

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ),
Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱԴԲԱԼՅԱՆ,
Ռ.Վ. ԱՏՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ,
Ս.Ս. ԴԱԶԱՐՅԱՆ, Ռ.Զ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

EDITORIAL BOARD

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

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

ՀԱՍՄԻԿ Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՀԱՍՄԻԿ Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2013

УДК 629.7.01'04

М.А. ПОГОСЯН, Р.М. МАРТИРОСЯН, В.А. КАРГОПОЛЬЦЕВ

**НЕКОТОРЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В
РАЗРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АВИАСТРОЕНИЯ**

Приведены основные положения Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между Объединенной авиастроительной корпорацией (ОАК) и Национальной академией наук Армении (НАН РА) по решению задач повышения научно-производственного потенциала авиастроительного комплекса Российской Федерации. Конкретизированы три важных направления сотрудничества: исследование надежности и прочности соединения металла и композита для перспективных воздушных судов (ВС); разработка возможности использования нанотехнологии получения монодисперсных нанокристаллов для защиты элементов самолетов от обледенения; проведение совместных исследований по обеспечению вихревой безопасности ВС.

Ключевые слова: соглашение, прочность, металл, композит, нанотехнология, нанокристаллы, воздушное судно, безопасность, вихрь.

В настоящее время воздушный транспорт, вместе с другими составляющими авиационной системы, находится на стадии серьезных трансформаций (преобразований). Это вызвано стремительным развитием процессов глобализации, динамической конкурентности, глобального производства, а также развитием международной научной кооперации, аутосорсинга и т.д. Важной движущей силой является рост мировой торговли.

С другой стороны, воздушно-транспортные средства неуклонно совершенствуются. Растут показатели пассажирского оборота (RPK-Revenue passenger-hilometer) и грузооборота (RPK- Revenue Tone- hilometer).

По данным Института мировой экономики и международных отношений РАН, авиационный транспорт (АТ) становится критическим фактором, реализующим движение людей и товаров по достаточно широкому и все расширяющемуся спектру в национальных и глобальных цепочках экономики.

В целом можно говорить о глобальной авиационной экспансии в ближайшие 10...20 лет в мировую экономику.

Проведенный анализ перспективных требований к самолетам нового поколения, основанный на российских и зарубежных публикациях [1-10], показал, что создаваемый самолет должен превосходить существующую технику по уровню безопасности в 5...7 раз, иметь увеличенный ресурс самолета в 1,5...2,0 раза, увеличенный срок службы на 50% при одновременном снижении стоимости на 50% и увеличении жизненного цикла на 15...20%. При этом должны быть на

качественно новом уровне решены задачи экологии, комфорта, регулярности выполнения расписания полетов, транспортной эффективности.

Создание новых технологий авиастроения, необходимых для достижения поставленных задач, базируется на новых знаниях и результатах исследований в области фундаментальных и прикладных наук. Сокращение временного цикла формирования научного базиса и внедрения новых технологий в практику авиастроения, существенное ускорение разработки при одновременном снижении риска являются одной из ключевых задач в создании конкурентности АТ.

Очевидно, что повышение эффективности характеристик авиационной техники и ее конкурентоспособности в современных условиях невозможно без кардинального совершенствования проектных и производственных технологий создания воздушных судов, совершенствования взаимодействия фундаментальной, прикладной науки и авиационного производства.

Анализ показывает, что использование в процессе создания самолета “незрелых” (т.е. не доведенных до высоко уровня готовности) технологий гарантированно приводит к дополнительным и очень большим финансовым и временным затратам.

Важность вопроса сокращения цикла создания технологий, основанных на новых знаниях, и доведения их до уровня готовности сертификации поддерживается тем, что в ведущих промышленно развитых странах (США, страны Евросоюза, Россия) разработана система оценки зрелости технологии, которая взята за основу многими ведомствами и организациями. Для реализации этого процесса на практике необходимо обеспечить объединение научных, проектных и производственных ресурсов по приоритетным направлениям создания ВС нового поколения. На решение этой задачи, в частности, направлено Соглашение о научно-техническом и инновационном сотрудничестве ОАО “ОАК” и НАН РА.

Соглашением предусмотрено:

1. Участие в совместных проектах и программах, в разработке и реализации совместных планов работ, а также осуществлении других совместных действий.
2. Приоритетный взаимообмен коммерческой, технической и иной информацией по реализуемым совместным программам, проектам и планам совместных действий.
3. Осуществление скоординированной совместной научно-технической деятельности в сфере развития и внедрения перспективных технологий в области авиастроения.
4. Осуществление скоординированной совместной научно-технической деятельности в международной сфере.
5. Возможность организации совместных предприятий, действующих в рамках существующего законодательства.

В соответствии с планом работ созданы рабочие группы специалистов институтов НАН РА и ОАО “ОАК”, направленные на реализацию таких проблем, как создание новых решений в области композитных материалов, повышение прочности соединения металла и композита с использованием достижений нанотехнологий, повышение безопасности полета ВС за счет использования интеллектуальных прогностических систем в прочности, аэродинамике, системах управления и т.д., использование новых экологически чистых источников энергии.

В дальнейшем этот список может быть расширен. Рассмотрим основные фундаментальные и научные проблемы, решаемые в настоящее время совместно с российскими и армянскими специалистами.

Повышение прочности и долговечности соединений металлокомпозитных конструкций. В современных условиях использование композиционных материалов (КМ) в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) возрастает. Так в европейском самолете А-380 (Airbus) использование композитов составляет ~25%, в проектируемом самолете А-350 (Airbus) их количество достигает 35%, а в самолете В-787 (Boeing) > 50%.

В России применение КМ в авиационных конструкциях также возрастает. В конструкции эксплуатируемых транспортных и пассажирских самолетов их объем составляет ~10%. В разрабатываемом пассажирском магистральном самолете МС-21, наряду с применением перспективных алюминиевых и титановых сплавов, объем использования композитов предполагается на уровне 40...50%.

Успешное внедрение КМ в силовые конструкции планера самолета непосредственно связано с созданием и совершенствованием расчетных методов оценки их прочности и жесткости. В общем случае КМ относятся к разряду анизотропных материалов, поэтому анализ их прочности требует особых подходов и методик, отличных от традиционных методов исследования прочности изотропных металлических материалов. Основы теории расчета анизотропных тел были заложены в работах Сен-Венана, С.А. Амбарцумяна, С.Г. Лехницкого и др. Прикладные методы расчета авиационных конструкций из КМ рассматривались в работах Г.Н. Замулы, К.М. Иерусалимского, В.М. Андриенко, В.В. Васильева и многих других отечественных и зарубежных авторов. В настоящее время благодаря усилиям разработчиков создан целый ряд методов оценки прочности конструкций из композиционных материалов.

Несмотря на это, до сих пор не разработана надежная универсальная инженерная методика определения конструктивных параметров в зоне стыка композит-металл и композит-композит с учетом технологии изготовления деталей, узлов и агрегатов. Физико-механические характеристики КМ (коэффициенты жесткости E_{ij}, G_{ij} , пределы прочности на растяжение-сжатие и срез), в отличие от металлических, часто требуют получения дополнительного подтверждения в эксперименте. Затруднительна также оценка влияния разрушения связующего, степени произ-

водственных, ремонтных или эксплуатационных повреждений на остаточную прочность и ресурс конструкции.

Одна из проблем разработки конструкций из КМ связана с обеспечением прочности соединения композитных деталей с металлическими. Такие соединения приходится использовать в зонах с высокими местными нагрузками, когда большие потоки сил необходимо воспринять деталями с высокой контактной прочностью и передать (распределить) их на более эффективные в весовом отношении, но чувствительные к концентраторам напряжений детали из композиционных материалов. Как правило, по соображениям надежности, такие соединения выполняются с использованием закладных металлических соединительных элементов.

В отличие от металлов, проблемы соединений в которых хорошо изучены, КМ обладают рядом особенностей, которые следует учитывать при прочностных расчетах соединений типа композит-композит и металл-композит.

Нагружение элементов узлов соединений металлокомпозитных конструкций также существенно отличается от традиционных металлических, что обуславливается различиями в прочностных характеристиках КМ при растяжении и смятии, сложностью реализации плотных высокоресурсных посадок соединительных элементов, повреждаемостью при обработке деталей из КМ, металлокомпозитных пакетов и др.

Наряду с использованием для исследования трудоемких расчетов методом конечного элемента (МКЭ), а также экспериментов на изготавливаемых образцах, целесообразно развитие эффективных аналитических методов для определения коэффициентов концентрации напряжений, а также прочностного расчета соединений, пригодных для использования в инженерной практике.

В этой связи актуальными могут стать следующие методические работы:

- исследование вариантов двух-, трех- и многослойных пакетов металл-композит при различных силовых воздействиях с целью оптимизации параметров пакета (чередование слоев и подбор их геометрических характеристик и др.), включая оценку концентрации напряжений методами теории упругости, теории вязкоупругости и механики разрушения;
- установление функциональной связи между концентрацией напряжений в отверстиях для болтов и характеристиками прочности односрезных и двухсрезных болтовых соединений металла с композитом с учетом разнородности и анизотропности соединяемых материалов, способа и цикличности нагружения, а также частоты и амплитуды динамических воздействий;
- разработка аналитической модели болтового соединения металл-композит для оптимизации параметров по условиям прочности. Оценка усилен-

ния соединения с помощью специально вставленных во время полимеризации в композит закладных втулок;

- исследование металлокомпозитных болтовых соединений (одноточечных и многорядных) с учетом затяжки крепежных элементов. Оценка концентраций напряжений в зоне соединений МКЭ;
- исследование повреждаемости кромок деталей из КМ и отверстий в узлах соединений для известных технологий обработки (лазерная резка, гидроабразивная резка, фрезерование, сверление, растачивание);
- совершенствование технологии механической обработки кромок деталей из КМ и отверстий, включая двух- и многослойные конструкции металл-композит, из условия уменьшения повреждаемости;
- повышение прочности болтовых и заклепочных соединений за счет рациональной технологии изготовления стыка, исключения концентрации напряжений при упрочнении кромок деталей из КМ путем введения клеевых втулок (включая использование наноклеевой композиции).

Для формирования научно-технического задела по проектированию самолетов нового поколения с применением КМ в силовой конструкции планера и достижения практических результатов будут привлечены высококвалифицированные специалисты институтов Национальной академии наук Республики Армения (НАН РА) и Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Жуковского (ФГУП ЦАГИ), специализирующихся в данной области.

В итоге намеченных научно-исследовательских работ к 2015 году ожидаются следующие результаты:

- результаты исследования прочностных характеристик с оценкой концентрации напряжений в отверстиях под крепеж двух-, трех- и многослойных пакетов металл-композит с оптимизацией параметров пакета;
- оценка концентрации напряжений в отверстиях для болтов и прочности болтовых соединений (односрезных и двухсрезных) металл-композит для заданных цикличности нагружения, частоты и амплитуды динамических воздействий;
- получение численной математической модели болтового соединения металл-композит, обеспечивающей оптимизацию параметров стыка по условиям прочности, а также оценка возможностей усиления соединения с использованием закладных втулок;
- получение инженерных методик по оценке рациональных параметров двухсрезных (“Ухо-вилка”) металлокомпозитных болтовых соединений (в одноточечных и многорядных) с оценкой рациональной затяжки крепежных элементов;
- повышение прочности двухсрезных болтовых и заклепочных соединений за счет исключения концентрации напряжений, реализации плотных по-

сажок соединительных элементов в отверстиях, одновременного включения соединительных элементов в работу, при приложении нагрузки, путем введения технологических втулок из наноклеевой композиции;

- получение сравнительных результатов исследований повреждаемости кромок деталей из КМ, кромок деталей и отверстий в узлах соединений для известных технологий обработки;
- разработка рациональной технологии механической обработки (фрезерования, сверления, растачивания) кромок отверстий в деталях из КМ, а также сверления двух- и многослойных конструкций металл-композит, включая выбор материала и геометрии инструмента, значения технологических параметров обработки, способы стружкоудаления и охлаждения.

Достижение вышеупомянутых научных и практических результатов позволит заложить фундамент для активного освоения КМ в производстве и авиационном строении.

Применение плазмо-механохимических покрытий для повышения характеристик авиационных конструкций. Композиционные механохимические покрытия на основе графит-наноалмазных порошков существенно повышают качество материала-основы. Композиционные покрытия, содержащие ультрадисперсную алмазграфитовую шихту, обеспечивают повышение микротвердости поверхностного слоя материала за счет формирования наноразмерной субзеренной структуры с размером субзерен менее 100 нм.

Метод нанесения покрытий существенно влияет на свойства конечного материала. Механохимический метод нанесения (Dynamic Compound Deposition – DCD) позволяет получать достаточно плотные покрытия. Этот метод применим для нанесения покрытий на упрочняемые детали широкого диапазона размеров и форм; он позволяет достичь высоких антикоррозионных, антиадгезионных, антифрикционных и износостойких характеристик упрочняемых деталей. Под воздействием ударов шаров в виброреакторе происходит диффузное сцепление частиц наносимой фазы и подложки. Частицы более твердых элементов проникают в вязкую матрицу подложки. В результате происходит увеличение глубины проникновения частиц наносимого материала и образование новых субзеренных структур в материале подложки. Беспористая субмикроструктурная структура покрытий, снижение исходной шероховатости на 1...2 класса и коэффициента трения в несколько раз, низкая температура процесса, отсутствие отпуска закаленных деталей, малый расход газообразного реагента и современные методы исследования создают хорошие перспективы для развития метода механохимического нанесения покрытий.

В данной статье приведены результаты исследования нового способа нанесения алмазосодержащих композиционных покрытий в виброреакторе в присутствии электроискрового ($P \sim 1 \text{ атм}$) или тлеющего ($P \sim 20 - 40 \text{ мм рт.ст}$)

разрядов ($U \sim 30 \text{ кВ}$, 50 Гц , $J \sim 150 \text{ мкА}$) – плазмо-механохимического метода (Electrical Discharge Assisted Mechanochemical Processing – EDAMP). Этот метод обеспечивает особые условия образования соответствующих фазовых составляющих в поверхностном слое материала подложки. Метод значительно интенсифицирует процесс нанесения покрытий и создает условия для образования нитридных, карбидных или оксидных фаз в поверхностном слое.

Основные характеристики EDAMP - метода:

- низкие температуры осаждения покрытия ($< 35^\circ\text{C}$);
- максимальная рабочая температура 400°C ;
- процесс занимает небольшое время ($\sim 30 \text{ мин}$).

Предварительные результаты получены при проведении лабораторных исследований. Показано, что сформированные методом EDAMP покрытия имеют хорошую адгезию к подложке, обладают улучшенными механическими и триботехническими характеристиками (твердость, сопротивление износу и коррозии, низкий коэффициент трения). Ввиду специфических условий синтеза и создания в поверхностном слое новой микро- и макроструктуры алмазосодержащих покрытий детали с такими покрытиями хорошо приспособлены для работы в тяжелых условиях нагрузок.

Некоторые свойства и особенности алмазосодержащих покрытий, формируемых методом EDAMP:

- низкий коэффициент трения (менее 0,1) по металлическим материалам;
- толщина покрытия не превышает $0,001 \dots 0,005 \text{ мм}$;
- микротвердость HV $1500 \dots 2000$;
- они не требуют последующей обработки;
- их наносят на детали широкого диапазона форм и размеров;
- нет изменений геометрических размеров деталей.

Наряду с простотой практической реализации очевидными преимуществами предложенного метода нанесения покрытий являются высокая скорость нанесения и низкая себестоимость сформированных покрытий.

Покрытия находят применение для защиты деталей техники, подвергаемых действию агрессивных сред и температур до 600°C (выхлопные газы, влажность), налипанию и обледенению, действию абразивного (пыль, твердые частицы) и кавитационного износа.

В результате выполнения запланированных работ предполагается завершить и систематизировать научные и практические результаты с целью создания новой технологии нанесения металлических, оксидных, нитридных, карбидных и алмазосодержащих покрытий на основе метода EDAMP. Разработка данной технологии, в частности, позволит:

- создать альтернативу для экологически вредных антикоррозионных хромосодержащих электролитических покрытий;

– создать основу для нового поколения авиационных материалов (демпферы вибраций, упрочнение шеек валов в поворотных конструкциях).

Повышение безопасности полетов самолетов в зонах интенсивного воздушного движения. Возрастание плотности воздушного движения и числа эксплуатируемых крупноразмерных самолетов существенно обостряет проблему вихревой безопасности. Любой летящий самолет оставляет за собой вихревой след, который возмущает воздушное пространство и тем самым представляет угрозу для полета других самолетов. Вихревой след постепенно рассеивается, но в обычных ситуациях заметное возмущение воздушного пространства может присутствовать за быстро летящим тяжёлым самолетом на расстоянии от него порядка 30...40 км (рис.1).

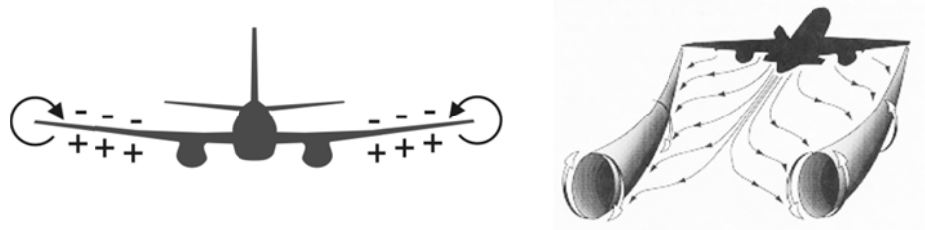


Рис. 1. Формирование вихревого следа

При этом энергия движения вихрей сопоставляется с энергией для поддержания самолета в воздухе. Важнейшей характеристикой вихревого движения является его интенсивность:

$$\Gamma = Y / \rho V b_o ,$$

где Y - подъемная сила самолета; V - скорость полета; ρ - атмосферная плотность; b_o - расстояние между вихрями.

В разных фрагментах вихревого следа распределения скоростей воздушной среды различны. Поэтому реакция самолета, попадающего в вихревой след другого самолета, вообще говоря, неоднозначная. Очевидно, что при полете поперек вихревого следа самолет испытывает максимальные избыточные знакопеременные перегрузки. В полете за самолетом-генератором в области между двумя вихревыми шнурами воздушный поток будет увлекать самолет вниз, а в наружной области, наоборот, вверх. В полете вдоль оси вихревого шнура на самолет будет действовать максимальный кренящий момент.

Проведенные исследования поведения самолёта взлетной массой ~100 т, совершающего крейсерский полёт в автоматическом режиме, при попадании в вихревой след от самолёта А-380 показали, что в случае его попадания в опасную зону характер его взаимодействия с вихревым следом зависит от двух

основных параметров: минимального расстояния по высоте от оси вихрей и разницы углов курса $\Delta\psi$ двух самолётов. Наибольшие значения приращения вертикальной перегрузки (порядка 1) реализуются при $\Delta\psi = 7 \dots 10^\circ$.

На рис. 2 показана зависимость дозы дискомфорта, которая представляет собой квадрат приращения вертикальной и боковой перегрузок, пропущенных через изодромное звено. Этот критерий учитывает как величину приращения перегрузки, так и скорость её изменения:

$$J = J_1 + J_2 = \int_0^T \left(\Delta n_y \frac{T_s}{T_s + 1} \right)^2 dt + k \int_0^T \left(\Delta n_z \frac{T_s}{T_s + 1} \right)^2 dt .$$



Рис. 2. Зависимость значения $J_{1\max}$ от разности углов курса

При малых значениях $\Delta\psi$ самолёт не может приблизиться к оси одного из прямых вихрей, поскольку система вихрей оказывает значительное противодействие. В то же время, если вихревой след искривлён из-за воздействия ветра, развития неустойчивости Кроу или вследствие искривления трассы полёта, то такое событие вполне возможно. В этом случае угол крена может достигать величины порядка 40° .

Учитывая сложность этой задачи, совершенно очевидно, что пилот нуждается в информационной поддержке, способствующей принятию своевременных и адекватных действий. На борту самолета должна быть индикаторная система, показывающая летчику расположение вихревых зон в окружающем воздушном пространстве и содержащая определенную директорную информацию для выполнения необходимых маневров облета.

Для успешного внедрения такой системы немаловажными дополнительными условиями являются простота системы, возможность ее интегрирования в существующие штатные индикаторы, а также совместимость со стандартной системой TCAS.

По характеру вихревой ситуации и возможным последствиям целесообразно выделить отдельно этапы крейсерского полета, происходящие на больших высотах, и этапы взлета-посадки, происходящие на малых высотах в зонах аэропортов. В настоящее время уже разработан вариант бортового информационного обеспечения на базе штатных индикаторов, позволяющий экипажу выполнять необходимые маневры уклонения от опасных вихревых зон.

Предложенные решения позволяют выполнить информационную систему вихревой безопасности с использованием существующих штатных бортовых систем индикации.

Основными принятыми концепциями являются:

- геометрическая модель опасной вихревой зоны (ОВЗ) в виде конической трубки, содержащей с большой вероятностью вихревой след;
- отображение прогнозируемого движения относительно ОВЗ;
- рассмотрение только двух сечений ОВЗ – горизонтального и вертикального в месте прогнозируемого прохождения самолета через вихревой след;
- рассмотрение запретных траекторий, ведущих к попаданию в вихревой след, и отображение этих траекторий на штатных индикаторах;
- привлечение элементов директорной индикации для управления по горизонтали и вертикали.

Дальнейшие исследования по данной теме в первую очередь связаны с разработкой теории воздействия на вихревую структуру, возможностью инструментального определения траектории вихревого следа с совершенствованием модели опасной вихревой зоны (в том числе с учетом ветра), а также с созданием форматов индикации для других этапов полета.

На рис. 3 представлен пример отображения информации на экране НД.



Рис. 3. Пример отображения информации на экране НД

Обозначения: 1 – метка самолета-генератора; 2 – метка своего самолета;
 3 – прогнозируемая траектория сближения; 4 – трасса вихревого следа;
 5 – горизонтальное сечение опасной вихревой зоны; 6 – шкала углов курса;
 7 – шкала относительных высот; 8 – шкала вертикальных скоростей (со стрелкой-указателем текущей вертикальной скорости); 9 – шкала углов крена

Для решения этой задачи будут привлечены специалисты ряда ведущих российских институтов и институтов НАН РА, имеющие опыт в исследовании физических процессов в атмосфере и использующие соответствующую математическую модель и оборудование для определения безопасной траектории полета.

Фундаментальные и прикладные исследования в обеспечении создания бортовой энергоустановки самолета на новых принципах. В настоящее время источником бортовой энергии на самолете для выполнения полета, движения по аэродрому, питания электрооборудования и агрегатов (в т.ч. кондиционеров) и т.д. являются маршевые двигатели и вспомогательные силовые установки (ВСУ).

При этом значительная часть энергии (~30...35%) отвлекается от решения главной части – обеспечения полета самолета, что существенно снижает его эффективность и не является оптимальным. Анализ показывает, что внутренние

потребности самолета для работы его энергопотребителей - системы кондиционирования, приборы оборудования, выпуск и уборка шасси, управление самолетом, передвижки по земле и т.д. - постоянно увеличиваются. Так на самолете Boeing-787 общие бортовые потребности энергии составляют ~ 1400 кВт, а на самолете A-380 ~ 350 кВт. На рис.4 показана эволюция потребления электроэнергии на борту самолетов.

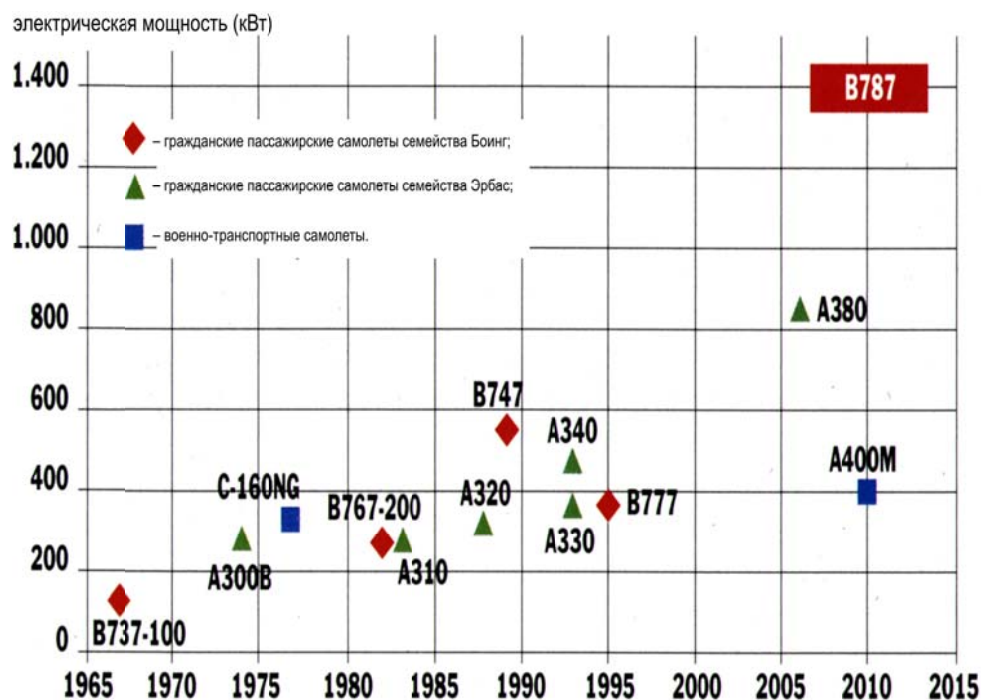


Рис.4. Эволюция потребления электроэнергии

При таком согласовании режимов работы внутренних энергопотребителей и маршевых двигателей часть входит в противоречие, плохо поддается оптимизации, а в ряде случаев не позволяет решить вопрос удовлетворения требований по экологии, безопасности полета и эффективности. В этой связи одной из наиболее перспективных концепций самолетов будущего является концепция полностью электрического самолета, переход к которой (учитывая сложность задачи) будет носить этапный характер и обеспечивать последовательное аккумулирование достижений в этой области.

На рис. 5 показаны основные направления перехода к электрическому самолету и представление основного эффекта реализации такой концепции.



Рис.5. Технологии перехода к «электрическому самолету»

Резкое возрастание роли экологии при создании и эксплуатации ВС определило высокий уровень экологической чистоты самолета, часто в качестве одного из определяющих критериев. Существующие решения основаны на использовании тепловых машин, имеют сравнительно невысокий КПД (~ 20...30%) и, как следствие этого, низкие экологические показатели, не соответствующие этим требованиям по экологии.

Для повышения энергоэффективности и уменьшения выброса парниковых газов (путем повышения КПД), уменьшения количества вредных выбросов, шума и вибраций большинство авиастроительных фирм активно разрабатывают и внедряют бортовой энергоузел на основе электрохимических источников энергии, в основном – топливных элементов (ТЭ).

Среди наиболее перспективных источников энергии в последнее время наиболее активно изучаются и разрабатываются химические источники (и накопители) энергии: суперконденсаторы (ионисторы), аккумуляторные батареи (чаще Li-ионные или литий-полимерные) и топливные элементы.

Ионисторы – это электрохимические конденсаторы, в качестве обкладки которых используется двойной электрический слой. Он обладает небольшим запасом энергии, однако его мощность сравнима с мощностью аккумуляторов, а время

разрядки немного меньше (от долей секунды до секунды). Хотя сам по себе ионистор пока неконкурентоспособен по энергетическим характеристикам по сравнению с другими электрохимическими источниками тока, однако его достоинства — большие скорости заряда и разряда — делают его перспективным для компенсации пиковых нагрузок и рекуперации ряда других типов энергии (например, при торможении).

Аккумулятор — вторичный элемент, в котором ион, экстрагированный из одного электрода, переносится через электролит к другому, в который и интеркалируется. Поскольку литий является одним из самых легких элементов и его потенциал ионизации один из самых низких, наиболее перспективными по своим характеристикам являются на настоящий момент литийионные (литийполимерные) аккумуляторы. Их энергетические характеристики более чем в 4 раза превосходят характеристики свинцовых аккумуляторов и в 2 раза — никелькадмиевых аккумуляторов, а рабочее напряжение единичной ячейки превышает 3 В и в перспективе может быть увеличено до 5 В. Переход от литиевого катода к сложным оксидным системам позволил значительно повысить безопасность таких аккумуляторов.

В отличие от Li-ионных аккумуляторов, в топливных элементах окислитель и восстановитель не находятся в самом элементе, а подводятся извне. Чаще всего используют водородно-воздушные и спиртовые топливные элементы. Среди всего разнообразия топливных элементов наиболее перспективными для практического использования в транспортных средствах считаются твердополимерные топливные элементы. В таких элементах в качестве электролита используются протонообменные мембраны, а электродами служат углеродные материалы с нанесенными на их поверхность наноразмерными кластерами платины.

Водород ионизируется на один из электродов, переносится через электролит и вступает в реакцию с кислородом на втором электроде. При этом единственным продуктом реакции является вода. КПД реально действующих ТЭ такого типа составляет 45...65%.

Анализ показывает, что энергетические установки самолета ближайшего будущего будут содержать все три электрохимических источника энергии. Основным источником энергии станут ТЭ, которые во время полета будут снабжать электроэнергией всех основных потребителей. Li-ионные аккумуляторы будут подзаряжаться от ТЭ во время полета и использоваться для кратковременного включения мощного оборудования (мотор-колесо, кухонное оборудование и т.д.), а ионисторы — для кратковременной выдачи большой энергии (выключение оборудования, запуск маршевого двигателя, начальный сдвиг колеса). Компоновка этих источников в ВСУ будет зависеть от его режимов полета.

Для успешного применения водородно-воздушного ТЭ необходимо решить несколько основных задач:

- а) создание высокоэффективных катализаторов с пониженным содержанием платины и повышенной толерантностью к СО;
- б) создание влагонезависимых термостабильных (минимум до 160...180°С) протонообменных мембран;
- в) создание новых аккумуляторов водорода с содержанием основного компонента не менее 12...15 % масс;
- г) создание нового поколения конвертеров керосина в водород для генерации водорода на борту.

Для эффективного решения поставленных задач и проектирования энергоустановок для летательных аппаратов будут привлечены силы РАН, НАН РА и ОАК, традиционно занимающихся созданием энергоустановок на основе электрохимических источников тока.

В результате проведения намеченных работ в ближайшие 5 лет можно ожидать следующие результаты:

- создание новых электрокатализаторов на основе наноструктурированных носителей и “core-shell” кластеров с загрузкой платины ниже 0,1 мг/см²;
- разработка новых протонообменных мембран, работающих без внешнего увлажнения при температурах 150...160°С. Эти разработки позволят снизить масс-габаритные характеристики ТЭ до 2 кВт/кг и использовать водород, полученный на борту летательного аппарата без его дополнительной очистки;
- предложение безопасных аккумуляторов водорода с обратимой емкостью не менее 6% масс. водорода и испытание высокоэффективных конвертеров углеводородного сырья, пригодных для использования на борту ЛА, и компактных систем очистки водорода;
- испытание ВСУ на основе комбинации электрохимических источников тока, работающих на авиационном керосине.

Достижение планируемых результатов позволит активизировать работы по внедрению новых источников энергии в авиастроение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агаловян Л.А., Геворкян Р.С.** Неклассические краевые задачи анизотропных слоистых балок, пластин и оболочек. - Ереван: Изд-во "Гитутюн" НАН РА, 2005.- 468 с.
2. **Александров В.М., Мхитарян С.М.** Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками.- М.: Наука, 1983.- 488 с.
3. **Шекян Г.Г., Кошкарян Г.Н.** Влияние жесткости деталей на динамическое качество болтовых соединений // Изв. АН АрмССР. Сер. Техн.наук.- 1980.- XXXIII, № 2.
4. **Гаспарян С.С., Казарян Р.А., Манучарян Р.Г.** Экспериментальное исследование флуктуации интенсивности лазерного излучения в атмосфере // Квантовая электроника.- 1973.- Том 16, № 4.-120 с.
5. **Казарян Р.А., Джулакян В.М.** Экспериментальное исследование продольной корреляции лазерного излучения в турбулентной атмосфере // Изв. ВУЗ-ов. Радиофизика.-1980.-Том 23, № 5.- 718 с.
6. **Proctor F.H. (NASA/LARC), Hamilton D.W.** Review of real-time wake vortex prediction models // 12th Conference on Aviation Rang and Aerospace Metrology. -2006.-6.7.
7. **Burnham D.C., Mackey S., Wang F., Wacsaf H.** Wake turbulence Measurements Practical Experience, Considerations, Contrubution Made to NAS and Science to Date // Wake Net3-Greenwake Dedicated Workshop on "Wake Vortex and Wind Monitoring Sensor in all Weather Conditions". - Palaiseau, France, 2010.
8. **Aghasi R., Torosyan, Jonathan R., Tack, Alexander M., Korsunsky.** A new mechanochemical metod for metal coating // Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials.-2012. - Vol.13.- P. 251-256.
9. **Khachatryan A., Aloyan S., Way P.** Graphit to diamond transformation induced by ultrasound cavitation // Diamond and Related Materials. -2008.-17.- P. 931-936.
10. **Ghazarian H., Beylerian N., Baklachev E.** Behaviour of some irradiated solid oxides in different media and in presence of additions // Monomers, Oligomers, Polymers, Composites and Nanocomposites (Polymer Yearbook).- Pub. Date.- 2011.-2nd quarter: Vol.23.- P. 305-313.

ОАО "ОАК", НАН РА. Материал поступил в редакцию 05.02.2013.

Մ.Ա. ՊՈԴՈՍՅԱՆ, Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Վ.Ա. ԿԱՐԳՈՊՈԼՏԵՎ

ԱՎԻԱՇԻՆԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ ՀԵՌԱՆԿԱՐԱՅԻՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ
ՈՐՈՇ ՀԻՄՆԱՐԱՐ ԵՎ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐ

Ներկայացված են Ռուսաստանի միավորված ավիաշինարարական կորպորացիայի և ՀՀ ԳԱԱ-ի միջև կնքված գիտատեխնիկական համաձայնագրի հիմնական դրույթները՝ ուղղված Ռուսաստանի Դաշնության ավիաշինարարական համալիրի գիտատեխնիկական ներուժի ուժեղացման խնդրի լուծմանը: Մասնավորապես, քննարկվում են համագործակցության երեք կարևոր ուղղությունները. մետաղ կոմպոզիտ միացության ամրության և հուսալիության ուսումնասիրություններ՝ հեռանկարային օդային նավատորմի համար, հետազոտություններ՝ ուղղված մոնոդիսպերս նանոբյուրեղների ստացմանը օդանավերը սառցակալումից պաշտպանելու համար, համատեղ ուսումնասիրություններ՝ ուղղված օդանավերի մրրկային անվտանգության ապահովմանը:

Առանցքային բաներ. համաձայնագիր, ամրություն, մետաղ, կոմպոզիտ, նանոտեխնոլոգիա, նանոբյուրեղ, օդանավ, անվտանգություն, մրրիկ:

M.A. POGHOSYAN, R.M. MARTIROSYAN, V.A. KARGOPOLTSEV

SOME FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS IN DEVELOPING ADVANCED
AIRCRAFT TECHNOLOGIES

The main provisions of the Agreement on scientific and technological cooperation between the UAC and the NAS RA aimed at solving the problems of improving the scientific and industrial potential of RF's Aircraft Building Complex. Three important areas of cooperation are particularly specified: investigating the reliability and strength of metal and composite connections for advanced aircraft; developing possibilities of using nanotechnology to produce monodisperse nanocrystals for protecting the aircraft's elements from icing; carrying out joint research to ensure the vortex safety of aircraft.

Keywords: agreement, strength, metal, composite, nanotechnology, nanocrystals, aircraft, safety, vortex.

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Շ.Զ. ՄԻՍԹԱՆԻ, Մ.Է. ՀԱՅԿԱԶՅԱՆ

ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՑԻՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՑԹՆԵՐԻ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Դիտարկվում են 40X մակնիշի պողպատից պատրաստված մեքենամասերի մակերևութային շերտերում միկրոկարծրությունների և միկրոանհարթությունների պարամետրերի փոփոխման առանձնահատկությունները մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացման (ՄՊԴ) տեխնոլոգիայի կիրառման արդյունքում: Օգտագործելով տվյալների մշակման փոքրագույն քառակուսիների մեթոդը, որը լրացված է լավարկային ընթացակարգերով, կատարված է ամրացման գործընթացի ձևայնացում և ստացված են մաթեմատիկական մոդելներ մակերևութային շերտի ֆիզիկամեխանիկական պարամետրերի որոշման համար՝ կախված ամրացման ռեժիմային պայմաններից:

Առանցքային բառեր. մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացում, միկրոկարծրություն, մակերևութային անհարթություններ, փոքրագույն քառակուսիների մեթոդ, մաթեմատիկական մոդել:

Մեքենամասերի և հանգույցների կրողունակության, երկարակեցության և հուսալիության բարձրացման նպատակով լայնորեն օգտագործվում են մակերևութային պլաստիկ դեֆորմացման (ՄՊԴ) մեթոդները, որոնց շնորհիվ աշխատանքային մակերևութային շերտերը ստանում են անհրաժեշտ դեֆորմացիոն ամրացում (մակերկուփում): ՄՊԴ-ն փոքրացնում է մակերևութային միկրոանհարթությունների բարձրությունները, բարձրացնում կարծրությունը և մակերևութային շերտերում ստեղծում մնացորդային սեղմող լարումներ, որոնց շնորհիվ բարձրանում են մեքենամասերի և հանգույցների շահագործական ցուցանիշները՝ հոգնածային և հարակցման դիմադրությունը, կոնտակտային դիմացկունությունը և մաշակայունությունը: Այն հատկապես արդյունավետ է կոնտակտային և տեխնոլոգիական բնույթի լարումների կոնտակտներ ունեցող մեքենամասերի համար [1,2]:

ՄՊԴ-ի ազդեցությունը նշված մեքենամասերի ֆիզիկամեխանիկական ցուցանիշների վրա ուսումնասիրելու նպատակով կատարված է փորձարարական հետազոտություն: Խառատային հաստոցի վրա տեղակայված դեֆորմացնող գործիքով, որի աշխատանքային տարրը շրջագլորման սկզբունքով գործող գնդիկ է, պողպատյա փորձանմուշների մի խմբաքանակ ենթարկված է մակերևութային ամրացման, իսկ այնուհետև կատարվել են մակերևութային շերտերի խորդուրորդությունների պարամետրերի և ըստ խորության՝ միկրոկարծրությունների չափումներ $K_{\text{Либр}}-210$ մակնիշի պրոֆիլաչափ-պրոֆիլագրով և ПМТ-3 սարքով: Փորձանմուշների քանակը՝ $n=15$, նյութը՝ կոնստրուկցիոն պողպատ 40X, ГОСТ4543-81, $\sigma_B = 870 \text{ ՄՊա}$, $H_B =$

=215...250: Նախնական մշակման ռեժիմներն են. $n=560$ պտ/րոպ, $V=50$ մ/րոպ, $S=0,1$ մմ/պտ, $t=0,5$ մմ, $d=35,5$ մմ, մշակման նախնական մակերևութային մաքրությունը՝ $R_a = 1,71$ մկմ, $R_z = 8,83$ մկմ, $R_{max} = 10,08$ մկմ: Փորձանմուշների արտաքին մակերևութները դեֆորմացնող գործիքի պտտվող գնդիկի ներխուժման և երկայնական մատուցման միջոցով ենթարկվել են ամրացման՝ կիրառելով քսայուղ (масло индустриальное, И-20А, ГОСТ 20799-88): Մակերևույթը մշակող գործիքի պարամետրերն են. գնդիկի տրամագիծը՝ $d_g = 8,731$ մմ, նյութը՝ պողպատ IIIХ15, ГОСТ 801-88, մակերևութային կարծրությունը՝ $HRC=62...65$: Ամրացման ռեժիմային պարամետրերն են. $F=100, 200, 300, 400, 500$ Ն, F -ի յուրաքանչյուր արժեքի համար $S=0,050, 0,100$ և $0,155$ մմ/պտ մատուցումներով: Կատարված են ամրացված մակերևութների միկրոանիսարթությունների R_a, R_z, R_{max} պարամետրերի չափումներ բոլոր 15 փորձանմուշների համար:

Պլաստիկ դեֆորմացված մակերևութային շերտերում $\Delta h = 0 \dots 0,3$ մմ խորությամբ միկրոկարծրությունների չափման նպատակով նուրբ հղկմամբ $\alpha = 2^\circ 20'$ անկյան տակ արտաքին մակերևութի վրա ստացվել են հարթակներ, որոնց համաչափության առանցքով կատարվել են այդ չափումները. $l_1 = 0 \dots 2$ մմ տեղամասում՝ $0,2$ մմ, իսկ $l_2 = 2 \dots 7$ մմ տեղամասում՝ $0,5$ մմ քայլերով (20 չափում):

Հետազոտության արդյունքների ընդհանրացման և ստացված առնչությունները հաշվարկանախագծային, տեխնոլոգիական, սպասարկման և շահագործման գործընթացներում օգտագործելու նպատակով անհրաժեշտ է ձևայնացնել պատասխանատու մեքենամասերի (լիսեռներ, ստամանիվներ, առանցքակալային վռաններ և այլն) աշխատանքային մակերևութների ամրացման գործընթացները և դուրս բերել մշակման տեխնոլոգիական ռեժիմային պարամետրերի առնչությունը մակերևութային շերտերի ֆիզիկամեխանիկական ցուցանիշների հետ, որոնք փաստորեն այդ գործընթացների մաթեմատիկական մոդելներն են: Ընդհանուր դեպքում դա արտահայտվում է բազմապարամետրական ֆունկցիոնալ կապով՝ $\varphi(\sigma_B, \sigma_T, HB, HV, l, \Delta h, V, S, t, F) = 0$, որը գործնական հաշվարկներում օգտագործելու նպատակով հարմար է ներկայացնել փոխկապակցված պարամետրական հավասարումների համակարգի տեսքով.

$$HV = f_1(\ell), HV = f_2(S), HV = f_3(F), R_a, R_z, R_{max} = f_{4,5,6}(F), \dots, \quad (1)$$

որը թույլ է տալիս հաշվարկներում կամ տեխնոլոգիական գործընթացներում, որն է ցուցանիշի արժեքն ապահովելու պահանջից ելնելով, համալիր կարգով որոշել ցուցանիշների ողջ համակարգը:

$HV = f_1(\ell)$ առնչության դուրսբերման նպատակով չափումները դասակարգված են 15 խմբաքանակներում (ըստ F, S -ի), իսկ $R_a, R_z, R_{max} = f_{4,5,6}(F)$ -ի համար՝ 9 խմբաքանակներում (ըստ S -ի): Փորձարկումների տվյալները վկայում են, որ նշված ֆունկցիաների տեսքի և գրադիենտի, ինչպես նաև $HV_{max}, \Delta h_{max}$ և $(R_a, R_z, R_{max})_{min}$

արժեքների վրա ազդող հիմնական գործոնը գրտնակիչի ճնշման F ուժն է: S մատուցման ազդեցությունը համեմատաբար ցածր է և այն հիմնականում բացահայտվում է միկրոանհարթությունների ձևավորման գործընթացում:

Նշված ֆունկցիաների դուրսբերման համար օգտագործված է փոքրագույն քառակուսիների մեթոդը, համաձայն որի՝ հետազոտվող $y_x = f(x, a_0, a_1, a_2, \dots, a_h)$ ֆունկցիոնալ կապի $a_0, a_1, a_2, \dots, a_h$ գործակիցները որոշվում են հետևյալ պայմանից՝

$$E = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{xi})^2 = \sum [y_i - f(x, a_0, a_1, a_2, \dots, a_h)]^2 \Rightarrow \min,$$

որը բերվում է նորմալ հավասարումների համակարգի լուծմանը [3].

$$\partial E / \partial a_0 = 0, \quad \partial E / \partial a_1 = 0, \quad \partial E / \partial a_2 = 0, \quad \dots, \quad \partial E / \partial a_h = 0, \quad (2)$$

որտեղ e_i -ն շեղումն է y_i փորձարարական և դրան համապատասխանող y_{xi} հաշվարկային տվյալների միջև: (2) համակարգերի տեսքերն ուղղագծային, քառակուսային և խորանարդային պարաբոլական, ինչպես նաև աստիճանային հիպերբոլական առնչությունների համար՝

$$y_x = a_0 + a_1 x, \quad (3)$$

$$y_x = a_0 + a_1 x + a_2 x^2, \quad (4)$$

$$y_x = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3, \quad (5)$$

$$y_x = a_0 + a_1 x^{-(m+\Delta m)}, \quad (6)$$

տրված են [3,4]-ում: (3)-(6) ֆունկցիաներից որևէ մեկի ճիշտ ընտրությունը կարևոր նշանակություն ունի հետագա հաշվարկներում պարամետրերի քանակական գնահատման համար, մանավանդ, երբ դա վերաբերում է քիչ հետազոտված գործընթացների և երևույթների ուսումնասիրմանը: ՓՔՄ-ը թույլ է տալիս իրականացնել այդ համեմատական վերլուծությունը, եթե հաշվարկներում ներմուծվի լրացուցիչ լավարկային ընթացակարգ՝ ներկայացված մաթեմատիկական մոդելներից ընտրելու այն տարբերակը, որն ապահովում է հետևյալ պայմանը.

$$\min(E \Rightarrow \min) : \quad (7)$$

Նման մոտեցումը նշանակալիորեն ապահովում է մաթեմատիկական մոդելի համապատասխանությունը հետազոտվող գործընթացին և բացառում է դրա ընտրության սուբյեկտիվ բնույթը [4]: Զգալի ծավալի հաշվարկներ կատարելու համար ստեղծված է կիրառական ծրագրային փաթեթ, որը ներառում է նշված հաշվարկային ընթացակարգերը [4]:

Հաշվարկներն ըստ (1)-(7)-ի (աղ. 1) բացահայտում են ամրացման գործընթացի հիմնական գործոնի՝ ճնշման F ուժի տարաբնույթ ազդեցությունը մակերևութային շերտերում $HV = f_1(\ell)$ միկրոկարծրությունների փոփոխման օրինաչափությունների վրա (նկ. 1): $F=100$ Ն-ի դեպքում HV -ի գրադիենտը թույլ է, որն էլ արտահայտվում է (3) ուղղագծային կապով, $F=100...400$ Ն միջակայքում HV -ի գրադիենտը հետզհետե աճում է, որը բնութագրվում է (5) խորանարդային պարաբոլական առնչությամբ. այն նաև գերակշռում է մյուսների համեմատ (թթ. 1, 4...10 և 13 փորձանմուշներում): $F=300...400$ Ն միջակայքում, որտեղ նշագրվել են HV_{max} արժեքները, գերադասելի են (6) աստիճանային հիպերբոլական առնչությունները (նկ. 1 գ):

$R_a, R_z, R_{max} = f_{4,5,6}(F)$ ֆունկցիաների համար դիտարկված (3)-(6) առնչություններից որպես մաթեմատիկական մոդել գերադասելի է (5) խորանարդային պարաբոլականը, որը փորձարկումների ողջ խմբաքանակի համար ապահովում է $min(E_{min})$ պայմանը (աղ. 2): Համեմատական կարգով այլընտրանքային է (4) քառակուսային պարաբոլական առնչությունը, որը հատկապես $R_a = f_4(F)$ ֆունկցիայի համար շատ մոտ է (5)-ին: Նույն ֆունկցիայի համար այնուհետև կարելի է նշել նաև (1) զծային առնչությունը, սակայն $R_z = f_5(F)$, $R_{max} = f_6(F)$ -ի համար առաջնայինը (5) առնչությունն է (նկ. 2):

Աղյուսակ 1

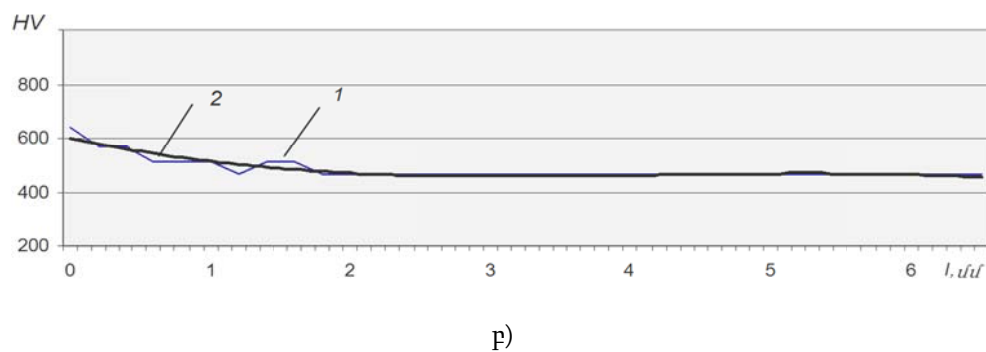
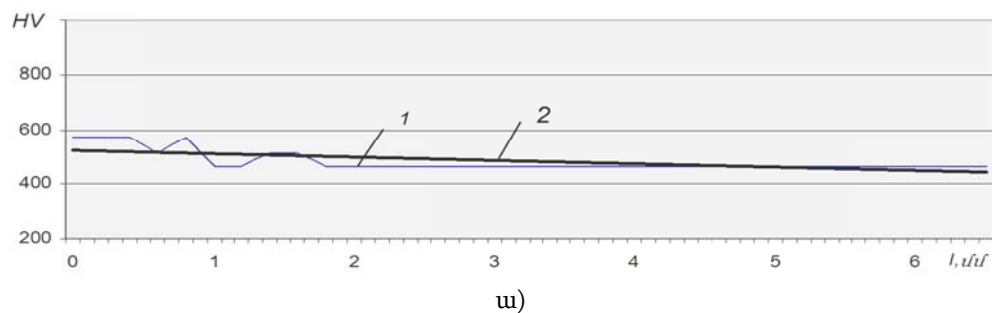
Տվյալների մաթեմատիկական միջարկման արդյունքներն ըստ $HV = f_1(\ell)$ -ի

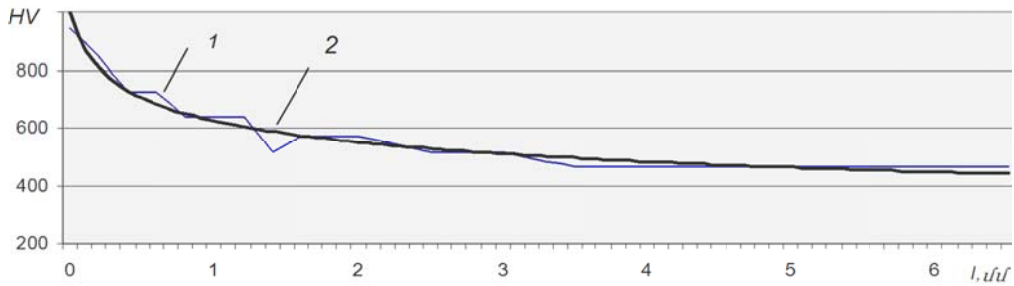
Փորձանմուշի համարը	$F, \text{Ն}$	E-ի արժեքներն ըստ (3), (4), (5), (6) ֆունկցիաների				E_{min} արժեքներն ապահոված (3), (5), (6) ֆունկցիաների պարամետրերը				
		զծային (3)	քառակուսային (4)	խորանարդային (5)	հիպերբոլային (6)	m	a_0	a_1	a_2	a_3
1	100	41030,62	18901,09	17722,33	26009,37	-	592,12	-7,5304	0,1372	-0,0008
2		51371,97	57591,24	64083,70	65675,60		521,93	-1,2273	-	-
3		52399,02	24345,15	17029,04	14214,00		0,0891	0	652,9200	-
4	200	37154,87	16119,08	10011,12	12432,61	-	614,65	-12,1990	0,3039	-0,0024
5		46196,20	23775,08	22615,83	22771,75		637,81	-12,5120	0,2863	-0,0021
6		184760,55	68805,13	32712,89	41464,48		818,66	-26,4570	0,6354	-0,0049
7	300	245454,96	52107,85	16322,83	68472,01	-	866,72	-28,039	0,6200	-0,0044
8		61400,97	29167,51	15429,13	19269,56		641,06	-14,8070	0,3769	-0,0030
9		84034,57	25842,75	12592,61	20683,13		705,97	-17,8410	0,4176	-0,0031
10	400	301741,60	153313,03	61198,09	30101,03	-	847,34	-34,8850	0,9329	-0,0076
11		214159,12	62787,99	42466,31	36999,40		0,1964	0	1001,1000	-
12		220598,90	72811,48	47293,63	35828,95		0,1896	0	969,7900	-
13	500	4316,88	1262,91	626,38	687,45	-	855,85	-27,9740	0,6502	-0,0049
14		95873,71	38089,74	32502,25	29884,23		0,1560	0	869,0400	-
15		2003008,58	35630,22	9488784,94	29951,63		0,1134	0	707,6400	-

Ծանոթություն. ստվերված են E_{min} արժեքները:

Հավարկային մաթեմատիկական մոդելի ընտրությունը R_a , R_z , $R_{max} = f_{4,5,6}(F)$ - ի համար

N	E-ի արժեքներն ըստ (1)- (4) ֆունկցիաների				(3) ֆունկցիայի			
	գծային (3)	քառակուսային(4)	խորանարդային (5)	հիպերբոլային (6)	a_0	a_1	$a_2 \times 10^{-6}$	$a_3 \times 10^{-8}$
R_a								
1	0,12497	0,04877	0,03643	0,09245	1.67389	-0.0068	15.0	-1.00
2	0,05915	0,02434	0,02240	0,10959	1.68246	-0.0050	7.2	-0.50
3	0,02885	0,02633	0,02596	0,17596	1.68349	-0.0028	-1.0	0.24
R_z								
4	8,15596	2,98566	0,58210	0,67342	8.68063	-0.0572	180	-20
5	2,93168	1,43301	0,53977	2,13913	8.70008	-0.0389	110	-10
6	1,47331	1,31988	0,95628	4,60133	8.64794	-0.0264	63	-7
R_{max}								
7	10,50625	3,40120	0,83553	1,60877	9.90444	-0.0616	190	-20
8	5,15267	1,32974	0,43086	0,67569	9.97048	-0.0443	120	-10
9	1,91078	0,92061	0,68876	2,00305	9.91516	-0.0275	61	-6

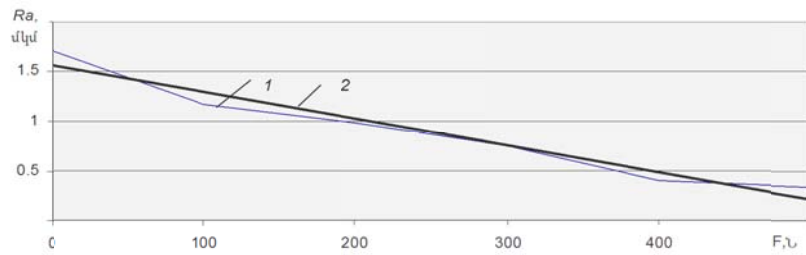




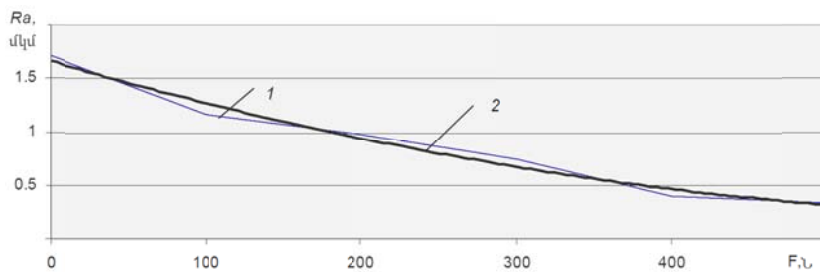
գ)

Նկ. 1. E_{min} արժեքներն ապահոված $HV = f_1(\ell)$ ֆունկցիաները .

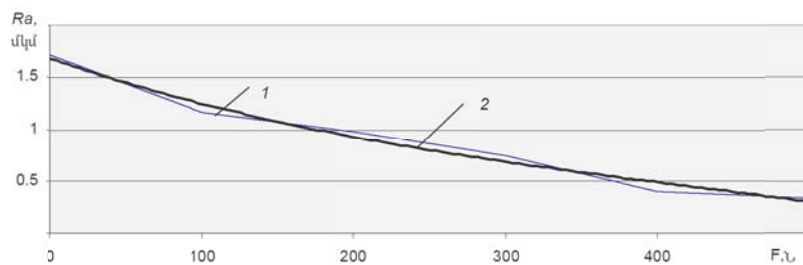
ω – ուղղագծային (3), թ. 2, p – խորանորդային պարաբոլ (5), թ. 4, q – հիպերբոլային (6), թ. 11 փորձանմուշների համար. 1 – փորձարարական բեկյալ գծերը, 2 – $HV = f_1(\ell)$ ֆունկցիաները



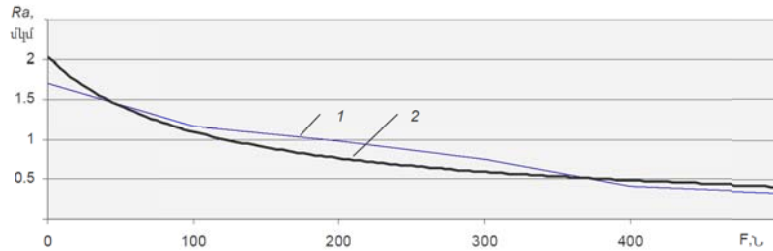
ա)



բ)



գ)



դ)

Նկ. 2. $R_a = f_4(F)$ առնչության լավարկային մաթեմատիկական մոդելի ընտրությունը թ. 2 փորձարկումների խմբաքանակի համար (աղ. 2, $S=0,1$ մմ/սմ). ա), բ), գ), դ)-ն համապատասխանում են (3)-(6) ֆունկցիաներին.

1-փորձարարական տվյալները, 2-(3) - (6) ֆունկցիաները

Ստացված արդյունքները վկայում են, որ մշակված կիրառական ծրագրային փաթեթը զգալիորեն ընդլայնում է ՓՔՄ-ի հնարավորությունները, թույլ տալով հետազոտության շրջանակներում քանակականից անցնելու նաև որակական գնահատումների, քանի որ հաշվարկներում (7) պայմանի ընդգրկումը հնարավորություն է ընձեռում կատարելու լավարկային և այլընտրանքային լուծումներ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Систани Ш. Дж.** Повышение несущей способности и надежности логистического оборудования применением упрочняющих технологий // Мат. Междунар. науч.-практ. конф. Арм.-Польск. экон. фор.: “Логистика, упаковка, полиграфия - 2011”, г. Ереван, 17-18 окт. 2011г. – Ереван: Арменпак, 2012. – С. 60-67.
2. **Дашенко А.Ф., Кравчук В.С., Иоргачев В.Д.** Несущая способность упрочненных деталей машин. - Одесса: Астропринт, 2004.-160 с.
3. **Ստախյան Մ.Գ.** Գիտափորձի արդյունքների վիճակագրական մշակման մեթոդները.- Երևան: ՀՊՃՀ հրատ., 2003.-100 էջ:
4. **Стакян М.Г., Маргарян Э.А., Ильев Д.Б.** Расширение возможностей метода наименьших квадратов, применяемого в различных исследованиях // Международный научный журнал (г. Москва). - 2011.- N4.- С.65-70.

ՀՊՃՀ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.05.2012:

М.Г. СТАКЯН, Ш.ДЖ. СИСТАНИ, М.Э. АЙКАЗЯН

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ
РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

На основе технологии поверхностного пластического деформирования рассматриваются особенности изменения микротвердостей и параметров микронеровностей на поверхностных слоях деталей, изготовленных из стали 40Х. Используя метод наименьших квадратов для обработки данных, который дополнен оптимизационными процедурами, произведена формализация процесса упрочнения и получены математические модели для определения физико-механических параметров поверхностного слоя в зависимости от режимных параметров упрочнения.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, микротвердость, поверхностные неровности, метод наименьших квадратов, математическая модель.

M.G. STAKYAN, SH.J. SISTANI, M.E. HAYKAZYAN

MATHEMATICAL MODELING OF THE SURFACE STRENGTHENING PROCESS

On the basis of the surface plastic deformation technology, the peculiarities of changes in microhardnesses and unevenness parameters on the surface layers of the parts made of steel 40X are considered. By using the method of the least squares supplemented by optimization procedures for data elaboration, formalization of the strengthening process is carried out and mathematical models for defining the physical and mechanical parameters of the surface layer depending on the regime parameters of strengthening are obtained.

Keywords: surfaces plastic deformation, microhardness, surface unevennesses, method of the least squares, mathematical model.

Г.Л. ПЕТРОСЯН, Г.Г. ХАЧАТРЯН, А.Г. ПЕТРОСЯН

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЬЦА ПО ДАННЫМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Решается задача процесса раскатки кольца с использованием дифференциальных уравнений равновесия элемента, условия пластичности Треска – Сен-Венана, компьютерных данных геометрических параметров процесса раскатки кольца и граничных условий. В случае численного вычисления компонентов напряженного состояния кольца зона его деформирования разделена на десять равномерных элементов. Дан анализ результатов расчета безразмерных величин окружных напряжений и контактных нормальных давлений.

Ключевые слова: компоненты напряженного состояния, компьютерные геометрические параметры, граничные условия.

Введение. Вопросам определения компонентов напряженно-деформированного состояния процессов раскатки кольца посвящено много исследований и, в частности, [1-3].

В [1] аналитическим методом исследовано деформированное состояние процесса раскатки кольца большого диаметра, в результате чего было выявлено, что основные геометрические параметры процесса раскатки взаимосвязаны. Полученные формулы позволили по некоторым начальным параметрам определить другие.

В [2] выявлены особенности определения текущих взаимосвязанных геометрических параметров процесса раскатки кольца большого диаметра, на основе которых исследовано напряженное состояние кольца. Получена система уравнений для определения напряжений в деформированной зоне кольца. Показано, что в случае увеличения диаметра кольца путем изменения текущих геометрических параметров эти уравнения преобразуются в уравнения прокатки плоской полосы.

В [3] компоненты напряженного состояния процесса раскатки кольца прямоугольного поперечного сечения определены с использованием аналитических зависимостей текущих геометрических параметров кольца. Для выполнения численных расчетов зона деформирования кольца разделена на десять равномерных элементов. Дан анализ результатов расчета безразмерных величин окружных напряжений и контактных нормальных давлений.

Отметим, что процесс раскатки кольца с использованием аналитических зависимостей текущих геометрических параметров является достаточно сложным, что обусловлено его многопараметричностью.

Исходя из вышеизложенного, особую актуальность представляют работы, упрощающие вычисления компонентов напряженного состояния процесса раскатки кольца.

Целью настоящей работы является вычисление компонентов напряженного состояния процесса раскатки кольца большого диаметра прямоугольного поперечного сечения с использованием данных текущих компьютерных геометрических параметров.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в случае разделения зоны деформирования кольца на определенное количество конечных элементов используем основные формулы численных расчетов [3], написанных в безразмерных величинах окружного напряжения, его приращения и наружного контактного давления:

$$\bar{\sigma}_\theta = \sigma_\theta / \sigma_T, \quad \overline{\Delta\sigma}_\theta = \Delta\sigma_\theta / \sigma_T, \quad \bar{p}_1 = p_1 / \sigma_T.$$

Формула для определения приращения окружного напряжения в его различных сечениях является первым уравнением равновесия элемента (рис. 1):

$$\overline{\Delta\sigma}_\theta = -\bar{\sigma}_\theta \frac{\Delta h_c}{h_c} + \frac{\bar{p}_1 \Delta h_{1c}}{h_c} (1 \mp 2f / \operatorname{tg} \varphi_{1c} + \operatorname{tg} \varphi_{2c} / \operatorname{tg} \varphi_{1c}). \quad (1)$$

Формула, связывающая внутреннее контактное давление кольца с наружным, является вторым уравнением равновесия элемента:

$$\bar{p}_2 = \bar{p}_1 \frac{\Delta h_{1c}}{\Delta h_{2c}} \frac{\operatorname{tg} \varphi_{2c}}{\operatorname{tg} \varphi_{1c}}. \quad (2)$$

Условие пластичности Треска–Сен-Венана:

$$\bar{p}_1 = 1 - \bar{\sigma}_\theta. \quad (3)$$

В формулах (1)-(3) $\bar{\sigma}_\theta$ – окружное напряжение; h_c – текущее значение толщины кольца; Δh_c и Δh_{1c} , Δh_{2c} – ее приращение и составляющие; f – коэффициент трения; φ_{1c} и φ_{2c} – текущие контактные углы соответствующих валков; σ_T – предел текучести материала кольца.

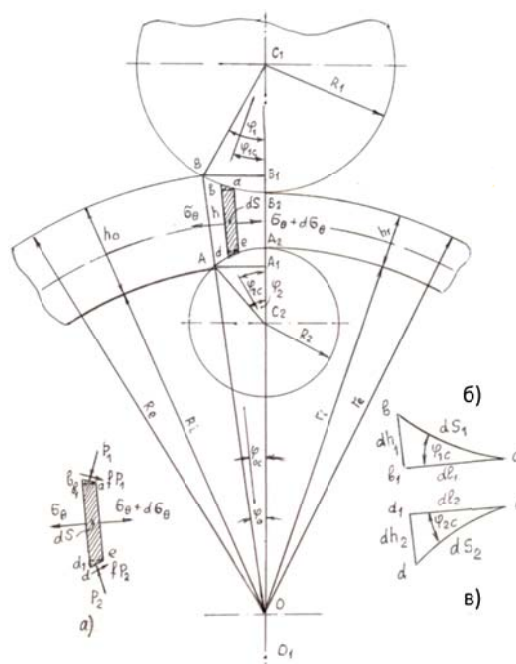


Рис. 1. Схема раскатки кольца: а, б, в - части, отделенные двумя поперечными сечениями, и элементы соответствующих его концов

Компьютерные взаимосвязанные данные геометрических параметров раскатки кольца (рис. 1) определены для двух случаев начальных геометрических технологических параметров [1]: постоянных для обоих случаев - $h_0 = 7 \text{ мм}$; $h_1 = 3 \text{ мм}$; $R_1 = 200 \text{ мм}$ и отличающихся друг от друга: 1) $R_e = 400 \text{ мм}$; $R_2 = 74,5 \text{ мм}$; $\varphi_0 = 3^\circ$; $\varphi_1 = 6^\circ$; $\varphi_2 = 16^\circ$; 2) $R_e = 1000 \text{ мм}$; $R_2 = 116,5 \text{ мм}$; $\varphi_0 = 1,4^\circ$; $\varphi_1 = 7^\circ$; $\varphi_2 = 12^\circ$.

Данные компьютерного моделирования в среде “Solidworks” (рис. 2) соответственно приведены в табл. 1 и 2.

Для выполнения численных расчетов в первом случае зона деформирования кольца разделена на десять равномерных элементов с центральными углами $0,3^\circ$, а во втором случае используются пять элементов с центральными углами $0,28^\circ$.

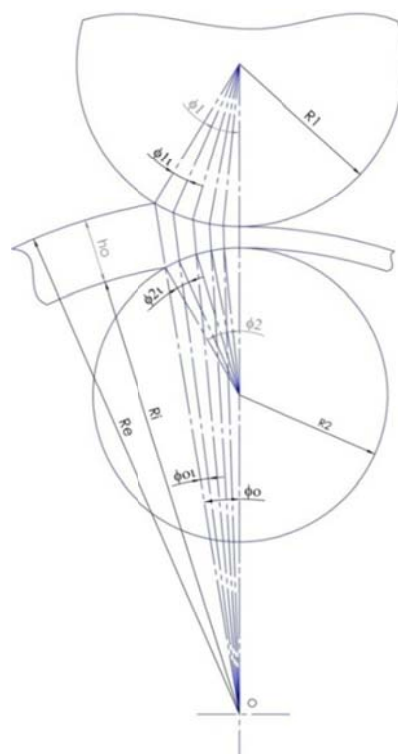


Рис. 2. Компьютерная схема раскатки кольца

Таблица 1

Компьютерные данные геометрических параметров раскатки кольца при $\varphi_0 = 3^\circ$,
 $R_e = 400 \text{ мм}$, $R_2 = 74,5 \text{ мм}$

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta\varphi_{0i}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$\Delta\varphi_{1i}$	0,598	0,605	0,603	0,602	0,601	0,599	0,599	0,598	0,598	0,598
$\Delta\varphi_{2i}$	1,603	1,619	1,614	1,609	1,606	1,602	1,599	1,598	1,597	1,596
R_{ei} , мм	399,7	399,4	399,2	398,9	398,8	398,6	398,5	398,4	398,4	398,4
R_{ii} , мм	393,5	393,9	394,2	394,5	394,8	395,0	395,2	395,3	395,3	395,4

Таблица 2

Компьютерные и расчетные данные геометрических параметров раскатки кольца
при $\varphi_0 = 1,4^0$, $R_e = 1000$ мм, $R_2 = 116,5$ мм

Параметры	1	2	3	4	5
$\Delta\varphi_{0i}$	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
$\Delta\varphi_{1i}$	1,395	1,406	1,402	1,399	1,398
$\Delta\varphi_{2i}$	2,359	2,377	2,368	2,363	2,360
R_{ei} , мм	999,359	998,856	998,498	998,284	998,212
R_{ii} , мм	993,793	994,416	994,859	995,124	995,212
Δh_{ic} мм	0,641	0,503	0,358	0,214	0,072
Δh_{2c} мм	0,793	0,623	0,443	0,265	0,088
Δh_c мм	1,434	1,126	0,801	0,479	0,160
$\tilde{h}_c$ мм	5,526	4,400	3,599	3,120	2,960
$\Delta h_{ic}/\Delta h_{2c}$	0,808	0,807	0,808	0,808	0,818

Численные данные компонентов напряженного состояния кольца определяются только для первого случая при коэффициенте трения $f = 0,2$. Принимается также, что приращения других углов также разделены равномерно с шагами $0,6^0$ и $1,6^0$ (табл. 3).

В формуле приращения окружного напряжения (1) для зоны отставания в скобках используется знак "минус" (-), а для зоны опережения – знак "плюс" (+).

Численное интегрирование основной формулы (1) выполняется с использованием следующего граничного условия: при входе и выходе из зоны деформирования кольца окружное напряжение отсутствует $\overline{\sigma_{\theta 0}} = 0$. Это позволяет по формуле (1) определить приращение окружного напряжения $\overline{\Delta\sigma_{\theta 1}}$ в конце первого элемента. При этом величина окружного напряжения в данном сечении кольца будет найдена по следующей зависимости $\overline{\sigma_{\theta 1}} = \overline{\sigma_{\theta 0}} + \overline{\Delta\sigma_{\theta 1}}$. Отметим, что для других элементов можно использовать следующую формулу: $\overline{\sigma_{\theta l}} = \overline{\sigma_{\theta(l-1)}} + \overline{\Delta\sigma_{\theta l}}$.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 3, показывают, что в данном случае при выходе из зоны деформирования кольца граничное условие удовлетворяется приближенно - в конце десятого элемента остаются безразмерные сжимающие напряжения величиной 0,214. Это объясняется максимальными безразмерными величинами окружного напряжения (1,056) и его приращением (0,347). При этом нейтральное сечение находится между элементами 8 и 9, где приращение окружного напряжения меняет знак, а это напряжение и контактные давления имеют экстремальные значения. Отмеченное означает, что точное нахождение места нейтрального слоя разделением деформированной зоны меньшего числа равномерными элементами невозможно. В действительности нейтральный слой должен находиться между элементами 7 и 8. Точность этого граничного условия можно повысить увеличением числа элементов разделения в зоне нейтрального слоя, подобно [4], уменьшением размеров элементов.

Таблица 3

Данные численного моделирования процесса раскатки кольца

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ_{1c}^0	6,0	5,4	4,8	4,2	3,6	3,0	2,4	1,8	1,2	0,6
φ_{2c}^0	16,0	14,4	12,8	11,2	9,6	8,0	6,4	4,8	3,2	1,6
$\Delta h_{1c}, мм$	0,310	0,280	0,249	0,211	0,183	0,148	0,114	0,082	0,049	0,016
$\Delta h_{2c}, мм$	0,446	0,404	0,355	0,307	0,259	0,215	0,161	0,117	0,070	0,024
$\Delta h_c, мм$	0,756	0,684	0,604	0,518	0,442	0,363	0,275	0,199	0,119	0,040
$h_c, мм$	6,244	5,560	4,956	4,438	3,996	3,633	3,358	3,159	3,040	3,000
$\Delta h_{1c}/\Delta h_c$	0,05	0,05	0,05	0,047	0,045	0,041	0,033	0,025	0,016	0,005
$\Delta h_c/h_c$	0,12	0,12	0,12	0,117	0,111	0,100	0,082	0,063	0,039	0,013
$\Delta h_{1c}/\Delta h_{2c}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$tg\varphi_{2c}/tg\varphi_{1c}$	2,731	2,717	2,705	2,698	2,689	2,682	2,677	2,674	2,671	2,660
$-\Delta\sigma_\theta$	0,004	0,025	0,051	0,082	0,122	0,181	0,244	0,347	-0,563	-0,279
$-\bar{\sigma}_\theta$	0,004	0,029	0,080	0,162	0,284	0,465	0,709	1,056	0,493	0,214
$\bar{p}_1$	1,004	1,029	1,080	1,162	1,284	1,465	1,709	2,056	1,493	1,214
$\bar{p}_2$	1,919	1,957	2,045	2,195	2,417	2,750	3,202	3,848	2,791	2,260

Заключение. Определены числовые данные компонентов напряженно-деформированного состояния при раскатке кольца прямоугольного поперечного сечения с использованием компьютерных данных геометрических параметров раскатки кольца.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта N 11-2d435.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Պետրոսյան Գ.Լ., Պետրոսյան Հ.Գ., Մոտալլեբի Ս.Ռ. Մեծ կորության շառավղով օղակի գրտնակման գործընթացի վերլուծական մեթոդով մոդելավորումը: Հաղորդում 1. Օղակի գրտնակման գործընթացի երկրաչափական պարամետրերի որոշման առանձնահատկությունները // Հայաստանի ճարտ. ակադ. Լրաբեր. – 2011. – Հ. 8, № 2. – էջ 337-341:
2. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Моталлеби С.Р. Особенности определения компонентов напряженного состояния процесса раскатки кольца большого радиуса кривизны // Изв. НАН Армении. Сер. Механика.-2012. -Том 65, № 3.- С. 61-67.
3. Петросян Г.Л., Петросян А.Г., Сафарян М.Б., Моталлеби С.Р. Вопросы численного и экспериментального моделирования процесса раскатки кольца большого радиуса кривизны // Сборник трудов Международной научно-технической конференции “Машиностроение и Техносфера XXI века”.- Донецк, 2012.- Том 2.- С. 273-275.
4. Պետրոսյան Գ., Լևոնյան Հ., Խաչատրյան Հ. Հարթ շերտի զլոցման գործընթացի հետազոտումը դեֆորմացված շրջանագծային եզրի՝ շոշափողներով մոդելավորմամբ// ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ)-ի ԼՐԱԲԵՐ. Գիտական և մեթոդական հոդվածների ժողովածու.- Երևան: Ճարտարագետ, 2010.- Հատոր 2, N1.- էջ 70-73:

ГИУА (Политехник). Материал поступил в редакцию 10.07.2012.

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Հ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Հ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

**ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՍԲ ՍՏԱՑՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ
ՏՎՅԱԼՆԵՐՈՎ ՄԵԾ ԿՈՐՈՒԹՅԱՆ ՇԱՌԱՎՂՈՎ ՕՂԱԿԻ ԳՐՏՆԱԿՄԱՆ
ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ**

Օղակի գրտնակման գործընթացի խնդիրը լուծվել է՝ օգտագործելով տարրի հավասարակշռության դիֆերենցյալ հավասարումը, Տրեսկա – Սեն-Վենանի պլաստիկության պայմանը, օղակի գրտնակման գործընթացի համակարգչային ընթացիկ երկրաչափական պարամետրերի տվյալները և եզրային պայմանները: Օղակի լարվածային վիճակի բաղադրիչների թվային հաշվարկների դեպքում դրա դեֆորմացված գոտին բաժանվում է տասը հավասարաչափ տարրերի: Ներկայացված է շրջանային լարումների և հպակային նորմալ ճնշումների չափում չունեցող մեծությունների հաշվարկային արդյունքների վերլուծություն:

Առանցքային բառեր. լարվածային վիճակի բաղադրիչներ, համակարգչային երկրաչափական պարամետրեր, եզրային պայմաններ:

G.L. PETROSYAN, H.KH. KHACHATRYAN, H.G. PETROSYAN

**THE METHOD OF CALCULATION OF STRESS STATE COMPONENTS IN THE
PROCESS OF RING EXPANSION BY THE DATA OF RECEIVED BY COMPUTER
MODELLING GEOMETRICAL PARAMETERS**

The problem of the ring expansion process has been solved by using differential equations of element equilibrium, plasticity conditions of Treska – Sen-Venan, computer data of current geometrical parameters of ring expansion process and boundary conditions. In case of numerical calculation the deformation zone of the ring is divided into ten equal elements. The results of calculation of measureless dimensions of cylindrical stress and contact normal pressures are analyzed.

Keywords: stress state components, computer geometrical parameters, boundary conditions.

Л.М. БУНИАТЯН

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РУКИ С
УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Выведены линеаризованные уравнения движения искусственной руки (ИР) с учетом динамики исполнительных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением. Даны трехмерные графики зависимости элементов матрицы инерции и вектора гравитационных сил нелинейных уравнений движения ИР с шестью степенями свободы от обобщенных координат (углов поворота механических узлов ИР). Предложена методика проектирования и исследования устойчивости системы управления ИР на основе метода характеристических передаточных функций.

Ключевые слова: искусственная рука, система управления, нелинейные уравнения движения, метод характеристических передаточных функций.

Введение. Проблема создания современных протезов верхних конечностей связана с решением целого ряда сложных научно-технических задач [1]. Среди них важное место занимает задача разработки системы управления механическим движением искусственной руки. По существу, механические элементы протезов рук являются сложными устройствами со многими степенями свободы, число которых может достигать 22-х и более [1]. Движение механических узлов искусственной руки (ИР) описывается сложными взаимосвязанными нелинейными уравнениями, которые в общем случае изучаются методами теории роботов-манипуляторов [2]. В настоящей статье дается вывод линеаризованных уравнений движения ИР с n степенями свободы с учетом динамики исполнительных двигателей, в качестве которых приняты двигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Предложена методика построения характеристических годографов линеаризованной системы управления движением ИР, не требующая определения передаточной матрицы системы с n входами и n выходами.

Уравнения движения ИР с учетом динамики исполнительных двигателей. Уравнение движения робота-манипулятора в общем виде может быть записано в следующей векторной форме [2]:

$$M(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + B \left(q, \frac{dq}{dt} \right) \frac{dq}{dt} + C(q) = \tau, \quad (1)$$

где q - n мерный вектор обобщенных координат (угловых вращений) с компонентами q_i , $i = 1, 2, \dots, n$ (для краткости мы будем опускать зависимость вектора

$q(t)$ от времени t); $M(q)$ - симметричная положительно-определенная матрица моментов инерции, зависящая от вектора q ; $B(q, dq/dt)$ - матрица центробежных и кориолисовых ускорений; $C(q)$ - вектор гравитационных сил; τ - вектор приложенных внешних моментов.

Уравнения движения i -го двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с учетом передаточного числа редуктора, если пренебречь электромагнитной постоянной времени цепи якоря, имеют вид [3]

$$I_{Mi} \frac{d\Omega_i}{dt} = c_{Mi} i_i - \frac{1}{k_i} M_{\tau i}, \quad i_i = \frac{1}{r_i} U_i - \frac{c_{ei}}{r_i} \Omega_i, \quad (2)$$

где I_{Mi} - момент инерции ротора двигателя; Ω_i - скорость вращения ротора; $M_{\tau i} = \tau_i$ - момент сопротивления нагрузки; k_i - передаточное число редуктора; r_i - активное сопротивление цепи якоря; i_i - ток цепи якоря; c_{Mi} - коэффициент по моменту; c_{ei} - коэффициент противо-ЭДС; U_i - напряжение, приложенное ко входу двигателя.

На основе уравнений (1) и (2) можно получить после ряда преобразований следующее нелинейное векторное уравнение движения ИР с учетом динамики исполнительных двигателей:

$$M^*(q) \frac{d^2 q}{dt^2} + B^*\left(q, \frac{dq}{dt}\right) \frac{dq}{dt} + C^*(q) = DU, \quad (3)$$

где

$$M^*(q) = \left[\text{diag}\{I_{Mi}\} + \text{diag}\left\{\frac{1}{k_i^2}\right\} M(q) \right], \quad (4)$$

$$B^*\left(q, \frac{dq}{dt}\right) = \left[\text{diag}\left\{\frac{c_{Mi} c_{ei}}{k_i r_i}\right\} + \text{diag}\left\{\frac{1}{k_i^2}\right\} B\left(q, \frac{dq}{dt}\right) \right], \quad (5)$$

$$C^*(q) = \text{diag}\left\{\frac{1}{k_i^2}\right\} C(q), \quad D = \text{diag}\left\{\frac{c_{Mi}}{r_i k_i}\right\}. \quad (6)$$

В выражениях (4)-(6) через $\text{diag}\{\}$ обозначена диагональная матрица; U - вектор управляющих напряжений U_i на входах двигателей, а также учтено, что $dq_i/dt = \Omega_i/k_i$. Анализ этих выражений позволяет прийти к важному выводу, что увеличение передаточных чисел k_i приводит к существенному уменьшению влияния центробежных и кориолисовых ускорений, а также гравитационных сил на динамику ИР.

Линеаризация уравнений движения ИР. Линеаризация нелинейного уравнения (3) в окрестности произвольной траектории движения $q_0(t)$ может быть осуществлена по методике, данной в [4], что приводит к следующему уравнению в приращениях:

$$\frac{d^2 \Delta q}{dt^2} + A_1 \frac{d \Delta q}{dt} + A_2 \Delta q = K \Delta U, \quad (7)$$

где

$$A_1 = M_0^{*-1}(q) \left[B_0^* \left(q, \frac{dq}{dt} \right) + B_2 \left(q, \frac{dq}{dt} \right) \right], \quad (8)$$

$$A_2 = M_0^{*-1}(q) \left[M_1(q) + B_1 \left(q, \frac{dq}{dt} \right) + C_1(q) \right], \quad (9)$$

$$K = M_0^{*-1}(q) D, \quad (10)$$

$$B_1(q) = \text{diag} \left\{ \frac{1}{k_i^2} \right\} [B_{11}(q) \ B_{12}(q) \ \dots \ B_{1n}(q)]; \ B_{1i}(q) = \frac{\delta B(q)}{\delta q_i} \frac{dq_0}{dt}, \quad (11)$$

$$B_2(q) = \text{diag} \left\{ \frac{1}{k_i^2} \right\} [B_{21}(q) \ B_{22}(q) \ \dots \ B_{2n}(q)]; \ B_{2i}(q) = \frac{\delta B(q)}{\delta (dq_i / dt)} \frac{dq_0}{dt}, \quad (12)$$

$$C_1(q) = \text{diag} \left\{ \frac{1}{k_i^2} \right\} [C_{11}(q) \ C_{12}(q) \ \dots \ C_{1n}(q)]; \ C_{1i}(q) = \frac{\delta C(q)}{\delta q_i}, \quad (13)$$

а нулевой индекс соответствует движению вдоль номинальной (базовой) траектории $q_0(t)$.

Обозначив $x_1 = \Delta q$ и $x_2 = d \Delta q / dt$, приходим на основе (7) к системе $2n$ линейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -A_2 x_1 - A_1 x_2 + K \Delta U, \end{cases} \quad (14)$$

откуда, вводя обозначения

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -A_2 & -A_1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} \\ K \end{bmatrix}, \quad (15)$$

окончательно получим линеаризованные уравнения движения ИР с n степенями свободы в стандартной форме:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B\Delta U, \quad (16)$$

$$\Delta q = C_{Out}x, \text{ где } C_{Out} = [I_{n \times n} \quad 0_{n \times n}]. \quad (17)$$

Линейные уравнения (16), (17) могут быть использованы при разработке и исследовании систем управления ИР на основе известных методов теории многосвязных систем автоматического регулирования [5, 6].

Применение метода характеристических передаточных функций (ХПФ). Уравнения в пространстве состояний (16), (17) описывают динамику линейной взаимосвязанной системы управления с n входами и n выходами, которая может быть исследована общими методами современной теории многосвязного регулирования и управления [2, 3]. Особенно перспективным и эффективным при этом является применение метода ХПФ [3], который позволяет свести исследование n мерной (т.е. имеющей n входов и n выходов) взаимосвязанной системы управления к исследованию совокупности n изолированных фиктивных систем с одним входом и выходом при помощи обычных методов классической теории автоматического регулирования [4]. Однако применение метода ХПФ в его стандартной форме требует представления уравнений ИР при помощи передаточных матриц, а не в виде уравнений в пространстве состояний (16)-(17). Переход от этих уравнений к соответствующей $n \times n$ передаточной матрице $W(s)$ осуществляется при помощи преобразования Лапласа и приводит к выражению [2]

$$\Delta q(s) = W(s)U(s), \quad (18)$$

где матрица $W(s)$ имеет вид

$$W(s) = C[sI - A]^{-1}B. \quad (19)$$

В терминах теории многосвязного управления матрица $W(s)$ (19) является передаточной матрицей объекта регулирования, связывающей между собой напряжения на входах исполнительных двигателей с углами поворотов отдельных механических узлов ИР (в уравнении (19) через I обозначена единичная матрица). Если обозначить через $K(s)$ передаточную матрицу регулятора, то передаточ-

ные матрицы $P(s)$ и $\Phi(s)$ разомкнутой и замкнутой систем управления ИР примут вид

$$P(s) = W(s)K(s), \quad (20)$$

$$\Phi(s) = [I + P(s)]^{-1} P(s). \quad (21)$$

В соответствии с методом ХПФ [3] передаточные матрицы $P(s)$ (20) и $\Phi(s)$ (21) могут быть представлены при помощи следующих канонических разложений:

$$P(s) = C(s) \text{diag}\{p_i(s)\} C^{-1}(s), \quad (22)$$

$$\Phi(s) = C(s) \text{diag}\left\{\frac{p_i(s)}{1 + p_i(s)}\right\} C^{-1}(s), \quad (23)$$

где через $p_i(s)$ обозначены ХПФ разомкнутой системы (собственные значения матрицы $P(s)$), которые для простоты предполагаются различными), а модальная матрица $C(s)$ составлена из линейно-независимых собственных векторов матрицы $P(s)$. Устойчивость замкнутой системы управления ИР определяется распределением корней характеристического уравнения

$$\det[I + P(s)] = \prod_{i=1}^n [1 + p_i(s)] = 0, \quad (24)$$

которое, очевидно, эквивалентно следующей системе n уравнений:

$$\begin{aligned} 1 + p_i(s) &= 0, \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (25)$$

Уравнения (25) являются характеристическими уравнениями n изолированных систем с одним входом и выходом (одномерных систем) с передаточными функциями в разомкнутом состоянии $p_i(s)$. Поэтому можно утверждать, что применение метода ХПФ дает возможность свести анализ устойчивости взаимосвязанной системы управления ИР с n степенями свободы к анализу устойчивости n одномерных систем. На практике наиболее удобным при этом является применение обобщенного критерия Найквиста [3], который позволяет судить об устойчивости замкнутой системы управления ИР по расположению на комплексной плоскости характеристических годографов $p_i(j\omega)$ разомкнутой системы относительно критической точки $(-1, j0)$ (характеристические годографы получаются из ХПФ $p_i(s)$ заменой $s = j\omega$ и построением графиков $p_i(j\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞).

При практическом применении описанной процедуры для исследования устойчивости и выбора коррекции системы управления ИР возникает сложная проблема перехода от линейных уравнений в пространстве состояний (14)-(17) к соответствующей передаточной матрице $W(s)$ (19), которая необходима для нахождения ХПФ $p_i(s)$. Дело в том, что практическое применение формулы (19) для определения $W(s)$ эффективно лишь при небольшом числе степеней свободы n (обычно при $n \leq 3$), в то время как современные протезы рук являются сложными механическими устройствами со многими степенями свободы, число которых может достигать 22-х и более (рука человека имеет около 25 степеней свободы) [1]. В этом отношении не очень полезными оказываются и стандартные функции `tf` и `zpk` пакета Control System Toolbox [7], входящего в состав компьютерной системы технических расчетов MATLAB [8], так как применение функций `tf` и `zpk` при переходе от записи в пространстве состояний к передаточным матрицам приводит обычно к повышению общего порядка уравнений системы и появлению новых (не существующих в реальности) нулей в правой полуплоскости.

Чтобы обойти эти препятствия, в работе предлагается воспользоваться следующим подходом, который исключает необходимость определения передаточной матрицы $W(s)$ (19) и дает возможность непосредственного построения характеристических годографов $p_i(j\omega)$ по матрицам A , B и C в уравнениях (16), (17). Для определенности, в дальнейшем воспользуемся концепцией скалярного компенсатора, т.е. примем регулятор $K(s)$ в виде $K(s) = k(s)I$, где $k(s)$ есть обычная скалярная передаточная функция [3]. Передаточная матрица разомкнутой системы $P(s)$ (20) при этом будет равна $k(s)W(s)$, а для ХПФ $p_i(s)$ будем иметь $p_i(s) = k(s)w_i(s)$, где $w_i(s)$ есть ХПФ передаточной матрицы ИР $W(s)$ (19). Суть подхода состоит в том, что вместо определения матриц $W(s)$ и $P(s)$ с последующим вычислением собственных значений $p_i(s)$ матрицы $P(s)$ и подстановкой в них $s = j\omega$ вычисляется для фиксированных значений частоты $\omega = \omega_k$ следующая последовательность числовых матриц (см. (19)):

$$[j\omega_k I - A] \Rightarrow [j\omega_k I - A]^{-1} \Rightarrow C[j\omega_k I - A]^{-1} B = W(j\omega_k). \quad (26)$$

Определив матрицу $W(j\omega_k)$, нетрудно найти её собственные значения $w_i(j\omega_k)$, что дает возможность окончательно получить значения ХПФ $p_i(j\omega_k) = k(j\omega_k)w_i(j\omega_k)$ для выбранной частоты $\omega = \omega_k$. Изменяя частоту ω в интервале от 0 до ∞ , можно построить все семейство n годографов $p_i(j\omega)$ и тем самым исследовать устойчивость, а также осуществить выбор требуемой

коррекции $k(s)$ взаимосвязанной системы управления ИР. Следует особо подчеркнуть, что при использовании описанного подхода исключается необходимость определения передаточной матрицы $W(s)$ (19) в явном виде, и все вычисления осуществляются с квадратными числовыми матрицами с комплексными элементами. Укажем также, что функция `eig` в системе MATLAB позволяет находить собственные значения числовых матриц с комплексными элементами практически любой размерности (порядка нескольких десятков и даже сотен) [8].

Пример 1. В качестве примера рассмотрим математическую модель антропоморфического робота Puma 560 с шестью степенями свободы, уравнения движения и численные значения параметров которого даны в [9]. На рис. 1 и 2 показаны зависимости элемента $m_{11}(q)$ исходной матрицы инерции $M(q)$ и элемента $c_2(q)$ вектора гравитационных сил $C(q)$ от обобщенных координат q_2 и q_3 при изменении последних в диапазоне $\pm\pi$. Эти зависимости были построены при помощи специальной программы, написанной на языке программирования MATLAB. Аналогичные графики получены и для остальных элементов матрицы $M(q)$ и вектора $C(q)$.

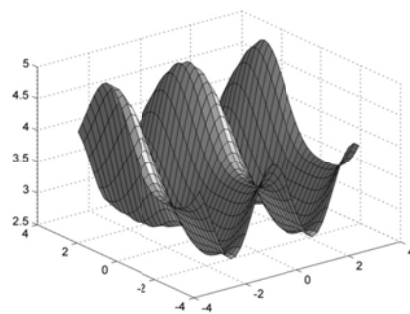


Рис. 1. Зависимость значения элемента $m_{11}(q)$ исходной матрицы инерции $M(q)$ от обобщенных координат q_2 и q_3

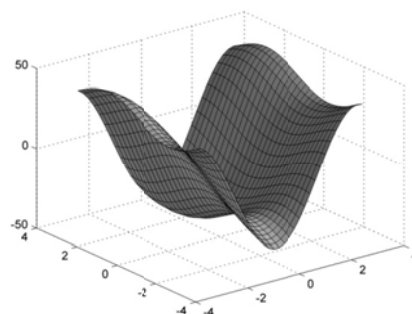


Рис. 2. Зависимость значения элемента $c_2(q)$ исходного вектора гравитационных сил $C(q)$ от обобщенных координат q_2 и q_3

Как видно из трехмерных графиков на рис. 1 и 2, имеется ярко выраженная нелинейная зависимость элементов матрицы $M(q)$ и вектора $C(q)$ от вектора обобщенных координат q . Линеаризация уравнений движений ИР позволяет как бы заменить сложные трехмерные поверхности плоскостями, касательными к исходным поверхностям в рабочих точках.

Пример 2. На рис. 3 показаны характеристические годографы разомкнутой и скорректированной линеаризованной системы управления ИР с шестью степенями свободы на плоскостях Найквиста и Никольса. В качестве скалярного компенсатора выбрана передаточная функция

$$k(s) = \frac{5s + 1}{0,000067s^2 + 0,0167s + 1} \quad (27)$$

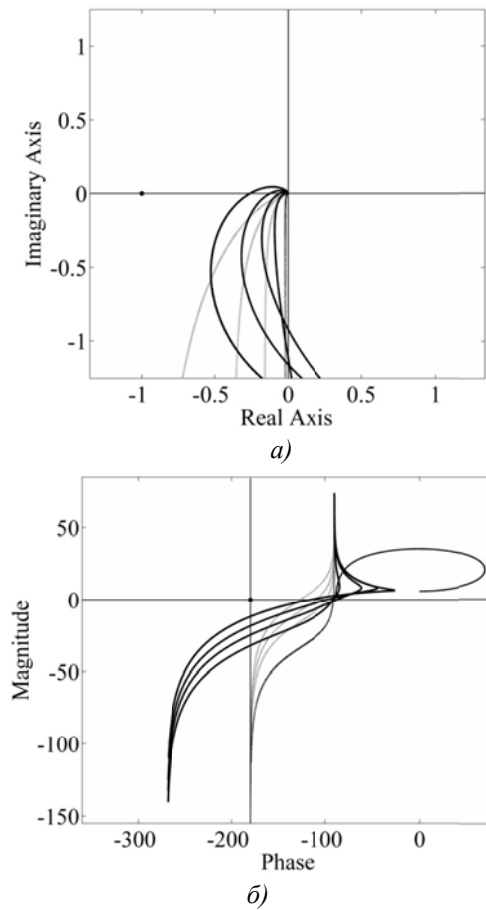


Рис. 3. Характеристические годографы системы управления ИР при $n = 6$:
а - диаграммы Найквиста; б - диаграммы Никольса

По сути дела, выбор скалярного компенсатора $k(s)$ (27) осуществлялся на основе линеаризации нелинейных уравнений движения в различных точках пространства состояний системы и выбора “наихудших” рабочих точек. В этом смысле скалярный компенсатор гарантирует удовлетворение требуемых частотных критериев качества системы на всем пространстве состояний. Это позволяет существенно упростить процедуру практической реализации системы, так как здесь отсутствует необходимость применения так называемого метода планирования коэффициентов усиления (gain scheduling) [2].

Выводы

1. Выведены линеаризованные уравнения движения ИР с n степенями свободы с учетом динамики исполнительных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением и передаточных чисел редукторов.
2. Предложена методика построения характеристических годографов системы управления ИР, не требующая определения передаточной матрицы системы и основанная на представлении системы в пространстве состояний.
3. Приведены примеры исследования инерционных свойств, а также анализа устойчивости и выбора скалярного компенсатора для антропоморфического робота с шестью степенями свободы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pike R.A., Alvin V.** The New High Tech Prostheses // In Motion Magazine.- May/June 1999.- 9(3).
2. **Spong M., Hutchinson S., Vidyasagar M.** Robot Modeling and Control. - Wiley, Hoboken, NJ, 2006. - 419 p.
3. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 2003. - 560 с.
4. **Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С.** Системы управления манипуляционных роботов. - М.: Наука, 1978. - 416 с.
5. **Skogestad S. and Postlethwaite I.** Multivariable Feedback Control. Analysis and Design. - John Wiley and Sons Ltd., Chichester, Sussex, UK, 2005. - 595 p.
6. **Gasparyan O.N.** Linear and Nonlinear Multivariable Feedback Control: A Classical Approach. - John Wiley & Sons, UK, 2008. - 356 p.
7. Control System Toolbox User's Guide, The MathWorks, Inc., 2011. - 410 p.
8. Using MATLAB. The MathWorks, Inc., 2010. - 874 p.
9. **Armstrong B., Khatib O. and Burdick J.** The explicit dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm // Proc. 1986 IEEE Conf. Robot. Autom. - San Francisco, Apr. 7–10, 1986. – P. 510–518.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.09.2012.

Լ.Ս. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ

ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՁԵՌՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ
ԱՌՆԵԼՈՎ ԿԱՏԱՐՈՂԱԿԱՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ

Դուրս են բերվել արհեստական ձեռքի (ԱՁ) շարժման գծայնացված հավասարումները՝ հաշվի առնելով անկախ զրգռումով հաստատուն հոսանքի շարժիչների դինամիկան: Բերված են վեց ազատության աստիճանով ԱՁ - ի շարժման ոչ գծային հավասարումների գրավիտացիոն ուժի վեկտորի և իներցիայի մատրիցի տարրերի ընդհանրացված կոորդինատներից (ԱՁ-ի մեխանիկական հանգույցների պտտման անկյուններ) կախվածության եռաչափ գրաֆիկները: Առաջարկվել է արհեստական ձեռքի կառավարման համակարգի կայունության հետազոտման և նախագծման մոտեցում՝ բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդով:

Առանցքային բառեր. արհեստական ձեռք, կառավարման համակարգ, շարժման ոչ գծային հավասարումներ, բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդ:

L.M. BUNIATYAN

DESIGN OF A CONTROL SYSTEM FOR AN ARTIFICIAL HAND TAKING
INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF THE ACTUATING MOTORS

Linearized equations of motion of an artificial hand (AH) considering the dynamics of DC actuating motors with independent excitation are derived. Three-dimensional graphs showing dependencies on the generalized coordinates (rotation angles of the mechanical parts of AH) elements of the inertia matrix and the vector of gravitational forces of nonlinear equations of an AH with six degrees of freedom are presented. A method of design and stability investigation of the control system of AH on the basis of characteristic transfer functions method is proposed.

Keywords: artificial hand, control system, nonlinear equations of motion, characteristic transfer functions method.

А.О. ТОНОЯН, М.А. ШАХНАЗАРЯН, С.Б. АНТОНЯН, А.Г. ХАЧАТРЯН,
С.П. ДАВТЯН

**ФРОНТАЛЬНАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА С
МЕТИЛМЕТАКРИЛАТОМ И СТИРОЛОМ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ
SiO₂, TiO₂. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ
НАНОКОМПОЗИТОВ**

На основе данных по влиянию количества нанодобавок на предельную температуру тепловых волн, скорость фронта и характер изменения относительной теплоемкости образцов нанокompозитов установлено позитивное влияние тепловых полимеризационных волн на процесс деагломерации наночастиц. Показано, что относительная теплоемкость нанокompозитов меняется в зависимости от количества нанонаполнителя неаддитивным образом.

Ключевые слова: фронтальная сополимеризация, наночастицы, нанокompозит, относительная теплоемкость, твердая аморфная фракция.

Введение. Фронтальная полимеризация [1-8] является простым и удобным технологическим методом синтеза нанокompозитов с обеспечением равномерного распределения наночастиц в полимерной матрице [9], где исследованы теплофизические и механико-динамические свойства нанокompозитов, полученных фронтальной полимеризацией метилметакрилата (ММА) в присутствии SiO₂. Теплофизические свойства полимерных нанокompозитов также исследованы в ряде работ [10-14]. Показано [9, 10-13] наличие химического взаимодействия макромолекул полиметилметакрилата (ПММА) с поверхностью SiO₂ и практическая инертность макромолекул полистирола (ПС) в отношении к тем же наночастицам. Интересно, что способ полимеризации ММА (эмульсионная, микроэмульсионная в сопровождении высокочастотных акустических полей [10-12] и фронтальная [9]) не влияет на характер изменения относительной теплоемкости от количества нанодобавок SiO₂. На основе полученных результатов авторами работ [9, 10-13] показано образование (формирование) твердой аморфной фракции (ТАФ) полимерного связующего ПММА на поверхности наночастиц SiO₂. При этом сегментальная подвижность макромолекул полимерной фракции [14], находящейся в виде ТАФ, на 2...3 порядка замедлена по сравнению с макромолекулами чистого полимера.

Анализ результатов работ [9, 10-12, 14] показывает, что не до конца выяснено влияние полимерного связующего на процесс формирования ТАФ и на ее характерные размеры.

Цель данной работы - синтез нанокомпозитов ААМ + ММА/SiO₂, ААМ + ММА/TiO₂, ААМ + СТ/SiO₂, ААМ + СТ/TiO₂ методом фронтальной сополимеризации акриламида (ААМ) с ММА и акриламида со стиролом (СТ), а также исследование теплофизических свойств синтезированных нанокомпозитов с выяснением особенностей формирования межфазного слоя в зависимости от количества нанодобавок SiO₂, TiO₂.

1. Экспериментальная часть. В качестве сомономеров использовали ААМ, ММА и СТ фирмы Sigma Aldrich. СТ и ММА очищали по методике [11], а ААМ - двукратной перекристаллизацией из насыщенных растворов этилового спирта.

Инициатор сополимеризации – дициклогексилпероксидикарбонат (ДЦПК) - применяли после двукратной перекристаллизации из этилового спирта и сушки в вакуумном шкафу при комнатной температуре до постоянного веса.

В качестве нанонаполнителей процесса сополимеризации применяли порошкообразные SiO₂ и TiO₂. Средние размеры частиц использованных наполнителей составляли 10 нм (фирма Sigma Aldrich).

Фронтальную сополимеризацию ААМ с ММА или ААМ с СТ с добавками соответствующих наполнителей осуществляли по методике, ранее описанной нами в работах [2,6,24].

2. Влияние количества наночастиц на температурные профили и скорость фронтальной сополимеризации. Температурные профили и изменение скорости фронтальной сополимеризацией ААМ с ММА под действием ДЦПК представлены на рис. 1.

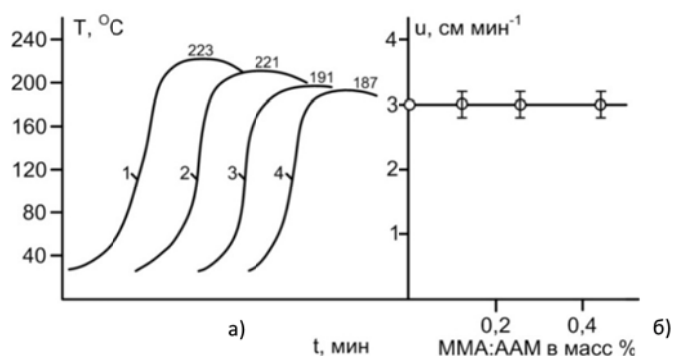


Рис.1. Температурные профили фронтальной сополимеризации ААМ с ММА при соотношении сомономеров ААМ : ММА, 100:0 - 1, 90:10 - 2, 80:20 - 3, 70:30 - 4 (а) и изменение скорости фронта от соотношения сомономеров (б)

Из кривых рис. 1а видно, что с увеличением количества ММА предельный разогрев тепловых сополимеризационных волн уменьшается незначительно. Подобная ситуация связана с меньшим тепловым эффектом полимеризации ММА по сравнению с ААМ.

Наблюдаемое незначительное возрастание скорости сополимеризационного фронта (рис. 1б) с уменьшением количества ААМ в исходной смеси сомономеров, по всей вероятности, связано с высокой скоростью распространения тепловых полимеризационных волн чистого ММА.

Аналогичный характер поведения температурных профилей наблюдается и при фронтальной сополимеризации ААМ с СТ. Однако в последнем случае увеличение количества СТ в исходной смеси сомономеров приводит к незначительному уменьшению скорости фронта. Необходимо отметить, что в дальнейших экспериментах соотношение сомономеров (ААМ:ММА и ААМ:СТ) сохраняли постоянным (80:20), что связано лишь с удобством эксперимента.

Влияние количества наночастиц SiO_2 на температурные профили фронтальной сополимеризации ААМ с ММА и на скорость фронта представлено на рис. 2а, б. Из кривых 1–4 (рис. 2а) видно, что добавление наночастиц влияет как на структуру тепловых полимеризационных волн, так и на предельную температуру разогрева.

Необходимо отметить, что значения величины предельной температуры ($T_{\text{пр}}$) тепловых волн, как и в работах [9,17,18], уменьшаются непропорционально количеству нанонаполнителя SiO_2 . Так, из кривых 1-4 (рис. 2а) видно, что до степеней наполнения 25...30 % величина $T_{\text{пр}}$ уменьшается достаточно медленно, а затем достаточно быстро.

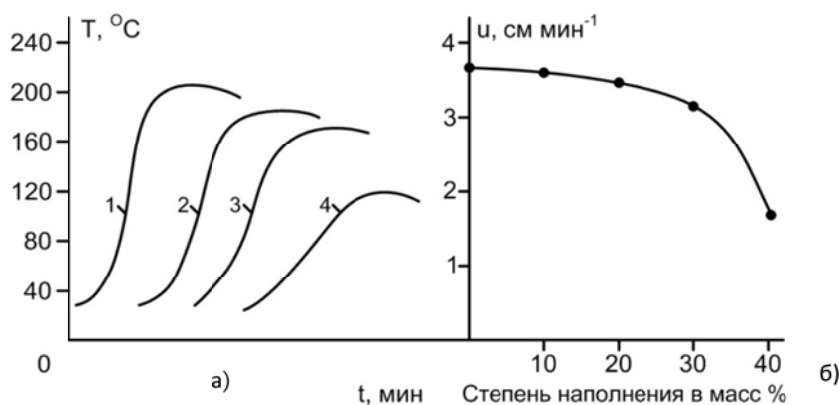


Рис. 2. Влияние количества SiO_2 на температурные профили (а) и скорость сополимеризационного фронта (б). Соотношение сомономеров ААМ : ММА = 80:20, количество SiO_2 % массовых от общего количества сомономеров: 1-10, 2-20, 3-25, 4-40

Медленное уменьшение величины $T_{\text{пр}}$, по-видимому, обусловлено вкладом в значения $T_{\text{пр}}$ теплоты экзотермического взаимодействия макромолекул связующего с поверхностью зерен наночастиц в процессе фронтальной сополимеризации [9,15]. При больших же количествах нанодобавок (выше 30...35%) имеет место их агломерация, приводящая к уменьшению интенсивности взаимо-

действия макромолекул связующего с поверхностью агломерированных частиц SiO_2 .

Скорость фронтальной сополимеризации (u) ААМ с ММА в присутствии разных количеств наночастиц SiO_2 меняется в соответствии с изменением величины $T_{\text{пр}}$. Действительно, из данных рис. 2б видно, что при добавлении в реакционную среду наноразмерного SiO_2 величина u вначале меняется незначительно и лишь после 25...30% наполнения начинает уменьшаться достаточно интенсивно. Закономерности фронтальной сополимеризации ААМ с ММА меняются аналогично при нанодобавках TiO_2 .

Следует отметить, что приведенные данные (рис. 2а и б) по исследованию закономерностей фронтальной сополимеризации ААМ+ММА с различными нанодобавками (TiO_2 и SiO_2) аналогичны результатам по сополимеризации ААМ+СТ с теми же нанодобавками, поэтому здесь они не приводятся. Более того, данные, представленные на рис. 2, показывают, что влияние количества наночастиц SiO_2 и TiO_2 на закономерности фронтальной сополимеризации идентично результатам, полученным в работе [9].

3. Теплофизические характеристики образцов нанокомпозитов и особенности формирования межфазного слоя. В работах [9,10-12] нами было показано, что относительная теплоемкость нанокомпозитов, полученных различными способами (фронтальная, эмульсионная и микроэмульсионная полимеризации из растворов ПММА с добавками наночастиц SiO_2 размером 10 нм), меняется неаддитивным образом. Это явление было объяснено достаточно сильным взаимодействием между полимерными цепями и поверхностью наночастиц, приводящим к формированию на их поверхности ТАФ. При этом наличие ТАФ на 5...6 °С увеличивает температуру стеклования нанокомпозитов [9,10-12]. Образование ТАФ было показано ранее для различных полимеризующихся сред с нанонаполнителями разной природы [19].

Представляет интерес сравнение формирования ТАФ для наночастиц SiO_2 и TiO_2 со связующими из сополимеров ААМ с ММА и со СТ. Для этого были исследованы теплофизические свойства сополимерных нанокомпозитов с добавками различных количеств SiO_2 и TiO_2 . На рис. 3 представлена зависимость относительной теплоемкости от количества введенного нанонаполнителя для систем ААМ+ ММА + SiO_2 , ААМ + ММА + TiO_2 и ААМ+ СТ + SiO_2 , ААМ + СТ + TiO_2 .

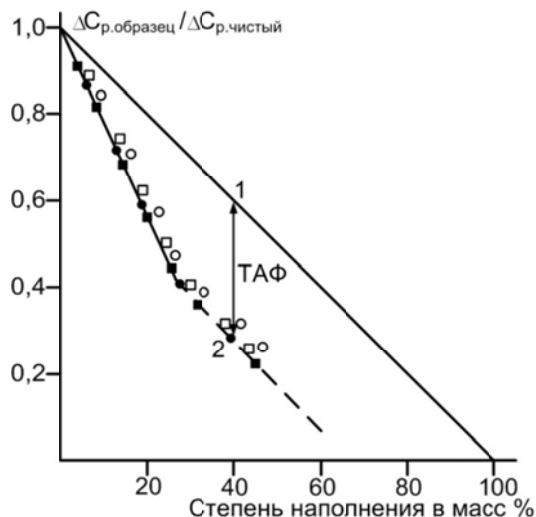


Рис. 3. Зависимость относительной теплоемкости от количества нанодобавок для образцов нанокомпозитов, полученных фронтальной сополимеризацией ААМ с ММА и СТ, в присутствии нанодобавок SiO_2 , TiO_2 : 1 - изменение относительной теплоемкости SiO_2 , TiO_2 содержащих сополимеров по аддитивному закону, 2 – экспериментально определенные значения изменения относительных теплоемкостей от количества нанодобавок: ■ - ААМ + ММА + SiO_2 , ● - ААМ + ММА + TiO_2 , □ - ААМ + СТ + SiO_2 , ○ - ААМ + СТ + TiO_2

Отметим, что кривая 1 на рис. 3 соответствует изменению относительной теплоемкости сополимеров по аддитивному закону. Как видно из данных, представленных на рис. 3, кр. 2, введение в систему SiO_2 и TiO_2 со средними размерами наночастиц 10 приводит к изменению формы зависимости относительной теплоемкости $\Delta C_{p, \text{обр}} / \Delta C_{p, \text{чист}}$ (где $\Delta C_{p, \text{обр}}$, $\Delta C_{p, \text{чист}}$ - теплоемкости для образцов нанокомпозитов и чистого полимера) от количества нанонаполнителя. При этом величина $\Delta C_{p, \text{обр}} / \Delta C_{p, \text{чист}}$ вначале уменьшается быстрее по сравнению с кривой 1, и лишь при степенях наполнения 25...30 масс.% и выше кривая 2 становится параллельной прямой 1.

Интересно, что для образцов сополимерных нанокомпозитов ААМ + ММА/ SiO_2 , TiO_2 (точки ■, ● кр. 2, рис 3) относительные теплоемкости меняются практически одинаково, тогда как для образцов нанокомпозитов ААМ+СТ/ SiO_2 , TiO_2 (точки □, ○ кр.2, рис. 4) наблюдается некоторая тенденция приближения соответствующих точек изменения относительной теплоемкости к прямой 1. Очевидно, с увеличением доли СТ звеньев в нанокомпозитных сополимерах наблюдаемый эффект должен возрастать. Однако необходимо отметить, что при соотношениях сомономеров ААМ:СТ меньших, чем 80:20, происходит вырождение фронтальных режимов.

Таким образом, наблюдаемые явления (рис. 1-3), по всей вероятности, определяются тремя факторами:

- независимо от природы наполнителя, при степенях наполнения до 25...30% происходит деагломерация наночастиц под воздействием полимеризационных тепловых волн;

- поверхностные энергии натяжения наночастиц SiO_2 , TiO_2 мало отличаются;

- взаимодействие макромолекул связующего с поверхностью наночастиц SiO_2 или TiO_2 и формирование ТАФ, т.е. межфазного слоя, могут быть представлены последовательным протеканием двух процессов: химическим взаимодействием радикальных концов макромолекул с ОН группами поверхности наночастиц и окутыванием макромолекул вокруг наночастиц SiO_2 или TiO_2 .

Закключение. Таким образом, результаты работ [8-11,14] и рассмотренные выше экспериментальные данные позволяют заключить, что при синтезе полимерных нанокомпозитов в присутствии добавок наночастиц разной геометрии имеет место формирование ТАФ, линейные размеры которого определяются не только природой связующего, но и размерами, геометрической формой и количеством наночастиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чечило Н.М., Ениколопан Н.С.** Структура тепловых полимеризационных волн и механизм распространения реакции полимеризации // Докл. АН СССР. – 1974. – Т. 214, № 5. – С. 1131.
2. **Арутюнян Х.А., Давтян С.П., Розенберг Б.А., Ениколопан Н.С.** Отверждение эпоксидианового олигомера ЭД-20 аминами в режиме распространения фронта реакции // Докл. АН СССР. - 1975. - Т. 223. - С. 657–661.
3. **Давтян С.П., Жирков В.П., Вольфсон С.А.** Проблемы неизотермичности в полимеризационных процессах // Успехи химии. – 1984. - Т. 53, 2. - С. 251.
4. **Давтян Д.С., Багдасарян А.Э., Тоноян А.О., Давтян С.П.** О роли теплового конвективного массопереноса компонентов реакционной смеси в процессах фронтального отверждения эпоксидиановых олигомеров // Хим. физика. – 2000. – Т. 19, № 9. - С. 83.
5. The Structure Stability of Autowaves During Polymerization of Co Metal-Complexes with Acryl Amide / **S.P. Davtyan, A.F. Hambartsumyan, D.S. Davtyan, A.O. Tonoyan et al** // Eur. Polym. J. – 2002. - V. 38. - P. 2423.
6. **Davtyan S.P., Tonoyan A.O., Lekishvili N.G., Schick C.** Frontal Copolymerization of Lactams: Structure, Velocity and Composition of Copolymers // Compounds and Material with Specific Properties. - 2008 Nova Science Publishers, Inc ISBN 978-1-60456-343-6. - P.121.

7. **Давтян С.П., Берлин А.А., Тоноян А.О.** Об основных приближениях в теории фронтальной радикальной полимеризации виниловых мономеров // Успехи химии. – 2010. - Т. 79, № 3. - С. 234.
8. **Давтян С.П., Берлин А.А., Тоноян А.О.** Успехи и проблемы процессов фронтальной полимеризации // Обзорный журнал по химии. – 2011. - Т. 1, №. 1. - С. 56–92.
9. Полимерные нанокомпозиты с равномерным распределением наночастиц в полимерной матрице, синтезированные методом фронтальной полимеризации / **С.П. Давтян, А.А. Берлин, К. Шик и др.** // Российские нанотехнологии. – 2009. - Т. 4, № 7–8. - С. 489.
10. **Sargsyan A.G., Tonoyan A.O., Davtyan S.P., Schick C.** Thermal Characterization of PMMA SiO₂ Nano-Composites Prepared by Different Methods // Proc. NATAS 2006. - Bowling Green. CO. USA, 2006. - P. 102.
11. **Sargsyan A.G., Tonoyan A.O., Davtyan S.P., Schick C.** The amount of immobilized polymer in PMMA SiO₂ nanocomposites determined from calorimetric data // Europ. Polym. J. – 2007. - № 8. - P. 3113.
12. **Sargsyan A.G., Tonoyan A.O., Davtyan S.P., Schick C.** Rigid Amorphous Fraction in Polymer Nano-Composites // NATAS Notes. – 2007. - V. 39, N4. - P. 6.
13. **Tonoyan A.O., Davtyan S.P., Schick C.** Intercalated Nanocomposites Based on High-Temperature Superconducting Ceramics and Their Properties // Materials. – 2009. – V. 4. - P. 2054-2087.
14. **Fragiadakis D, Pissis P, Bokobza L.** Glass transition and molecular dynamics in poly-(dimethylsiloxane)/silica nanocomposites // Polymer. – 2005. – 46. - P. 6001–6008.
15. Особенности фронтальной инициированной полимеризации акриламида / **Д.С. Давтян, А.О. Тоноян, С.Е. Багян и др.** // Известия НАН РА. Сер. ТН. - 2003. - Т. 52, № 1. – С. 38.
16. **Davtyan S.P., Zakaryan H.H., Tonoyan A.O.** Steady State frontal polymerization of vinyl monomers: the peculiarities // Chemical Engineering Journal. – 2009. - V. 155. – P. 292–297.
17. **Тоноян А.О., Шик К., Кетян А.Г., Давтян С.П.** Нанокомпозиты полиметилметакрилат/SiO₂ и их свойства // Хим. журнал Армении. – 2009. - Т. 62, N. 1-2. - С. 201-211.
18. **Давтян С.П., Тоноян А.О.** Основы нанотехнологии. Наночастицы и полимерные нанокомпозиты. – Ереван: Изд-во "Гитутюн" НАН РА, 2011. – 422 с.
19. Separation of components of different molecular mobility by calorimetry, dynamic mechanical and dielectric spectroscopy / **C. Schick, J. Dobbertin, M. Potter et al** // J. Therm. Anal. - 1997. - V. 49, № 1. - P. 499–511.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК), ЕГУ. Материал поступил в редакцию 10.09.2012.

Ա.Հ. ՏՈՆՈՅԱՆ, Մ.Ա. ՇԱՀՆԱԶԱՐՅԱՆ, Ս.Բ. ԱՆՏՈՆՅԱՆ, Հ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ

ԱԿՐԻԼԱՄԻԴԻ ՖՐՈՆՏԱԼ ՀԱՄԱՊՈԼԻՄԵՐԱՑՈՒՄԸ՝ ՄԵԹԱԿՐԻԼԱՏԻ
ԵՎ ՍՏԻՐՈԼԻ ՀԵՏ՝ SiO_2 , TiO_2 ՆԱՆՈՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ԵՎ
ՍՏԱՅՎԱԾ ՆԱՆՈԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ուսումնասիրվել է նանոմասնիկների քանակների ազդեցությունը նանոմասնիկների ջերմատարողության, ֆրոնտալ համապոլիմերացման արագության և ջերմային ալիքի սահմանային ջերմաստիճանի վրա: Հաստատված է ջերմային ալիքների դրական ազդեցությունը նանոմասնիկների ապագլոմերացման վրա: Ցույց է տրված, որ նանոկոմպոզիտների հարաբերական ջերմունակությունը փոխվում է նանոմասնիկների հավելումից ոչ ադիտիվ կերպով:

Առանցքային բառեր. ֆրոնտալ համապոլիմերացում, նանոմասնիկներ, նանոկոմպոզիտ, հարաբերական ջերմունակություն, պինդ ամորֆ ֆրակցիա:

A.O. TONROYAN, M.A. SHAHNAZARYAN, S.B. ANTONYAN,
H.G. KHACHATRYAN, S.P. DAVTYAN

FRONTAL COPOLYMERIZATION OF ACRYLAMIDE WITH METHACRYLATE
AND STYRENE IN THE PRESENCE OF NANOPARTICLES SiO_2 , TiO_2 . THE
THERMO-PHYSICAL PROPERTIES OF THE OBTAINED NANOCOMPOSITES

The impact of the nanoadditive quantities on the limiting temperature of the heat waves, the front copolymerization speed and the nature of the change in a relative heat capacity of the nanocomposite samples has been studied. The positive influence of heat polymerization waves on deagglomeration of nanoparticles is established. It is shown that the relative heat capacity of nanocomposites changes depending on the amount of nanofiller in a nonadditive way.

Keywords: frontal copolymerization, nanoparticles, nanocomposites, relative heat, solid amorphous fraction.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Գ.Հ. ՄԱՐՏՈՅԱՆ

**ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՎԱՌԵԼԻՔԱՅԻՆ ԿԱՄԵՏՆԵՐԻ
ՆԵՅՏՐՈՆԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ
ՄՈՂԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Մոդելավորվել է ՋՋԷՌ-440-ի վառելիքային կասետը՝ քառախմբային մոտավորությամբ, և մշակվել հաշվարկային ծրագիր Microsoft Visual Studio-2010 միջավայրում: Դիտարկվել են նեյտրոն-միջուկ փոխազդեցության կտրվածքների՝ ըստ տարածության և էներգիայի միջինացման նրբությունները, կատարվել է հարստացումից կտրվածքների կախվածության վերլուծություն:

Առանցքային բառեր. միկրոսկոպիկ կտրվածք, մակրոսկոպիկ կտրվածք, խմբային հաստատուն, քառախմբային մոտավորություն, վառելիքային հարստացում, դիֆուզիայի գործակից:

Ներածություն: ՋՋԷՌ – 440 ռեակտորների իրանի մետաղի վրա նեյտրոնային հոսքի ազդեցության ուսումնասիրությունը խիստ արդիական է հատկապես հին սերնդի ռեակտորների համար, որոնք մոտենում են իրենց շահագործման նախագծային ժամկետին: Արագ նեյտրոնների ազդեցությունը կարող է հանգեցնել ռեակտորի իրանի մետաղի մեխանիկական հատկությունների վատացման, որը կարող է էականորեն ազդել ռեակտորի շահագործման ժամկետի վրա: Մասնավորապես, խնդիրն արդիական է ՀԱԷԿ ռեակտորի իրանի շահագործման ժամկետի որոշման և հետագա անվտանգ աշխատանքի տեսանկյունից:

Ռեակտորների նեյտրոնաֆիզիկական կամ միջուկային հաշվարկը կատարվում է ինչպես նախագծման, այնպես էլ կառուցման և շահագործման փուլերում: Միջուկային հաշվարկը երեք տեսակ է.

- գնահատման,
- տարբերակային,
- ստուգողական:

Նշված բոլոր տեսակի հաշվարկները միտված են լուծելու հետևյալ խնդիրները.

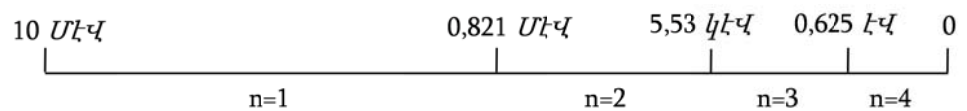
- ռեակտիվության ավելցուկային պաշարի հաշվարկ և ցանկացած անցումային վիճակներում ռեակտիվության էֆեկտների հաշվարկ,
- միջուկային վառելիքում իզոտոպային կազմի՝ էներգաանջատման դաշտից կախվածության բացահայտում,
- կառավարման և պաշտպանական համակարգի (СУЗ) և միջուկային անվտանգության համակարգի արդյունավետության հաշվարկ, ինչպես նաև ռեակտիվության կոմպենսացում աշխատանքային բոլոր ռեժիմներում,

- Էներգաանջատման բաշխում ակտիվ գոտու ողջ ծավալում՝ ժամանակի ցանկացած պահին:

Վերը բերված բոլոր խնդիրները լուծելու համար անհրաժեշտ է (սակայն ոչ բավարար) ունենալ հնարավորինս ճշգրիտ հաշվարկված (միջինացված) նեյտրոն –միջուկ փոխազդեցությունների կտրվածքների արժեքները (տվյալ էներգետիկ խմբի հաստատունները): Խմբային հաստատունների հաշվարկը պահանջում է հետևյալ հաջորդական քայլերը.

- նեյտրոնային էներգետիկ սպեկտրի բաժանում որոշակի քանակությամբ խմբերի,
- միջուկային խտությունների հաշվարկ,
- վառելիքային բջջի հոմոգենացում,
- մակրոսկոպիկ կտրվածքների միջինացում՝ ըստ տարածության և էներգիայի [1,2]:

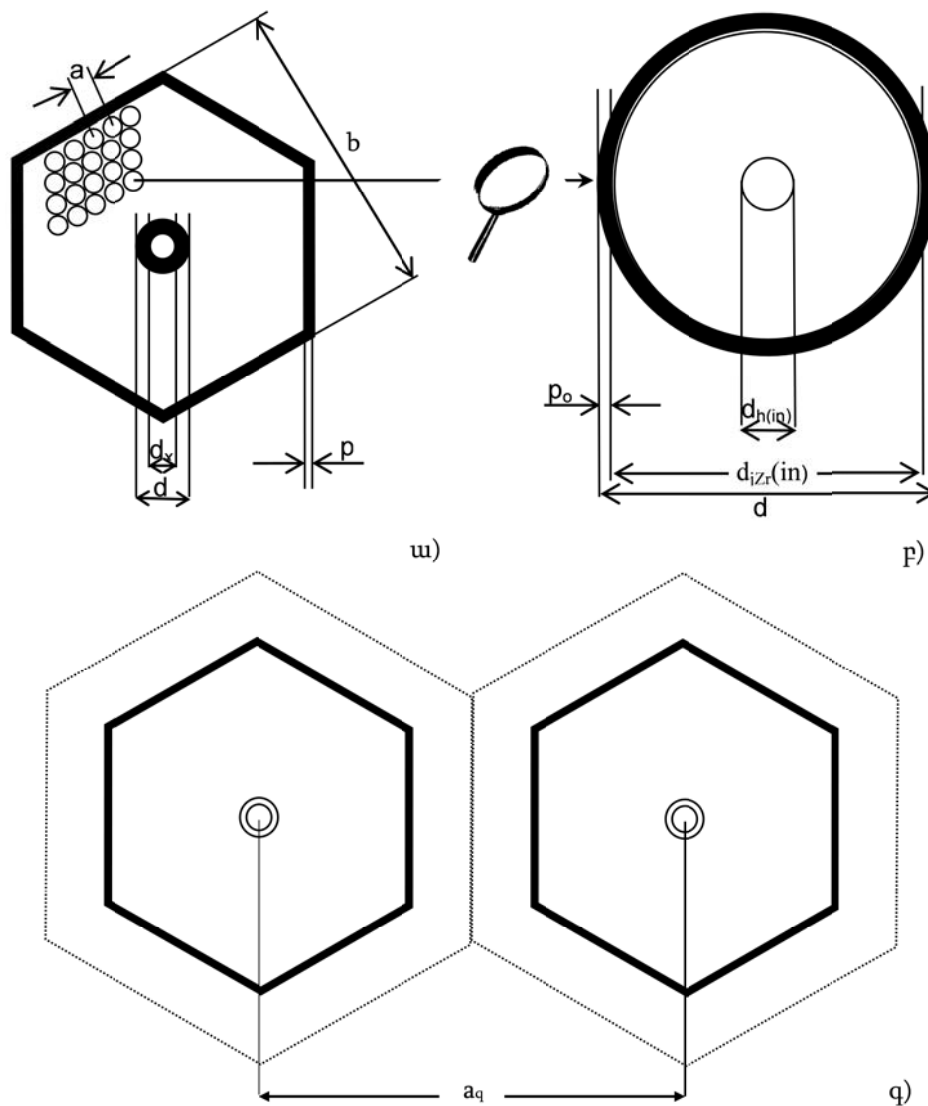
Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Նեյտրոնների էներգետիկ անընդհատ սպեկտրը բաժանվել է չորս խմբի, որոնցից յուրաքանչյուրում նեյտրոն –միջուկ փոխազդեցության կտրվածքները հաստատուն են (նկ.1): Իբրև ելակետային տվյալներ ունենք վառելիքային կասետի նյութական կազմը, երկրաչափությունը (նկ.2) և մի շարք բազմախմբային փոխազդեցությունների միկրոսկոպիկ կտրվածքների արժեքները [3,4]: Այս մոտավորությունը ճիշտ է թեթև ջրով աշխատող ռեակտորների համար [4]: Աղյուսակային կտրվածքները միջինացված են ըստ նկ.1-ում ներկայացված էներգետիկ տիրույթների, $n=4$ խմբի կտրվածքները տրված են $E=0,0253$ էՎ էներգիայի համար (ջերմային խումբ), բացառությամբ σ_s -ի, որը բերված է $E=1$ էՎ-ի համար:



Նկ.1. Նեյտրոնային էներգիայի դիսկրետ սպեկտրը

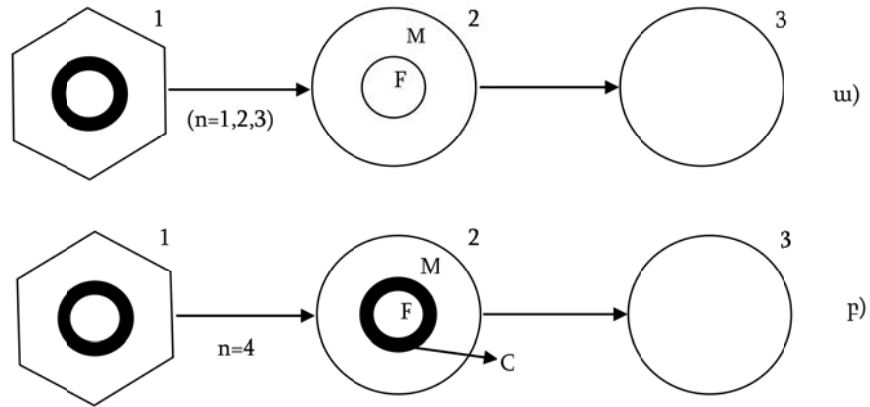
Ռեակտորի ակտիվ գոտին համասեռ չէ, այն ամբողջությամբ լցված չէ վառելիքով, նրանում կան բազմաթիվ չափիչ սարքեր, կառավարման ձողեր, տարբեր հարստացմամբ վառելիքային կասետներ և այլն: Դիտարկված խնդրում նման անհամասեռությունները կարելի է անտեսել և ակտիվ գոտին դիտարկել իբրև տարածական պարբերական ցանց՝ կազմված վառելիքային միանման բջիջներից, և սահմանափակվել մեկ երկչափ բջջի դեպքով, քանի որ վառելիքի լայնական չափը շատ անգամ փոքր է երկայնականից:

Վառելիքային կասետների միջև եղած ջրային միջավայրը ևս մոդելավորվել է իբրև բջջի բաղկացուցիչ մաս (նկ.2 գ): Դիտարկված եռագոտի բջջի գազային բացակը միակցվել է պատյանին (ցիրկոնիումին), իսկ հաբի կենտրոնական մասը՝ վառելիքին (նկ.3):



Նկ.2. Վառելիքային կասետի երկրաչափությունը.

a – կասետի երկչափ կտրվածքը, p – ՋԱՏ - ի երկչափ կտրվածքը, q – վառելիքային բջիջ



Նկ.3. Տարրական բջջի համոզենացում.

1 – հետերոգեն կասետ, 2 – գոտևորված բջիջ, 3 – Վիզներ - Ջեյտցի բջիջ

$n=4$ դեպքը դիտարկվել է առանձին, քանի որ ՋՋԷՌ տեսակի ռեակտորներում միջուկային բաժանումների ավելի քան 85...90%-ը տեղի է ունենում ջերմային նեյտրոնների ազդեցությամբ, այդ իսկ պատճառով չորրորդ խմբի կտրվածքներն ավելի նուրբ են մոդելավորված: Հաջորդ փուլում կատարվել է վառելիքի և ցիրկոնիումի խտությունների վերահաշվարկ, ինչպես նաև հաշվարկային եռագոտի բջջի չափսերի հաշվարկ $r_M = 0,687579$ սմ, $r_C = 0,477964$ սմ, $r_F = 0,38$ սմ (նկ.3 բ - 2): Աղյուսակային կտրվածքները վերաբերում են մեկ առանձին վերցրած միջուկին (միկրոսկոպիկ կտրվածք), իրականում գործ ունենք մակրոսկոպիկ կտրվածքների հետ՝

$$\Sigma_{ij} = N_j \sigma_{ij}, \quad (1)$$

որտեղ N_j - ն միջուկային խտությունն է: $n = 1$ խմբում տրված կտրվածքներն ունիվերսալ են (աշխատանքում դրանք տարբերակելու համար մեծությունների վերնի ձախ ցուցիչում նշվում է $\ll 0 \gg$), $n = 2$ խմբում որոշ կտրվածքներ, կախված մոդելի առանձնահատկություններից, ենթակա են ուղղման: Մեր օրինակում կատարվել է ^{238}U -ի կլանման միկրոսկոպիկ կտրվածքի վերահաշվարկ հետևյալ փորձնական բանաձևով՝

$$\sigma_a^{238} = {}^0\sigma_a^{238} \cdot \left(A - B \cdot \left(d_j^2 \cdot N_{235} \cdot N_{238} \cdot \sigma_a^{235} \cdot {}^0\sigma_a^{238} \right) \right): \quad (2)$$

$n = 1, 2, 3$ խմբերում նեյտրոնների էներգիաները մեծ են, ուստի կարելի է սահմանափակվել երկգոտի բջջի դիտարկմամբ (նկ 3 ա - 2): Կտրվածքները յուրաքանչյուր գոտում (ըստ տարածության միջինացված) հաշվարկվել են՝

$$\Sigma_{i(M)}^{(n)} = \frac{\Sigma_{i(Zr)}^{(n)} \cdot S_C + \Sigma_{i(H_2O)}^{(n)} \cdot S_M}{S_C + S_M} \quad (3)$$

բանաձևով, որտեղ S_C -ն և S_M -ը համապատասխանաբար ցիրկոնիումի և ջրի լայնական հատույթի մակերեսներն են: Յուրաքանչյուր գոտում որոշված կտրվածքներով կատարվել է միջինացում ըստ էներգիայի (նկ 3 ա - 3).

$$\Sigma_i^{(n)} = \frac{\Sigma_{i(F)}^{(n)} + \Sigma_{i(M)}^{(n)} \cdot \frac{S_M}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_M^{(n)}}{\overline{\Phi}_F^{(n)}}}{1 + \frac{S_M}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_M^{(n)}}{\overline{\Phi}_F^{(n)}}} \quad (n = 1, 2, 3), \quad (4)$$

որտեղ $\overline{\Phi}_M^{(n)}$ -ը և $\overline{\Phi}_F^{(n)}$ -ը ըստ բջի տվյալ գոտու միջինացված նեյտրոնային հոսքերն են, $\frac{\overline{\Phi}_M^{(n)}}{\overline{\Phi}_F^{(n)}} = \zeta$ - ն՝ նեյտրոնների կորստի գործակիցը: $n = 3$ խմբում հաշվարկվել են

^{235}U – ի կլանման և բաժանման միկրոսկոպիկ կտրվածքները, ինչպես նաև ^{238}U – ի կլանման և խմբից դուրս գալու կտրվածքները [4,5]: $n = 4$ խմբում դիտարկվել է եռագոտի բջիջ (նկ 3 բ - 2), քանի որ նեյտրոնային հոսքերի տարբերությունը պատյանում և դանդաղեցուցչում զգալի է: Այս խմբում նեյտրոնների էներգիան համարժեք է միջավայրում եղած մոլեկուլների, ատոմների միջև գործող կապի էներգիային, միջավայրի մասնիկների ջերմային տատանման էներգիային, ուստի ցրման ժամանակ հնարավոր է նաև նեյտրոնի էներգիայի մեծացում [6]: Չորրորդ խմբում փոխադրեցության միկրոսկոպիկ կտրվածքները տրված են նեյտրոնի ամենահավանական արագության համար՝

$$v=2200 \text{ սմ/վ}, E=0,0253 \text{ էՎ և } T_0=293,15 \text{ Կ:}$$

Միկրոսկոպիկ կտրվածքների՝ ըստ էներգիայի միջինացված արժեքները որոշվել են հետևյալ բանաձևով [4]՝

$$\sigma_{i(4)}^j = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sigma_{i(4)}^{j0} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \cdot F(z_b^j) \cdot g_{a(f)} \quad (i \equiv a, f), \quad (5)$$

որտեղ փոխկապակցման հարաբերական էներգիան՝ (z_b^j) - ն, որոշվել է հետևյալ տրանսցենդենտ հավասարման թվային լուծմամբ [7].

$$(z_b^j)^2 \cdot e^{-z_b^j} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\sum_j S_j \Sigma_a^{j0}}{\sum_j S_j (\xi \Sigma_s^0)_j} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}}, \quad (6)$$

որտեղ $\mathcal{G}_{a(f)}$ -ը նեյտրոնային գազի ջերմաստիճանից կախված աղյուսակային տվյալ է, որի ներմուծմամբ հաշվի է առնվում կլանման և բաժանման կտրվածքների՝ էներգիայից $1/v$ կախվածության օրինաչափությունից շեղումը, T_0, T_n և $\bar{T}$ - ը համապատասխանաբար սենյակային, նեյտրոնային գազի և ջերմատարի միջին ջերմաստիճաններն են:

Հստ քջջի միջինացված (հոմոգենացված) հաստատունները (նկ 3 բ - 3) որոշելիս հաշվարկային բանաձևում կալեկանա նոր անդամ՝

$$\Sigma_i^{(4)} = \frac{\Sigma_{i(F)}^{(4)} + \Sigma_{i(C)}^{(4)} \cdot \frac{S_C}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_C^{(4)}}{\overline{\Phi}_F^{(4)}} + \Sigma_{i(M)}^{(4)} \cdot \frac{S_M}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_M^{(4)}}{\overline{\Phi}_F^{(4)}}}{1 + \frac{S_C}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_C^{(4)}}{\overline{\Phi}_F^{(4)}} + \frac{S_M}{S_F} \cdot \frac{\overline{\Phi}_M^{(4)}}{\overline{\Phi}_F^{(4)}}}, \quad (7)$$

$$\frac{\overline{\Phi}_C^{(4)}}{\overline{\Phi}_F^{(4)}} = \frac{\Sigma_{a(F)}^{(4)}}{\Sigma_{a(C)}^{(4)}} \cdot \frac{(r_C - r_F) \cdot r_F}{2 \cdot L_C^2} + Q_0, \quad (8)$$

որտեղ Q_0 - ն ներքին բլոկ-էֆեկտն է, L_C - ն՝ դիֆուզիայի երկարությունը պատյանում:

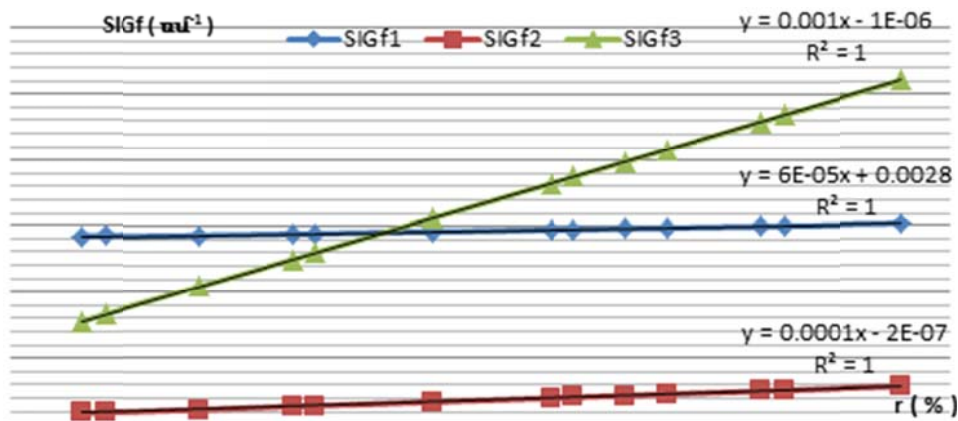
Հետազոտության արդյունքները: Վերը բերված հաշվարկային մոդելով կատարվել է հաշվարկ Microsoft Visual Studio – 2010 միջավայրում: Ծրագրային մշակումն իրականացվել է C++ լեզվով (համակարգային ծրագրավորում) և ստացված արդյունքները ներկայացված են աղյուսակում, որտեղ r - ը վառելիքային կասետի հարստացումն է, SIGtr, SIGa, SIGr և SIGf-ը՝ համապատասխանաբար տրանսպորտային, կլանման, խմբից դուրս գալու և բաժանման՝ ըստ տարածության և էներգիայի միջինացված, մակրոսկոպիկ կտրվածքները, D - ն՝ դիֆուզիայի գործակիցը, FI_m/FI_f – ը և FI_c/FI_f – ը՝ համապատասխանաբար նեյտրոնային հոսքերի հարաբերությունները դանդաղեցուցիչ – վառելիք և պատյան – վառելիք գոտիներում, Zb – ն՝ փոխկապակցման հարաբերական էներգիան, Eb-ն՝ փոխկապակցման էներգիան: Կատարվել է նշված մեծությունների՝ վառելիքային կասետի հարստացումից կախվածության վերլուծություն $r = 1,5, 1,6, 2,0, 2,4, 2,5, 3,0, 3,5, 3,6, 3,82, 4,0, 4,5, 5,0$ արժեքների բազմության համար (աղյուսակում բերված են ՋՋԷՌ – 440 - ում օգտագործվող հարստացման արժեքները): Նկ.4-6 - ում ակնառու կերպով տրված են նեյտրոնաֆիզիկական բնութագրերի՝ հարստացումից կախվածության պատկերները, գրաֆիկների վրա նշված են գծային մոտարկումից ստացված ֆունկցիաների տեսքերը, $R^2 = 1$ արժեքը համապատասխանում է լրիվ համընկնմանը:

Նեյտրոնաֆիզիկական բնութագրերի արժեքները

r	n	SIGtr	SIGa	SIGr	SIGf	D	FIm/FIf	FIc/FIf	Zb	Eb
1,6	1	0,1511	0,0047	0,065	0,0028	2,2287	0,9354	-	-	-
	2	0,2971	0,0042	0,0596	0,0002	1,1334	0,9654			
	3	0,3996	0,0203	0,06	0,0017	0,8344	-			
	4	0,924	0,051	-	0,0299	0,4526	1,2157	1,1637	5,623	0,329
2,4	1	0,1512	0,0048	0,065	0,0029	2,2279	0,9354	-	-	-
	2	0,2969	0,0039	0,0596	0,0003	1,1341	0,9653			
	3	0,4008	0,0216	0,0589	0,0025	0,832	-			
	4	0,956	0,0644	-	0,0419	0,4407	1,2955	1,2248	5,132	0,320
3,6	1	0,1512	0,0049	0,0649	0,003	2,2268	0,9354	-	-	-
	2	0,2966	0,0036	0,0596	0,0004	1,1351	0,965			
	3	0,4025	0,0234	0,0573	0,0038	0,8285	-			
	4	0,9996	0,0815	-	0,0572	0,4255	1,4124	1,3143	4,562	0,310
3,82	1	0,1513	0,0049	0,0649	0,003	2,2266	0,9354	-	-	-
	2	0,2966	0,0036	0,0596	0,0004	1,1353	0,965			
	3	0,4029	0,0238	0,057	0,004	0,8278	-			
	4	1,007	0,0843	-	0,0597	0,423	1,4335	1,3306	4,470	0,309

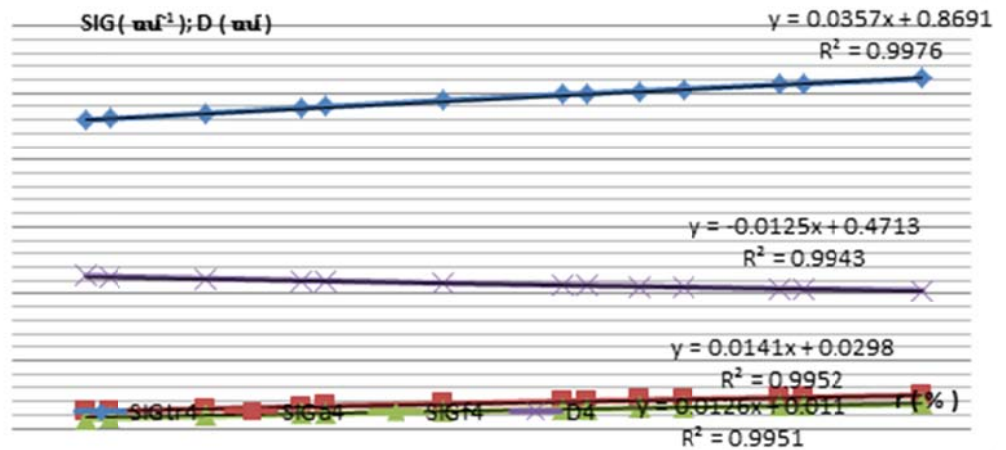
Արդյունքում.

- $n = 1, 2, 3$ խմբերում բաժանման մակրոսկոպիկ կտրվածքներն ունեն գծային թույլ կախվածություն վառելիքի հարստացումից (նկ.4),



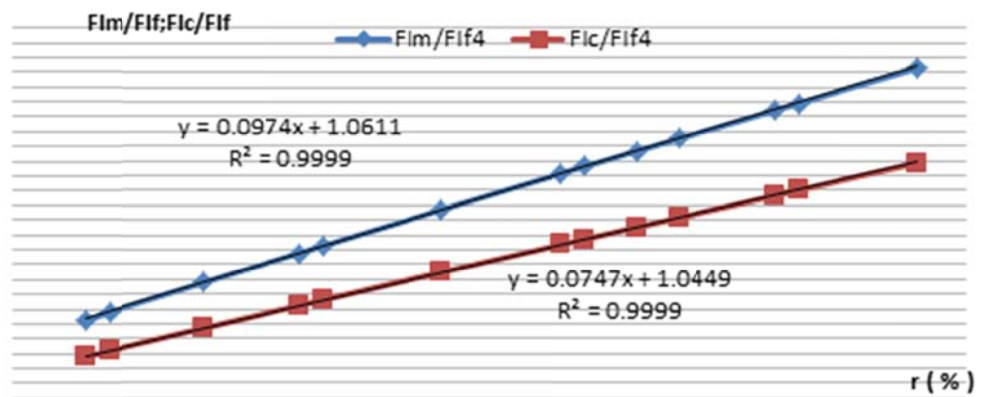
Նկ. 4. $n = 1, 2, 3$ խմբերում բաժանման մակրոսկոպիկ կտրվածքների կախվածությունը վառելիքային հարստացումից

- $n = 4$ խմբում ևս ստացված արդյունքները տալիս են տեսությանը համապատասխանող արդյունքներ (նկ.5),



Նկ.5. $n = 4$ խմբում դիֆուզիայի գործակցի, տրանսպորտային, կլանման և բաժանման մակրոսկոպիկ կտրվածքների կախվածությունը վառելիքային հարստացումից

- նեյտրոնների խմբային հոսքերի հարաբերությունը գծայնորեն է կախված հարստացումից՝ $F_{Im}/F_{If} > F_{Ic}/F_{If}$ (նկ.6):



Նկ.6. $n = 4$ խմբում հոսքերի հարաբերության կախվածությունը վառելիքային հարստացումից

Եզրակացություն: Հաշվարկի արդյունքներից կարելի է եզրակացնել, որ մշակված մոդելը ճիշտ է արտացոլում ֆիզիկական երևույթները ՋՋԷՌ-440-ում: Ստացված տվյալները և օրինաչափությունները կարելի է օգտագործել այս տիպի ռեակտորների կրիտիկականության, ռեակտիվության և բորաթթվային վերլուծության խնդիրներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Румянцев Г.Я.** Расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1967. – 124 с.
2. **Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б.** Теория ядерных реакторов. Том 1. – М.: Атомиздат, 1978. – 400 с.
3. **Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н.** Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. – М.: Академкнига, 2004. – 220 с.
4. **Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.
5. **Белл Д., Глессон С.** Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 489 с.
6. **Галанин А.Д.** Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 536 с.
7. **Հակոբյան Յու.Ռ.** Թվային մեթոդներ. Մաս 1. Երևան: Արմենիկա, 2003. – 222 էջ:

«Ատոմային էլեկտրակայանների շահագործման Հայկական գիտահետազոտական ինստիտուտ» ՓԲԸ («Հայատոմ» ՓԲԸ), «Չափագիտության ազգային ինստիտուտ» ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 15.10.2012:

В.Г. ПЕТРОСЯН, Г.Г. МАРТОЯН

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ ТОПЛИВНЫХ КАССЕТ РЕАКТОРА ВВЭР-440

Моделирована топливная кассета реактора ВВЭР-440 в четырехгрупповом приближении и составлена расчетная программа в среде Microsoft Visual Studio-2010. Рассмотрены особенности пространственных и энергетических усреднений сечений нейтронно-ядерного взаимодействия, проведен анализ зависимости сечений от обогащения.

Ключевые слова: микроскопическое сечение, макроскопическое сечение, групповые константы, четырехгрупповое приближение, обогащение топлива, коэффициент диффузии.

V.G. PETROSYAN, G.H. MARTOYAN

DEVELOPING THE COMPUTATIONAL MODELS OF NEUTRON-PHYSICAL GROUP CONSTANTS OF THE FUEL ASSEMBLIES OF THE REACTOR WWER-440

A fuel assembly of the WWER-440 reactor is modelled in a four-group approximation and a calculation program is compiled in the medium Microsoft Visual Studio-2010. The peculiarities of spatial and energy averaging of the neutron-nucleus interaction cross-sections are considered; the dependence of the cross sections on the enrichment is analyzed.

Keywords: microscopic cross section, macroscopic cross section, group constants, four-group approximation, fuel enrichment, diffusion coefficient.

Т.С. ГНУНИ, Л.В. САФАРЯН

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ПО
УЗЛАМ НАГРУЗКИ СЛОЖНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

На основе результатов структурного анализа потокораспределения в электрической системе предложен метод определения интегральных показателей загрязнения окружающей среды, дифференцированных по узлам нагрузки сложной энергосистемы. Рассмотрен численный пример для гипотетической энергосистемы.

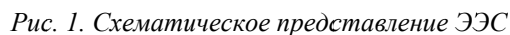
Ключевые слова: структурный анализ, активная мощность, интегральный показатель загрязнения окружающей среды, потокораспределение.

Следствием удовлетворения экономических, социальных, культурных и других потребностей современной цивилизации является антропогенное воздействие на окружающую среду и возникновение проблемы экологической безопасности [1]. В настоящее время в мировой практике используется ряд методов и подходов к оценке эколого-экономического ущерба, под которым понимается определение в денежном эквиваленте негативных изменений в окружающей среде, а также последствий таких изменений [2]. В соответствии с этими подходами в ходе оценки экологической безопасности на локальном уровне особое значение придается оценке ресурсопотребления предприятий. С точки зрения экологической безопасности предприятий, обычно рассматриваются следующие ресурсы:

- экологические — вода и кислород;
- технологические — топливно-энергетические ресурсы (природный газ, нефть, мазут, уголь, электроэнергия и т.п.).

Основные недостатки системы расчета ущербов связаны с трудностями оценки стоимостных показателей потери биологических компонентов окружающей среды, а также сложностью сбора информации для оценки ущербов аналитическими методами. Для преодоления указанных недостатков при оценке экологической опасности промышленных предприятий приходится использовать показатели ущербов, рассчитанные эмпирическим методом на базе удельных показателей [3]. Однако эти показатели, например удельное ресурсопотребление, не всегда в полной мере отражают структуру используемых в технологическом процессе ресурсов. Более того, современные подходы не ограничиваются оценкой экологических ущербов от использования тех или иных технологий, а рассматривают также ущербы, обусловленные технологическими процессами по производству, сооружению, вводу в эксплуатацию этих технологий. Так, известно [4], что при

В настоящей статье предлагается методика определения интегральных показателей загрязнения окружающей среды от генерирующих станций, дифференцированных по узлам нагрузки сложной энергосистемы. Иными словами, предлагается методика, позволяющая в ходе оценки общей экологической безопасности предприятия корректно учитывать одну из ее составляющих – экологический ущерб, обусловленный производством топливно-энергетических ресурсов (в частности, электрической энергии), необходимых для покрытия текущего спроса в узле нагрузки. В предлагаемой методике используется математический аппарат, разработанный для определения доли участия электростанций в электроснабжении конкретной нагрузки и потокораспределения активной мощности в электрической сети [5].

[illegible]

[illegible]

где P_i , $i = \overline{1, m}$ - выработка активной мощности i -й станции; P_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ - активная мощность, поставленная j -му узлу потребления от i -й станции; ΔP_i , $i = \overline{1, m}$ - потери активной мощности, покрываемые i -й станцией.

Очевидно, что

[illegible]

где P'_j , $j = \overline{1, n}$ - потребление активной мощности в j -ом узле потребления.

Представим потокораспределение ЭЭС в виде геометрической модели транспортной задачи (рис. 2).

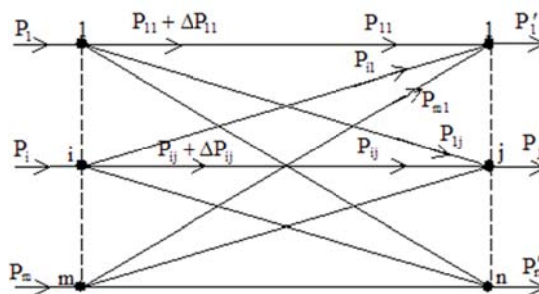


Рис. 2. Потокораспределение активной мощности в виде модели транспортной задачи

В соответствии с рис. 2 потери активной мощности могут быть записаны в виде

[illegible]

где ΔP_{ij} - потери активной мощности, вызванные перетоком P_{ij} .

Аналогично (3), можно также записать

[illegible]

где $\Delta P'_j$ - потери в сети, обусловленные режимом потребления в j -ом узле потребления.

В качестве параметра, характеризующего степень загрязнения окружающей среды от каждой электростанции, воспользуемся интегральным показателем антропогенного воздействия, который представляет собой линейную свертку нормированных по N-балльной шкале значений частных показателей загрязнения и рассчитывается по формуле [2]

$$K_i = \sum_{j=1}^J w_i^j \cdot \tilde{k}_i^j, \quad (5)$$

где K_i , $i = \overline{1, m}$ - интегральный показатель антропогенного воздействия на окружающую среду от i -й электростанции; j - индекс частного комплексного показателя

загрязнения окружающей среды; $\tilde{k}_i^j = \frac{k_i^j - k_{\min}^j}{k_{\max}^j - k_{\min}^j} \cdot N$, $i = \overline{1, m}$ - значение

j -го нормированного по N -балльной шкале частного комплексного показателя загрязнения; w_i^j - весовой коэффициент j -го комплексного показателя, удовлет-

воряющий условию $w_i^j \geq 0$, $\sum_{j=1}^J w_i^j = 1$.

При расчете интегрального показателя основной проблемой является выбор весовых коэффициентов, которые, как правило, устанавливаются путем экспертных оценок. Для исключения возможного субъективизма используются методы структуризации и классификации показателей по их значимости.

Отметим, что в качестве частных комплексных показателей загрязнения окружающей среды, как правило, используют различные индексы, учитывающие:

- степень загрязнения атмосферного воздуха бензопиреном, взвешенными веществами, оксидом углерода, диоксидом серы, диоксидом азота, сероводородами и др.;
- степень загрязнения воды по содержанию в ней фтора, кальция, натрия, сульфатов, железа, пригодности выживания рыб и др.;
- степень загрязнения почвы по содержанию в ней ртути, хрома, свинца, цинка, никеля, магния и др.;
- состояние лесных ресурсов и лесопользования;
- состояние фауны и изменения генофонда животных;
- состояние экосистемы и т.п.

С учетом принятых обозначений определим значения интегральных показателей K'_j , $j = \overline{1, n}$, обусловленных режимами электропотребления в каждом из узлов потребления.

На основе структурного анализа потокораспределения (рис. 2) запишем

[illegible]

или в компактной форме:

$$\sum_{j=1}^m K_i(\mathbf{p}_{ij} + \Delta \mathbf{p}_{ij}) = K'_j \mathbf{p}'_j, \quad j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Из системы уравнений (7) имеем

$$K'_j = \frac{\sum_{i=1}^m K_i (\mathbf{p}_{ij} + \Delta \mathbf{p}_{ij})}{\mathbf{p}'_i}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Введя обозначение

$$\alpha_{ij} = \frac{P_{ij} + \Delta P_{ij}}{P'_i} \leq 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (9)$$

уравнение (8) можем представить в виде

$$K'_j = \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} K_i, \quad j = \overline{1, n}. \quad (10)$$

С учетом принятых в (9) обозначений представим (1) в виде

$$P_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} P'_j, \quad i = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Суммируя правые и левые части (6), запишем уравнения баланса в виде

$$\sum_{i=1}^m K_i \mathbf{P}_i = \sum_{j=1}^n K'_j \mathbf{P}'_j. \quad (12)$$

Аналогично (11), для P'_j , $j = \overline{1, n}$ запишем

$$P'_j = \sum_{i=1}^m \beta_{ij} P_i, \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где $\beta_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_i}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Рассмотрим численный расчет на примере гипотетической электрической системы, схема замещения которой в виде ориентированного графа (ветви графа ориентированы по направлению перетока активной мощности в ней) представлена на рис. 3.

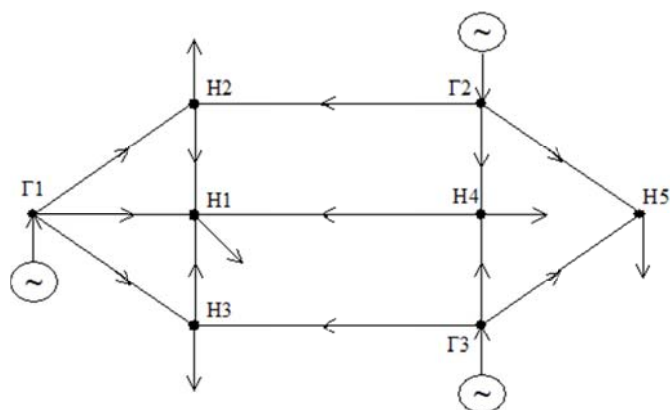


Рис. 3. Ориентированный граф схемы замещения гипотетической электрической системы

Исходная информация и результаты расчета установившегося режима электрической системы приведены в табл. 1 и 2, где R , X – активное и реактивное сопротивления ветви (Ω); $P_{\text{начало}}$, $P_{\text{конец}}$ – перетоки активной мощности ветви ($MВт$); ΔP – потери активной мощности ветви ($MВт$); I – ток ветви ($кА$); P , Q – активные и реактивные узловые мощности ($MВт$, $MВАр$); U , φ – модуль и аргумент узлового напряжения ($кВ$, $град$).

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета режима по узлам

Узел	P	Q	$ U $	φ
Г1	115,31	82,6	115	0
Г2	150	50	116,64	3,48
Г3	100	30	112,79	1,50
Н1	50	20	108,34	-1,41
Н2	60	25	109,01	-1,49
Н3	80	40	108,72	-0,93
Н4	70	30	107,65	-0,60
Н5	90	30	109,07	0,01

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета режима по ветвям

Ветвь		R	X	P _{начало}	P _{конец}	ΔP	I
Г1	Н1	9,89	14,02	40,50	38,74	1,76	0,421
Г1	Н2	9,82	18,07	30,06	29,00	1,06	0,326
Г1	Н3	7,77	10,67	44,75	42,81	1,94	0,493
Г2	Н2	17,37	37,63	33,71	32,04	1,67	0,297
Г2	Н4	14,00	22,00	51,22	48,24	2,98	0,461
Г2	Н5	8,00	15,00	65,07	62,19	2,88	0,600
Г3	Н3	8,58	13,48	43,27	41,96	1,31	0,389
Г3	Н4	11,00	21,00	28,18	27,34	0,84	0,276
Г3	Н5	9,65	14,62	28,55	27,81	0,74	0,270
Н1	Н2	11,11	19,04	1,04	1,00	0,04	0,034
Н1	Н3	13,37	17,16	4,78	4,73	0,05	0,045
Н1	Н4	9,00	19,00	5,58	5,52	0,06	0,080

Результаты расчетов структурного анализа потокораспределения (P_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,5}$) представлены в табл. 3, где элементы первого столбца и первой строки являются активными мощностями соответственно выработки электростанций и потребления потребителей.

Таблица 3

Результаты расчетов структурного анализа потокораспределения

		Н1	Н2	Н3	Н4	Н5
		50	60	80	70	90
Г1	115,31	41,61	28,51	40,40	0	0
Г2	150	4,05	31,49	0	44,68	62,19
Г3	100	4,34	0	39,60	25,32	27,81

Потери активной мощности ΔP_{ij} , вызванные перетоками P_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,5}$, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Потери активной мощности ΔP_{ij}

	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Σ
Г1	1,93	1,03	1,83	0	0	4,79
Г2	0,30	1,65	0	2,76	2,88	7,59
Г3	0,18	0	1,23	0,78	0,74	2,93
Σ	2,41	2,68	3,06	3,54	3,62	15,31

Значения коэффициентов α_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,5}$ (9) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Коэффициенты α_{ij} , $i = \overline{1,3}$, $j = \overline{1,5}$

α	H1	H2	H3	H4	H5
Г1	0,871	0,492	0,528	0	0
Г2	0,087	0,552	0	0,678	0,723
Г3	0,090	0	0,510	0,373	0,317

В табл. 6 приведены нормативные значения комплексных показателей загрязнения атмосферы, почвы и воды [6], а в табл. 7 – рассчитанные по формуле (5) нормативные значения нормированных по 10-балльной шкале комплексных и интегрального показателей загрязнения. Выбор весовых коэффициентов осуществлен на основе простейшего эгалитарного подхода, при котором для всех показателей используются равные весовые коэффициенты.

Таблица 6

Нормативные значения комплексных и интегрального показателей загрязнения окружающей среды

Показатель	Усл. обозн.	Низкое		Среднее		Высокое		Опасное		Критическое более
		от	до	от	до	от	до	от	до	
Индекс загрязнения атмосферы	ИЗА	0	5	5	7	7	14	14	21	21
Индекс загрязнения почвы	Z _c	0	16	16	32	32	64	64	128	128
Индекс загрязнения воды	ИЗВ	1	2,5	2,5	4	4	6	6	10	10

Поскольку расчет комплексных показателей загрязнения окружающей среды не является предметом настоящей статьи и представляет собой отдельную задачу, основанную на использовании указанных выше аналитических и эмпирических методов, то в рассматриваемом примере принято, что значения показателей загрязнения окружающей среды для каждой из электростанций определены и приведены в табл. 8.

Таблица 7

Нормативные значения нормированных показателей загрязнения окружающей среды

Нормированный показатель	Усл. обозн.	Низкое		Среднее		Высокое		Опасное		Критическое более
		от	до	от	до	от	до	от	до	
Индекс загрязнения атмосферы	ИЗА	0	2,4	2,4	3,3	3,3	6,7	6,7	10	10,0
Индекс загрязнения почвы	Z_c	0	1,3	1,3	2,5	2,5	5,0	5,0	10	10,0
Индекс загрязнения воды	ИЗВ	0	1,7	1,7	3,3	3,3	5,6	5,6	10	10,0
Интегральный	К	0	1,8	1,8	3,1	3,1	5,7	5,7	10	10,0

Примечание. Чем больше значение показателя, тем выше экологический ущерб окружающей среды.

Таблица 8

Значения показателей загрязнения окружающей среды от каждой из электростанций

Показатель	Узлы генерации					
	1		2		3	
	Значение показателя	Нормированное значение показателя	Значение показателя	Нормированное значение показателя	Значение показателя	Нормированное значение показателя
Индекс загрязнения атмосферы	12,5	5,95	0	0	9,8	4,67
Индекс загрязнения почвы	29,7	2,32	2,2	0,17	14,8	1,16
Индекс загрязнения воды	2,8	2,00	3,8	3,11	2,4	1,56
Интегральный		3,42		1,09		2,46

Имея значения K_i , $i = \overline{1,3}$, по (10) определим K'_j , $j = \overline{1,5}$:

$$\begin{bmatrix} K'_1 \\ K'_2 \\ K'_3 \\ K'_4 \\ K'_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,871 & 0,087 & 0,090 \\ 0,492 & 0,552 & 0 \\ 0,528 & 0 & 0,510 \\ 0 & 0,678 & 0,373 \\ 0 & 0,723 & 0,317 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3,42 \\ 1,09 \\ 2,46 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,30 \\ 2,29 \\ 3,06 \\ 1,66 \\ 1,57 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Таким образом, значения элементов матрицы-столбца (14) представляют собой интегральные показатели загрязнения окружающей природной среды от генерирующих станций, дифференцированные по узлам нагрузки. Если узлами нагрузки являются промышленные потребители, то, с точки зрения произведенной для покрытия спроса электрической энергии, используемой в технологических процессах, наибольший ущерб окружающей среде наносит предприятие, расположенное в узле 1, а наименьшее – в узле 4. Дезагрегированные по комплексным показателям загрязнения окружающей среды значения интегральных показателей приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения нормированных интегральных и комплексных показателей загрязнения окружающей среды от генерирующих станций, дифференцированных по узлам нагрузки

Нормированный показатель	Узлы нагрузки				
	1	2	3	4	5
Интегральный	3,30	2,29	3,06	1,66	1,57
Индекс загрязнения атмосферы	5,60	2,93	5,52	1,74	1,48
Индекс загрязнения почвы	2,14	1,24	1,81	0,55	0,49
Индекс загрязнения воды	2,15	2,70	1,85	2,69	2,74

Анализ приведенных в табл. 9 показателей позволяет прийти к заключению, что если текущий уровень спроса в узлах нагрузки не оказывает существенного влияния на уровни загрязнения со стороны генерирующих станций почвы и воды, то с точки зрения загрязнения атмосферы, наиболее неблагоприятное воздействие на структуру генерации оказывают значения нагрузок в узлах 1 и 3.

Выводы

1. Предложена методика, позволяющая корректно учитывать одну из составляющих общей экологической безопасности предприятия – экологический ущерб, обусловленный производством топливно-энергетических ресурсов, необходимых для покрытия текущего спроса в узле нагрузки.
2. Приведен пример расчета для гипотетической электрической системы.
3. Предложенная методика после соответствующих преобразований может быть использована для определения дифференцированных по узлам нагрузок интегральных показателей загрязнения окружающей природной среды в системах газо- и теплоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михайлов Л.А.** Концепции современного естествознания / Под редакцией Л. А. Михайлова. - СПб.: Изд-во "Питер", 2008. -336 с.
2. **Бакуменко Л.П., Коротков П.А.** Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона // Прикладная эконометрика. - 2008. - № 1(9). С. 73-92.
3. **Жибинова К.В.** Экономические основы экологии: Электронный учебно-методический комплекс. http://www.kgau.ru/distance/ur_4/ekology/cont/index.html
4. Introduction to Clean Energy Project Analysis / RET Screen International. - Canada. (www.retscreen.net)
5. **Сафарян В.С.** Структурный анализ потоков и потерь активной мощности в электрических цепях // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2001. - Т. 54, № 1. - С. 52-57.
6. **Ламтюгин В.А.** Нормирование качества окружающей среды: Методические указания к практическому занятию по дисциплине "Экология". -Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. - 39 с.

ЗАО "НИИ Энергетики". Материал поступил в редакцию 10.07.2012.

S.U. ԳՆՈՒՆԻ, Լ.Վ. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

**ԲԱՐԴ ԷՆԵՐԳԱԶԱՄԱԿԱՐԳԻ ԲԵՌԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՎ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԾ
ՇՐՋԱԿԱ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԱՂՏՈՏՄԱՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼԱՑԻՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԻ
ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱ**

Էլեկտրական համակարգի հոսքաբաշխման կառուցվածքային վերլուծության արդյունքների հիման վրա առաջարկվում է բարդ էներգահամակարգի բեռային հանգույցներով դիֆերենցված շրջակա միջավայրի աղտոտվածության ինտեգրալային ցուցանիշների որոշման մեթոդիկա: Դիտարկված է թվային օրինակ վարկածային էներգահամակարգի համար:

Առանցքային բառեր. կառուցվածքային վերլուծություն, ակտիվ հզորություն, շրջակա միջավայրի աղտոտվածության ինտեգրալային ցուցանիշ, հոսքաբաշխում:

T.S. GNUNI, L.V. SAFARYAN

**A METHOD TO DEFINE THE ENVIRONMENTAL POLLUTION OF INTEGRATED
INDICATORS DIFFERENTIATED AT LOAD NODES OF A COMPLEX POWER
SYSTEM**

On the basis of flow distribution structural analysis results in an electric system, a method to a define the integrated indicators of environmental pollution differentiated at load nodes of complex power system is offered. A digital example for a hypothetical power system is reviewed.

Keywords: structural analysis, active power, integrated indicator of environmental pollution, flow distribution.

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Ա.Ն. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Դ.Լ. ՄԻՐԶՈՅԱՆ, Ա.Ա. ԴՈՒՐԳԱՐՅԱՆ

**ԻՆՔՆԱՏԱՔԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՍԲ ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏԻԿ
ԼԻՑԶԱԹԱՓՈԽՄԻՑ ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՍՈՂԵԼՆԵՐ**

Առաջարկվել են ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) կարևորագույն հանգույց հանդիսացող էլեկտրաստատիկ լիցքաթափումից (ԷՍԼ) պաշտպանության սարքերի ժամանակային և հաճախականային վերլուծությանը կողմնորոշված ստատիկ և ջերմային մոդելներ: Մշակված մոդելները, ինքնատաքացման երևույթը հաշվի առնելու շնորհիվ, բարձր հոսանքների ռեժիմներում հաշվարկների դեպքում, առկա մոդելների համեմատ, ապահովում են ավելի մեծ ճշտություն և թույլ են տալիս մոդելավորել ԻՍ-երը ԷՍԼ-ի տեսանկյունից ու մինչև արտադրությունը պարզել դրանց հուսալիությունը:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաստատիկ լիցքաթափում, ջերմային մոդել, մոդելավորման ճշտություն:

ԷՍԼ-ից պաշտպանության սարքերի առկա մոդելների սահմանափակ հնարավորությունները: Ժամանակակից ԻՍ-երի կարևոր հանգույցների՝ ԷՍԼ-ից պաշտպանության սարքերի առկա մոդելները չեն ապահովում նախագծման գործնական պահանջները բավարարող արդյունքների ճշտություն: Դա խոչընդոտում է ԻՍ-ի ԷՍԼ-ից պաշտպանության աստիճանի որոշումը: Այս խնդրի լուծման համար առաջարկվել են տարբեր մոդելներ [1, 2]: Սակայն դրանցում հաշվի չեն առնված ԷՍԼ-ից պաշտպանության սարքերի հիմնական ռեժիմները: Առկա մոդելներում հաշվի չեն առնված նաև ԷՍԼ-ից պաշտպանության ժամանակակից սարքերի բնութագրերի վրա եղևան ազդեցություն ունեցող տեխնոլոգիական շեղումները:

Ներկայումս հայտնի են ԷՍԼ-ից պաշտպանության սարքերի մոդելավորման ճշտության մեծացման երկու հիմնական մոտեցումներ: Առաջինի էությունը առկա սարքերի մոդելների օգտագործմամբ մակրոմոդելի կառուցումն է [3]: Սրա հիմնական թերությունն այն է, որ օգտագործվող մոդելի պարամետրերի քանակը զգալիորեն ավելին է, քան անհրաժեշտ է նշված խնդրի լուծման համար: Ավելին, կոնկրետ տեխնոլոգիական գործընթացի համար բավականին բարդ է ստանալ մակրոմոդելի պարամետրերի արժեքները: Մյուս մոտեցման դեպքում կառուցվում է ԷՍԼ-ից պաշտպանության սարքի ամբողջական մոդելը [4]: Սա հնարավորություն է տալիս ստանալ հենց ԷՍԼ երևույթի մոդելավորմանը կողմնորոշված հատուկ մոդել: Դրա մյուս առավելությունը կապված է տեխնոլոգիական փոփոխությունները և նոր երևույթները հաշվի առնելու տեսանկյունից հարմարվողականության հետ: Անցողիկ գործընթացները հաշվի առնելու նպատակով մշակվել են նաև բարձր ազդանշանային մոդելներ, ինչպիսիք են dV/dt փոխանջատումները [4] և ժամանակից կախված բացասական

դիմադրությամբ տեղամասերը բնութագրող մոդելները [5]: Ավելին, ռադիոհաճախականային շղթաների հետ օգտագործվող էլքային դիմադրությունների համաձայնեցման և բարձր արագագործություն ունեցող մուտք/էլք հանգույցների համար մշակվել են նաև էլքային դիմադրության ճշգրիտ մոդելավորմանը կողմնորոշված ցածր ազդանշանային մոդելներ:

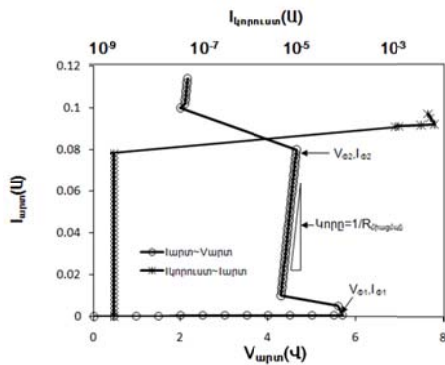
Անցողիկ գործընթացներում սարքի խափանման գրանցման նպատակով [3]-ում առաջարկված մոդելում կիրառվել է դիֆուզիայի ջերմային և սարքի էլեկտրական հավասարումների միաժամանակյա լուծման գաղափարը: Այս մոտեցումը ենթադրում է բարձրջերմաստիճանային ճշգրիտ մոդելների, խոռոչների շարժունակության, իոնացման աստիճանի, էներգիական գոտիների և այլ պարամետրերի առկայություն:

Սակայն առկա բոլոր մոդելներում անտեսված են երկրորդային ինքնատաքացման երևույթը և սարքերի ներքին դիմադրության աճը, երբ էՄԼ-ի ժամանակը և լիցքաթափման հոսանքները դառնում են ավելի մեծ, ինչը օհմական տեղամասերում հանդիսանում է Ջոուլյան տաքացման պատճառ: Ստորև ներկայացված է ինքնատաքացման երևույթը հաշվի առնող մշակված մոդելը:

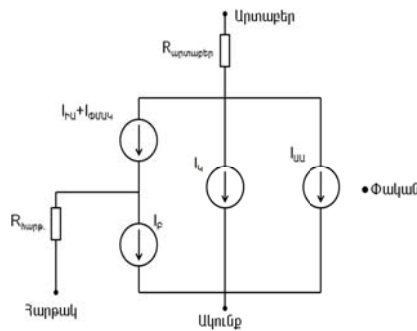
N տիպի ՄՕԿ տրանզիստորի մոդելը: էՄԼ-ից պաշտպանության նպատակով N տիպի ՄՕԿ տրանզիստորներն օգտագործվում են որպես լարումը փոքրացնող և հոսանքը շունտող սարքեր: Պաշտպանության սարքի աշխատանքի հիմքում ընկած է պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի բացման երևույթը, որի արդյունքում առաջանում է, այսպես կոչված, «բացասական դիմադրությամբ» տեղամաս: Որպես N տիպի ՄՕԿ տրանզիստորներով պաշտպանության սարք հիմնականում օգտագործվում է հողանցված փականով տրանզիստորը (ՀՓՏ) [5]: Որպես պաշտպանության սարք կարելի է օգտագործել նաև մեծ հոսքուղու լայնությամբ հագեցման վիճակում գտնվող ՄՕԿ տրանզիստորը [5]: Այս դեպքում նույնպես անհրաժեշտ է մոդելավորել ծակման տիրույթը, քանի որ բավականաչափ բարձր հոսանքի դեպքում տրանզիստորը կարող է դուրս գալ հագեցման տիրույթից՝ մտնելով ծակման տիրույթ: ՀՓՏ-ի հաշվարկային վոլտ-ամպերային բնութագրի (ՎԱԲ) (նկ.1) ստացման համար օգտագործված է հաղորդման գծի իմպուլսային տեխնոլոգիան (ՀԳԻՏ) [6]: Յուրաքանչյուր իմպուլսի համար բերված է հաստատուն կորստի հոսանքը: Առավել կարևոր է նկ.1-ում պատկերված ՎԱԲ-ի նշագրված պարամետրերի ճշգրիտ մոդելավորումը: Դրանք են՝ $V_{\Phi 1}$ -ը և $I_{\Phi 1}$ -ը՝ համապատասխանաբար փոխանջատման լարումն ու հոսանքը, $V_{\Phi 2}$ -ը և $I_{\Phi 2}$ -ը՝ համապատասխանաբար երկրորդական ծակման լարումն ու հոսանքը, $R_{միացման}$ -ը՝ սարքի դիմադրությունը, երբ այն փոխանջատված է (միացած է), $V_{պահ}$ -ը՝ էքստրապոլացված պահպանման լարումը:

Ստատիկ մոդելը: Ստատիկ մոդելում (նկ.2) հոսանքի բոլոր աղբյուրները լարումով ղեկավարվող են: $I_{սս}$ -ն ՄՕԿ տրանզիստորի արտաբեր-ակունք հոսանքն է [6], $R_{արտաբեր}$ -ը՝ բացասական դիմադրության տեղամասում սարքի դիմադրությունը, $I_{ԻԸ}$ -ն՝ իոնացման ազդեցությամբ հոսանքը, իսկ $I_{\Phi ՄԱԿ}$ -ը՝ փականի մակաձած կորստի հո-

սանքը արտաբերով (գոտուց-գոտի թունելային անցման), I_G -ն և I_F -ն՝ պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի կոլեկտորի և բազայի հոսանքները, $R_{\text{հարթ}}$ -ն՝ բազայից մինչև հարթակի կոնտակտը եղած տեղամասի դիմադրությունը:



Նկ. 1. ՀՓՏ-ի հաշվարկային վոլտ-ամպերային բնութագիրը



Նկ. 2. N տիպի ՄՕԿ տրանզիստորի ստատիկ մոդելը

Եթե ՄՕԿ տրանզիստորի ստանդարտ մոդելում [7] $I_{\text{սս}}$ -ն արդեն առկա է, ապա դրա համար VERILOG-A [8] լեզվով նոր մոդելի նկարագրության անհրաժեշտություն չի լինի: Միշտ չէ, որ անհրաժեշտ է՝ պաշտպանության շղթայի մոդելը տարբերվի ակտիվ շղթայի մոդելից: Եթե ՄՕԿ տրանզիստորի պարամետրերն առկա են մոդելում, ապա այդ մոդելը կարող է կցվել VERILOG-A լեզվով ստեղծված կոդային n-p-n տիպի երկբևեռ տրանզիստորի մոդելին՝ կազմելով մի ընդհանուր սարքի մոդել: Քանի որ մոդելավորող ծրագրային ներկայիս միջոցներն աշխատում են միայն այն VERILOG-A մոդելներով, որոնց մուտքերին կարող են կիրառվել միայն լարումներ, այդ պատճառով օգտագործվել է հոսանքով դեկավարվող լարման աղբյուրների հավելյալ ճյուղ, որի լարումը համարժեք է $I_{\text{սս}}$ հոսանքին: Առկա [7] մոդելներում ներառված արտաբեր-ակունք հաջորդական դիմադրությունները քիչ են ազդում պաշտպանության սարքերի մոդելների ճշտության վրա, քանի որ բարձր հոսանքի պայմաններում այդ հոսանքի մեծ մասը հոսում է կոդային n-p-n տիպի երկբևեռ տրանզիստորով: Այնուամենայնիվ, ՄՕԿ տրանզիստորի մոդելում իոնացման ազդեցության հոսանքը պետք է անտեսել, քանի որ այն արդեն հաշվի է առնված պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի մոդելում: Առաջարկվող մոդելում $I_{\text{սս}}$ -ն մոդելավորվել է աղյուսակի ձևի կողմում բերված բանաձևերի օգտագործմամբ: Այստեղ $I_{\text{սս}}$ -ի մոդելը BSIM [7] մոդելների պարզեցված տարբերակն է, սակայն այն լիովին բավարարում է ԷՄԼ երևույթը մոդելավորելու համար: Աղյուսակի աջ կողմում բերված են սարքում պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի համարժեք բանաձևերը: Երկու տարբեր տեխնոլոգիաներով արտադրված ՄՕԿ տրանզիստորները մոդելավորվել են աղյուսակի աջ և ձախ կողմերում բերված բանաձևերի կիրառմամբ: Հաշվարկային և մոդելավորված արդյունքները ներկայացված են նկ. 3-ում: Մոդելավորման համար օգ-

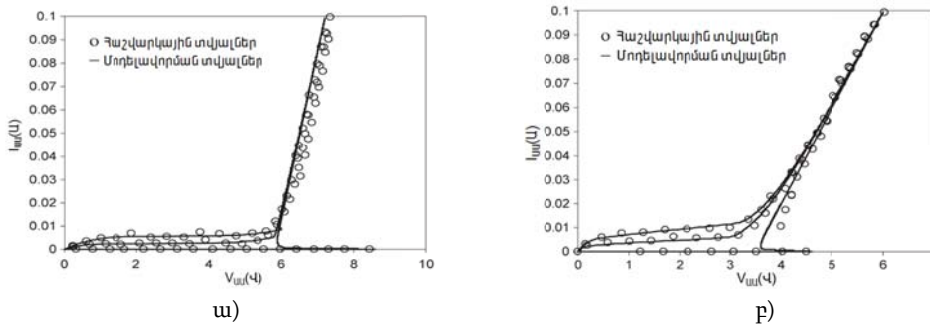
տագործվել է սխեմատեխնիկական վերլուծության HSPICE ծրագրային միջոցը: Ինչպես երևում է նկ.3-ից, մոդելները բավականին ճշգրիտ են բնութագրում սարքի վարքը երկու տարբեր տեխնոլոգիաների դեպքում: Խոռոչների բազմապատկման M գործակիցը, ի տարբերություն հիմնական տիպային $M=[1-V_w/BV_{wsh}]^{-1}$ սահմանման [3, 4, 6], նկարագրված է էքսպոնենցիալ ֆունկցիայով: M գործակիցի հիմնական հավասարումը չի գործում, երբ $V_w=BV_{wsh}$, որտեղ V_w -ն արտաբեր-հարթակ անցման ծակման լարումն է, իսկ BV_{wsh} ՝ պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի ծակման լարումը: Առաջարկվող մոդելներում առկա են երկու՝ $M_{\text{ՄՕԿ}}$ և $M_{\text{երկբևեռ}}$ բազմապատկման գործակիցներ:

Աղյուսակ

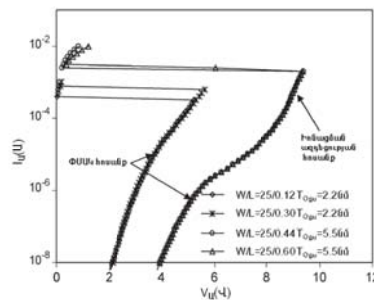
Ի _{ԱԱ} հոսանքի բանաձևերը	Պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի հոսանքի բանաձևերը
$V_{\text{Ա.Հազ.}} = \frac{(V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}})L\varepsilon_{\text{Հազ.}}}{V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}} + mL\varepsilon_{\text{Հազ.}}}$ $I_{\text{Ա.Հազ.}} = \frac{WC_{\text{օքս.}}\nu_{\text{Հազ.}}(V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}})^2}{V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}} + mL\varepsilon_{\text{Հազ.}}}$ Երբ $V_{\Phi\text{Ա}} > V_{2\text{եմ}}$ Եթե $V_{\text{ԱԱ}} \leq V_{\text{Ա.Հազ.}}$ $I_{\text{ԱԱ}} = \frac{WC_{\text{օքս.}}\mu_{\text{էֆ}}}{L} \left[(V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}})V_{\text{ԱԱ}} - \frac{m}{2}V_{\text{ԱԱ}}^2 \right] \frac{1}{1 + \frac{V_{\text{ԱԱ}}}{L\varepsilon_{\text{Հազ.}}}}$ Եթե $V_{\text{ԱԱ}} > V_{\text{Ա.Հազ.}}$ $I_{\text{ԱԱ}} = I_{\text{Ա.Հազ.}} \left(1 + \frac{V_{\text{ԱԱ}} - V_{\text{Ա.Հազ.}}}{V_A} \right)$ $V_{\Phi\text{Ա}} \leq V_{2\text{եմ}}$-ի համար $I_{\text{ԱԱ}} = \frac{WC_{\text{օքս.}}\mu_{\text{էֆ}}}{L} (m-1)(kT/q)^2 e^{\frac{V_{\Phi\text{Ա}} - V_{2\text{եմ}}}{m k T / q}} \left(1 - e^{\frac{-V_{\text{ԱԱ}}}{k T / q}} \right)$ $I_{\Phi\text{ԱԱ}} = AW \frac{V_{\text{ԱԱ}} - 1.12}{T_{\text{օքս.}}} \frac{WC_{\text{օքս.}}\mu_{\text{էֆ}}}{L} e^{\frac{-BT_{\text{օքս.}}}{(V_{\text{ԱԱ}} - 1.12)}}$	ա. Պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի հոսանքի բանաձևերը $I_{\text{Կ}} = I_{0\text{Կ}} \left(e^{V_{\text{բԱԱ}} / k T / q} - e^{V_{\text{բԱրտ}} / k T / q} \right)$ $I_{\text{բ}} = I_{0\text{բ}} \left(e^{V_{\text{բԱԱ}} / k T / q} - 1 \right)$ $I_{\text{հարթ}} = V_{\text{բհարթ}} / R_{\text{հարթ}}$ բ. Իոնացման ազդեցության հոսանքի բանաձևերը $I_{\text{ԻԱ}} = (M_{\text{ՄՕԿ}} - 1)I_{\text{ԱԱ}} + (M_{\text{երկ}} - 1)I_{\text{Կ}}$ $M_{\text{երկ}} = 1 + \exp(p_1(V_{\text{Արտ.բ}} - V_{\eta\text{ահ}})) - \exp(-p_1V_{\eta\text{ահ}})$ $M_{\text{ՄՕԿ}} = 1 + \exp(p_2(V_{\text{ԱԱ}} - p_3 - V_{\text{Ա.հազ}})) - \exp(p_2(-p_3 - V_{\text{Ա.հազ}}))$ գ. Արտաբերի դիմադրության բանաձևերը $R_{\text{Արտ}} = \begin{cases} \frac{V_{\text{Ա.արտԱ}}}{V_{\eta\text{ահ}}} R_{\text{միացման}} & \text{Երբ } V_{\text{Ա.արտԱ}} < V_{\eta\text{ահ}} \\ R_{\text{միացման}} & \text{Երբ } V_{\text{Ա.արտԱ}} \geq V_{\eta\text{ահ}} \end{cases}$

$M_{\text{ՄՕԿ}}$ -ը տրանզիստորի հոսքուղու հոսանքի բազմապատկման գործակիցն է և կախված է $V_{\text{ահազ}}$ -ից, ինչն էլ, իր հերթին, ֆունկցիա է $V_{\text{փա}}$ -ից: $M_{\text{երկբևեռ}}$ -ը պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորի հոսանքի բազմապատկման գործակիցն է: Այս տարանջատումն անհրաժեշտ է «բացասական դիմադրության» տեղամասից հետո փականի լարումից արտաբերի հոսանքի մեծացման անկախությունը (նկ.3) ընդգծելու համար: Նկ 3 ա-ում, երբ $V_{\text{փ}}=0$, ապա կորստի հոսանքը ցածր է, և սարքը չի փոխանջատվում

մինչև հեղեղային ծակման լարումը՝ $BV_{\text{ահ}}$: Երբ $V_{\text{փա}} > 0$, հոսքուղու մեծացած հոսանքն ապահովում է $V_{\text{փ}} < BV_{\text{ահ}}$ պայմանի կատարումը: Նմանապես, եթե հոսքուղում փականի մակածած կորստային հոսանքը մեծ է, ապա դա նույնպես կարող է փոքրացնել փոխանջատման լարումը [4]: Այստեղից ակնհայտ է, որ $I_{\text{փմակ}}$ -ը պետք է մոդելավորվի: Նկ 4-ում պատկերված է ՀՓՏ-ի ՎԱԲ-ը, երբ փականի օքսիդի հաստությունը համապատասխանաբար 2,2 նմ և 5,5 նմ է: Բարակ օքսիդի հաստություն ունեցող տրանզիստորի արտաբերում փականի մակածած կորստի հոսանքն ավելի մեծ է, որը $R_{\text{հարթ}}$ -ի շրջակայքում առաջացնում է էական լարման անկում, դրանով իսկ շեղում է բազա-էմիտեր անցումը և բացում պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորը: Հաստ օքսիդով տրանզիստորում պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորը բացելու համար հեղեղային ծակման հոսանք (իոնացման ազդեցության հոսանք) է անհրաժեշտ: «Բացասական դիմադրության» տեղամասից հետո արտաբերի դիմադրությունը դառնում է հաստատուն, որի արժեքը կարելի է ստանալ հաշվարկային եղանակով: Պարզության համար մոդելում $R_{\text{արտաբեր}}$ -ի արժեքն ընտրվում է այնպես, որ պարազիտային երկբևեռ տրանզիստորը բացվի: Փոխարենը՝ $R_{\text{արտաբեր}}$ -ի արժեքը բարձր հոսանքի դեպքում ավելի բարձր է, քան ցածր հոսանքի դեպքում, ինչը պայմանավորված է մասնիկների շարժման արագության հազեցմամբ:

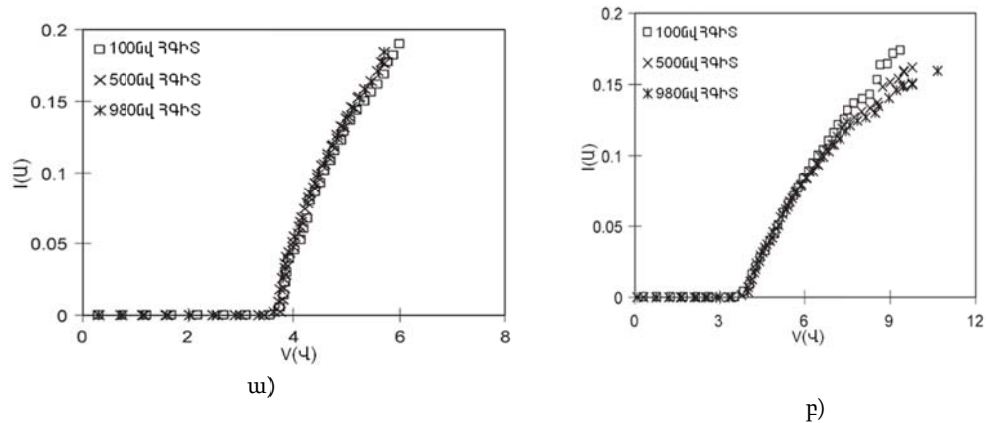


Նկ. 3. 100 նվ տևողությամբ ՀՓՏ-ի տվյալները և մոդելավորման արդյունքները. ա) 0,18 նմ տեխնոլոգիա $V_{\text{փ}}=0, 1,8$ ($W/L=20/0,6$), բ) 0,13 նմ տեխնոլոգիա $V_{\text{փ}}=0, 0,8$ ($W/L=25/0,12$)



Նկ. 4. Օքսիդի երկու տարբեր հաստությունների դեպքում ՀՓՏ-ի ՎԱԲ-ը

Ջերմային մոդելը: Վերը նկարագրված մոդելում ՄՕԿ տրանզիստորի միացման դիմադրությունը մոդելավորվել էր հաստատուն արժեքով: Սա փոքր հաջորդական դիմադրություն ունեցող սարքի դեպքում ընդունված մոտեցում է: Այն դառնում է սխալ, երբ արտաբերի ոչ սիլիցիդացված տիրույթի պատճառով (որը հաճախ արվում է ՀՓՏ-ի դեպքում) սարքի միացման դիմադրությունը մեծանում է: 0,12 նմ հոսքուղու երկարությամբ ՀՓՏ-ի իմպուլսային տեխնոլոգիայով ստացված ՎԱԲ-ը իմպուլսի տևողության տարբեր արժեքների համար բերված է նկ. 5-ում: Նկ. 5 բ-ում մոդելավորված տրանզիստորն ունի ավելի լայն ոչ սիլիցիդային հատված արտաբերի տիրույթում և, հետևաբար, ավելի մեծ միացման դիմադրություն, քան նկ.5 ա-ում մոդելավորված տրանզիստորը: *Քննարկում*-ը փոփոխվում է, որովհետև, ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց սիլիցիումի դիմադրությունն աճում է, իսկ սարքի ջերմաստիճանը, իմպուլսի տևողությունից կախված, աճող ֆունկցիա է [9]:



Նկ. 5. Ոչ սիլիցիդային N տիպի ՄՕԿ տրանզիստորի համար ՀԳԻՏ ՎԱԲ-ի տվյալները.

ա) $W/L=25/0,12$, $l_{wp}=1$ մկմ և $l_{wl}=1$ մկմ, բ) $W/L=25/0,12$, $l_{wp}=7$ մկմ և $l_{wl}=1$ մկմ

Եթե նույնիսկ ինքնատաքացման երևույթի ազդեցությունը փոքր է (ինչպես 50նմ իմպուլսի դեպքում), ապա միացման դիմադրությունն այնքան էլ հաստատուն չէ: Դրա պատճառը մասնիկների արագության հագեցումն է: Առաջարկվում է ինքնատաքացման երևույթը հաշվի առնել շեղումից և ժամանակից կախված դիմադրության մոդելում, որը կազմվել է՝ լիցքակիրների շարժման արագության և ջերմային երևույթը հաշվի առնելով, օգտագործելով կիսափորձնական բանաձև: Դրեյֆային արագության բանաձևը որոշվում է հետևյալ կերպ՝

$$\nu = \begin{cases} \frac{\mu_{T0} E}{E_{hագ}}, & E < E_{hագ} \\ \nu_{hագ}, & E \geq E_{hագ} \end{cases},$$

որտեղ μ_{T0} -ն սենյակային ջերմաստիճանում (300K) էլեկտրոնի շարժունակությունն է, իսկ $E_{\text{հազ}}$ -ը՝ մոդելի պարամետրը, որը կարող է դիտարկվել որպես լիցքակիրների արագության հազեցման համար անհրաժեշտ էլեկտրական դաշտի լարվածության որոշիչ արժեք: Դիմադրության 1 երկարության և կիրառված V_R լարման դեպքում կարելի է գրել՝

$$\nu = \begin{cases} \frac{\mu_{T0} \frac{V_R}{l}}{1 + \frac{V_R}{(E_{\text{հազ}} l)}}, \frac{V_R}{l} < E_{\text{հազ}}, \\ \nu_{\text{հազ}}, \frac{V_R}{l} \geq E_{\text{հազ}}: \end{cases}$$

Միլիցիումում էլեկտրոնների շարժունակության կախումը ջերմաստիճանից ներկայացվում է հետևյալ փորձնական բանաձևով.

$$\mu_T = \mu_{T0} \left(1 + \frac{\Delta T}{300} \right)^\beta, \quad (1)$$

որտեղ $\Delta T = T - 300 \text{ K}$, իսկ β - ն համապատասխանության գործակիցն է:

Արագության նկարագրված մոդելը կիրառելով Օհմի օրենքի միկրոսկոպիկ տարբերակում, կստացվի՝

$$J = \sigma E = nq \nu,$$

որտեղից՝

$$J = nq \frac{\mu_T \frac{V_R}{l}}{1 + \frac{V_R}{(E_{\text{հազ}} l)}} = nq \frac{\mu_{T0} \left(1 + \frac{\Delta T}{300} \right)^\beta \frac{V_R}{l}}{1 + \frac{V_R}{(E_{\text{հազ}} l)}}, \frac{V_R}{l} < E_{\text{հազ}},$$

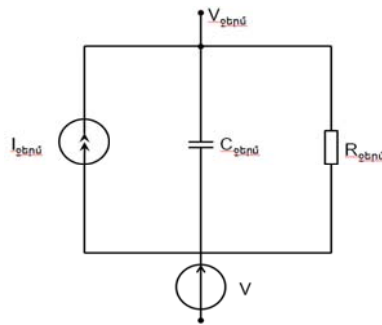
$$I = JWt_R = nqWt_R \frac{\mu_{T0} \left(1 + \frac{\Delta T}{300} \right)^\beta \frac{V_R}{l}}{1 + \frac{V_R}{(E_{\text{հազ}} l)}},$$

որտեղ W -ն դիմադրության լայնությունն է, իսկ t_R -ը՝ հաստությունը: Հոսանք-լարում կախվածությունը պարզեցվել է հետևյալ կերպ՝

$$I = \frac{\left(1 + \frac{\Delta T}{300} \right)^\beta V_R}{1 + \frac{V_R}{(E_{\text{հազ}} l)}} \frac{1}{R_{T0}}, \quad (2)$$

որտեղ $R_{T0} = l / (\sigma W t_R) = l / (nq \mu_{T0} W t_R)$:

Անհրաժեշտ է ջերմաստիճանի աճ՝ գնահատելու $I(V_R)$ -ն, օգտագործելով (2)-ը: Դիմադրության ջերմաստիճանի որոշման նպատակով կառուցվել է համարժեք ջերմային սխեման (նկ. 6 [9]): Նկ. 6-ում պատկերված յուրաքանչյուր մեծություն ունի իր ջերմային նմանակը: $I_{ջերմ}$, $V_{ջերմ}$, $V_{աղբյուր}$, $R_{ջերմ}$ և $C_{ջերմ}$ -ը համապատասխանաբար սպառվող հզորությունը (P), սարքի ջերմաստիճանը (T), ԻՄ-ի հակառակ կողմի ջերմաստիճանը (սենյակային ջերմաստիճանի համար (300 K)), ջերմային դիմադրությունն ու ունակությունն են:



Նկ. 6. Ջերմաստիճանի ակնթարթային աճի հաշվարկման համարժեք սխեմա

Շղթայի կետային հավասարումը կարելի է գրել հետևյալ տեսքով՝

$$I_{ջերմ} = C_{ջերմ} \frac{dV_{ջերմ}}{dt} + \frac{(V_{ջերմ} - V_{աղբյուր})}{R_{ջերմ}} : \quad (3)$$

Կետի $V_{ջերմ}$ լարումը ստացվում է մոդելավորման արդյունքում կամ (3)-ի լուծմամբ: (2)-ում ΔT -ն ընդունված էր ուղիղ համեմատական $V_{ջերմ} - V_{աղբյուր}$ -ի, և ՎԱԲ-ը, կախված ինքնատաքացման երևույթից, կարող է բնութագրվել սխեմայի մոդելավորմամբ: Մոդելի պարամետրերի ստացման նպատակով օգտագործվել են իմպուլսային հոսանք-լարում կախվածությունները: Իմպուլսի տևողության ընթացքում ΔT -ն կարելի է ներկայացնել՝ օգտվելով (3)-ից՝

$$\Delta T \sim V_{ջերմ} - V_{աղբյուր} = I_{ջերմ} R_{ջերմ} \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{R_{ջերմ} C_{ջերմ}} \right) \right), \quad (4)$$

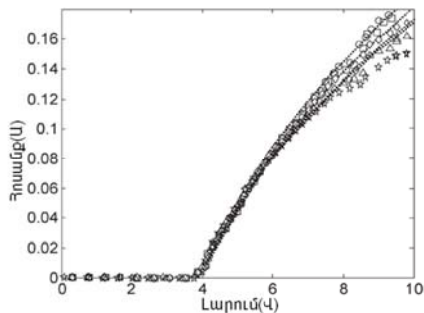
որտեղ $I_{ջերմ}$ -ը համապատասխանում է դիմադրության վրա հզորության ծախսին՝ $I_{ջերմ} = P = V_R I$: ΔT -ի համար ստացված հավասարումը տեղադրելով (2)-ի մեջ, կստացվի՝

$$I = \frac{\left(1 + P R_{ջերմ} \left(1 - \exp \left(- \frac{t}{R_{ջերմ} C_{ջերմ}} \right) \right) \right) \frac{1}{300} \right)^{\beta} V_R}{1 + \frac{V_R}{(E_{հազ} l)}} \frac{1}{R_{T0}} : \quad (5)$$

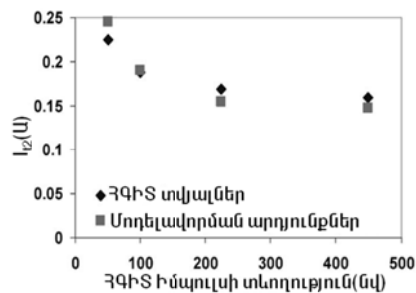
$R_{ջերմ}$, $C_{ջերմ}$, R_{T0} և $E_{հազ}$ պարամետրերի արժեքները ստացվում են իմպուլսային հոսանք-լարում կախվածություններից: 1-ը մուտքային պարամետր է: (5)-ում հոսանքը ֆունկցիա է V_R -ից և P -ից: Քանի որ դիմադրության համար $P=IV_R$, հետևաբար հավասարումը կարելի է վերաձևակերպել այնպես, որ I -ն կախված լինի միայն P -ից, և վերջնական բանաձևը կունենա հետևյալ տեսքը՝

$$I = \frac{-\frac{P}{E_{հազ}} + \sqrt{\left(\frac{P}{E_{հազ}}\right)^2 + 4\frac{P}{R_{T0}}\left(1 + PR_{ջերմ}\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_{ջերմ}C_{ջերմ}}\right)\right)\frac{1}{300}\right)^\beta}}{2} \quad (6)$$

Անհրաժեշտ է ջերմային այս մոդելը կիրառել $R_{միացման}$ դիմադրության համար: Քանի որ ՄՕԿ-ում արտաբերի դիմադրությունը գտնվում է արտաբեր-հարթակ հակառակ շեղված անցման կողքին, որի երկայնքով էլ տեղի է ունենում հիմնական լարման անկումը, ուստի ավելի նպատակահարմար է կիրառել $P=V_{արտ_ավելց.ակ.}I$ արտահայտությունը: Նկ.7-ում իմպուլսի տարբեր տևողությունների (t_S) դեպքում համեմատված են հաշվարկային և մոդելավորված իմպուլսային ՎԱԲ-ի կորերը: Մոդելը բնութագրում է $R_{միացման}$ -ի աճը՝ կախված իմպուլսի լայնությունից: Նկ.7-ից երևում է, որ երկրորդային ծակման հոսանք է գրանցվել բոլոր հաշվարկների համար: Երկրորդային ծակման հոսանքի կախումը իմպուլսի տևողությունից պատկերված է նկ.8-ում:



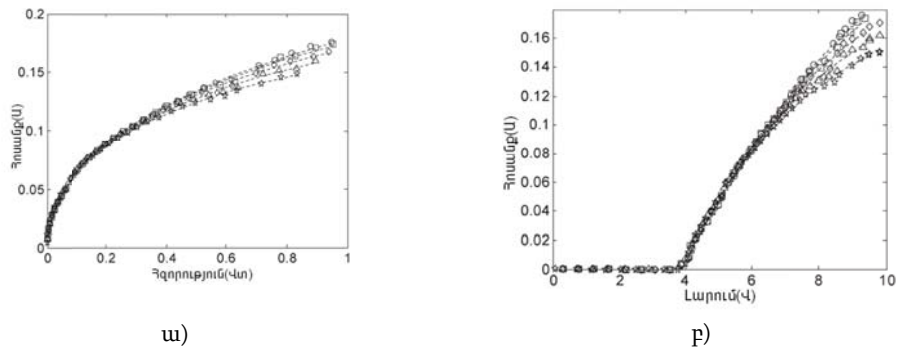
Նկ. 7. Տարբեր t_S -ների դեպքում $\Delta\Phi S$ -ի ՎԱԲ-ը. $W/L=25/0,12$, $l_{աբ}=7$ մկմ և $l_{ալ}=1$ մկմ.
 t_S : $\circ$ -50 նվ, $\square$ -100 նվ, $\diamond$ -225 նվ, Δ -500 նվ, $\star$ -980 նվ. կետագծերով ներկայացված են մոդելավորման արդյունքները



Նկ. 8. Հաշվարկային և մոդելավորված երկրորդային ծակման հոսանքը՝ կախված t_S -ից

Այստեղ ընդունված է, որ երկրորդային ծակման ջերմաստիճանը 1100 K է [10]: Երբ $T=T_{կրիտ}$, տրված τ իմպուլսի տևողության դեպքում կիրառելով մինչ այդ ստացված պարամետրերի արժեքները (4)-ում և (5)-ում, կարելի է գտնել հոսանքի արժեքը: Այս արժեքները նույնպես պատկերված են նկ. 9-ում: Մոդելավորված $I_2(\tau)$ արժեքը համընկնում է հաշվարկային $I_2(\tau)$ արժեքին, ինչը նշանակում է, որ առաջարկված մոդելն ունի մեծ ճշտություն: Նկ. 9-ը ցույց է տալիս, որ հաշվարկային և մոդելավոր-

ված իմպուլսային ՎԱԲ-երը գտնվում են լավ համապատասխանության մեջ: Երբ ԷՍԼ-ից պաշտպանության շղթաներում օգտագործվում են բարակ օքսիդով տրանզիստորներ, ապա այդ դեպքում պահանջվում է $R_{\text{միացման}}$ -ի ճշգրիտ մոդելավորում: Ավելին, լարման թռիչքի կանխարգելման շղթաներում միջմիացման դիմադրությունը նույնպես պետք է հաշվի առնել մոդելավորման ընթացքում, քանի որ դրա դիմադրությունը նույնպես աճում է ինքնատաքացման ժամանակ:



Նկ. 9. Տարբեր FS-ների դեպքում ՀՓՏ-ի ՎԱԲ-ը. $W/L=25/0.12$, $I_{\text{ար}}=7$ մկմ և $I_{\text{սկ}}=1$ մկմ. FS. օ-50 նվ, □-100 նվ, ◊-225 նվ, Δ-500 նվ, * -980 նվ. կետագծերով ներկայացված են մոդելավորման արդյունքները. ա) պարամետրերի ստացում՝ 6-ը օգտագործելով, բ) հաշվարկային և մոդելավորված հոսանք-լարում տվյալները

Եզրակացություն: Առաջարկված է ԷՍԼ-ից պաշտպանության սխեմաների՝ ՀՓՏ-ի մեծ ճշտությամբ մոդել: Մոդելի պարզության շնորհիվ տեխնոլոգիայի մասշտաբավորման արդյունքում ի հայտ եկած նոր երևույթները հեշտորեն են ինտեգրվում դրանում: Առաջարկված մոդելի մեծ ճշտությունը պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ դրանում հաշվի են առնված աշխատանքային բարձր հոսանքների պատճառով ի հայտ եկած ինքնատաքացման երևույթը և երկրորդային ծակման հոսանքները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Modeling substrate diodes under ultra high ESD injection conditions / **G. Boselli, S. Ramaswamy, A. Ameraseker, et al** // Proc. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge (EOS/ESD) Symp.- Portland, 2001. -P. 71–81.
2. Characterization and modeling of transient device behavior under CDM ESD stress / **J. Willemen, A. Andreini, V. De Heyn, et al** // Proc. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge (EOS/ESD) Symp.- Las Vegas, 2003. -P. 82–97.
3. Compact Modeling of On-Chip ESD Protection Devices Using Verilog-A / **J. Li, S. Joshi, R. Barnes, et al** // IEEE Trans- CAD.- 2006. -V. 25. -P. 1047.
4. **Li J., Joshi S. and Rosenbaum E.** A Verilog-A compact model for ESD protection NMOSTs // Proc. IEEE Custom Integrated Circuits Conf.- San Jose, CA, 2003. -P. 253–256.

5. A Method to Model MOSFET's Second Breakdown Action for Circuit-Level ESD Simulation / **Qiang Cui, Yan Han, Juin Liou, et al** // Proceedings of HDP'07, IEEE Trans. Electron Device.- Jul, 2007. -Vol. 42. -P. 107-109.
6. ESD protection for BiCMOS circuits / **S. Joshi, P. Juliano, E. Rosenbaum, et al** // Proc. Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting.- Minneapolis, MN, 2000. -P. 218-221.
7. BSIM4.6.0 MOSFET Model. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences. -University of California, Berkeley, 2010.
8. Verilog-A Language Reference Manual. Open Verilog International.- Jul, 2011.
9. Deep Trench NPN Transistor for Low Ron ESD Protection of High-Voltage I/Os in Advanced Smart Power Technology / **A. Gendron, C. Salamero, N. Nollhier, et al** // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting.- 2006. -P. 1-4.
10. **Vashchenko V.A., Kuznetsov V. and Hopper P.J.** ESD Protection of Fast Transient Pins in Bipolar Processes // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting.- 2007. -P. 222-225.

Synopsys Armenia CJSC. The material is received 09.05.2012.

В.Ш. МЕЛИКЯН, А.Н. ХАЧАТРЯН, Д.Л. МИРЗОЯН, А.А. ДУРГАРЯН

МОДЕЛИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА САМОСОГРЕВАНИЯ

Для временных и частотных анализов предложены статические и тепловые модели устройств, предохраняющих от электростатического разряда, которые являются одним из важных звеньев в современных интегральных схемах (ИС). Предложенные модели с учетом самосогревания обеспечивают большую точность в высоких токовых режимах и дают возможность тестировать ИС и узнать об их надежности до изготовления по сравнению с нынешними существующими моделями.

Ключевые слова: электростатический разряд, тепловая модель, точность моделирования.

V.SH. MELIKYAN, A.N. KHACHATRYAN, D.L. MIRZOYAN, A.A. DURGARYAN

MODELS OF ELECTROSTATIC DISCHARGE PROTECTION DEVICES CONSIDERING THE SELF-HEATING EFFECTS

DC and thermal models related to transient and ac analyses are proposed to protect the devices from electrostatic discharge (ESD) which are one of the most important elements in modern integrated circuits (IC). Compared to the existing models, the proposed models consider the self heating effects and provide a higher accuracy in high current regimes, enabling to test the ICs for ESD effects.

Keywords: electrostatic discharge, thermal model, accuracy of modeling.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊՈԴՈՍՅԱՆ Մ.Ա., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ռ.Մ., ԿԱՐԳՈՊՈԼՑԵՎ Վ.Ա.	
ԱՎԻԱՇԻՆԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ ՀԵՌԱՆԿԱՐԱՅԻՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԻՄՆԱՐԱՐ ԵՎ ԿԻՐԱՌԱԿԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐ	3
ՍՏԱԿՑԱՆ Մ.Գ., ՄԻՍԹԱՆԻ Շ.Ջ., ՀԱՅԿԱԶՑԱՆ Մ.Է	
ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ԱՄՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ	20
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Հ.Հ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Գ.	
ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՄԲ ՍՏԱՅՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՏՎՅԱԼՆԵՐՈՎ ՄԵԾ ԿՈՐՈՒԹՅԱՆ ՇԱՌԱՎՂՈՎ ՕՂԱԿԻ ԳՐՏՆԱԿՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ	28
ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Լ.Մ.	
ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՁԵՌՔԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ՝ ՀԱՇՎԻ ԱՌՆԵԼՈՎ ԿԱՏԱՐՈՂԱԿԱՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ.....	35
ՏՈՆՈՅԱՆ Ա.Հ., ՇԱՀՆԱԶԱՐՅԱՆ Մ.Ա., ԱՆՏՈՆՅԱՆ Ս.Բ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Հ.Գ., ՂԱՎԹՅԱՆ Ս.Պ.	
ԱԿՐԻԼԱՄԻԴԻ ՖՐՈՆՏԱԼ ՀԱՄԱՊՈԼԻՄԵՐԱՑՈՒՄԸ՝ ՄԵԹԻԼՄԵՏԱԿՐԻԼԱՏԻ ԵՎ ՍՏԻՐՈԼԻ ՀԵՏ՝ SiO ₂ , TiO ₂ ՆԱՆՈՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ԵՎ ՍՏԱՅՎԱԾ ՆԱՆՈԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ	45
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ., ՄԱՐՏՈՅԱՆ Գ.Հ.	
ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՎԱՌԵԼԻՔԱՅԻՆ ԿԱՍԵՏՆԵՐԻ ՆԵՅՏՐՈՆԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ.....	53
ԳՆՈՒՆԻ Տ.Ս., ՍԱՖԱՐՅԱՆ Լ.Վ.	
ԲԱՐԴ ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԲԵՌԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՎ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԾ ՇՐՋԱԿԱՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԱՂՏՈՏՄԱՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼԱՅԻՆ ՑՈՒՑԱՆԻՇՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻԿԱ	62
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ա.Ն., ՄԻՐԶՈՅԱՆ Դ.Լ., ԴՈՒՐԳԱՐՅԱՆ Ա.Ա.	
ԻՆՔՆԱՏԱՔԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏԻԿ ԼԻՑՔԱԹԱՓՈԽՄԻՑ ՊԱՇՏՊԱՆՈՒԹՅԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՄՈԴԵԼՆԵՐ	73

СОДЕРЖАНИЕ

ПОГОСЯН М.А., МАРТИРОСЯН Р.М., КАРГОПОЛЬЦЕВ В.А. НЕКОТОРЫЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В РАЗРАБОТКЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АВИАСТРОЕНИЯ	3
СТАКЯН М.Г., СИСТАНИ Ш.ДЖ., АЙКАЗЯН М.Э. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	20
ПЕТРОСЯН Г.Л., ХАЧАТРЯН Г.Г., ПЕТРОСЯН А.Г. МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА РАСКАТКИ КОЛЬЦА ПО ДАННЫМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ	28
БУНИАТЯН Л.М. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ РУКИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	35
ТОНОЯН А.О., ШАХНАЗАРЯН М.А., АНТОНЯН С.Б., ХАЧАТРЯН А.Г., ДАВТЯН С.П. ФРОНТАЛЬНАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА С МЕТИЛМЕТАКРИЛАТОМ И СТИРОЛОМ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ SiO ₂ , TiO ₂ . ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУЧЕННЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ	45
ПЕТРОСЯН В.Г., МАРТОЯН Г.Г. РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ ТОПЛИВНЫХ КАССЕТ РЕАКТОРА ВВЭР-440	53
ГНУНИ Т.С., САФАРЯН Л.В. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ПО УЗЛАМ НАГРУЗКИ СЛОЖНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ	62
МЕЛИКЯН В.Ш., ХАЧАТРЯН А.Н., МИРЗОЯН Д.Л., ДУРГАРЯН А.А. МОДЕЛИ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДОХРАНЕНИЯ ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА САМОСОГРЕВАНИЯ	73

CONTENTS

POGHOSYAN M.A., MARTIROSYAN R.M., KARGOPOLTSEV V.A. SOME FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS IN DEVELOPING ADVANCED AIRCRAFT TECHNOLOGIES.....	3
STAKYAN M.G., SISTANI SH.J., HAYKAZYAN M.E. MATHEMATICAL MODELING OF THE SURFACE STRENGTHENING PROCESS.....	20
PETROSYAN G.L., KHACHATRYAN H.H., PETROSYAN H.G. THE METHOD OF CALCULATION OF STRESS STATE COMPONENTS IN THE PROCESS OF RING EXPANSION BY THE DATA OF RECEIVED BY COMPUTER MODELLING GEOMETRICAL PARAMETERS	28
BUNIATYAN L.M. DESIGN OF A CONTROL SYSTEM FOR AN ARTIFICIAL HAND TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF THE ACTUATING MOTORS.....	35
TONOYAN A.O., SHAHNAZARYAN M.A., ANTONYAN S.B., KHACHATRYAN H.G., DAVTYAN S.P. FRONTAL COPOLYMERIZATION OF ACRYLAMIDE WITH METHACRYLATE AND STYRENE IN THE PRESENCE OF NANOPARTICLES SiO ₂ , TiO ₂ . THE THERMO- PHYSICAL PROPERTIES OF THE OBTAINED NANOCOMPOSITES	45
PETROSYAN V.G., MARTOYAN G.H. DEVELOPING THE COMPUTATIONAL MODELS OF NEUTRON-PHYSICAL GROUP CONSTANTS OF THE FUEL ASSEMBLIES OF THE REACTOR WWER-440	53
GNUNI T.S., SAFARYAN L.V. A METHOD TO DEFINE THE ENVIRONMENTAL POLLUTION OF INTEGRATED INDICATORS DIFFERENTIATED AT LOAD NODES OF A COMPLEX POWER SYSTEM.....	62
MELIKYAN V.SH., KHACHATRYAN A.N., MIRZOYAN D.L., DURGARYAN A.A. MODELS OF ELECTROSTATIC DISCHARGE PROTECTION DEVICES CONSIDERING THE SELF-HEATING EFFECTS.....	73