[t0,T];

G<sub>2</sub>(t) - продукция ГЭС в момент времени t€[t₀,T];

G<sub>3</sub>(t) - продукция атомных станций в момент времени t€[t₀,T];

δ1=Q<sup>S</sup>1/Q<sup>S</sup> - доля электроэнергии, предлагаемой ТЭЦ;

 $\delta_2 = Q^{S_2}/Q_{S}$  - доля электроэнергии, предлагаемой ГЭС;

δ<sub>3</sub>=Q<sup>S</sup><sub>3</sub>/Q - доля электроэнергии, предлагаемой атомными станциями;

 $v_1 = G_1/G$  - доля продукции ТЭЦ в ВВП;

 $v_2 = G_2/G$  - доля продукции ГЭС в ВВП;

v3 =G3/G - доля продукции атомных станций в ВВП;

 $\mu {\scriptscriptstyle 1}{=}Q^{s_{1}}\!/G_{1}$  - доля предложения электроэнергии ТЭЦ относительно их продукции;

 $\mu_2 \! = \! Q^S_2/G_2$  - доля предложения электроэнергии ГЭС относительно их продукции;

 $\mu_{3}\!=\!Q^{S_{3}}\!/G_{3}$  - доля предложения электроэнергии атомными станциями относительно их продукции.

 $E(t){=}Q^{S}(t)$  -  $Q^{D}(t)$  - величина потерь электроэнергии в момент времени t€[to,T].

Основная модель. Пусть  $\Delta(X) = \frac{\Delta x}{x}$  есть процент изменения переменной X.

Рассмотрим обобщение модели для последовательности функций  $\{X_{\ell}\}\ell=0,1,\ldots,n:$ 

$$\Delta(X_0) = \sum_{l=0}^{n-1} \Delta\left(\frac{X_1}{X_{l+1}}\right) + \Delta(X_n).$$
 (1)

Отсюда получаем, что

$$\Delta(\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}) = \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}}{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{i}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{i}}}{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{a}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{a}}}{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{o}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{o}}}{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{f}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{o}}}{\mathbf{Q}^{\mathrm{D}}_{\mathrm{f}}}\right) + \Delta(\mathbf{G}), \quad (2)$$

$$\Delta(\mathbf{Q}^{\mathrm{S}}) = +\Delta\left(\frac{\mathbf{Q}^{\mathrm{S}}}{\mathbf{Q}_{1}^{\mathrm{S}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}_{1}^{\mathrm{S}}}{\mathbf{Q}_{2}^{\mathrm{S}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}_{2}^{\mathrm{S}}}{\mathbf{Q}_{3}^{\mathrm{S}}}\right) + \Delta\left(\frac{\mathbf{Q}_{3}^{\mathrm{S}}}{\mathbf{G}}\right) + \Delta(\mathbf{G}).$$
(3)

Из (2) и (3) с учетом обозначений переменных управлений получаем: (а) систему уравнений движения:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{\mathbf{D}}(1-\frac{\Psi}{\mu_{\lambda}}) &= \left(\frac{1}{\varphi_{i}} - \frac{\Psi}{\psi_{i}\eta_{i}}\right) \mathbf{Q}_{i}^{\mathbf{D}} + \left(\frac{1}{\varphi_{a}} - \frac{\Psi}{\psi_{a}\eta_{a}}\right) \mathbf{Q}_{a}^{\mathbf{D}} + \\ &+ \left(\frac{1}{\varphi_{o}} - \frac{\Psi}{\psi_{o}\eta_{o}}\right) \mathbf{Q}_{o}^{\mathbf{D}} + \left(\frac{1}{\varphi_{f}} - \frac{\Psi}{\psi_{f}\eta_{f}}\right) \mathbf{Q}_{f}^{\mathbf{D}} + (\lambda\mu - \Psi) \mathbf{G}, \end{aligned}$$
(4)

$$\dot{\mathbf{Q}^{s}}(1-\frac{\lambda\mu}{\psi}) = \left(\frac{1}{\delta_{1}}-\frac{\mu}{\nu_{1}\mu_{1}}\right)\dot{\mathbf{Q}_{1}^{s}} + \left(\frac{1}{\delta_{2}}-\frac{\mu}{\nu_{2}\mu_{2}}\right)\dot{\mathbf{Q}_{2}^{s}} + \left(\frac{1}{\delta_{3}}-\frac{\mu}{\nu_{3}\mu_{3}}\right)\mathbf{Q}_{3}^{s} + \left(\frac{\psi}{\lambda}-\mu\right)\dot{\mathbf{G}};$$
(5)

(б) систему ограничений:

$$\begin{split} \phi_{i} + \phi_{a} + \phi_{o} + \phi_{f} &\leq 1, \\ \lambda &\in (0,1), \mu \in (0,1), \\ \eta_{i} + \eta_{a} + \eta_{o} + \eta_{f} &\leq 1, \\ Q_{i} + Q_{a} + Q_{o} + Q_{f} &\leq Q, \\ \psi, \psi_{i}, \psi_{a}, \psi_{o}, \psi_{f} \in (0,1), \\ \min \{\phi_{i}, \phi_{a}, \phi_{o}, \phi_{f}, \eta_{i}, \eta_{a}, \eta_{o}, \eta_{f}\} \geq 0, \\ \delta_{1} + \delta_{2} + \delta_{3} &= 1, \\ \nu_{1} + \nu_{2} + \nu_{3} &= 1, \\ \mu + \mu_{1} + \mu_{2} + \mu_{3} &= 1, \\ Q^{s} + Q^{p} \geq 0; \end{split}$$
(6)

(в) целевую функцию:

$$\min(\mathbf{Q}^{\mathrm{S}} - \mathbf{Q}^{\mathrm{D}}), \tag{7}$$

где min берется по всем управлениям при условии выполнения системы ограничений (6); (г) начальные условия:

(г) начальные условия:  

$$Q^{D}(t_{o}) = Q_{o}^{D}Q_{r}^{D}(t_{o}) = Q_{ro}^{D}, r \in \{i, a, o, f\},$$

$$Q^{s}(t_{o}) = Q_{o}^{s}, Q_{r}^{s}(t_{o}) = Q_{ro}^{s}, r \in \{1, 2, 3\},$$

$$\phi_{r}(t_{o}) = \phi_{ro}, r \in \{i, a, o, f\},$$

$$\lambda(t_{o}) = \lambda_{o}, \mu(t_{o}) = \mu_{o},$$

$$\psi(t_{o}) = \psi_{b},$$

$$\psi_{r}(t_{o}) = \psi_{ro}, r \in \{i, a, o, f\},$$

$$\delta_{r}(t_{o}) = \delta_{ro}, r \in \{1, 2, 3\},$$

$$\mu_{r}(t_{o}) = \mu_{ro}, r \in \{1, 2, 3\}.$$
Приведем систему (4), (5) к виду
$$(t_{o}) = \lambda_{ro}, r \in \{1, 2, 3\},$$

$$(t_{o}) = \lambda_{ro}, r \in \{1, 2, 3\}.$$

$$Q^{D}(t_{1+1}) = Q^{D}(t_{1}) + (\eta_{i}^{D} Q_{i}^{D} + \eta_{a}^{D} Q_{a}^{D} + \eta_{o}^{D} Q_{o}^{D} + \eta_{f}^{D} Q_{f}^{D} + \eta_{G}^{D} \dot{G}) \Delta t_{1}, \quad (9)$$

$$Q^{S}(t_{1+1}) = Q^{S}(t_{1}) + (\eta_{1}^{S} Q_{1}^{S} + \eta_{2}^{S} Q_{2}^{S} + \eta_{3}^{S} Q_{3}^{S} + \eta_{4}^{S} \dot{G}) \Delta t_{1}, \quad (10)$$

$$\ell = 0, 1, \dots, n,$$

где

$$\begin{split} \eta_{i}^{D} &= \left(\frac{1}{\varphi_{i}} - \frac{\psi}{\psi_{i}}\eta_{i}\right) / \left(1 - \frac{\psi}{\lambda\mu}\right), \\ \eta_{a}^{D} &= \left(\frac{1}{\varphi_{a}} - \frac{\psi}{\psi_{a}}\eta_{a}\right) / \left(1 - \frac{\psi}{\lambda\mu}\right), \\ \eta_{o}^{D} &= \left(\frac{1}{\varphi_{o}} - \frac{\psi}{\psi_{o}}\eta_{o}\right) / \left(1 - \frac{\psi}{\lambda\mu}\right), \\ \eta_{G}^{D} &= \lambda\mu, \\ \eta_{G}^{S} &= \left(\frac{1}{\delta_{1}} - \frac{\mu}{\nu_{1}\mu}\right) / \left(1 - \frac{\lambda\mu}{\psi}\right), \\ \eta_{3}^{S} &= \left(\frac{1}{\delta_{3}} - \frac{\mu}{\nu_{3}\mu}\right) / \left(1 - \frac{\lambda\mu}{\psi}\right), \\ \eta_{3}^{S} &= \left(\frac{1}{\delta_{3}} - \frac{\mu}{\nu_{3}\mu}\right) / \left(1 - \frac{\lambda\mu}{\psi}\right), \\ \eta_{4}^{S} &= \frac{\lambda}{\psi}. \end{split}$$

$$(11)$$

**Модель данных и результаты.** Нетрудно убедиться, что полное множество входных переменных задачи (7)-(11) является объемистым, так как включает множество переменных управлений, характеризующих спрос и предложение электроэнергии.

Решение задачи (7)-(11) проведем при помощи метода случайного поиска с "пересчетом" [6]. Разобъем плановый период [to,T] на части [tı,tı+1], l=0,1,...,p-1, где  $t_p=T$ .

Определим вектор - функцию {J<sub>i</sub>(t)} i=1,2,...,24 следующим образом:

$$\begin{split} J_1(t) &= \phi_i(t), \quad J_2(t) = \phi_a(t), \quad J_3(t) = \phi_o(t), \quad J_4(t) = \phi_f(t), \\ J_5(t) &= \lambda(t), \quad J_6(t) = \mu(t), \\ J_7(t) &= \eta_i(t), \quad J_8(t) = \eta_a(t), \quad J_9(t) = \eta_o(t), \quad J_{10}(t) = \eta_f(t), \\ J_{11}(t) &= \psi(t), \quad J_{12}(t) = \psi_i(t), \quad J_{13}(t) = \psi_a(t), \\ J_{14}(t) &= \psi_o(t), J_{15}(t) = \psi_f(t), \\ J_{16}(t) &= \delta_1(t), \quad J_{17}(t) = \delta_2(t), \quad J_{18}(t) = \delta_3(t), \\ J_{19}(t) &= \nu_1(t), \quad J_{20}(t) = \nu_2(t), \quad J_{21}(t) = \nu_3(t), \\ J_{22}(t) &= \mu_1(t), \quad J_{23}(t) = \mu_2(t), \quad J_{24}(t) = \mu_3(t). \end{split}$$

Общий шаг алгоритма состоит в следующем. Для значения  $t_{\ell}$  определяем  $J_{j}(t_{\ell+1}) = J_{j}(t_{\ell}) + a_{N} \qquad X(a_{N}, X_{N}, \xi_{N})\xi_{N},$ 

$$X(a, x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad R(x + ay) < R(x), \\ 0, & \text{если} \quad R(x + ay) \ge R(x), \end{cases}$$

где  $R(x) = Q^{S}(x) + Q^{D}(x)$ ,  $a_{N}, \xi_{N}$  - соответственно величина шага и случайный вектор, равномерно распределенный на n - мерной сфере.

Согласно [6], количество шагов N удовлетворяет следующему условию:

$$N = \log \frac{\frac{E}{R_{o}(t_{\ell})}}{\log\left(1 - \frac{c_{1}}{n}\right)},$$

где E = Q<sup>S</sup> - Q<sup>D</sup>, с<sub>1</sub> - коэффициент пропорциональности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chen Y.W. and Tzeng G.H. Fuzzy Multi-objective Approach to the supply Chain Model, Multiple Objective and Goal Programming, Recent Developments, Physica-Verlag, NewYork, 2002. - P. 221-234.
- Bierman H.Jr., Bonini Ch.P., Hausman W.H. Quantitative Analysis for Business Decisions, Boston, Richard D. IRWIN, INC. 1991. - P. 742.
- Chu S.C.K. Goal Programming Model for Airport Ground Support Equipment Parking, Multiple Objective and Goal Programming, Recent Developments, Physica-Verlag, New York, 2002. –P. 235-246.
- Arakelyan A.H., Grigoryan T.G., Sargsyan A.S. Analysis of catching of information flows to provide the increase of the efficiency of the management of dynamic operations, Internetbased Enterprise Integration and Management, 31 October - 1 November, 2001 Proceedings, Newton, Massachusetts, USA. – P. 152-158.
- Arakelyan A.H., Simonyan H.S. Dynamic multiple objective decision support system to provide the monitoring and management, the carbone dioxide emission, The Fourth International conference on Multiple objective programming and Goal programming, Proceedings, Poland, 2000. – P. 7-10.

- 6. **Растригин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С.** Адаптация случайного поиска. Рига: Зинатне, 1978. 243 с.
  - ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.01.2003.

## Մ.Ա. ԵՄԱՅԱՆ, Ա.Հ. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ, Ս.Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Գ.Պ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ

## ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈԴԵԼ

Առաջարկվում է էներգետիկ ռեսուրսների բաշխման խնդրի դինամիկ մոդել և լուծում։ Որպես մոդելի գործոններ դիտարկվում են էլեկտրաէներգիայի պահանջարկը, առաջարկը և համախառն ներքին արդյունքը, իսկ որպես կառավարման փոփոխականներ՝ այդ գործոններով սահմանված մեծություններ։ Յույց է տրվում, որ ընդհանուր առաջարկի և պահանջարկի՝ ժամանակից կախված ածանցյալներով կարելի է նկարագրել էլեկտրաէներգիայի առաջարկի և պահանջարկի հավասարակշռության կետր։

Մշակված դինամիկ լավարկման խնդրի մոդելը և վերջինիս լուծման ալգորիթմը հնարավորություն են տալիս ստանալ սահմանափակումների համակարգին բավարարող լավարկված հետագծեր։

# M.A. YESAYAN, A.H. ARAKELYAN, S.A. MINASSYAN, G.P. MELIKYAN

## DYNAMIC MODEL OF POWER RESOURCES DISTRIBUTION

A dynamic model is proposed for the problem of energy and power resources distribution in the region having diverse sectors of production: industry, agriculture as well as sectors involving transport and communication, public services, trade, science and education.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 62-52 + 513.1

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## К.А. СОГОМОНЯН, К.А. ТУМАНЯН, Н.Л. КАЗАРЯН

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНСТРУИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА R<sup>3</sup>, МОДЕЛИРУЕМЫХ ПАРАМИ ЛИНИЙ ПЛОСКОСТИ R<sup>2</sup>

Описана новая функция (команда), разработанная средствами функционального языка AutoLISP, работающая в среде графической системы AutoCAD и позволяющая конструировать разнообразные поверхности трехмерного пространства, задавая в диалоговом режиме пары линий плоскости  $\mathbf{R}^2$ , имея в основе принципиально новый метод конструирования поверхностей [1].

*Ключевые слова:* "треугольная" система координат, моделирование поверхностей трехмерного пространства.

Средства трехмерного компьютерного моделирования в настоящее время становятся объектом все большего внимания пользователей, и это не случайно. Их использование позволяет эффективно выполнять проектно-конструкторские работы, предоставляет пользователю – конструктору возможность применять естественный принцип проектирования изделия от пространственной модели к ее двумерному представлению, в том числе в виде чертежа.

Пространственные модели объектов широко применяются также в рекламе, в издательском деле, в дизайне и других сферах. Однако проектирование сложных криволинейных технических форм, их расчет и воспроизведение требуют разработки математических моделей, основанных на тех или иных способах геометрического конструирования поверхностей. В процессе автоматизированного проектирования этих форм существенное значение имеет автоматизация геометрического конструирования поверхностей на основе предварительно выбранных параметров и геометрических условий, что позволит в динамическом режиме (в диалоге) произвести поиск и выбор необходимых форм, перебор вариантов решения поставленных задач и т.д.

В настоящее время разработаны различные компьютерные графические языки и системы, которые по-разному представляют те или иные геометрические поверхности: в виде множества точек, множества линий и т.д. В векторных программах, аналогичных AutoCAD, непрерывная поверхность заменяется дискретным каркасом, плотность которого может регулироваться пользователем. Такой каркас представляет собой многоугольную сеть, определяемую двупараметрическим массивом вершин (или иначе, матрицей размером **MxN**).

Средствами AutoCAD строятся самые распространенные поверхности: призматические, конические, пирамидальные и т.д. Кроме того, имеется

возможность построения поверхностей вращения, сдвига, соединения, задаваемых образующими и направляющими.

Система AutoCAD поддерживает объектно-ориентированную технологию проектирования, тем самым обеспечивая пользователям возможность дальнейшего развития [2]. Для расширения AutoCAD, его адаптации, с целью различного применения: разработки параметрически заданных моделей, работы с графической базой AutoCAD, дополнения его новыми командами (возможностями), разработки пользовательского интерфейса, создания собственной среды проектирования, можно использовать язык программирования AutoLISP [3].

В данной работе представлена разработанная средствами языка программирования AutoLISP новая команда AutoCAD, которая позволяет конструировать разнообразные поверхности трехмерного пространства, задавая в диалоговом режиме пары линий плоскости  $\mathbb{R}^2$ , имея в основе принципиально новый метод конструирования поверхностей [1].

Предложенный метод с точки зрения графического осуществления алгоритма и автоматизации процесса его выполнения довольно прост. Суть метода в следующем.

В плоскости  $\mathbf{R}^2$  фиксируем три ориентированные прямые **x**, **y**, **z**, образующие треугольник (QGR (рис.1).



Каждую из этих прямых ориентируем с помощью стрелки. Тройку прямых (х, у, z) принимаем за "треугольную" систему координат плоскости R<sup>2</sup>. Посредством этой системы каждой точке А плосможно приписать кости R<sup>2</sup> три координаты ха, уа, za - расстояние точки А до соответствующих прямых (осей) х, у, z. При этом каждая из направленных осей х, у, z разделяет плоскость **R<sup>2</sup>** на две полуплоскости – правую и левую. Соответственно коорди-

натам точек, принадлежащих правым полуплоскостям, припишем положительный знак, а принадлежащих левым полуплоскостям – отрицательный. Можно показать [1], что между треугольными координатами точки  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^2(\mathbf{x}_A, \mathbf{y}_A, \mathbf{z}_A)$  существует одна линейная зависимость, а это значит, что точки плоскости интерпретируют (моделируют) множество точек трехмерного пространства, принадлежащих некоторой двумерной линейной форме – плоскости. Следовательно, данная система координат устанавливает взаимооднозначную зависимость (изоморфизм) между некоторой плоскостью  $\mathbf{\alpha} \in \mathbf{R}^3$  и плоскостью  $\mathbf{R}^2$ , для чего треугольным координатам точки  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^3$  ставятся в соответствие декартовы координаты точки  $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^3$  (рис.2). Причем отрезки OQ, OG, OR, отсекаемые плоскостью  $\mathbf{\alpha} \in \mathbf{R}^3$ , равны соответственно  $\mathbf{h}_x, \mathbf{h}_y, \mathbf{h}_z$  треугольника  $\Delta Q \mathbf{G} \mathbf{R}$ .



Задача.

Даны: 1. Две произвольно заданные линии **g**1, **g2**, принадлежащие двумерной плоскости **R**<sup>2</sup>.

2. Две вершины **G**, **R** треугольной координатной системы.

Необходимо: смоделировать трехмерную поверхность **Ф**, для которой **g1** и **g2** являются соответственно ее образующей и направляющей. Решение.

Известно, что паре точек плоскости  $\mathbf{R}^2$  можно поставить в соответствие точку  $\overline{\mathbf{A}}$  трехмерного пространства. Если зафиксировать точку на одной из заданных линий g1 и g2, например, точку A21 на g2, то эта точка в паре с точками A11, A12,..., A1n другой линии создаст множество точек

трехмерного пространства. Следующая точка **A**<sub>22</sub> линии **g**<sub>2</sub> с этими же точками линии **g**<sub>1</sub> создаст другое множество трехмерного пространства и т.д. (рис.3).



Рис. 3. Описание пар точек R<sup>2</sup>, моделирующих точки трехмерного пространства

$\mathbf{R}^2$	$\mathbf{R}^3$
$(A_{11}, A_{21})$	$\overline{A}_{111}$
$(A_{12}, A_{21})$	$\overline{\mathbf{A}}_{121}$
$(\mathbf{A}_{1n}, \mathbf{A}_{21})$	$\overline{A}_{1n1}$

Если теперь создадим треугольную координатную систему заданными двумя вершинами Q и R и третьей G, совмещенной с точкой A21, то на основании вышеизложенного смоделированные точки

 $\overline{A}$  111,  $\overline{A}$  121, ...,  $\overline{A}$  1n1 трехмерного пространства будут расположены в одной плоскости  $\alpha_1 \in \mathbb{R}^3$ . Если G совмес-тить со следующей точкой A22 линии g2, то смоделируем множество точек уже другой плоскости  $\alpha_2 \in \mathbb{R}^3$ . А если аналогичные расчеты повторить, совмещая вершину G координатного треугольника поочередно с другими точками линии g2, то получим дискретный каркас (многоугольную сеть) поверхности, элементами которого являются плоскостные линии g1 и g2 (рис. 4), что позволяет автоматизировать весь процесс конструирования поверхностей в среде AutoCAD средствами графического языка AutoLISP.


.....

Как уже было сказано, описанная задача и алгоритм ее решения реализованы в виде команды графической системы AutoCAD, являющейся одной комплексной функцией AutoLISP и действующей по следующей схеме.

```
(defun deka1 ()
 (setq n(getint"\n input number of first line's points n"))
 (setq spit1'())
 (if(< n 2)
  (progn
   (alert "number of segments must be >2")
   (princ))
   (progn
         (setq sp1 nil)
         (while (null sp1)
(setq sp1 (entsel)))
 (setq elast (entlast))
   (while (setq els (entnext elast))
         (setq elast els))
      (command "divide" sp1 n)
   (setq els elast)
           (while (setq els (entnext els))
             (setq list_els (entget els))
             (setq koor1 (cdr (assoc 10 list_els)))
             (setq koor1 (trans koor1 els 0))
             (setq spit1 (append spit1 (list koor1))))))
(setq m(getint"\n input number of second line's points n"))
 (setq spit2 '())
 (if(< m 2)
  (progn
   (alert "number of segments must be >2")
   (princ))
   (progn
         (setq sp2 nil)
         (while (null sp2)
(setq sp2(entsel)))
 (setq elast (entlast))
   (while (setq els (entnext elast))
         (setq elast els))
      (command "divide" sp2 m)
   (setq els elast)
           (while (setq els (entnext els))
             (setq list_els (entget els))
             (setq koor2(cdr (assoc 10 list els)))
             (setq koor2 (trans koor2 els 0))
            (setq spit2 (append spit2(list koor2))))))
(prompt "input two points of coordinate system Q and R")
          (setq Q(getpoint"\n input point Q")) (command "point" Q)
           (setq R(getpoint "\n input point R"))(command "point" R)
(setg xr(nth 0 R))
 (setq yr(nth 1 R))
 (setq xq(nth 0 Q))
 (setq yq(nth 1 Q))
 (setq i 1)
 (command "ucs" "w")
 (command "3dmesh" (- m 1) (- n 1))
(foreach kp spit2
 (setq c(car kp))
 (setq d(cadr kp))
          (foreach p spit1
```

```
ПРОГРАММА (DIPOV). Моделирование поверхностей
```

```
(setq x(car p))
  (setq y(cadr p))
 ;coord x
                      (setq bx(- xr xq) ax(- yq yr) cx(- (* xq yr) (* xr yq)))
                        (setq m1(* ax x) m2(* bx y) m3(sqrt(+ (expt ax 2) (expt bx 2))))
                        (setq m4(/ (+ m1 m2 cx) m3))
                                 (setq dx2(abs m4))
(setg w1(angle Q P))
(if (<= w1 3.14)(setg gx2 dx2)(setg gx2(- 0 dx2)))
         ;coord y
     (setq by(- c xr) ay(- yr d) cy(- (* xr d) (* c yr)))
(setq m5(* ay x) m6(* by y) m7(sqrt(+ (expt ay 2) (expt by 2))))
(setq m8(/ (+ m5 m6 cy) m7))
     (setq dy2(abs m8))
(setg w2(angle R P ))
(if(<= w2 3.14)(setq gy2 dy2)(setq gy2(- 0 dy2)))
       ;coord z
     (setq bz(- c xq) az(- yq d) cz(- (* xq d) (* c yq)))
(setq n1(* az x) n2(* bz y) n3(sqrt(+ (expt az 2) (expt bz 2))))
(setq n4(/ (+ n1 n2 cz) n3))
     (setq dz2(abs n4))
(setq w3(angle Kp P))
(if (<= w3 3.14)(setq gz2 dz2)(setq gz2(- 0 dz2)))
              (command (list gx2 gy2 gz2))
              (setq i (+ i 1)))))
```

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Согомонян К. А. Линейно-конструктивные методы формообразования (геометрическое моделирование). Ереван: Айастан, 1990. 214 с.
- 2. **Хейфец А. Л.** Инженерная компьютерная графика. AutoCAD. Опыт преподавания и широта взгляда. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 432 с.
- 3. Полещук Х. Х. Visual LISP и секреты адаптации AutoCAD. СПб.: БХВ-Петербург, 2001. 576 с.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.09.2002.

### Կ. Հ. ՍՈՂՈՄՈՆՅԱՆ, Կ. Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ, Ն. Լ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ R² ՀԱՐԹՈՒԹՅԱՆ ՉՈՒՅԳ ԳԾԵՐՈՎ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՎՈՂ R³ ԵՌԱՉԱՓ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՏԱՎՈՐՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՅՈՒՄ

Նկարագրված է նոր ֆունկցիա (հրաման DIPOV), որը մշակված է AutoCAD գրաֆիկական համակարգի AutoLISP ֆունկցիոնալ լեզվի միջոցներով։ Հրամանը հնարավորություն է տալիս երկխոսության ռեժիմում առաջադրելով **R**<sup>2</sup> հարթության զույգ գծեր, կոնստրուկտավորել եռաչափ տարածության տարբեր մակերևույթներ՝ կիրառելով վերջիններիս կոնստրուկտավորման սկզբունքորեն նոր մեթոդ [1]:

#### K. H. SOGHOMONYAN, K. A. TUMANYAN, N. L. GHAZARYAN DESIGN PROCESS AUTOMATION OF THREE-DIMENSIONAL SPACE R<sup>3</sup> SURFACES STIMULATED BY PAIRS OF LINES ON PLANE R<sup>2</sup>

A new function (command) developed by means of a functional language AutoLISP working in the AutoCAD graphic system environment and permitting to design various surfaces of three-dimensional space by giving the plane  $R^3$  pair of lines in the interactive mode based on a principally new surface design method is described.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, №2.

УДК 621.315

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

#### К.Дж. МИРЗАБЕКЯН

# ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Разработан метод определения влажности керамических материалов при выходе из шнек-пресса путем измерения диэлектрической проницаемости є и тангенс угла диэлектрических потерь tgδ, позволяющий автоматизировать технологический процесс.

*Ключевые слова:* керамический материал, влажность, диэлектрические потери, конденсатор, обкладки.

Качество и свойства большинства неоднородных материалов, в частности керамических, известняковых, огнеупорных, во многом определяются наличием в них влаги. Отсутствие или избыток ее ухудшает физико-химические и физикомеханические свойства, в то время как при оптимальном содержании влаги можно обеспечить высокие технологические и качественные показатели выпускаемой продукции.

Влажность керамических материалов измеряется различными методами [1], причем для конкретного материала в большинстве случаев она может быть определена одновременно несколькими методами.

В нынешних условиях, исходя из технологических требований, необходимо также учесть вопрос дистанционной передачи результата измерения влажности, особенно в централизованных системах контроля и управления.

В производственных условиях большинство керамических материалов характеризуется неравномерным распределением влаги в заготовке, что зачастую не отвечает требованиям технологического процесса или ГОСТа.

Анализ существующих методов измерения влажности керамических материалов показал, что наиболее приемлемым из них может стать электрофизический метод, где, в частности, рассматривается измерение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь tg $\delta$  от содержащейся влажности.

В этом случае изменение диэлектрических параметров контролируется по изменению электрической емкости, заполненной материалом.

Уравнение емкости обычно имеет вид линейной зависимости [2]

$$\mathbf{C}_{\Pi\Pi} = \frac{1}{\kappa} \boldsymbol{\epsilon}_{0} \boldsymbol{\epsilon}_{M}, \qquad (1)$$

где С<sub>пп</sub> – емкость первичного преобразователя (ПП),  $\Phi$ ; к – постоянная электродной системы (геометрия электродов), *мм*<sup>2</sup>;  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_{M}$  – диэлектрическая проницаемость воздуха и исследуемого материала соответственно.

Важным преимуществом диэлектрического метода измерения влажности является его практическая безынерционность, что в сочетании с бесконтактными ПП делает их особенно привлекательными для применения в автоматических системах непрерывного контроля, в частности, процесса увлажнения сыпучих керамических материалов.

В настоящее время в производстве керамических изделий для определения влажности керамической смеси применяется еще кустарный метод, т.е. взвешивание до и после увлажнения материала, который не только сильно влияет на скорость производственного процесса, но и зачастую резко ухудшает качество выпускаемых изделий. Поэтому нами изучался метод непрерывного измерения электрофизических параметров увлажненного материала, в частности, его є и tgδ.

В качестве ПП использовалась цилиндрическая емкостная ячейка, состоящая из двух половинок электродов. Такая ячейка обеспечивает равномерность электрического поля в межэлектродном пространстве.

С целью исключения влияния "краевого эффекта" на результат измерения центральный электрод должен быть короче наружного. Емкость [3] такого ПП определяется выражением

$$C_{nn} = \frac{10^{-9}}{36} \epsilon_{M} \frac{2h}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$
 (2)

где h – высота внутреннего электрода; r1 и r2 – радиус внутреннего и внешнего электродов соответственно.

Однако ввиду того, что поршневые машины наших предприятий не имеют центральной оси, мы считали целесообразным изготовлять электроды нз двух полукруглых половинок, где емкость можно определить по формуле

$$C_{\Pi\Pi} = \epsilon \frac{K'(r)}{K(r)}$$

где  $\square$  при  $\varphi \prec \frac{\pi}{10}$ ;  $\varphi$  - угол между электродами; К – полные

эллиптические интегралы, которые имеют вид

$$K = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}}, \qquad k = \sin(.)$$

Учитывая, что  $K(0)=K^{I}(1)=(/2, K(1)=K^{I}(0)=(, получим))$ 

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \prod_{n=0}^{\infty} \frac{2}{1+k_n^{I}},$$

где П – бесконечное произведение.

Одновременно надо отметить, что при выходе увлажненного керамического материала из шнек-машины полукруглые электроды для определения диэлектрической проницаемости, т.е. емкости, плотно охватывают круглый измеряемый материал. Тем не менее вследствие дрожения происходит удаление электродов от сердечника (материала). В этом случае появляется воздушный зазор между электродами и выходным материалом. Диэлектрическая проницаемость зазора (т.е. воздуха) ε<sub>0</sub>=1. Схема расположения такого двухслойного диэлектрика приведена на рис.1.



Для двухсвязной области справедливо следующее представление:

$$U_{1}(z) = \operatorname{Re}\left[\varphi\left(\frac{z-a}{R}\right) - \varphi\left(\frac{Rr_{0}^{2}}{z-a}\right)\right] + C_{0}\ln\frac{z-a}{r} + U_{0}$$
$$U_{2}(z) = \operatorname{Re}\left[\psi\left(\frac{R}{z-a}\right) - \psi\left(-\frac{R}{z+a}\right)\right] + C_{1}\ln\left|\frac{z+a}{z-a}\right|,$$

где С<sub>0</sub> и С<sub>1</sub> – действительные постоянные;  $\phi(z)$  и  $\psi(z)$  – аналитические в единичном круге IzI<1 функции;  $\epsilon_{0}=r/R$ .

Однако ввиду того, что диаметр выходного материала  $\sim 60$ *мм*, воздушный зазор в пределах до 1,0*мм*,  $\epsilon_1$  материала доходит до 20...25 и  $\epsilon_0$  воздуха равна 1,0, то погрешность измерения не превышает 0,006%.

Тогда 
$$C_{\Pi\Pi} = L \frac{4\varepsilon}{\pi} \ln \frac{4}{\varphi}.$$
 (3)

**Метод определения влажности материала.** Для определения емкости С диэлектрической проницаемости ( и тангенс угла диэлектрических потерь tg( необходимо учесть прежде всего влажность самого материала

$$W = \frac{M_{B}}{M_{B} + M_{M}},$$
(4)

где m<sub>в</sub>, m<sub>м</sub> – масса воды и увлажненного материала соответственно.

Учитывая что входной поток материала мгновенно распространяется по всему объему увлажнителя и полностью перемешивается со всей массой материала,

находящейся в нем, влажность смеси в аппарате будет равна влажности готового материала при выходе

$$W = \frac{Q_{BX}^{B}}{Q_{Bbix}^{B} + Q_{Bbix}^{M}},$$
(5)

где  $Q^{\scriptscriptstyle B}_{\scriptscriptstyle {\rm Bbx}}$ ,  $Q^{\scriptscriptstyle M}_{\scriptscriptstyle {\rm Bbx}}$  – массовые расходы воды и материала на выходе увлажнителя.

В случае, если расход воды  $Q_{Bx}^{B}$  и сыпучего материала  $Q_{Bx}^{M}$  на входе, а следовательно, и масса материала и воды в увлажнителе изменяются во времени, приращение влажности готового продукта из выражения (3) будет равно

$$dW = \frac{m_{M}dm_{B} - m_{B}dm_{M}}{(m_{B} + m_{M})^{2}}.$$
 (6)

Производя почленное деление числителя на знаменатель в правой части выражения, получим

$$dW = \frac{m_{M}dm_{B}}{(m_{B} + m_{M})^{2}} - \frac{m_{B}dm_{M}}{(m_{B} + m_{M})^{2}}.$$
 (7)

Решая эту задачу как из двух частных задач, путем некоторых математических преобразований окончательно получим влажность для реального активного увлажнителя:

$$W(P) = [Q_{Bx}^{B}(P)R_{1}\frac{T_{2}P+1}{T_{2}P+1} - Q_{Bx}^{M}(P)R_{2}\frac{T_{3}P+1}{T_{1}P+1}]e^{-p\tau 3}, \qquad (8)$$

где 
$$T_1 = \frac{m_M}{Q_{BX}^M} -$$
постоянная времени увлажнителя;  $T_2 = T_1 \frac{N}{N + Q_{BX}^M};$   
 $T_3 = T_1 \frac{Q_{BX}^B + 2L}{Q_{BX}^B + L};$   $T_3 = \frac{T_3}{T_1} = \frac{I}{V_{\pi}};$   $R_1 = \frac{1}{Q_{BX}^M};$   $R_2 = \frac{Q_{BX}^B}{Q_{BX}^B + L};$ 

N – амплитуда скачка; l – длина увлажнителя; V<sub>л</sub> – линейная скорость перемещения материала; ( - время запаздывания; P – функция преобразования Карсона-Лапласа [4].

Экспериментальный метод определения влажности керамического увлажненного материала. Согласно вышеуказанному, наиболее приемлемым методом определения влажности в производственных условиях является электрофизический, т.е. измерение ( и tg( непрерывным способом. Схема применяемой установки показана на рис. 2.

Практически применяемый сухой материал (полевой шпат, каолин, песок силикатный) после увлажнения, т.е. в тестообразном виде, подается в поршневой шнек.

Величина расхода материала при определенном выпускном отверстии определяется путем контроля времени истечения материала по формуле

 $Q=m_{\rm H}/t_{\rm ист}$ ,

где Q- массовый расход материала;  $m_{\pi}$  – масса вытекшего материала; t – время истечения.



Минимальное число проб (П<sub>мин</sub>), необходимое для достоверной оценки качества увлажнения материала, устанавливается на основании теоремы Ляпунова:

$$\Pi_{\text{MUH}} \geq t_{\alpha}^{2} \mathbf{S}^{2} / \Delta^{2} = t_{\alpha}^{2} \mathbf{V}_{c} / \varepsilon^{2}, \qquad (9)$$

где  $t_{\alpha}$  - нормированное отклонение, определяемое с помощью таблиц [5]; S – среднеквадратическое отклонение влажности материала в пробах; V<sub>c</sub> – коэффициент вариации (обычно не более 15%);  $\Delta$  - предельная относительная погрешность (обычно до 5%).

Тогда Пмин =1,8\*1,5%/25%=1,1.

Принимаем Пмин=3.

Важным вопросом в определении влажности керамической увлажненной массы является выбор электродов ПП и разработка метода расчета емкости такого конденсатора.

Таблица

	Влажность, %	C, pf	tgδ
W <sub>0</sub>	0	94,05	0,1066
$W_1$	10	106,7	0,0966
$W_2$	20	118,4	0,0912
W <sub>3</sub>	30	127,9	0,0871

Технологическая особенность в производстве диктует применение конструкций электродов из двух полукруглых половинок, охватывающих круглую тестообразную (пастообразную) массу.

Для данной цели наиболее подходящими являлись обкладки конденсатора с полукруглыми профилями (рис.26). Результаты экспериментальных данных приведены в таблице, а зависимость C от W приводится на рис.3, где заштрихованная зона ( $W^1 - W^{II}$ ) является приемлемой влажностью материала для получения наиболее лучшего качества изделия.



Puc.3

Сравнивая результаты измерения влажности (т.е. C=F(W)), можно установить, что влажность, измеренная методом взвешивания, как наиболее приемлемый показатель с точки зрения получения высокого качества изделия, должна находиться в промежутке  $W^1 - W^{II}$ , который приравнивается к 20(5% увлажненного материала. Кроме того, разработанный метод позволяет проводить дистанционный контроль для измерения влажности керамических и сыпучих материалов при выходе из шнек-пресса и автоматизировать весь технологический процесс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. 136 с.
- 2. Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов.-М.:Энергоатомиздат,1987. - 136 с.
- 3. **Деч Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Zпреобразования. - М.: Наука, 1971.- 288с.
- 4. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир, 1970. 368 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.06.2002.

### Կ.Ջ. ՄԻՐՉԱԲԵԿՅԱՆ

### ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄՆ ՈՒ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Մշակվել է դիէլեկտրիկական թափանցելիության և կորուստների անկյան տանգենսի չափման միջոցով շնեկ /փողրակ-փոխադրիչ/ մամլիչի ելքում կերամիկական նյութերի խոնավության որոշման մեթոդ, որը թույլատրում է ավտոմատացնել տեխնոլոգիական գործընթացը։

#### K.G. MIRZABEKYAN

# RESEARCH AND DETERMINATION OF INHOMOGENEOUS MATERIAL HUMIDITY BY ELECTROPHYSICAL METHOD

A method of determining ceramic and inhomogeneous material humidity on the output of auger press by mesuring the permittivity  $\epsilon$  and the loss tangents of a dielectric tg $\delta$  is developed. This method allows to automate the technological process.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 621.372.57

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

#### В. М. АРУТЮНЯН, В. В. БУНИАТЯН, Вз. В. БУНИАТЯН, А Г. АКОПЯН

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ И ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Теоретически исследованы характеристики линий передач и фильтров на основе высокотемпературных сверхпроводящих тонких пленок в режиме неболометрического поглощения оптического сигнала. Установлено, что эти параметры можно управлять изменением интенсивности оптического сигнала.

*Ключевые слова*: высокотемпературная сверхпроводимость, линии передач, фильтры.

оптических нелинейных эффектов в Исследования тонких ВЫСОкотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) пленках [1,2] показали перспективность реализации ряда СВЧ устройств: оптически управляемых фильтров, фильтроввыключателей, линий задержки, смесителей и детекторов, фильтров-ограничителей, параметрических преобразователей, усилителей и других активных и пассивных цепей, принцип действия которых основан на изменении СВЧ импедансных параметров под влиянием оптического излучения. Особенно привлекает возможность оптического "управления" кинетической индуктивностью. Поскольку кинетическая индуктивность связана с движением электронов, то появляется возможность управления ею благодаря зависимости числа сверхпроводящих и нормальных электронов и скорости их движения не только от температуры и транспортного тока, но и от других внешних воздействий, например, оптического излучения [3,4]. Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований подтверждают [1-4], что доминирующим механизмом поглощения ВТСП материалом оптического излучения является болометрический. Однако при определенных параметрах оптического излучения и состояния образца могут реализовываться и неболометрические механизмы поглощения [6-8]. В рамках двухжидкостной модели, в [5,6] впервые теоретически показано, что при таком механизме поглощения можно "управлять" составляющими СВЧ поверхностного импеданса ВТСП пленок оптическим сигналом.

Согласно [3,4], если на ВТСП пленку падает модулированный по интенсивности оптический сигнал  $\Phi = \frac{\Phi_0}{2}(1 + \sin\omega_s t)$ , где  $\Phi_0$ - интенсивность падающего излучения,  $\omega_s$ - частота модуляции, t- время, то активная и реактивная составляющие поверхностного СВЧ импеданса могут модулироваться по закону "накачки", т.е.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\mathrm{S}\Phi}(t) &\cong \mathbf{R}_{\mathrm{S}0}(t_{\mathrm{c}}) \big( \mathbf{1} + \mathbf{m}_{\mathrm{R}} \sin \omega_{\mathrm{s}} t \big), \\ \mathbf{L}_{\mathrm{S}\Phi}(t) &\cong \mathbf{L}_{\mathrm{S}0}(t_{\mathrm{c}}) \big( \mathbf{1} + \mathbf{m}_{\mathrm{L}} \sin \omega_{\mathrm{s}} t \big), \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$\begin{split} R_{so}(t_{c}) &\approx \frac{R_{s}(t_{c})}{f_{10}^{2}} f_{20}, \ R_{s}(t_{c}) \approx \left(\omega\mu_{0}\right)^{2} \frac{\lambda_{L}^{4}(t_{c})\sigma_{N}(t_{c})}{d}, \\ L_{so}(t_{c}) &\approx \frac{\mu_{0}\lambda_{L}^{2}}{df_{10}}, \ f_{10} \approx 1 - f_{1}, \ f_{20} \approx 1 + f_{2} \ , \\ \sigma_{N}(t_{c}) &\approx \frac{n_{N}q^{2}\tau_{N}}{m_{N}}, f_{1} \approx \frac{C_{1}\Phi_{0}}{2n_{s}} \approx \frac{C_{1}N_{\Phi}^{0}}{2n_{s}}, f_{2} \approx \frac{C_{1}\Phi_{0}}{2n_{N}} \approx \frac{C_{1}N_{\Phi}^{0}}{2n_{N}}, \ m_{l} = m_{R} + 2m_{L} \ , \\ m_{R} &= \frac{f_{2}}{1 - f_{2}} \ , \qquad m_{L} = \frac{f_{1}}{1 - f_{1}} \qquad (m_{1} \ll 1, m_{L} \ll 1) \end{split}$$

для тонкой пленки толщиной d <<  $\lambda_{\rm L}$ , t<sub>c</sub> = T/T<sub>c</sub> < 1; T<sub>c</sub> - критическая температура; m<sub>R</sub> и m<sub>L</sub> - глубины модуляции высокочастотного активного поверхностного сопротивления и кинетической индуктивности; R<sub>50</sub>, L<sub>50</sub> - активная и реактивная составляющие поверхностного CBЧ импеданса до "накачки",  $\lambda_{L}$ -глубина лондоновского проникновения,  $\sigma_{\rm N}$  - проводимость пленки в нормальном состоянии.

В предлагаемой работе впервые делается попытка описания характеристик линий передач (рис.1) и  $\Gamma$ -образного полосового и заграждающего фильтров (рис.2) на основе ВТСП пленок.

Учитывая (1) и результаты работ [1,2,5,6], для волнового сопротивления  $Z_{\text{в}}$ , составляющих коэффициента распространения K=K-jK" (где  $K^{'}=\omega\sqrt{L_{_{s\Phi}}C}$  -

коэффициент фазы,  $K^{-} = \frac{1}{2}(\frac{R_{_{1}}}{Z_{_{B}}} + Z_{_{B}}G)^{-}$  коэффициент затухания) линий

передач длиной w получим соответственно

$$\begin{split} Z_{_{B}} = & \sqrt{\frac{(R_{_{1}} + j\omega L)(G - j\omega C)}{G^{2} + \omega^{2}C^{2}}} , R_{_{1}} = R_{_{s\varphi}} \frac{8}{w\pi^{2}} [1 + 0.25 \ln(\frac{w}{\lambda_{\perp}} - 1)] , \\ \lambda_{_{L}}(t) = & \lambda_{_{L}}(0)(1 - t^{\frac{3}{2}})^{-\frac{1}{2}}, \lambda_{_{L}}^{2} = \frac{m_{_{s}}}{n_{_{s}}q^{^{2}}\mu_{_{0}}}, \lambda_{_{\perp}} = \frac{2\lambda_{_{L}}^{2}}{d}, \end{split}$$



Рис.1. Эквивалентная схема линий передач на основе ВТСП пленок





б)

Рис.2. Эквивалентная схема Г- образного полосового (а) и заграждающего (б) фильтров на основе ВТСП пленок

а для передаточной функции 8-звенных полосовых и заграждающих (режекторных) фильтров:

$$K = \frac{1}{\left[ ((1 + \frac{z_1}{z_2})^2 + \frac{z_1}{z_2})^2 + \frac{z_1}{z_2} (2 + \frac{z_1}{z_2})^2 \right]^2 + \frac{z_1}{z_2} (2 + \frac{z_1}{z_2})^2 \left[ ((1 + \frac{z_1}{z_2})^2 + 2\frac{z_1}{z_2} + 1)^2 \right]^2}$$
$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{((1 - \omega^2 cL_s)^2 + R_1^2 \omega^2 c^2)}{\omega c \sqrt{(\omega L_s)^2 + R_1^2}},$$

где R<sub>1</sub>, L, *C* - сопротивление, индуктивность и емкость линий единичной длины соответственно.

Численные расчеты проведены нами в соответствии с параметрами, экспериментально полученными различными авторами [1,2, 5,6]. Для YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> пленок принято:  $d \approx 0,3 \cdot 10^{-6}$  м,  $\eta_{.9\phi} \approx 10\%$ ,  $\Delta(T, \Delta N) = 0,013$  эB,  $C_t = 10^{-9} \cdots 10^{-14} \Phi/M$ ,  $\lambda_L \approx 150$  HM,  $\tau_{.9\phi} = 10^{-8}$  с,  $R_{.50} = 10^{-4} \cdots 10^{-1}$  OM,  $f = 10 \cdots 1000$  ГГ ц,  $L_{.50} = 10^{-10} \dots 10^{-14}$  ГH/CM,  $T_c = (10 \cdots 80)$  K.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости волнового сопротивления Z<sub>в</sub>, составляющей коэффициента распространения K', K" и мгновенного значения напряжения в линии (при *U*<sub>m</sub>=1B) от частоты СВЧ сигнала и расстояния *x* при различных значениях глубины модуляции активного сопротивления и кинетической индуктивности.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости передаточной функции 8- звенных полосовых и 4-звенных заграждающих (режекторных) фильтров при различных значениях глубины модуляции активного сопротивления и кинетической индуктивности.

Видно (рис.3,4), что коэффициенты фазы К' и К" изменяются пропорционально частоте СВЧ сигнала ш и квадрату частоты соответственно. Поэтому при высоких частотах амплитудное затухание будет более сильно выражено, чем фазовое искажение. Расчеты показывают, что при фиксированной глубине модуляции (m<sub>2</sub> и

 $\mathbf{m}_{_{\mathrm{L}}}$ ) волновое сопротивление остается постоянным, близким к нулю фазовым значением.

Как видно из рис. 5 и 6, с увеличением глубины модуляции кинетической индуктивности *т*. полоса пропускания для обоих фильтров (ПФ, 3Ф), оставаясь постоянной, смещается в сторону низких частот, что связано с увеличением *L*sФ из-за поглощения оптического излучения. С увеличением количества звеньев уменьшается полоса пропускания и увеличивается крутизна ветвей для ПФ, а для ЗФ происходит обратный процесс.

Таким образом, путем изменения интенсивности излучения (глубины модуляции  $m_{_R}$  и  $m_{_L}$ ) и частоты модуляции  $\omega_s$  можно "управлять" параметрами фильтров на основе ВТСП.



Рис.3. Зависимость K(a), K'(b) от частоты СВЧ сигнала при различных значениях глубины модуляции  $m_L$  ( $m_R=3m_L$ )



Рис.4. Зависимость мгновенного значения напряжения в линии (при Um=1B) от расстояния x при различных значениях глубины модуляции mL (mR=3mL) и времени t



Рис.5. Зависимость передаточной функции 8- звенного полосового фильтра при различных значениях глубины модуляции *m*L (*m*R=3*m*L)



Рис.6. Зависимость передаточной функции 4- звенного заграждающего (режекторного) фильтра при различных значениях глубины модуляции *m*L (*m*R=3*m*L)

Работа выполнена в рамках гранта Ansef PS-32.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vendik O. G, Gal'chenko S., Kaparkov D. et al. Models of HTSC Transmission lines as Applied for CAD of Microwave Integrated Circuits// Report N9, ISSN 1103-4599, ISRN CTA-NVT-R— SE. - 1994. – 87p.
- Kleinhammes A., Chang C.L., Moulton W. G., and Testardi L. R. Nonbolometric laser-induced voltage signals in YBa2Cu3O7-( thin films at room temperature// Physical Review B. -1991-I. -V. 44. -P.2313-2319.
- 3. **Bluser N.** Analysis of quantum superconducting kinetic inductance photo detectors // Journal of Applied Physics.-1995. -V. 78. -P. 7340-7351.
- Fenkel A. Mechanism of non equilibrium optical response of high-temperature superconductors//Physical Review.-1993.-V.B48. -P. 9717-9719.
- Aroutiounian V. M., Buniatyan V.V. Sensitivity of the surface microwave impedance of HTSC thin films to optical excitation // Journal Technical. Physics Letters (Russian, S. Peterburg). 1999. V.25. -P. 51-56.
- 6. Aroutiounian V. M., Buniatyan V. V. Response of HTSC Films to Modulated Optical Radiation // Solid State Communications. -1998. -V.108. -P. 579-581.
- Carlsson E., Gevorgian S., Kollberg E. et al. Optical Response of a YBCO Coplanar Waveguide Resonator // Proceed. 1994 IEEE MTT-S Topical Meeting on Optical Microwave Interaction, Goeteborg, Sweden.- 1994. -P.195-197.
- Zhang D., Plat D. V., and Fettermarn H. Optical control of millimeter wave high-TC superconducting quasi-optical band pass filter // Applied Physics. Letters. 1991 -V. 58. P.1560-1562.
- 9. Trank E. K., Drake R. E., and Hobenwarterg G. K. G. Optically Modulated Superconducting Delay Lines// IEEE Transaction on Applied Superconductivity. –1993. -V. 3. -P. 2899-2902.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 13. 02. 2003.

### Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Վ. Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Վզ. Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Ա.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ ՕՊՏԻԿԱՊԵՍ ԿԱՌԱՎԱՐԵԼԻ ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐԻ ԵՎ ԶՏԻՉՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Տեսականորեն հետազոտվել են բարձրջերմաստիձանային գերհաղորդիչ թաղանթային հաղորդման գծերի և զտիչների բնութագրերը օպտիկական ազդանշանի ոչ ջերմային կլանման ռեժիմում։ Հաստատվել է, որ այդ բնութագրերը կարելի է կառավարել օպտիկական ազդանշանի ինտենսիվության փոփոխմամբ։

### V.M. HAROUTYUNIAN, V.V. BUNIATYAN, Vz. V. BUNIATYAN, A. H. HAKOBYAN CHARACTERISTICS OF OPTICALLY CONTROLLED TRANSMISSION LINES AND FILTERS ON THE BASE OF HTSC

Characteristics of transmission lines and filters based on high temperature superconductive thin films in the conditions of nonbolometric absorption of the optical signal is investigated. It is established that these parameters can be controlled by changing the intensity of the optical signal.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 621.315.592

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

### С.Х. ХУДАВЕРДЯН, А.А. АРУТЮНЯН, Ж.Г. ДОХОЛЯН, А.А. КОЧАРЯН

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ОПЗ В ДВУХБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Рассматриваются вольт-амперные характеристики и спектральное распределение фототоков двухбарьерных структур с высокоомной прослойкой при наличии и отсутствии длинноволновых потерь. Показана возможность определения ширины областей пространственных зарядов (ОПЗ) переходов путем измерения длины волны инверсии спектрального фототока.

*Ключевые слова:* спектральная характеристика, фотогенерированные носители, область пространственных зарядов, тыловой барьер.

В [1] теоретически изучена спектральная характеристика двухбарьерных структур с высокоомной прослойкой между барьерами в области собственного и коротковолнового поглощения с учетом отражающих свойств контактов. На рис.1 приведена энергетическая зонная диаграмма исследуемых силицид-силициум-силицид структур.



Рис.1. Энергетическая зонная диаграмма структуры NiSi-n-Si-TiSi2

Фототоки, обусловленные переходами в рассматриваемых структурах, как видно из рисунка, имеют противоположные направления. Фототок  $I_{\varphi 1}$ , индуцируемый на участке 0-Х<sub>т</sub> первого барьера, равен

$$I_{\Phi_1} = qS\beta S_0 (1 - R_1) (e^{\alpha Xm} - 1) (e^{-\alpha Xm} + R_2 e^{-2\alpha d}) (1 + R_1 R_2 e^{-2\alpha d} + R_1^2 R_2^2 e^{-4\alpha d} + ...)$$
(1)

$$I_{\Phi_{2}} = qS\beta S_{0}(1 - R_{1})(1 - e^{-\alpha(d - Xm)})(e^{-\alpha Xm} + R_{2}e^{-\alpha d})(1 + R_{1}R_{2}e^{-2\alpha d} + R_{1}^{2}R_{2}^{2}e^{-4\alpha d} + ...)$$
(2)

Фототоки I<sub>ф1</sub> и I<sub>ф2</sub> направлены навстречу друг другу. Исходя из (1) и (2), можно вычислить результирующий фототок I<sub>ф</sub> в структуре по формуле

$$I_{\Phi} = qS\beta S_0 \frac{1 - R_1}{1 - R_1 R_2 e^{-2\alpha d}} \left[ \left( 1 + e^{-\alpha d} \right) \left( 1 - R_2 e^{-\alpha d} \right) - 2e^{-\alpha Xm} \left( 1 - R_2 e^{-2\alpha (d - Xm)} \right) \right],$$
(3)

где q - заряд электрона; S - площадь светочувствительной поверхности; β- квантовый выход; J<sub>0</sub> - интенсивность падающего излучения; R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> - коэффициенты отражения от первого и второго барьеров, имеющих ОПЗ соответственно с толщиной X<sub>m</sub> и d-X<sub>m</sub>; d - толщина базы; α - коэффициент поглощения.

При отсутствии отражений (R1=R2=0) получим

$$I_{\Phi} = qS\beta S_0 \left[ \left( 1 + e^{-\alpha d} \right) - 2e^{-\alpha Xm} \right].$$
(4)

Результирующий темновой ток также обусловлен разницей темновых токов двух переходов [2] :

$$I_{T} = I_{s1} \left( \exp \frac{qVX_{m}}{dkT} - 1 \right) - I_{s2} \left( \exp \frac{-qV(d - X_{m})}{dkT} - 1 \right).$$
(5)

Приведем общую вольт-амперную характеристику с учетом результирующего темнового (5) и светового (3) токов :

$$I = qS\beta S_{0} \frac{1 - R_{1}}{1 - R_{1}R_{2}e^{-2\alpha d}} \left[ \left( 1 + e^{-\alpha d} \right) \left( 1 - R_{2}e^{-\alpha d} \right) - 2e^{-\alpha Xm} \left( 1 - R_{2}e^{-2\alpha (d - Xm)} \right) \right] + I_{s1} \left( e^{(qVXm)/dkT} - 1 \right) - I_{s2} \left( e^{-qV(d - Xm)/dkT} - 1 \right).$$
(6)

Выражение (6) описывает связь между фототоком, напряжением внешнего смещения (V), длиной волны поглощения (через  $\alpha$ ) и разницей высот потенциальных барьеров ( $\Delta \phi_k$ ), входящих в выражения для  $X_m$  [2].



Рис.2. ВАХ структуры NiSi-n-Si-TiSi2. Кр. 1 - темновой ток; кр. 2 и 3 - фототоки при  $\lambda$ =0,4 *мкм* и  $\lambda$ =0,9 *мкм* соответственно. Интенсивность падающего излучения J0=10<sup>-7</sup> кв/см<sup>2</sup>с

По формуле (6) была построена вольт-амперная характеристика (рис.2).

Приложенное отрицательное напряжение смещает обратно первый переход и прямо - тыловой. При смене полярности напряжения прямо смещается первый переход, а тыловой - обратно. При этом в диапазоне напряжений от -2,1 до +1,9 темновые токи меньше, чем 2×10<sup>-11</sup> *A* (кривая 1 на рис.2).

При освещении из коротковолновой области спектра ( $\lambda = 0,4$  *мкм*) основная часть излучения поглощается вблизи первого перехода (рис.2, кривая 2). При освещении из длинноволновой области, по сравнению с коротковолновым излучением, возрастает число квантов, поглощенных у тылового барьера. При этом значительная часть квантов не поглощается в базовой области (из-за "хвостовых" потерь) и не вызывает больших изменений сопротивления первого обратно смещенного перехода (кривая 3).

В случае внешнего напряжения, когда первый барьер смещается прямо, а тыловой обратно, при любых значениях длин волн падающего излучения большее число квантов поглощается в области первого барьера, но разделение фотогенерированных носителей происходит полем второго барьера, следовательно, увеличивается ток тылового барьера  $I_{\phi 2}$ . В итоге, происходит уменьшение коротковолнового фототока, и, начиная с V~1,5 *B*, ток через структуру определяется тыловым обратно смещенным переходом.

Если в (2) принять, что ширина базы d стремится к бесконечности, то этим в выражении для фототока, протекающего через второй барьер, будет учтено влияние всех падающих на образец квантов. При этом выражение (2) примет следующий вид:

$$I'_{\Phi_2} = qS\beta S_0 (1 - R_1) e^{-\alpha Xm} .$$
 (7)

С учетом выражения фототока через первый барьер (1) результирующий фототок будет равен

$$I'_{\Phi} = I_{\Phi 1} - I'_{\Phi 2} = qS\beta S_0 (1 - R_1) (1 - 2e^{-\alpha Xm}).$$
(8)

С учетом темнового тока получим

$$I = I_{T} + qS\beta S_{0}(1 - R_{1})(1 - 2e^{-\alpha Xm}).$$
(9)

На рис.3 представлены расчетные спектральные кривые для структур NiSi-n-Si-TiSi<sub>2</sub> как с учетом "хвостовой" части поглощенных квантов, построенные по (9) (рис.3, кр. 4-6) для соответствующих значений V, так и без их учета, построенные по (4) (рис.3, кр. 1-3) при одинаковой мощности падающего излучения  $P=4x10^{-9}$  *Br*. Нетрудно заметить, что закономерности для этих кривых сохраняются, однако точка смены знака фототока смещается в сторону коротких длин волн. Это объясняется тем, что число поглощенных квантов вдали от влияния поля первого барьера в области длинных волн увеличивается. Поэтому максимумы длинноволнового фототока значительно больше при учете "хвостовой" части и находятся в области собственного поглощения. Из сравнения кривых 1-3 и 4-6 видно также, что в случае, когда не создается внутреннее отражение от противоположных контактов,

приводящее к увеличению эффективности поглощения, структуры могут служить эффективными фотоприемниками коротковолнового излучения, т.к. при λ < 0,5 *мкм* падающее излучение

ПОЛНОСТЬЮ базе с толщиной 1 10E-09 -10E-09 -10E-00 -10E-09 -10E-00 -10E-00 -10E-00 -10E-00 -1

Рис.3. Спектральная характеристика NiSi-n-Si-TiSi₂ структур с учетом "хвостового" поглощения (кр. 1-3) и без их учета (кр 4-6). Мощность падающего излучения Р=4х10<sup>-9</sup> *Br*. С увеличением нумерации кривых растет приложенное на контакте напряжение ("+" на Ni контакте)

Закономерность смещения точки "0" при изменении  $\Delta \phi_k$  или  $X_m$  без учета "хвостовой" части поглощения можно получить из условия  $I_{\phi}$ =  $I_{\phi 1}$  -  $I_{\phi 2}$ . Учитывая, что темновые токи составляют незначительную часть общего фототока и могут быть не учтены, приравнивая (1) и (2) (в точке инверсии спектрального фототока), при отсутствии отражения от контактов (R2=R1=0) можно получить зависимость  $X_m$  от коэффициента поглощения (, которая имеет вид

$$X_{\rm m} = (1/\alpha) \operatorname{Ln} 2 - (1/\alpha) \operatorname{Ln} (1 + e^{-\alpha d}) .$$
 (10)

С учетом "хвостовой части (αd>1) это выражение примет вид

$$X'_{m} = (1/\alpha)Ln2 . \qquad (11)$$

Зависимости ширины области объемного заряда первого перехода от тех длин волн, при которых происходит смена знака фототока, построенные для  $X_m$  и  $X_m$ ' по (10) и (11) соответственно, приведены на рис.4. С увеличением  $X_m$  точка инверсии смещается в сторону длинных волн. Резкое изменение точки "0" с учетом "хвостового" поглощения происходит в более широком диапазоне длин волн, чем без его учета. Это связано с тем, что диапазон  $\lambda_{инв}$  увеличивается при увеличении эффективности поглощения длинноволнового излучения.

Таким образом, в двухбарьерных структурах, подобных рассматриваемым, экспериментально определяя длину волны, при которой происходит инверсия знака



ение коэффициента поглощения, можно рассчитать по (10) и (11) ширину областей объемных зарядов переходов.

б)

a) Рис.4. Зависимость точки инверсии фототока с учетом "хвостового" поглощения (а) и без его учета (б) от ширины области объемного заряда первого перехода

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Khudaverdyan S.Kh. Photo-detecting characteristics of double barrier structures. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. 2003. - V. 504/1-3. -P. 350-353.
- 2. Grigoryan G.E., Pogosyan L.N., Khudaverdyan S.Kh. Detectors of Electromagnetic Radiation Based on the Double-Barrier Structures. Appled Electromagnetism. - 1999. - V 2, N 2. - P. 43-50.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.04.2002.

### Ս.Խ. ԽՈՒԴԱՎԵՐԴՅԱՆ, Հ.Հ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ժ.Գ. ԴՈԽՈԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՔՈՉԱՐՅԱՆ ԵՐԿԱՐԳԵԼՔ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ԼԻՑՔԵՐՈՎ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԼԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Դիտարկվում են բարձր օհմային բազայով երկարգելք կառուցվածքների վոլտամպերային բնութագրերը և ֆոտոհոսանքների սպեկտրալ բաշխումը՝ երկարայիքային կորուստների առկայության և բացակայության պայմաններում։ Բերվում է տրված պոտենցիալ արգելքների ծավալային լիցքերով շերտերի լայնության որոշման եղանակ սպեկտրալ ֆոտոհոսանքի նշանափոխման կետի ալիքի երկարության չափման մեթոդով։

#### S.H. KHUDAVERDYAN, H.H. HARUTYUNYAN, J.G. DOKHOLYAN, A.A. KOCHARYAN ON OPPORTUNITY TO DEFINE THE WIDTH OF SPACE CHARGE REGION IN THE DOUBLE-BARRIER STRUCTURES

Current-voltage characteristics and spectral distribution of photocurrents of doublebarrier structures with high-resistance base are reviewed in the presence and absence of long-wave losses. There is an opportunity to define the width of space charge region of junctions by measuring the length of inversion wave of spectral photocurrent.

# ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՍԱՐԳՍՅԱՆ ՅՈՒ.Լ., ԹԵՐՉՅԱՆ Հ.Ա.	
ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ ԶԱՐԳԱՑՈՒՄԸ	
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՃԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆՈՒՄ	183
<i>ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Հ.Հ., ՀԱՍՐԱԹՅԱՆ Լ.Գ.</i>	
ՆՅՈՒԹԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ԳՐԱՖԻԿԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ	
ՓՈԽԱԿԵՐՊՎԱԾ ՄԵԹՈԴ	202
ՍՏԱԿՑԱՆ Մ.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Հ., ԴԵՄԻՐԽԱՆՅԱՆ Ա.Ռ.	
ԶԳԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՇԵՄԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	
ԸՍՏ ԵՐԿԱՐԱԿԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ	
Հաղորդում 1. Երկարակեցությունների փոփոխակային շարքերի	
վիմակագրերի նորմալ բաշխման ստուգումը	208
<i>ዒ፟፟፟ጟ</i> ፈኒስትህን ይ	
ԷՔՍԿԱՎԱՏՈՐԻ ՀԵՆԱՀԱՐԹԱԿԻ ՊՏՏՄԱՆ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ	
ՆՎԱԶԱԳՈԻՅՆ(Ծատ) ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ	217
<i>ደԱՎԱԽՅԱՆ Ռ.Պ., ԱՐԶՈՒՄԱՆՅԱՆ Հ.Ս.</i>	
ՕՔՍԻԳԵՆԱՏՈՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ ԱՐՅԱՆ	
ՀՈՍՔԻ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿՈՐԵՆ	222
ՆԵՐԿԱՅԱՑՈՒՄԸ	223
ԱՂԲԱԼՑԱՆ Ս.Գ., ՍՏԵՓԱՆՑԱՆ Ա.Մ., ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Գ.Բ.	
ԱՐԱԳԱՀԱՏ ՓՈՇԵՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ՖԱԶԱՅԻՆ ԿԱԶՄԸ,	000
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ	229
#U3LU3PU \$CUUOLUUU IICU\$4CU3UU	<b>77</b> 4
	230
U.U., ZUUI UMOUU L.M., IIU 4UUOUU E.U., AIIU A2III. II A	
ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ, ՆԱՆՈ-ԿՈՄՊՈՉԻՑԻԱՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆՆՈՐ	
ሆበያይያህኩቢንድር	244
<i>UUU3UL U.</i> 9.	
ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՉՐԱՑՈՒՄԸ ԼԱՎԱՐԿՎԱԾ	
ՄԱԿՐՈԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՍԱՀՄԱՆՄԱՆ ՃԱՆԱՊԱՐՀՈՎ	252
INLAUSUL V.U., LUVFUL 2NFVBUL U.A., HNUSULBUL H.U.	
ԹՐԾՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱՐՁՐՍԻԼԻԿԱՏԱՅԻՆ ԱՊԱԿԻՆԵՐԻ	
ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԸՆԴԱՐՉԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՎՐԱ	259
<i>ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ Գ.Հ.</i>	
ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ	
ԱՌԱՋԱՑԱԾ ԼԱՐՎԱԾԱ - ԴԵՖՈՐՄԱՑՎԱԾ ՎԻՃԱԿԻ	263
ՕՐԻՆԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ	
ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԲԱԴԱԼՅԱՆ Ն.Ղ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ.	
ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈԻՆԱՑՎԱԾ	
ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱԶՄԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ Р-Ս ԵՎ	_
P-Q ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	272

ԱՐԵՇՅԱՆ Գ.Լ.	
ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԳԾԱՅԻՆ ՊՏՏԱԿԱՆ ԱՐԱԳԱՑՈԻՑՉԻ	
ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՀՒՄՈՒՆՔՆԵՐԸ	282
UMLQUFE43UL F.U., QUQULGUL Y.Y.	
ՈՉ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈւՄ ՀԱՂՈՐԴՈՂ	
ԷԼԷԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉ	293
ՀԱԿՈԲՋԱՆՅԱՆ Գ.Դ., ՄԱՖԱՐՅԱՆ Վ.Ս.	
ՀԱՄԱՍԵՌ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅԱՆ	301
ደብብር	
ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ Վ.Բ.	
ՄՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ ՁԵՎԱՓՈԽԻՉԻ ՕԴԱՅԻՆ ԲԱՑԱԿՈՒՄ ՈՉ	
ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԹԻԹԵՂԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	
ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿ	306
ԵՍԱՅԱՆ Մ.Ա., ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ Ա.Հ., ՄԻՆԱՍՅԱՆ Ս.Ա.,	
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Գ.Ղ.	
ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿ ՄՈԴԵԼ	315
ՍՈՂՈՄՈՆՅԱՆ Կ.Հ., ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ Կ. Ա., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Ն.Լ.	
R² ՀԱՐԹՈՒԹՅԱՆ ԶՈՒՅԳ ԳԾԵՐՈՎ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՎՈՂ R³ ԵՌԱՉԱՓ	
ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՏԱՎՈՐՄԱՆ	
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄ	322
UMLQUADHIU 4.Q.	
ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄՆ ՈՒ	
ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ	328
ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Վ.Մ., ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Վ.Վ.,	
ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Վզ.Վ., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ա.Հ.	
ՕՊՏԻԿԱՊԵՍ ԿԱՌԱՎԱՐԵԼԻ ԲԱՐՉՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ	
ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉ ՀԱՂՈՐԴՄԱՆ ԳԾԵՐԻ ԵՎ ԶՏԻՉՆԵՐԻ	
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ	334
ԽՈԻԴԱՎԵՐԴՅԱՆ Ս.Խ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Հ.Հ., ԴՈԽՈԼՅԱՆ Ժ.Գ.,	
£NQUIBUL U.U.	
ԵՐԿԱՐԳԵԼՔ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ	
ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ԼԻՑՔԵՐՈՎ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ԼԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ	<b>.</b>
ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ	341

# СОДЕРЖАНИЕ

САРКИСЯН Ю.Л., ТЕРЗЯН А.А.	
РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В ГОСУДАРСТВЕННОМ	
ИНЖЕНЕРНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ АРМЕНИИ	1 <b>83</b>
ПЕТРОСЯН Г.Л., ХАЧАТРЯН Г.Г., АСРАТЯН Л.Г.	
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ	
ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА	202
СТАКЯН М. Г., ОГАНЕСЯН А. О., ДЕМИРХАНЯН А. Р.	
СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГА	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПО ДОЛГОВЕЧНОСТЯМ	
Сообщение 1. Проверка нормальности распределения статистик	000
вариационных рядов долговечностей	208
ДЖАНГУЛЯН Э.А.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ	
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ	
ЭКСКАВАТОРА	217
ДЖАВАХЯН Р.П., АРЗУМАНЯН О.С.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ СКОРОСТИ	
ПОТОКА КРОВИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОКСИГЕНАТОРА	
	223
АГБАЛЯН С.Г., СТЕПАНЯН А.М., МАНУКЯН Г.Б.	
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРОШКОВОЙ	
БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ	229
АБОЯН А.О.	
РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОПОГРАФИЯ ШАГОВОГО	
СКАНИРОВАНИЯ	236
ТОНОЯН А.О., БАГДАСАРЯН А.Э., МАНУКЯН Л.С., КИРАКОСЯН Н.Н.,	
АСРАТЯН Л.Х., ВОСКАНЯН Э.С., ДАВТЯН С.П.	
НОВЫЕ ПОДХОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ	
НАНО-КОМПОЗИЦИЙ	244
МАМЯН С.Г.	
ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПУТЕМ	
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ	252
ПОГОСЯН М.А., АМБАРЦУМЯН А.Г., КОСТАНЯН К.А.	
ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ	
ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ВЫСОКОКРЕМНЕЗЕМИСТЫХ	070
СТЕКОЛ	259
ТУМАНЯН Г.А.	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО	

СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ТЕЛ ПРИ ЭКСТРУЗИИ <i>ХАЧАТРЯН В.С., БАДАЛЯН Н.П., ГУЛЯН А.Г.</i>	263
ВЫБОР СОСТАВА УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА	
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ Р-U И	
Р-Q ТИПАХ СТАНЦИОННЫХ УЗЛОВ	272
АРЕШЯН Г.Л.	
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО	
ЛИНЕЙНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ	282
МИРЗАБЕКЯН Ж.М., КАЗАРЯН В.К.	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ДЛЯ	
ПЕРЕДАЧИ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДЫМ НЕМАГНИТНЫМ ТЕЛАМ	293
АКОПДЖАНЯН Г. Д., САФАРЯН В.С.	
К ИССЛЕДОВАНИЮ ОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМ	301
НЕРСИСЯН В.Б.	
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ЗАЗОРЕ	
МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРИ	
НАЛИЧИИ В НЕМ ПРОВОДЯЩЕГО НЕМАГНИТНОГО ЛИСТА	
	306
ECAME M.A., APAREJIME A.A., MUHACME C.A., MEJIMKAH I.II.	
ДИПАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ	315
ГЕСУРСОВ СОГОМОНИНКА ТУМАНИНКА КАЗАРИНН П	515
ΑΒΤΟΜΑΤИЗΑΙΙИЯ ΠΡΟΙΙΓΟΟΑ ΚΟΗΟΤΡΥΝΡΟΒΑΗΝЯ	
ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА В <sup>3</sup>	
МОЛЕЛИРУЕМЫХ ПАРАМИ ЛИНИЙ ПЛОСКОСТИ В <sup>2</sup>	322
МИРЗАБЕКЯН К.Дж.	
ИССЛЕЛОВАНИЕ И ОПРЕЛЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ	
НЕОЛНОРОЛНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ	
МЕТОЛОМ	328
АРУТЮНЯН В.М., БУНИАТЯН В.В., БУНИАТЯН Вз.В., АКОПЯН А. Г.	
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ЛИНИЙ	
ПЕРЕДАЧ И ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ	
СВЕРХПРОВОЛНИКОВ	334
ХУЛАВЕРЛЯН С.Х., АРУТЮНЯН А.А., ЛОХОЛЯН Ж.Г.	
КОЧАРЯН А.А.	
О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ОПЗ В	
ДВУХБАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ	341

# CONTENTS

SARGSYAN Yu.L., TERZYAN H.A.	
DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES AT STATE	
ENGINEERING UNIVERSITY OF ARMENIA	18:
PETROSSYAN G.L., KHACHATRYAN H.H., HASRATYAN L.G.	
MODIFIED METHOD OF MATERIAL STRAIN DIAGRAM	
PARAMETER DETERMINATION	202
STAKYAN M. G., HOVHANNISYAN A. H., DEMIRKHANYAN A. R.	
STATISTICAL INVESTIGATION OF THRESHOLD SENSITIVITY	
DUE TO DURABILITY	
Information 1. Normal distribution testing of variational series for	
durability statics	20
JANGULYAN E.H.	
MINIMUM VALUE DETERMINATION OF EXCAVATOR	
PLATFORM DURATION	21
JAVAKHYAN R. P., ARZUMANYAN H. C.	
MATHEMATICAL PRESENTATION OF THE BLOOD FLOW RATE	
IN VIEW OF OXYGENATOR INFLUENCE	22
AGHBALYAN S.G., STEPANYAN A.M., MANUKYAN G.B.	
PHASE COMPOSITION, STRUCURE AND PROPERTIES OF	
HIGH-SPEED POWDER STEELS	22
ABOYAN A.H.	
X-RAY STEP SCANNING TOPOGRAPHY	23
TONOYAN A.O., BAGHDASARYAN A.E., MANUKYAN L.S.,	
KIRAKOSSYAN N.N., HASRATYAN L.KH.,	
VOSKANYAN E.S., DAVTYAN S.P.	
THE NEW APPROACHES OF POLYMER NANO-	
COMPOSITIONS OBTAINMENT	24
MAMYAN S.G.	
FATIGUE STRENGTH INCREASE BY DETERMINING OPTICAL	
MACROSTRUCTURE	2
POGHOSSYAN M.A., HAMBARDZUMYAN A.G.,	
KOSTANYAN K.A.	
INFLUENCE OF ANNEALING ON HIGH-SILICEOUS GLASS	
LETC	2
TUMANYAN G.H.	
STRESS – STRAIN STATE MECHANISM OF POROUS BODIES	
DURING EXTRUSION	26
KHACHATRYAN V.S., BADALYAN N.P., GHULYAN A.G.	
EQUATION COMPOSITION SELECTION OF ELECTRIC POWER	
STATION STEADY-STATE MODE FOR P-U, P-Q TYPES OF	
STATIONAL UNITS	2
ARESHIAN G.L.	
PRINCIPLES OF ELECTROMAGNETIC LINEARLY-ROTATING	
ACCELERATOR THEORY	28

MIRZABEKYAN Zh. M., GHAZARYAN V.K. ELECTROMAGNETIC PULSE ACCELERATOR FOR

ACCELERATION TRANSMISSION TO SOLID NON-MAGNETIC	
BODIES	293
HAKOBJANYAN G. D., SAFARYAN V. S.	
ON HOMOGENEOUS CHAIN CIRCUIT STUDIES	301
NERSISSYAN V.B.	
ELECTROMAGNETIC FIELD CALCULATION IN THE RUNNING	
CLEARANCE OF MAGNETIC EDDY- CURRENT TRANSFORMER	
IN THE PRESENCE OF CONDUCTING NON-MAGNETIC	
SHEET	306
YESAYAN M.A., ARAKELYAN A.H., MINASSYAN S.A.,	
MELIKYAN G.P.	
DYNAMIC MODEL OF POWER RESOURCES DISTRIBUTION	315
SOGHOMONYAN K. H., TUMANYAN K. A., GHAZARYAN N. L.	
DESIGN PROCESS AUTOMATION OF THREE-DIMENSIONAL	
SPACE R <sup>3</sup> SURFACES STIMULATED BY PAIRS OF LINES ON	
PLANE R <sup>2</sup>	322
MIRZABEKYAN K.G.	
RESEARCH AND DETERMINATION OF INHOMOGENEOUS	
MATERIAL HUMIDITY BY ELECTROPHYSICAL METHOD	328
HAROUTYUNIAN V.M., BUNIATYAN V.V., BUNIATYAN, Vz. V.	
HAKOBYAN A. H.	
CHARACTERISTICS OF OPTICALLY CONTROLLED	
TRANSMISSION LINES AND FILTERS ON THE BASE OF	
HTSC	334
KHUDAVERDYAN S.H., HARUTYUNYAN H.H.,	
DOKHOLYAN J.G., KOCHARYAN A.A.	
ON OPPORTUNITY TO DEFINE THE WIDTH OF SPACE	
CHARGE REGION IN THE DOUBLE-BARRIER STRUCTURES	341