ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

# SԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

# СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



**EPEBAH** 

Журнал издается с 5.01.1948 г. Выходит 4 раза в год

## ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ **(գլխավոր խմբագիր),** Դ.Ա. ԹԵՐՋՅԱՆ **(գլխ. խմբ. տեղակալ),** Ջ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ **(պատասխանատու քարտուղար),** Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈԻՆԻԱԹՅԱՆ, Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ժ.Դ.ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Մ. ՂԱՋԱՐՅԱՆ, Ո.Ջ. ՄԱՐՈԻԽՅԱՆ, Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, ՅՈԻ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ս.ጓ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈԻՉՈԻԿՅԱՆ

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

#### **EDITORIAL BOARD**

R.M. MARTIROSSYAN (editor-in-chief), H.A. TERZYAN (vice-editor-in-chief), Z.K. STEPANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN, V.V. BUNIATYAN, Zh.D. DAVIDYAN, S.P. DAVTYAN, S.M. GHAZARYAN, A.Kh. GRIGORYAN, A.T. KUCHUKYAN, V.Z. MARUKHYAN, V.Sh. MELIKYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN, V.A. SAFARYAN, S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN

Հրատ. խմբագիր՝ **Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ** 

Խմբագիրներ՝

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Չ. ՂԱՉԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА Известия НАН РА и НПУА (сер. техн. наук), 2016

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

#### УДК 621.992

#### МАШИНОСТРОЕНИЕ

#### А.И. САГРАДЯН, В.С. СИМОНЯН, А.А. ПАПАЗЯН

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА КОНТАКТЕ ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Исследованы вопросы инженерии и изменения характеристик поверхностного слоя передней поверхности инструмента в результате структурообразования в тонких поверхностных слоях контакта резца из стали P6M5 под воздействием пластических деформаций при обработке стали 45 с управлением процессом резания. Экспериментально установлен характер распределения микротвердости по глубине и поверхности контакта в зависимости от деформированного структурно измененного слоя, приводящего к повышению микротвердости, износостойкости и экспериментальной долговечности инструмента.

*Ключевые слова:* пластическая деформация, дислокация, структурообразование, микротвердость, инженерия поверхностного слоя, энтропия, свободная энергия, износостойкость.

Поверхность контакта является одним из главных объектов инструмента при обработке материалов резанием, вследствие чего происходящие температурнодеформационные явления влияют на процессы самоорганизации новых структур в тонких поверхностных слоях контакта, что, в свою очередь, повышает микротвердость, износостойкость и работоспособность инструмента. В настоящее время требования к разработке различных методов поверхностной модификации и внедрению новых ресурсосберегающих технологий для применения в промышленности резко возросли, что приводит к повышению эксплуатационной долговечности инструмента без дополнительных энергозатрат [1-3].

Целью работы является исследование структурных изменений и выявление характеристик модифицированных тонких поверхностных слоёв на контакте передней поверхности инструмента под воздействием температурно-силовых напряжений и пластических деформаций.

В условиях современных требований в машиностроении одним из наиболее распространенных и эффективных путей совершенствования инструментальных материалов является применение методов поверхностной модификации с целью изменения структуры, а также повышения физико-механических свойств поверхностных слоев инструментов. В процессе резания наиболее нагруженными оказываются контактные поверхностные слои, свойства которых определяют работоспособность инструментов при обработке материалов. Основным объектом исследования современного материаловедения являются модификация и создание новых структур, обладающих уникальным сочетанием таких свойств, как высокая прочность, твердость, износостойкость и эксплуатационная долговечность [4, 5].

Эксперименты проводились на многоцелевом станке 16К20 при обработке стали 45 резцами из быстрорежущей стали Р6М5. Для регистрации сил резания использована тензометрическая станция К-105, в состав которой входит динамометр УДМ-1, сигналы с которого через усилитель ТА-5 регистрируются шлейфовым осциллографом Н-700.

Измерения температур контакта проводились методом естественной термопары. Для оценки характеристик изменения модифицированной структуры применен метод измерения микротвердости с использованием микротвердомера ПМТ-3.

Пластическая деформация как технологический способ воздействия на структурообразование в тонких поверхностных слоях контакта передней поверхности инструмента из быстрорежущей стали P6M5 имеет различные характеристики на пластическом и упругом участках контакта. Под воздействием сходящего потока обрабатываемого материала как по глубине, так и по ширине контакта С меняются структура и прочностные характеристики инструмента. Это связано с различием механизмов реконструкции структур на участках деформационного упрочнения  $C_2$  и температурного разупрочнения  $C_3$ , на пластическом участке контакта  $C_1$  и динамической рекристаллизацией на упругом участке  $C-C_1$  (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость температурно-силовых характеристик от воздействия сходящего потока стружки на контакте передней поверхности инструмента из P6M5 при обработке стали 45 режимами: V=40 м/мин; S=0,30 мм/об; t=2,0 мм

На участке внешнего трения C-C<sub>1</sub> под воздействием температурно-силовых давлений и высоких коэффициентов трения начинаются рекристаллизационные явления, повышающие энергию поверхностных атомов, снижающих микротвердость (рис. 1).

Внедрением ресурсосберегающих технологий в процессе резания, без дополнительных энергозатрат, путем модификации структур тонких поверхностных слоев инструмента из P6M5 вследствие температурно-силовых воздействий сходящего потока из стали 45 (управлением процесса резания и регулированием параметров режимов обработки) можно достичь самоорганизации новых структур, приводящей к повышению износостойкости и эксплуатационной долговечности инструмента, особенно на участке пластического контакта [3,4].

Экспериментальными исследованиями установлено, что в тонких поверхностных слоях инструмента из P6M5 под воздействием температурно-силовых факторов с самоорганизацией новых структур и формированием дисперсного распределения упрочняющих карбидных фаз WC, MoC в процессе резания, а также пластических деформаций поверхностных слоев передней поверхности инструмента из P6M5 наблюдаются различные эффекты изменения структуры и микротвердости по ширине контакта C и глубине до исходной микротвердости (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость структурных изменений на контакте передней поверхности резца из P6M5 от температурно-силовых воздействий сходящей стружки из стали 45 режимами: V=40 м/мин; S=0,3 мм/об; t=2,0 мм: а - участок упрочненного пластического контакта; б - участок рекристаллизованного упругого контакта (x500)

В результате пластической деформации на участке контакта передней поверхности обнаружено (рис. 3), что микротвердость в зоне пластического контакта  $C_1$  повышается до 1080 *HV* (при базовой микротвердости 880 *HV*), естественно, повышая износостойкость. На участке упругого контакта, наоборот, замечено снижение микротвердости до 760 *HV* за счет происходящих рекристаллизационных явлений, где в центре лунки температурное давление и коэффициент трения имеют наибольшее значение (рис. 1) и доходят соответственно до 630°C и µ=1,2, что приводит к снижению микротвердости и интенсификации молекулярно-адгезионного, а также диффузионного изнашивания. При этом толщина рекристаллизованной структуры с лункой составляет 0,34...0,04 *мм* (рис. 3).

Самоорганизация новых структур в тонком поверхностном слое инструмента под воздействием силовых и тепловых характеристик сходящего потока обрабатываемого материала в процессе резания в результате обмена энергией на поверхности контакта инструмента со сходящей стружкой приводит к уменьшению энтропии и самообразованию новых структур с более износостойкими характеристиками на участке пластического контакта. В процессе резания энтропия составляет dS=dS<sub>e</sub>+dS<sub>i</sub> [4], где dS<sub>e</sub> - внешний вклад энтропии за счет обмена теплотой между инструментом и сходящей стружкой; dS<sub>i</sub> - изменение энтропии в результате процесса внутри системы.

Энтропия уменьшается, если ее отдача в единицу времени превышает ее производство внутри системы:

$$P = \frac{dSe}{dt}$$
, т. е.  $\frac{dS}{dt} < 0$ , если  $\left|\frac{dSe}{dt}\right| > P > 0$ .

Подобные изменения являются результатом саморегулирования и модификации поверхностных слоев резца с применением метода пластической деформации, повышения износостойкости контактных поверхностных слоев и эксплуатационной долговечности инструмента с целью управления процессом резания. В равновесном состоянии энтропии при резании преобладает dSi>0. Свободная энергия Гиббса будет G=E-TS+PV, которая с уменьшением энтропии S вызывает повышение свободной энергии в поверхностном слое и образование новых структур в тонких поверхностных слоях инструмента по ширине контакта с применением метода пластической деформации.

Как видно из рис. 3, в центре лунки резца из P6M5 микротвердость снижается в результате рекристаллизационных процессов в структуре инструментального материала.

В процессе динамической рекристаллизации в центре наибольшего теплового давления, где температура доходит до 632  $^{0}$  С [4] и выше, при средней температуре контакта 570  $^{0}$ С микротвердость снижается до 760 *HV* (рис. 3). На участке пластического контакта под воздействием температурно-силовых характеристик P<sub>z</sub>=1520 *H*, T<sub>сp</sub>=570  $^{0}$ *C* при реальной температуре ниже 500  $^{0}$ *C* [3,4] поверхностный слой пластически деформируется, происходят внутридислокационные процессы и самоорганизация новых структур с повышенными физикомеханическими свойствами и микротвердостью. Толщина упрочненного поверхностного слоя с модифицированной структурой на участке пластического контакта составляет 140 *мкм*, где микротвердость по сравнению с базовой микротвердостью термообработанного инструмента выше в среднем на 200 *HV* и при пластической деформации составляет 1080 *HV* по отношению к базовой – 880 *HV* (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость микротвердости от пластической деформации по площади контакта и глубине после 10 мин работы резца из P6M5 при обработке стали 45 режимами: V<sub>60</sub> = 40 м/мин; S = 0,30 мм/об; t = 2,0 мм

Исследованиями структурных изменений на передней поверхности участков пластического и упругого контактов выявлено, что участок пластического контакта в результате пластической деформации упрочняется вследствие воздействия нормальных и касательных напряжений, трения и температур, а упругий участок С-С<sub>1</sub> - в результате тепловых давлений и трения, контактные поверхностные слои инструмента рекристаллизуются при взаимодействии со сходящей стружкой (рис. 4).

Конфигурация упрочненного структурно измененного поверхностного слоя на контакте передней поверхности инструмента отражает воздействие температур, нормальных и касательных напряжений. Как видно из рис. 4, изменения структур на участке пластического контакта имеют обратные по форме распределения касательных напряжений на том же участке.



Рис. 4. Зависимость структурных изменений от пластической деформации и температур на участке контакта передней поверхности инструмента из P6M5 после 10 мин работы при обработке стали 45 режимами: V = 40 м/мин; S = 0,3 мм/об; t = 2,0 мм

Толщина структурно измененного, упрочненного слоя имеет максимальную величину примерно на границе деформационного упрочнения  $C_2$ , в центре пластического участка контакта  $C_1/2$ , совпадающего с максимальными значениями касательных напряжений (рис. 4). На участке упругого контакта C- $C_1$ , где действуют сравнительно малые значения нормальных и касательных напряжений, при высоких тепловых давлениях происходят рекристаллизационные процессы, где максимальная величина ослабленного структурно измененного слоя наблюдается примерно в центре лунки, толщина которого оценивается измерением микротвердости по отношению к базовой (рис. 3,4).

Толщина пластически деформированного, упрочненного слоя по глубине проникновения на пластическом участке контакта инструмента из быстрорежущей стали P6M5 под температурно-силовым воздействием сходящей стружки из стали 45 в процессе резания составляет 100...140 *мкм* (рис. 3, 4). На рис. 5 показано распределение микротвердости от поверхности пластического контакта в глубь инструментального материала в зависимости от дальности передней поверхности инструмента на участке пластического контакта. Как видно из рисунка, при глубине 120 *мкм* микротвердость составлявт 1010 *HV*, а при 130 *мкм* - 950 *HV*. При 140 *мкм* и больше микротвердость соответствует базовой микротвердости исследуемого инструментального материала из P6M5-880 *HV*.



Рис. 5. Изменение микротвердости по глубине на участке пластического контакта передней поверхности от воздействия пластической деформации после 10 мин работы инструмента

В процессе резания для повышения износостойкости инструментального материала, особенно инструментов из быстрорежущих сталей и сплавов типа P6M5, P18 и B14M7K25, представляет интерес технологический прием упрочнения с применением метода пластической деформации контактных поверхностей [3].

В результате такой обработки поверхностный слой контакта пластически деформируется, образуя дислокационное поле, плотность которого составляет

10<sup>10</sup>см<sup>-2</sup>, и намного превосходит матричную часть при работе на крейсерских скоростях инструмента, создавая новые структуры в тонких поверхностных слоях толщиной от 130...150 *мкм* с повышенными свойствами износостойкости и долговечности инструмента (рис. 3 и 4).

При воздействии деформации и выходе дислокации на поверхность контакта появление вакансий в объеме поверхностного слоя приводит к уменьшению энтропии за счет взаимопоглощенности двух противоположных потоков: дислокации атомов, движущихся к поверхности контакта инструмента, и их вакансии, движущихся от поверхности в глубину слоя. Изменение на поверхности контакта пар трения резец-сходящая стружка начинается в результате локализации зоны деформационного упрочнения на участке пластического контакта, где действует примерно 90% напряжения общего контакта. Таким образом, в проведенных экспериментах самоорганизующие новые структуры образуются под воздействием максимальных силовых и деформационных факторов между парами трения инструмент-сходящая стружка, являющимися термодинамической системой с неравновесным процессом перехода механической энергии в тепловую. Этот переход в процессе трения связан с накоплением энергии деформирования в кристаллической решётке на контактных поверхностных слоях инструмента, т.е. в зоне конфигурационной энтропии, что влечёт за собой изменение структур и коэффициента трения. На основе полученных экспериментальных данных при обработке стали 45 для повышения износостойкости инструментальных материалов из быстрорежущих сталей Р6М5, Р18 и безуглеродистых сплавов В14М7К25 большой интерес представляет технологический прием упрочнения тонких поверхностных слоев с применением метода пластической деформации и модификацией структур контактных поверхностей готовых инструментов.

Исходя из полученных экспериментальных данных (рис. 3), построен график изменения микротвердости непосредственно по передней поверхности инструмента по ширине контатка со сходящей стружкой (рис. 6).



Рис. 6. Изменение микротвердости поверхностного слоя в зависимости от ширины контакта резец-сходящая стружка после 10 мин работы инструмента

Характер изменения микротвердости по ширине всего контакта отражает результат пластической деформации и самоорганизации упрочняющих структур на участке пластического контакта. На участке упругого контакта C-C<sub>1</sub>, начиная с конца пластического участка до центра лунки, где действуют максимальные температуры с интенсификацией адгезионных явлений, наблюдается некоторое снижение микротвердости (рис. 6).

Установлено, что пластическая деформация как упрочняющий фактор контактных поверхностей инструмента оказывает влияние на самоорганизацию новых структур и изменение свойств в тонких поверхностных слоях на передней поверхности контакта инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 45. При деформационно-тепловом воздействии экспериментально доказано, что с применением ресурсосберегающих технологий, подобно пластическим деформациям, можно достичь повышения износостойкости и эксплуатационной надежности инструмента.

Таким образом, сформировавшаяся структура в тонком поверхностном слое контакта инструмента с управлением процесса резания и регулированием параметров режимов обработки приводит к упрочнению рабочих контактных поверхностей инструмента под воздействием выбранных температурно-силовых характеристик, что наиболее полно отвечает требованиям реальных условий процесса резания. Показано, что имеется значительный резерв повышения физико-механических свойств, без применения особых энергозатрат и времени, что, в конечном итоге, приводит к повышению износостойкости и эксплуатационной долговечности инструментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
- Якубов Ф.Я., Ким В.А. Энергетика процесса самоорганизации при трении и изнашивании // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. "ХПИ". – Харьков, 2001.- Вып.1(4). - Электронная версия. http://users.kpi.Kharkov.ua/cutting/izdania/.
- Саградян А.И., Папазян А.Л. Пластическая деформация как фактор самоорганизации новых структур в тонких поверхностных слоях контакта инструмента // Вестник ГИУА: Мат. науч.-техн. конф. ГИУА. – Ереван, 2012. - С. 515-521.
- 4. Саградян А.И. Исследование температурных полей методом конечных разностей // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. 1981. Т. XXXIV, N 6. С. 3-9.
- 5. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах / Под ред. Ю.Л. Климантовича. М.: Мир, 1979. 271 с.

Армянский государственный педагогический университет им Х. Абовяна. Материал поступил в редакцию 12.01.2016.

#### Ա.Ի. ՍԱՀՐԱԴՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Հ. ՓԱՓԱԶՅԱՆ

## ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ԱՉԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ ԳՈՐԾԻՔԻ ԱՌՋԵՎԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԴՈՆԵ ՀՊՄԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՇԵՐՏԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱՁՈՏՈՒՄԸ

Հետազոտվել են գործիքի առջևի մակերևույթի հպման մակերևութային բարակ շերտերի Ճարտարագիտությանը վերաբերող խնդիրները՝ պայմանավորված բարակ մակերևութային շերտերում պլաստիկ դեֆորմացման ազդեցությամբ նոր կառուցվածքագոյացմամբ և հատկությունների փոփոխմամբ, ինչն ի հայտ է գալիս կտրման գործընթացի կառավարմամբ, P6M5 կտրիչով պողպատ 45-ի մշակման ժամանակ։ Փորձերով ապացուցվել է, որ հպման տիրույթում միկրոկարծրությունը, ըստ շերտերի խորության և ըստ արտաքին մակերևութային տիրույթում բաշխման, պայմանավորված դեֆորմացման ազդեցությամբ կառուցվածքի փոփոխությամբ, հանգեցնում է միկրոկարծրության, մաշակայունության և գործիքի շահագործման երկարակեցության բարձրացմանը։

**Առանցքային բառեր** պլաստիկ դեֆորմացում, դիսլոկացիա, կառուցվածքագոյացում, միկրոկարծրություն, մակերևութային Ճարտարագիտություն, էնտրոպիա, ազատ էներգիա, մաշակայունություն։

#### A.I. SAHRADYAN, V.S. SIMONYAN, A.H. PAPAZYAN

#### INVESTIGATING THE CHARACTERISTICS CHANGES OF THE SURFACE LAYERS ON THE CONTACT OF THE FRONT SURFACE OF A TOOL UNDER THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION

The issues on engineering and the characterisrics change of the surface layer of the front surface of a tool as a result of structurization in the thin surface layers of the cutter contact of P6M5 under the influence of plastic deformation, when steel 45 is treated at the controlled cutting process, are studied. The character of the microhardness distribution by the depth and the contact surface, depending upon the deformed structurally changed layer, leading to the increase in microhardness, wear resistance and service durability of the tool is determined.

*Keywords:* plastic deformation, dislocation, structurization, microhardness, surface layer engineering, entropy, free energy, wear resistance.

#### ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2016. Հ. LXIX, N 3.

*ኢ*SԴ 621.891

#### ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

# Ն.Գ. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ, Կ.Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Վ.Վ. ՍԱՐՈՅԱՆ

# ՄԵՏԱՂԱՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ՇՓԱՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՒՄ ԻՆՔՆԱՅՈՒՂՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԴԻՖՈԻԶԻՈՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Մետաղապոլիմերային շփահանգույցների ինքնայուղման մեխանիզմի ուսումնասիրման և շփանյութափոխանցման թաղանթի առաջացման դիֆուզիոն մոդելի հիման վրա բացահայտվել է շփման ընթացքում տեղի ունեցող դիֆուզիոն պրոցեսների և ձևավորված շփանյութափոխանցման թաղանթների միջև անալիտիկ կապը։ Առաջարկվել է մետաղապոլիմերային շփակցորդմամբ առաջացած պոլիմերային թաղանթների հաստության գնահատման հաշվարկային մեթոդիկա, ինչը հնարավորություն է ընձեռում որոշելու մեքենաների շփահանգույցների երկարակեցությունը։

*Առանցքային բառեր.* պոլիմեր, շփանյութափոխանցում, ինքնայուղում, դիֆուզիա, թաղանթի հաստություն, մաշակայունություն։

**Ներածություն։** Հայտնի է, որ հակաշփական ինքնայուղվող պոլիմերային նյութերի շփման ընթացքում մաշման պրոցեսները հիմնականում պայմանավորված են մետաղական հակամարմնի վրա առաջացած շփանյութափոխանցման թաղանթով, որը ադհեզիոն մաշման և ինքնայուղման մեխանիզմի գլխավոր գործոնն է։ Շահագործման ցանկացած պայմաններում պոլիմերային նյութերի շփման մակերևույթների վրա բարդ կառուցվածքով, բաղադրությամբ և յուղման հատկություններով օժտված շփանյութափոխանցման (ՇՆՓ) թաղանթների ձևավորումը հիմնական մակրոսկոպիկ երևույթն է շփման ժամանակ, որով տարբերվում են պոլիմերային և մետաղային նյութերը, և այս երևույթը կարևոր դեր ունի առանց յուղման շփման պայմաններում պոլիմերների ինքնայուղման մեխանիզմում [1]։

Պոլիմերների ՇՆՓ և ինքնայուղման մեխանիզմի վերաբերյալ ժամանակակից հետազոտությունները վերլուծելիս առաջին հերթին պետք է նշել դեռևս անցյալ դարի կեսերին Կրագելսկու կողմից ձևակերպված արտաքին շփման հիմնական պայմաններից մեկը` դրական գրադիենտի կանոնը, համաձայն որի արտաքին շփումն ապահովելու համար տեղաշարժի դիմադրությունը պինդ մարմինների հպման գոտում պետք է լինի ավելի փոքր, քան որոշակի խորության վրա։ Այսինքն` կատարվում է հետևյալ պայմանը` ∂v∂z > 0, ինչը նշանակում է, որ պինդ մարմնի մակերևույթի վրա առկա է թաղանթ` ցածր տեղաշարժի դիմադրությամբ, և կարելի է ասել` պոլիմերների նյութափոխանցումը մակերևութային շերտերում դրական գրադիենտի ձևավորման ինքնուրույն ձևերից մեկն է [2]։ ՇՆՓ երևույթը գիտնականների կողմից բացատրվել է տարբեր տեսական մոտեցումներով [1]՝ հիմնված զուտ մեխանիկական, էներգետիկական, ջերմաֆիզիկական չափորոշիչների կամ մոլեկուլյար ուժերի էլեկտրամագնիսական տեսության վրա։ Այս երևույթի ավելի խոր ուսումնասիրմանն առանձնապես նպաստել է փորձարարական մեթոդների զարգացումը։ Ներկայումս հայտնի են այս երևույթի հետազոտման շուրջ 40 փորձարարական մեթոդներ [3], որոնք հնարավորություն են տալիս կատարելու մակերևույթների քիմիական և ֆիզիկամեխանիկական վերլուծություններ, կառուցվածքի հետազոտում, քանակական չափումներ և այլն։

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը։ Ներկա փուլում շփանյութագիտության զարգացման կաևորագույն խնդիրը ամուր և համասեռ շփանյութափոխանցման թաղանթների ստեղծման միջոցով շփահանգույցի աշխատունակության և երկարակեցության բարձրացումն է։ Դա գիտական մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում նոր կոմպոզիտային ինքնայուղվող պոլիմերային նյութերի նպատակային ստեղծման, ինչպես նաև ժամանակակից շփագիտական համակարգերի շահագործման հատկությունների բարձրացման առումով [4-9]։

ՇՆՓ թաղանթի աշխատունակության բարձրացման հեռանկարային մեթոդներից է համապատասխան լցանութերի օգտագործմամբ մետաղական հակամարմնի վրա ինքնայուղման թաղանթի ադհեզիոն անհրաժեշտ ամրության ապահովումը։ Այդ առումով մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում նաև հայկական հանքային ձևափոխված լցանյութերի (տրավերտին, բենտոնիտ)՝ ՇՆՓ թաղանթի առաջացման պրոցեսի, կառուցվածքի, բաղադրակազմի և ադհեզիոն ունակության վրա ազդեցության ուսումնասիրությունը։ Դիտարկվել է շփման երկու փուլ՝ զելման (10 րոպե) և հավասարակշռված մաշման (6 ժամ), իսկ փորձերը կատարվել են ИМ-58 ձակատային շփման լաբորատոր մեքենայի վրա։ ՇՆՓ թաղանթի կառուցվածքային, մանրադիտակային հետազոտությունը հնարավորություն է տալիս բացահայտելու ոչ միայն քանակական, այլ նաև որակակական փոփոխությունները մեքենաների մետաղապոլիմերային շփազույգերում։ Ստացված արդյունքների հիման վրա բացահայտվում են շփազույգերում և լցանյութերում ֆիզիկաքիմիական պրոցեսները։

Շփանյութափոխանցման երևույթին վերաբերող արդի հետազոտությունների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ դրանցից ոչ մեկը չի տալիս այդ երևույթի ֆիզիկական լրիվ հիմնավորումը, ինչը բացատրվում է շփակցորդման ընթացքում տեղի ունեցող պրոցեսների բարդությամբ։ ՇՆՓ թաղանթի առաջացումն ու ինքնայուղման մեխանիզմի օրինաչափությունների բացահայտումը, ինչպես նաև այդ թաղանթների ձևավորման վերլուծությունը հնարավորություն են տալիս պարզաբանելու շփման համակարգում ընթացող պրոցեսները` կախված նյութերի տեսակից ու կառուցվածքից, քիմիական ակտիվությունից, շահագործման պայմաններից և այլն։ Վերջնահաշվով դա շփման և մաշման պրոցեսները կառավարելու հնարավորություն է ընձեռում։ Շփանյութափոխանցումը բնութագրող համապիտանի բանաձների որոնումը բավականին բարդ է, քանի որ յուրաքանչյուր շփազույգ ունի իրեն հատուկ բեռնվածքի, արագության և ջերմաստիձանի օպտիմալ հարաբերակցությունը։

Մետաղապոլիմերային հանգույցներում ՇՆՓ թաղանթի ձևավորման մեխանիզմի առկա մոդելները կարելի է ամփոփել որպես` ա) մեխանիկական, բ) ֆիզիկաքիմիական, գ) ադհեզիոն-մեխանիկական և դ) ադհեզիոն-էներգետիկական [1]։ Շփանյութափոխանցման ադհեզիոն-էներգետիկական տեսությունն առանձնանում է տեսական ու փորձարարական արդյունքների բարձր կոռելյացիայով և կիրառական հաշվարկների համեմատական դյուրինությամբ։ Այս մոդելի հիմնական թերությունը ցածր pv բեռնվածության պայմաններում նրա կիրառման սահմանափակությունն է։ Դիֆուզիայի ազդեցությունը ՇՆՓ թաղանթի ձևավորման մեխանիզմի վրա զերծ է նման սահմանափակումից։ Շփաջերմաստիձանային գրադիենտի և տեղային բարձր բեռնվածքների ազդեցության ներքո մետաղի ատոմները դիֆունդվում են պոլիմերում։ Հարակցային մակերեսի առանձին տեղամասերում ադհեզիոն և էլեկտրաստատիկ ուժերի շնորհիվ առաջանում են միջմոլեկուլային կապեր (նկ.), որոնք կարող են դիմակայել սահքի շոշափող լարումներին։ Արդյունքում` հպվող նյութերից ամրությամբ ավելի պակաս պոլիմերում տեղի է ունենում մակերևութային շերտի որոշ տեղամասերի խզում։ Առանձնացված մասնիկները փոխանցվում են մետաղական հակամարմնի վրա և առաջացնում պոլիմերային թաղանթ։ Այդպիսի մոդելի առկայությունը նպաստում է ՇՆՓ երևույթի հիմքով ինքնայուղման մեխանիզմի բացահայտմանը, ֆիզիկական հիմնավորված հաշվարկային մեթոդի մշակմանն ու կիրառությանը։

Հետազոտության արդյունքները։ ՇՆՓ թաղանթների ձևավորման մեխանիզմը դիտարկվել է հարակցային փոխազդեցության ֆիզիկաքիմիական մեխանիկայի՝ պլաստիկ դեֆորմացման, դիֆուզիոն պրոցեսների, ադհեզիոն-կոհեզիոն միջմոլեկուլային փոխազդեցության, պոլիմերի հիմնական շղթայի ապապոլիմերացման, մակերևութային շերտերի շփաէլեկտրականացման դրույթների հիման վրա։



Նկ. ՇՆՓ թաղանթի ձևավորումը մետաղ (1) – պոլիմեր (2) շփահամակարգում.

ա) միկրոանհարթությունների փոխազդեցությունը շփման սկզբնական փուլում, բ) միկրոանհարթությունների առավելագույն հարակցման փուլը, գ) պոլիմերի մակերևութային շերտի մասնիկների անջատումը և ՇՆՓ թաղանթի ձևավորումը

Կատարվել են մետաղի ատոմների դիֆուզիայի տեսական հետազոտությունները պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտային նյութի հետ շփման ընթացքում։ Քանի որ դիֆունդվող մետաղի կոնցենտրացիան փոփոխվում է ժամանակի ընթացքում, ուստի այդպիսի ոչ ստացիոնար հոսքը պատկերվում է Ֆիկի երկրորդ օրենքի բանաձևով՝

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_f \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right],\tag{1}$$

$$C(x,0) = 0,$$

$$C(0,t) = \delta t \left( 1 + \frac{1-t}{t_0} \right), \quad C(x_0,t) = 0,$$
(2)

որտեղ C(x,t)-ն մետաղի ատոմների կոնցենտրացիան է **x** մակերևույթի վրա t ժամանակում,  $D_f = ga^2 \frac{k\theta}{\hbar} exp(-E_{\alpha}/k\theta)$ ՝ դիֆուզիոն տեղաշարժի գործակիցը, g-ն՝ երկրաչափական գործոնը,  $\alpha$ -ն՝ ատոմի տրամագիծը, k-ն՝ Բոլցմանի հաստատունը, <u>ի-</u>ն՝ Պյանկի հաստատունը, 9-ն՝ մակերևութային ջերմաստիձանը,  $E_{\alpha} = E_0 + \beta_0 b^2 P_{\alpha}^{2/3} - \alpha_0 / 2(c^2 t^2 + \sigma_s^2)$ -ը՝ մետաղի ատոմների ակտիվացման էներգիան, E<sub>0</sub>-ն՝ մինչև շփումը ակտիվացման ազատ էներգիան,  $\beta_0 = \frac{k_{\sigma}^2}{2K}V_0$ , <u>k</u><sub> $\sigma$ </sub>-ն՝ ատոմային կապերի գերլարումը հաշվի առնող գործակիցը, V₀–ն՝ ատոմի ծավալը, K-ն՝ ծավալային սեղմման մոդուլը,  $\alpha_{0} = \frac{k_{\sigma}^{2}V_{0}}{6G}$ , G-ն՝ սահքի մոդուլը, b, c-ն՝ նյութի առաձգական հատկությունները և շփման մակերևույթների խորդուբորդության երկրաչափական պարամետրերը բնութագրող գործակիցները, P $_{lpha}$ -ն՝ տեսակարար բեռնվածքը,  $\sigma_s$ -ը՝ հոսունության սահմանը,  $\tau = fP_{\alpha}$ ՝ տեսակարար 2փման ուժը, f -ը՝ շփման գործակիցը,  $\delta = c_0/t_0$ ,  $c_0 = p/m$  -ը` կոնցենտրացիայի արժեքը x = 0 մակերևույթի վրա, ρ-ն՝ պողպատի խտությունը, m-ը՝պողպատի ատոմի զանգվածը, to-ն՝ գործընթացի տևողությունը։

Փորձարարական տվյալների հիման վրա, լուծելով (1), (2) խնդիրը վերջավոր տարբերությունների մեթոդով, ստանում ենք թվային մոտավոր արժեքները C(x, t) ֆունկցիայի **x**, **t** դիսկրետ արժեքների դեպքում։ Բացահայտվել է մետաղի դիֆունդվող մասնիկների կոնցենտրացիայի, թափանցելիության խորության և փորձարկումների տևողության միջև կոռելյացիոն կապը՝

$$C(x,t) = \delta\left(t - \frac{(t-1)t}{t_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{x}{x_0}\right) + \psi \delta t e^{-E_\alpha / k\theta} \sin\frac{\pi}{x_0} x, \qquad (3)$$

npտեη  $\psi = 1.3 x_0^2 \hbar / g \alpha^2 k t_0 \vartheta$ :

Հետազոտությունների արդյունքները ցույց են տվել, որ կատարվող դիֆուզիոն պրոցեսների ուժգնությունն ավելի մեծ է տրավերտինի և բենտոնիտի լցանյութերով կոմպոզիտային պոլիմերային նյութերի և մետաղի (պողպատ 45) շփումից հետո, քան հայտնի պոլիմերային նյութերի դեպքում (ԱՏՄ-2, Էստերան-51, ՖԴՀ)։ Հաստատված է, որ պոլիմերային նյութի մեջ ավելի ակտիվ դիֆունդվող մետաղի ատոմների շնորհիվ ձևավորված ՇՆՓ թաղանթներն ունեն բարձր ադհեզիոն կպչունություն մետաղի հետ, ինչն ապահովում է մետաղապոլիմերային շփահանգույցի լավ աշխատունակությունը։ Ցույց է տրված, որ դիֆունդվող ատոմների ներթափանցման խորությունը մոտ է մետաղական մակերևույթի վրա ձևավորված ՇՆՓ թաղանթների հաստությանը։ Պոլիմերի մակերևութային շերտի մասնիկների փոխանցումը մետաղական մակերևույթ տեղի է ունենում այն պահին, երբ կատարվում է հետևյալ պայմանը՝

$$F_{\alpha} + F_{e} \ge F_{k} , \qquad (4)$$

որտեղ F<sub>a</sub>-ն մետաղական և պոլիմերային մակերևութային շերտերի միջև ադհեզիոն փոխազդեցության ուժն է, F<sub>e</sub>-ն` երկու հակադիր լիցքավորված մակերևութային շերտերի միջև կուլոնյան էլեկտրաստատիկ ձգողության ուժը, F<sub>k</sub>-ն` պոլիմերային շղթաների միջև կոհեզիոն միջմոլեկուլար ուժը։ Բաժանելով (4) հավասարման բոլոր անդամները մակերևույթի միավոր մակերեսին, կստանանք՝

$$W_{\alpha} + W_{e} \ge W_{k} , \qquad (5)$$

որտեղ Wa-ն ՇՆՓ թաղանթի ադհեզիոն ամրությունն է մետաղական հակամարմնի վրա, We-ն` միավոր մակերեսի վրա մակերևութային շերտերի էլեկտրաստատիկ փոխազդեցության ուժը, We-ն` պոլիմերային նյութի կոհեզիոն ամրությունը։

ՇՆՓ թաղանթի ադհեզիոն և կոհեզիոն ամրությունը մետաղական հակամարմնի վրա գնահատվել է Դյուպրեի հայտնի արտահայտությամբ՝

$$W_{\alpha} = 2 (Y^{d}_{s1} Y^{d}_{s2})^{1/2} + 2(Y^{h}_{s1} Y^{h}_{s2})^{1/2},$$
(6)

որտեղ Y = Y<sup>d</sup>s + Y<sup>h</sup>s, (Ջ/մ<sup>2</sup>) – ն d և h ցուցիչներով համապատասխանաբար մակերևութային ազատ էներգիայի բաշխման և ջրածնային կապերի ստեղծման բաղադրիչներն են (մակերևութային ազատ էներգիայի որոշման համար սովորաբար օգտագործվում է երկու տիպի հեղուկ` ջուր և մեթիլենյոդիդ).

$$W_k = 2Y_{S2} N_A^{\frac{1}{3}} V_M^{\frac{2}{3}} n_M , \qquad (7)$$

որտեղ Ys2-ը պոլիմերային նյութի մակերևութային ձգվածությունն է, Nѧ-ն` Ավոգադրոյի թիվը, 6.02·10<sup>23</sup> *մոլ⁻*, Vм-ը` *մոլի* ծավալը, ոм-ը` *մոլերի* թիվը, որը որոշվում է նմուշի ծավալին մոլի ծավալի հարաբերությամբ։

ՇՆՓ թաղանթների ադհեզիոն ամրության հաշվարկները ցույց են տվել, որ այն 1.2...1.3 անգամ մեծ է մշակված տեղական հանքանյութերի օգտագործումով կոմպոզիտային նյութերի շփման դեպքում` համեմատած հայտնի պոլիմերային նյութերի հետ։ Հպման մակերնույթի միավոր մակերեսի վրա ազդող էլեկտրաստատիկ ուժը որոշվել է, ընդունելով մետաղական անհարթության ձևը հատած կոնի տեսքով`

$$W_e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \Delta \varphi^2}{2h^3} \frac{A_a}{A_r} \left( h + r - \sqrt{h^2 + r^2} \right), \tag{8}$$

npտեղ ε<sub>0</sub>-ն էլեկտրական հաստատունն է, ε-ը՝ պոլիմերային նյութի հարաբերական դիէլեկտրիկ թափանցելիությունը, r-ը՝ հարակցման հենամասի շառավիղը, Δφ-ն՝ շփման գոտում պոտենցիալի տարբերությունը, h-ը՝ ՇՆՓ թաղանթի հաստությունը, A<sub>α</sub>-ն՝ մակերևույթի անվանական մակերեսը, A<sub>r</sub>-ը՝ հարակցման իրական մակերեսը։ Նշանակելով  $\alpha = W_{\alpha} - W_{k}$ ,  $\beta = \varepsilon_{0} \varepsilon \Delta \varphi^{2} \frac{A_{\alpha}}{A_{r}}$  և լուծելով (8) հավասարումը h-ի նկատ-

մամբ` ստանում ենք հինգերորդ կարգի բազմանդամ`

$$\alpha^{2}h^{5} + \alpha\beta h^{3} + \alpha\beta rh^{2} + 0.5\beta^{2}r = 0: \qquad (9)$$

Տվյալ (9) հավասարման լուծումը կատարվել է «Մաթեմատիկա» համակարգի միջոցով։ Յույց է տրված, որ առավել կոհերենտ թաղանթները ձևավորվել են պողպատյա հակամարմնի և բենտոնիտով ու տրավերտինով լցված կոմպոզիտների հետ շփումից հետո։ Այդ թաղանթների հաստությունը 1,4...1,6 անգամ մեծ է հետազոտվող մյուս հայտնի կոմպոզիտների շփման ընթացքում առաջացած թաղանթների հաստությունից։ ՇՆՓ թաղանթների հաստությունների հաշվարկային արժեքները (աղ.) լավ համադրվում են փորձարարական հայտնի տվյալների հետ։ Բացահայտված է ոչ գծային կոռելյացիոն կապը թաղանթի հաստության և փորձարկման տևողության միջև՝

$$h(t) = (0,044t - 0,932)^{1/2}$$
(10)

Աղյուսակ

ՇՆՓ թաղանթների հաստության հաշվարկային արժեքները (to=60 p, Pa=1,91 ՄՊա, v = 0,78 մ/վ)

Նյութը	Թաղանթի հաստությունը, հ, <i>մկմ</i>
ԱՏՄ-2	5,44
Էստերան-51	5,86
ዄጉ፟	6,30
ՖԴՀ+տրավերտին	8,12
ՖԴՀ+բենտոնիտ	8,93

ՇՆՓ թաղանթը, մետաղական մակերևույթի նկատմամբ սահմանափակ ադհեզիոն ամրություն ունենալով, ժամանակի ընթացքում կորցնում է իր կրողունակությունը, քայքայվում և դուրս է բերվում շփման գոտուց մաշման մասնիկների տեսքով։ Այնուհետև թաղանթի ձևավորման գործընթացը վերսկսվում է՝ համաձայն (10) օրենքի։ Առաջարկված մոդելը հնարավորություն է ընձեռում փորձարարական տվյալների հիման վրա հաշվարկելու ՇՆՓ թաղանթի հաստությունը, որի երկարակեցությունը և աշխատունակությունն ապահովում է մետաղապոլիմերային շփահանգույցի ինքնայուղման գործընթացի կայացումը։

Եզրակացություն։ Համալիր հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է շփանյութափոխանցման թաղանթի առաջացման պրոցեսը, որով պոլիմերը տարբերվում է մետաղից և որոշիչ դեր ունի առանց յուղման շփման պայմաններում մետաղապոլիմերային հանգույցի ինքնայուղման մեխանիզմում։ Առաջարկվել է շփանյութափոխանցման թաղանթի ձևավորման մեխանիզմը` ադհեզիոն, կոհեզիոն և էլեկտրաստատիկ ուժերի, ինչպես նաև մետաղապոլիմերային շփակցորդմամբ ընթացող դիֆուզիոն պրոցեսների հաշվառմամբ։ Բացահայտվել է ոչ գծային կոռելյացիոն կապը դիֆունդվող ատոմների կոնցենտրացիայի, դրանց ներթափանցման խորության և փորձարկման տևողության միջև, ինչպես նաև մշակվել է շփանյութափոխանցման թաղանթների հաստության գնահատման հաշվարկային մեթոդիկա։

Շփանյութափոխանցման և ինքնայուղման մեխանիզմի յուրահատկությունների վերաբերյալ փորձի և գիտելիքների իմացությունը հիմք է ստեղծում կոմպոզիտային ինքնայուղվող ավելի արդյունավետ պոլիմերային նյութերի մշակման և առանց յուղման պայմաններում շփահանգույցների նախագծման համար։

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ ԿԳՆ գիտության պետական կոմիտեի կողմից ՀԱՂՀ «Շփագիտություն» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիային տրամադրած ֆինանսավորման շրջանակներում։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Трибология: Исследования и приложения. Опыт США и стран СНГ / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. - М.: Машиностроение, 1993. – 454 с.
- Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.
- Основы трибологии (трение, износ, смазка) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001.– 664 с.
- Погосян А.К., Карапетян А.Н., Оганесян К.В. Трибохимические процессы и их влияние на фрикционные свойства антифрикционных полимеров // Тр. Межд. конф. "ПОЛИКОМТРИБ-2013". – Гомель, 2013.– С. 184.
- Pogosian A.K., Karapetyan A.N., Hovhannisyan K.V. Development of composite antifriction materials based on the thermoplastic polymers // Tribologia. – 2005. – N 5.– P. 111-119.

- Pogosian A.K., Bahadur S., Hovhannisyan K.V., Karapetyan A.N. Investigation of the tribochemical and physicomechanical processes in sliding of mineral-filled formaldehyde copolymer composites against steel // Wear. – 2006.- N 260.– P. 662-668.
- Pogosian A.K., Hovhannisyan K.V., Isajanyan A.R. Polymer friction transfer // Encyclopedia: Springer Science. – New-York, 2013. – P. 2585-2592.
- Պողոսյան Ա.Կ., Կարապետյան Ա.Ն., Հովհաննիսյան Կ.Վ. Հակաշփական պոլիմերային նյութերի շփաքիմիական պրոցեսների ուսումնասիրությունը // ՀԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. – 2014. - Հատ. LXVII, N4.– էջ 365-370:
- Карапетян А.Н., Оганесян К.В., Сароян В.В. Влияние физико-механических и трибохимических процессов на формирование пленок фрикционного переноса // Труды Межд. научн.-техн.конф. "Поликомтриб–2015".– Гомель, Беларусь, 2015.- С. 96.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է իսմբագրություն 16.02.2016։

#### Н.Г. МЕЛИКСЕТЯН, К.В. ОГАНЕСЯН, А.Н. КАРАПЕТЯН, В.В. САРОЯН

#### РАЗРАБОТКА ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА САМОСМАЗЫВАНИЯ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

На основе изучения механизма самосмазывания металлополимерных узлов трения и диффузионной модели образования пленок фрикционного переноса выявлена аналитическая связь между процессами диффузии при трении и формированием пленок фрикционного переноса. Предложена методика оценки толщины формирующихся в металлополимерном трибосопряжении пленок фрикционного переноса, что позволяет определить долговечность узлов трения машин.

*Ключевые слова:* полимер, фрикционный перенос, самосмазывание, диффузия, толщина пленки, износостойкость.

# N.G. MELIKSETYAN, K.V. HOVHANNISYAN, A.N. KARAPETYAN, W.V. SAROYAN

#### DEVELOPING THE DIFFUSION MODEL AND INVESTIGATING THE SELF-LUBRICATING MECHANISM IN METAL-POLYMER TRIBOUNITS

Based on the study of the self-lubricating mechanism of the metal-polymer tribounits and the diffusion model of the friction transfer film formation, the analytic correlation between the diffusion processes at friction and the friction transfer film formation is revealed. A method for estimating the friction transfer film thickness in the metal-polymer tribocontact is proposed, allowing to determine the durability of the friction units.

*Keywords*: polymer, friction transfer, self-lubrication, diffusion, film thickness, wear resistance.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

#### УДК 685.34

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

#### З.А. МИНАСЯН, Г.Г. АКОПЯН

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ОБУВИ

Показана предпочтительность использования маломощных нагревательных элементов в подогреваемой обуви специального назначения с автономным питанием с целью минимизации и сбережения потребляемой энергии. Обосновано, что для правильного расчета системы обогрева обуви, помимо выбора нагревательного элемента, необходимо произвести расчеты теплопотерь через верх и низ обуви. С этой целью предлагается универсальная методика расчета системы электрообогрева обуви, которая связывает все величины, характеризующие внутренний электрообогрев и теплопотери обуви.

Ключевые слова: обувь, система электрообогрева, теплопотери, методика расчета.

**Введение.** Во время ходьбы стопа находится в постоянном теплообмене с окружающей средой. В случае, когда температура окружающей среды ниже внутриобувной температуры, происходит теплоотдача от стопы в окружающую среду. При этом температура стопы начинает падать, и человек испытывает дискомфорт [1]. Слишком низкая температура стопы может привести к обморожению, отмиранию клеток и даже к смерти [2]. Для решения данной проблемы предлагают специальную обувь с электрическим подогревом [3]. Такая обувь обеспечивает комфортную тепловую среду для ступни, однако имеет существенный недостаток: ограниченный ресурс источника питания. Поэтому предлагаются автономные источники энергии, в которых механическая энергия ходьбы или энергия деформации определенных элементов преобразовывается в электрическую энергию. Нами разработан способ электропитания обогреваемой обуви, где механическая энергия ходьбы преобразовывается в электрическую энергию с помощью миниатюрного генератора, вмонтированного в каблук обуви [4].

Постановка задачи и методика исследования. Чтобы правильно рассчитать обогрев обуви, необходимо, помимо самого нагревательного элемента, произвести расчеты по теплопотерям. Так как разные материалы, используемые при изготовлении обуви, имеют различные характеристики, нами приводится универсальная методика расчета системы электрообогрева.

Для этого рассмотрим схематическую конструкцию низа обуви (см рис.).

Поскольку толщины слоев деталей низа обуви малы, то общая толщина  $\delta$  низа обуви будет также небольшой. Указанное обстоятельство и достаточно низкая теплопроводность материалов низа обуви дают возможность не принимать во внимание растекание тепла в деталях низа, а учитывать только потоки тепла, направленного перпендикулярно деталям низа обуви. Вышесказанное в полной мере относится и к деталям заготовки верха обуви.



Рис. Конструкция низа обуви при электрообогреве:

1- вкладная стелька; 2- стелька; 3- простилка; 4- подошва; 5- нагревательный элемент; δ<sub>1</sub>, δ<sub>2</sub>, δ<sub>3</sub>, δ<sub>4</sub> - толщины соответствующих слоев

Цель электрического обогрева обуви заключается в возмещении потерь тепла через низ и верх обуви при отрицательных температурах внешней среды. Иначе говоря, для поддержания теплового комфорта стопы человека в обуви в холодный период года необходимо, чтобы количество теплоты, выделяемой электронагревателем, было равно общим теплопотерям через обувь.

Количество теплоты, выделяемой электрическим нагревателем, определяется по формуле [5]

$$Q_{\mathfrak{I}} = P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 R \ [Bm].$$
 (1)

Здесь U - напряжение на клеммах электрического нагревателя, B; I - сила тока в цепи, A; R - электрическое сопротивление,  $O_M$ , равное

$$R=\rho\cdot\frac{l}{s},$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление материала нагревателя  $O_M \cdot M$ ; l – длина проволоки, M; S - площадь поперечного сечения проволоки,  $M^2$ .

Так как для проволоки круглого поперечного сечения  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , где d – диаметр проволоки, то формула (1) принимает следующий вид:

$$Q = \frac{U^2 \cdot S}{\rho \cdot l} = \frac{U^2 \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho \cdot l} = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} = I^2 \cdot \frac{4 \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot d^2} [Bm].$$
(2)

Если задано время нагрева  $\tau$ , то, умножив выражение (2) на  $\tau$ , получим количество теплоты, выраженное в джоулях.

Общие теплопотери через верх и низ обуви определяются по формуле

$$dQ_{o \delta u_{\mu}} = dQ_{\theta} + dQ_{\mu} = \int_{S_{\theta}} dq_{\theta} + \int_{S_{\mu}} dq_{\mu} , \qquad (3)$$

где

$$dQ_{\theta} = \int_{S_{\theta}} dq_{\theta} = \int_{S} \frac{t_{\theta,0} - t_{cp}}{R_{\theta} + \frac{1}{\alpha_{\theta}}} \cdot dS' [Bm], \qquad (4)$$

$$dQ_{\mu} = \int_{S_{\mu}} dq_{\mu} = \int_{S} \frac{t_{e.o.} - t_{ep}}{R_{\mu} + \frac{1}{\alpha_{\mu}}} \cdot dS'' [Bm],$$
(5)

где dS' - элемент поверхности заготовки верха обуви,  $M^2$ ; dS'' - элемент поверхности низа обуви,  $M^2$ ;  $t_{6.0}$  - внутриобувная температура,  ${}^{0}C$ .

 $R_{e} = \frac{\delta_{1}}{\lambda_{1}} + \frac{\delta_{2}}{\lambda_{2}} + \dots + \frac{\delta_{n}}{\lambda_{n}}$ - суммарное тепловое сопротивление заготовки верха обуви, обуви,  $M^{2}K/Bm$ ;  $\delta_{1}, \delta_{2}, \dots, \delta_{n}$  – толщина отдельных слоев заготовки верха обуви,  $M; \lambda_{1}, \lambda_{2}, \dots, \lambda_{n}$  – коэффициент теплопроводности отдельных слоев заготовки верха обуви,  $Bm/M^{2}K; \alpha_{e}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности верха обуви к внешней среде,  $Bm/M^{2}K; t_{cp}$  – температура окружающей среды,  ${}^{0}C;$  $R_{\mu} = \frac{\delta_{1}'}{\lambda_{1}'} + \frac{\delta_{2}'}{\lambda_{2}'} + \dots + \frac{\delta_{n}'}{\lambda_{n}'}$  - суммарное тепловое сопротивление низа обуви,  $M^{2}K/Bm;$  $\delta'_{1}, \delta'_{2}, \dots, \delta'_{n}$ , – толщина отдельных слоев низа обуви,  $M; \lambda'_{1}, \lambda'_{2}, \dots, \lambda'_{n}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности подошвы к грунту,  $Bm/M^{2}K; t_{cp}$  – температура грунта,  ${}^{0}C$ .

После интегрирования формул (4) и (5) получим

$$Q_{\theta} = \frac{t_{\theta,o} - t_{cp}}{R_{\theta} + \frac{1}{\alpha_{\theta}}} \cdot s_{\theta} \ [Bm], \tag{6}$$

$$Q_{\mu} = \frac{t_{e.o.} - t_{cp}}{R_{\mu} + \frac{1}{\alpha_{\mu}}} \cdot s_{\mu} [Bm], \qquad (7)$$

где  $S_{\theta}$  – площадь поверхности верха обуви,  $M^2$ ;  $S_{\mu}$  – площадь поверхности низа обуви,  $M^2$ .

Сложив формулы (6) и (7), получим общие теплопотери обуви:

$$Q_{o \delta u \mu} = Q_{\theta} + Q_{\mu} = \frac{t_{e.o.} - t_{cp}}{R_{\theta} + \frac{1}{\alpha_{\theta}}} \cdot s_{\theta} + \frac{t_{e.o.} - t_{cp}}{R_{\mu} + \frac{1}{\alpha_{\mu}}} \cdot s_{\mu} \ [Bm].$$
(8)

Сравнив формулы (2) и (8), получим

$$\frac{U^2 \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho \cdot l} = \frac{t_{6.0.} - t_{cp}}{R_6 + \frac{1}{\alpha_6}} \cdot S_6 + \frac{t_{6.0.} - t_{cp}}{R_{\mu} + \frac{1}{\alpha_{\mu}}} \cdot S_{\mu}.$$
(9)

После подстановки выражений для  $R_{\mu}$  и  $R_{g}$  в формулу (9) окончательно получим

$$\frac{U^2 \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot \rho \cdot l} = \frac{t_{e.o.} - t_{cp}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_e}} \cdot S_e + \frac{t_{e.o.} - t_{cp}}{\frac{\delta_1'}{\lambda_1'} + \frac{\delta_2'}{\lambda_2'} + \dots + \frac{\delta_n'}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_H}} \cdot S_H.$$
(10)

Заключение. Полученная в работе формула (10) связывает все величины, характеризующие внутренний электрообогрев обуви, и может быть использована для его оптимизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен.- М.: МЭИ, 2005.- 550 с.
- Прохорова В.Т. Особенности защиты человека от воздействия низких температур: Монография. - Шахты: ГОУ ВПО "ЮРГУЭС", 2007. - 499 с.
- 3. http://www.gsconto.com/ru/blogs/post/131/Elektricheskie-botinki-ot-COLUMBIA
- 4. ՀՀ արտոնագիր N0 2581A. Կոշիկ Գեներատոր /**Ա.Ռ. Պապոյան, Հ.Գ. Հակոբյան**. Հայտի համարը AM 20110106, Հրատարակման թվականը 25.01.2012. – 5 էջ։
- 5. Шатенье Г., Боэ М., Буи Д., Вайан Ж., Веркиндер Д. Учебник по общей электротехнике.- М.: Техносфера, 2009. - 624 с.

Гюмрийский филиал Национального политехнического университета Армении. Материал поступил в редакцию 02.02.2016.

#### **Զ.Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Հ.Գ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ**

#### ԿՈՇԻԿԻ ՆԵՐՔԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՋԵՌՈՒՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱ

Ինքնավար սնուցմամբ հատուկ նշանակության ջեռուցվող կոշիկներում նախընտրելի է ոչ մեծ հզորությամբ տաքացվող տարրի կիրառումը՝ օգտագործվող էներգիայի խնայման և նվազեցման նպատակով։ Կոշիկի ջեռուցման համակարգի Ճշգրիտ հաշվարկի համար, բացի տաքացնող տարրի ընտրությունից, անհրաժեշտ է կատարել կոշիկի վերնամասից և տակացուից ջերմության կորուստների հաշվարկները։ Առաջարկվում է կոշիկի ջեռուցման համակարգի հաշվարկի մեթոդիկա, որն ընդգրկում է կոշիկի ներքին էլեկտրաջեռուցումը և ջերմակորուստները բնութագրող բոլոր մեծությունները։

*Առանցքային բառեր.* կոշիկ, էլեկտրաջեռուցման համակարգ, ջերմակորուստներ, հաշվարկի մեթոդիկա։

#### Z.A. MINASYAN, H.G. HAKOBYAN

#### A METHOD FOR CALCULATING THE INTERNAL ELECTRIC HEATING OF SHOES

In the self-powered heated shoes for special purpose it is preferable to use low-power heating elements in order to minimize the energy consumption and savings. For a correct calculation of the heating system of shoes, besides the choice of the heating element, it is necessary to calculate the heat losses through the top and bottom of the shoe. To this end, we propose a universal method for calculating the electric heating system of shoes, connecting all the values, characterizing the internal electric heating and heat losses of the footwear.

*Keywords*: footwear, electrical heating system, heat losses, the universal method of calculation.

#### ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2016. Հ. LXIX, N 3.

*Հ*SԴ 661.21

#### ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱ

#### Ա.Ա. ՖՐԱՆԳՈՒԼՅԱՆ

### ԵՐԿԱԹԻ ԿՈՐՉՈՒՄԸ ՊՂԻՆՉ-ԿՈԼՉԵԴԱՆԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ՍՈՒԼՖԱՏԱՑՎԱԾ ԲՈՎՎԱԾՔԻ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ ՈՄԿԵՏԱՐ ՍՈՐԱԽՑՈՒԿԻՑ

Հետազոտված է պղինձ-կոլչեդանային խտանյութի սուլֆատային բովվածքի ծծմբաթթվային տարրալուծման արդյունքում ստացված օքսիդային ոսկետար սորախցուկից բարձրորակ երկաթափոշու ստացման տեխնոլոգիական գործընթացը։ Ցույց է տրված սորախցուկից ցիանիդային տարրալուծման եղանակով ոսկու և արծաթի նախնական կորզման անհրաժեշտությունը։ Ելային խտանյութից պղնձի, ոսկու և արծաթի կորզումից հետո մնացած երկրորդային սորախցուկը պարունակում է հիմնականում հեմաթիտ և մագնեթիտ, ինչը պայմանավորում է նախնական վերականգնիչ թրծման և հետագա մանրավրկիտ մագնիսական հարստացման կիրառումը՝ լրիվ մագնեթիտային գերխտանյութի ստացմամբ, որպես առավել հարմար հումք ջրածնային վերականգնման եղանակով բարձրորակ երկաթափոշու ստացման համար։

*Առանցքային բառեր.* սուլֆատացված բովվածք, օքսիդային սորախցուկ, տարրալուծում, մագնիսական զատում, վերականգնում, երկաթափոշի։

**Ներածություն.** Հետազոտվող ոսկետար օքսիդային սորախցուկը՝ 330,6 *գ/տ* Au-ի և 267,1 *գ/տ* Ag-ի պարունակությամբ և –0,07 *մկմ* հատիկայնությամբ, ունեցել է հետևյալ միներալային բաղադրությունը (%)՝ 12,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 16,8 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, 49,1 SiO<sub>2</sub>, 8,7 (CaO+MgO), մնացածը՝ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> և անլուծելի այլ օքսիդներ։ Այն ստացվել է պիրիտի բարձր պարունակությամբ պղնձային խտանյութի սուլֆատային բովվածքի 2 %անոց ծծմբաթթվային լուծույթով տարրալուծման արդյունքում՝ որպես անլուծելի մնացորդ։

Նկատի ունենալով ստացված սորախցուկում ոսկու և արծաթի բարձր պարունակությունը և այն հանգամանքը, որ ցիանիդային տարրալուծման պրոցեսում մետաղական երկաթը չի կարող փոխազդել ցիանիդի հետ [1], ընդհանուր տեխնոլոգիական ցիկլի (նկ. 1) առաջին փուլն առանձնացված է ելանյութի ցիանիդային տարրալուծմամբ հնարավորինս անմնացորդ ձևով ոսկու և արծաթի կորզման համար։ Երկրորդ փուլում ցիանիդով անլուծելի օքսիդային մնացորդի` երկրորդային սորախցուկի փոշեմետալուրգիական վերամշակման երեք հաջորդական ենթափուլերով (լվացված օքսիդափոշու նախնական վերականգնիչ թրծում՝ մինչև նրանում առկա հեմաթիտի լրիվ փոխակերպումը մագնեթիտի, թաց մագնիսական զատում, մագնեթիտային գերխտանյութի ջրածնային վերականգնում) ստացվում է բարձրորակ երկաթափոշի։



Նկ. 1. Պղինձ-կոլչեդանային խտանյութի հիդրոմետալուրգիական վերամշակման սորախցուկից երկաթի կորզման տեխնոլոգիական ցիկլի սխեման

Գործընթացի առաջին փուլում սորախցուկի 100 q զանգվածով նմուշի ցիանիդային տարրալուծումը (պինդ/հեղուկ = 1:8, լուծույթի ջերմաստիձանը՝ 80...85  $^{o}C$ , խառնման արագությունը՝ 600 պտ/րոպե, տևողությունը՝ 24 duu/) իրականացվել է 1 լիտր աշխատանքային ծավալով ռեակտորում (նկ. 2), իսկ լուծույթից ոսկու և արծաթի կորզումը (հոսանքի խտությունը՝ 40  $U/u^2$ , ջերմաստիձանը՝ 45 $^{o}C$ , լուծույթի մղման արագությունը՝ 30  $d_{l}/pոպե·uu^2$ )՝ «եռաչափ» կաթոդով էլեկտրոլիզային բջջի միջոցով (նկ. 3) [2]: Նատրիումի ցիանիդի կոնցենտրացիան տարրալուծման ամբողջ ընթացքում պահվել է 0,5...0,6 q/l սահմաններում, pH - ը՝ 12...13: Ազնիվ մետաղների ցիանիդացման և կորզման աստիձանը որոշվել է ստանդարտ ատոմա-աբսորբային սպեկտրաչափական եղանակով (AAS):



Փորձի արդյունքները ցույց են տվել, որ հետազոտվող սորախցուկից 24 ժամվա ընթացքում ոսկին կորզվում է 99 %- ով, իսկ արծաթը` 98 %- ով։ Լուծույթում երկաթի, սիլիցիումի, կալցիումի, ալյումինի և մագնեզիումի իոնների բացակայությունը վկայում է այդ մետաղների համապատասխան օքսիդների անզգայնությունը ցիանիդի նկատմամբ (աղ. 1)։

Աղյուսակ 1

Օքսիդային սորախցուկ-1-ի ցիանիդային տարրալուծման լուծույթի ատոմա-աբսորբային վերլուծության արդյունքները (գ/լ)

$Au^+$	$Ag^+$	Cu <sup>2+</sup>	$Zn^{2+}$	Pb <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Si <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	$Al^{3+}$	CN-
33,1	26,3	1,02	0,01	0,005	<u></u> ٤.h.	<u>չ</u> .h.	<u></u> ٤.h.	չ.h.	<u>չ</u> .h.	<u>չ</u> .h.	25,1
չ.հ. – չի հայտնաբերված։											

Ցիանիդային տարրալուծման պրոցեսի պինդ անլուծելի մնացորդի՝ սորաիցուկ -2 -ի սիլիկատային քիմիական վերլուծության տվյալները (աղ. 2) իրենց հերթին ցույց են տալիս, որ նրանում գրեթե ամբողջությամբ պահպանվում են երկաթի օքսիդներն իրենց նախնական կոնցենտրացիաներով։

Աղյուսակ 2

*Opuիդային unpախցուկ -1-ի ցիանիդային տարրալուծման պինդ անլուծելի մնացորդի* (иnpախցուկ-2) սիլիկատաքիմիական վերլուծության տվյալները (%)

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO+MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> և այլն	Au ( <i>uq/цq</i> )	Аg ( <i>uq/lqq</i> )
49,15	20,82	8,41	8,72	մնացածը	0,25	4,11

Մակայն այս արգասիքում երկաթի օքսիդները ամբողջովին չեն ներկայացված մագնիսական հարստացման համար հարմար միներալի տեսքով։ Այդ տեսակետից դրա նախնական վերականգնիչ թրծումն անխուսափելի է, որպեսզի նրանում պարունակվող ամբողջ երկաթօքսիդը դառնա մագնիսազգայուն։ Այս պրոցեսն իրականացվել է խողովակային պտտվող վառարանում՝ որպես վերականգնիչ գազ օգտագործելով ջրածինը։ Թրծման ջերմաստիձանը (500 ± 10  $^{o}$ C, որի դեպքում FeO -ի գոյացումը բացառվում է) ընտրվել է՝ ելնելով Fe – O – H<sup>2</sup> - H<sup>2</sup>O համակարգի վիձակի դիագրամից [3]։ Ռենտգենաֆազային վերլուծության տվյալներով՝ 30 րոպեի ընթացքում ելանյութում առկա հեմաթիտն ամբողջովին վերականգնվել է մինչև մագնեթիտի՝ ըստ հետևյալ ռեակցիայի.

$$3Fe_2O_3 + H_2 = 2Fe_3O_4 + H_2O$$
: (1)

Այդ պայմաններում նմուշը (մոտ 28,9 *%* Fe₃O₄) մնում է առանց նկատելի եռակալման, ինչը բավարար պայման է հետագա գործողությունների արդյունավետության տեսանկյունից։

Մագնեթիտային արգասիքից բազմաստիՃան թաց մագնիսական հարստացման եղանակով ստացված գերխտանյութը պարունակում է մոտ 99,1 *%* Fe₃O₄ (71,7 *%* Fe), որի վերականգնումը տեսականորեն [3] չպետք է գերազանցի 572 *ºC* – ը։ Համապատասխանաբար, որպեսզի Fe₃O₄→Fe փոխակերպումը տեղի ունենա առանց միջանկյալ Fe₃O₄ → FeO ֆազային անցումի, խողովակային վառարանի ներսում ջերմաստիձանը պահվել է 540 ± 20 <sup>ℴ</sup>C մակարդակում։ Այդ պայմաններում մագնեթիտը վերականգնվում է մինչև մետաղական երկաթը՝ ըստ հետևյալ ռեակցիայի.

$$Fe_3O_4 + 4H_2 = 3Fe + 4H_2O$$
: (2)

Իսկ գերխտանյութի լրիվ վերականգնման համար պահանջվել է 55...60 *րոպե*։ Քանի որ ցածր ջերմաստիձանային պայմաններում վերականգնված մետաղափոշիներն անխուսափելիորեն օժտված են լինում ինքնաբռնկման ունակությամբ (պիրոֆորությունը շատ մեծ է՝ տեսակարար մակերևույթի մեծացման շնորհիվ), այդ պատձառով լրիվ վերականգնման փուլի ավարտից հետո երկաթափոշին անմիջապես, խողովակի հետ միասին, տեղափոխվել է վառարանի բարձր ջերմաստիձանային գոտի (~700 °C), որտեղ պահվել է 30 *րոպե* (որպեսզի փոշու հատիկները մասնակիորեն եռակալվեն, միավորվելով գոյացնեն խոշոր հատիկներ` ավելի փոքր տեսակարար մակերևույթով)։

Էմիսիոն սպեկտրալային վերլուծության տվյալներով ստացված երկաթափոշում խառնուրդների ընդհանուր պարունակությունը չի գերազանցում 1,05 % - ը։ Իր մաքրությամբ (98,5 % Fe) և մյուս տեխնիկական բնութագրերով (հատիկի ձևը` սպունգային, լիցքային խտությունը` 1,92 *գ/սմ*<sup>3</sup>, հոսունությունը` 2,80 *գ/վրկ*) այն չի զիջում ПЖВ-3 մակնիշի ստանդարտ երկաթափոշուն<sup>`</sup> ըստ ԳOUS ГОСТ 9849-86-ի։

**Եզրակացություն**։ Պիրիտի բարձր պարունակությամբ խալկոպիրիտային խտանյութի սուլֆատային բովվածքի նոսը ծծմբաթթվային տարրալուծման արդյունքում ստացված ոսկետար անլուծելի մնացորդի (սորախցուկի) նկատմամբ կիրառելով հաջորդական՝ «ցիանիդային տարրալուծում  $\rightarrow$  օքսիդային սորախցուկի վերականգնիչ թրծում  $\rightarrow$  թրծված արգասիքի թաց մագնիսական հարստացում  $\rightarrow$  գոյացած մագնեթիտային գերխտանյութի վերականգնում» ընդհանուր տեխնոլոգիական ցիկլը, հնարավոր է արդյունավետորեն կորզել ինչպես ոսկին ու արծաթը, այնպես էլ նրա հիմնական բաղադրիչը հանդիսացող երկաթը։ Ստացված երկաթափոշին իր տեխնիկական բնութագրերով համապատասխանում է ԳOUS ГОСТ 9849-86-ին։ Երկաթափոշու նման ռեսուրսը բավարար է՝ տեղում համապատասխան արտադրության կազմակերպելու համար։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Marsden J.O., House C.I. The Chemistry of Gold Extraction. 2<sup>nd</sup> ed. Colorado, USA: Littletion, 2006 - 651 p.
- Moatasem M.KH. Cyanide Leaching of Polymetallic Ore Treatment Residuum and the Recovery of Noble Metals from Lich Liquor//Reports of the National Academy of Sciences and the State Engineering University of Armenia. TS Series.- 2010.- V.63, N<sup>0</sup> 3.- P. 248-256.

3. Теория металлургических процессов: Учебник для вузов / Д.И. Рыжанков, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев и др.- М.: Металлургия, 1989.- 392 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.03.2016։

#### А.А. ФРАНГУЛЯН

#### ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО КЕКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФАТИЗИРОВАННОГО ОГАРКА МЕДНО-КОЛЧЕДАННОГО КОНЦЕНТРАТА

Исследован технологический процесс получения качественного железного порошка из оксидного золотосодержащего кека, полученного методом медного выщелачивания сульфатизированного огарка медно-колчеданного концентрата. Показана необходимость предварительного извлечения золота и серебра из кека методом цианидного выщелачивания. Остаточный вторичный кек после извлечения меди, золота и серебра из исходного концентрата содержит в основном гематит и магнетит, что обусловливает применение предварительного восстановительного обжига с последующим тонким магнитным обогащением обожженного продукта для получения магнетитового суперконцентрата - наиболее удобного сырья для производства качественного железного порошка методом водородного восстановления.

*Ключевые слова:* сульфатизирующий обжиг, оксидный кек, выщелачивание, магнитное обогащение, восстановление, железный порошок.

#### A.A. FRANGULYAN

#### IRON RECOVERY FROM GOLD-CONTAINING CAKE OBTAINED BY THE LEACHING METHOD OF SULPHATIZED CALCINE OF THE COPPER-PYRITE CONCENTRATE

The technological process for producing high-quality iron powder from a gold-bearing oxide residue of sulphatized calcine of the copper-pyrite concentrate by leaching is investigated. The necessity of a preliminary extraction of gold and silver by the method of cyanide leaching is shown. The secondary residue cake, after the extraction of copper, gold and silver from the original concentrate, primarily contains hematite and magnetite, conditioning the use of a preliminary reduction roasting with the following thin magnetic enrichment of the calcined product to obtain a fully magnetite masterbatch, the most convenient of the raw materials for the production of high-quality iron powder by hydrogen reduction .

*Keywords:* sulphatization roasting, oxide cake, leaching, magnetic enrichment, recovery, iron powder.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

#### УДК 621.039.513

ЭНЕРГЕТИКА

# С.А. БЗНУНИ, Н.Г. БАГДАСАРЯН , А.М. АМИРДЖАНЯН, П. КОУТ АНАЛИЗ УПЛОТНЕННОЙ ЗАГРУЗКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В СТЕЛЛАЖАХ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ РЕАКТОРА ВВЭР-440

Приведены результаты анализа уплотненной загрузки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в стеллажах бассейна выдержки (БВ) Армянской АЭС (ААЭС). Проведен анализ критичности БВ с применением подхода "Учет выгорания" в сочетании с методом "Только актиноиди", т.е. с учетом изменения изотопного состава актиноидов. Разработана модель БВ реактора ВВЭР-440 на основе программы MCNP 6.1. Произведен расчет изотопного состава ОЯТ ВВЭР при помощи программы ORIGEN-S (SCALE 6.1). Разработанная модель валидирована и верифицирована на основе экспериментальных данных по химическому анализу изотопного состава ОЯТ реактора ВВЭР-440.

*Ключевые слова*: критичность, бассейн выдержки, отработанное топливо, уплотненная загрузка.

**Введение**. С переходом ААЭС на ядерное топливо с обогащением 3,82% и, как следствие, с более глубоким выгоранием может возникнуть проблема дефицита свободных ячеек для хранения отработанного топлива в БВ в период полной аварийной выгрузки активной зоны. Эта проблема обусловлена тем обстоятельством, что увеличение выгорания приводит к удвоению времени выдержки предварительного охлаждения ОЯТ, необходимого для приведения его в соответствие с приёмочными тепломеханическими и радиационными критериями хранения ОЯТ в хранилищах сухого типа NUHOMS ААЭС.

Одним из возможных способов увеличения числа свободных ячеек в БВ может служить обоснование возможности уплотненной загрузки ОЯТ в стеллажах на основе подхода "Учет выгорания". Применение топливных сборок с высоким обогащением 3,82%, чем предусмотрено первоначальным проектом 3,6%, позволило ААЭС повысить глубину выгорания выгружаемых кассет. В то же время высокая глубина выгорания влечет за собой более высокие значения остаточного тепловыделения, дозы гамма- и нейтронного облучения. Это практически удваивает время предварительного охлаждения ОЯТ в БВ с целью приведения его параметров в соответствие с требованиями хранения в сухом хранилище ОЯТ ААЭС.

Для оптимизации количества свободных ячеек в стеллажах ОЯТ в БВ ААЭС предусмотрено внедрить стеллажи с уплотненной конфигурацией. Для анализа безопасности уплотнённой загрузки ОЯТ, с точки зрения критичности, в данной работе проведены расчеты с применением метода Монте-Карло и подхода "Учет

выгорания". В настоящее время обоснование безопасности хранилищ проводится на основе подхода "Свежее топливо", который не предусматривает изменения изотопного состава ядерного топлива в процессе его выгорания в активной зоне. Однако данный подход является сверхконсервативным, так как не учитывается существенное снижение величины реактивности топливных сборок за счет выгорания делящихся изотопов и накопления продуктов деления с большими сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов. Применение подхода "Учет выгорания" позволяет избежать сверхконсерватизма, однако в этом случае существенным образом повышаются требования к точности программ, используемых для расчета изменения изотопного состава и критичности ОЯТ. Расчетная программа ORIGEN-S, использованная в работе для расчетов изотопного состава, верифицирована и валидирована на основе эксперимента радиохимического анализа ОЯТ ВВЭР-440, проведенного в НИИ атомных реакторов (Димитровград, Россия) [1]. Так как в настоящее время не проводились эксперименты на критичность ядерного топлива типа ВВЭР с использованием продуктов деления, применение программ для расчета критичности топливных сборок ограничено системами, включающими только актиноиды. Валидацию программ для расчета критичности проводят на основе результатов экспериментов со свежими топливными кассетами типа МОХ, которые наравне с ураном содержат и плутоний. По этой причине в настоящей работе был применен метод "Только актиноиди", т.е. учитывалось только изменение изотопного состава актиноидов в процессе выгорания ядерного топлива в активной зоне реактора.

Расчеты проведены в соответствии с рекомендациями [2] и руководством по выполнению анализа критичности хранилищ ОЯТ реакторов на легкой воде [3].

Анализ изотопного состава ОЯТ. Ключевым фактором, влияющим на величину критичности ОЯТ, является используемый изотопный состав. Применение подхода "Учет выгорания" требует использования изотопного состава ОЯТ, который обеспечит консерватизм при расчете коэффициента размножения нейтронов. Ключевыми параметрами, влияющими на реактивность ОЯТ ВВЭР-440, являются:

1. Удельная мощность топливной кассеты. В случае применения метода "Только актиноиди" необходимо использовать максимально допустимое значение, чтобы получить наиболее консервативный результат [1]. Поэтому для получения консервативного изотопного состава был выбран трехгодичный топливный цикл с максимально возможной удельной мощностью для достижения желаемой глубины выгорания.

2. Температура топлива. С целью получения консервативного изотопного состава ОЯТ температура топлива принята равной 1000 *K*, так как при высокой температуре величина резонансного поглощения нейтронов в <sup>238</sup>U увеличивается в результате доплер-эффекта, что приведет к повышению количества накапливае-

мого плутония и соответственно повышению коэффициента размножения нейтронов системы ( $k_{eff}$ ).

3. Температура/плотность замедлителя. Для получения консервативного изотопного состава ОЯТ в модели была принята максимальная температура/минимальная плотность замедлителя, соответствующая температуре замедлителя на выходе из активной зоны. Меньшая плотность замедлителя приводит к увеличению количества накапливаемого плутония по причине смещения спектра нейтронов в стороны высоких энергий.

4. Концентрация борной кислоты. В данной модели использовано максимальное значение средних концентраций борной кислоты в теплоносителе из предыдущих топливных загрузок ААЭС, так как увеличение концентрации борной кислоты также приводит к смещению спектра нейтронов в стороны высоких энергиий и, как следствие, к увеличению накопления плутония.

Анализ глубины выгорания тепловыделяющей сборки (TBC) (рис.1) со средним обогащением 3,82% проводился программой ORIGEN-S [4]. Программа моделирует изменение изотопного состава посредством применения матричного экспоненциального метода для решения уравнений, описывающих процессы накопления, выгорания и распада нуклидов. При этом изменения физических размеров топлива в процессе выгорания не учитывались по причине малого воздействия на  $k_{\rm eff}$  [3].



Рис. 1. Модель ТВС со средним обогащением 3,82% (стрелками показаны обогащения отдельных типов тепловыделяющих элементов)

На основе рекомендаций [2] и анализа значимости нуклидов, проведенного в [5], в настоящей работе учтена динамика изменения следующих изотопов: 234U, 235U, 238U, 238Pu, 239Pu, 240Pu, 241Pu, 242Pu, 241Am. Расчетные концентрации вышеуказанных изотопов использовались как исходные данные при расчетах критичности.

При условии наличия системы принудительного охлаждения БВ ВВЭР-440 ОЯТ могут быть загружены в БВ немедленно после изъятия их из активной зоны. Таким образом, минимальное время охлаждения ОЯТ выбрано на основе величины максимальной реактивности после выгрузки из активной зоны и составляет 100 суток.

Величина реактивности БВ сильно зависит от повысотного распределения глубины выгорания ОЯТ. Само же повысотное распределение как изменяется под воздействием условий эксплуатации, так и определяется особенностями активной зоны конкретного реактора.

Для изучения особенностей повысотного распределения выгорания аварийной рабочей кассеты (АРК) и рабочей кассеты (РК) была разработана база данных примерно с 1500 профилями повысотного распределения ААЭС с различными средними глубинами выгорания.

Повысотное распределение глубины выгорания РК имеет косинусообразную форму при начале кампании, постепенно уплотняясь к середине при постепенном росте величины выгорания. Низкая глубина выгорания около концевых частей РК в сочетании с высокой плотностью замедлителя (H<sub>2</sub>O) в нижней части активной зоны приводит к смещению максимума выгорания к нижней части РК. Таким образом, верхняя часть РК с низким выгоранием определяет реактивность всей РК (рис. 2).

Однако АРК, особенно находящиеся в шестой регулирующей группе по профилю повысотного распределения выгорания, существенным образом отличаются от РК, так как они находятся вне активной зоны реактора на протяжении почти всего топливного цикла, за исключением работы на мощностном эффекте. ТВС АРК шестой группы, как правило, перемещают в остальные 5 регулирующих групп АРК, которые находятся в активной зоне на протяжении всего топливного цикла. С увеличением глубины выгорания профили повысотного распределения выгорания сглаживаются, но значительная асимметрия профиля сохраняется. Поэтому в отличие от РК, реактивность выгоревшей ТВС АРК определяется его нижней частью с низким выгоранием (рис. 2).



Рис.2. Консервативные осевые профили для АЭС РК и АРК

Для применения подхода "Учет выгорания" была выбрана целевая группа со средней величиной выгорания 38...42 МВт сут/кгU, что соответствует среднему выгоранию выгружаемых кассет в БВ. На основе анализа 220 повысотных профилей из выбранной целевой группы консервативные профили были разработаны для РК и АРК. Расчет основывался на допущении использовать минимальную величину глубины выгорания каждого элемента всех РК с целью получения композитного осевого профиля для РК. Полученные композитные профили были повторно нормированы таким образом, чтобы среднее покассетное выгорание соответствовало среднему значению выгорания выбранной целевой группы (40 МВт сут/кгU). При этом осевая нодализация включала в себя 41 равномерный нод, что соответствует осевой нодализации программы БИПР-7А, используемой для нейтронно-физического анализа активной зоны ААЭС. Таким образом, использованная нодализация вполне достаточна для охвата асимметрии осевого распределения выгорания, так как согласно [6], 18-частичная равномерная осевая нодализация позволяет охватывать все эффекты распределения выгорания, важные с точки зрения расчетов критичности. Рассчитанные повысотные распределения глубин выгорания использовались как исходные данные при разработке модели БВ для последующих расчетов keff.

Два независимых анализа [2,7] показали, что применение 5%  $\Delta k$  для неопределенностей, связанных с расчетом выгорания топлива, является консервативным при использовании библиотек сечений нейтронно-ядерных взаимодействий ENDF/B-V и ENDF/B-VII. Проведенный анализ подтвердил, что в расчетах критичности можно использовать нулевое систематическое отклонение. Имея в виду, что проведенный анализ был ограничен методом "Только актиноиди", в данной работе была использована библиотека констант ENDF/B-VII. Для дальнейшего анализа нулевое систематическое отклонение и 2,5%  $\Delta k$  были использованы в качестве неопределённостей, связанных с разбросом данных применяемых постоянных нейтронно-ядерных взаимодействий.

Анализ критичности. Анализ критичности БВ ОЯТ был проведен для случая бесконечной решетки ТВС, что позволяет получить консервативную оценку величины реактивности БВ, так как в этом случае утечка нейтронов игнорируется.

В БВ ОЯТ ААЭС расположены два идентичных стеллажа (верхний и нижний). Геометрические размеры, конфигурация и состав материала ТВС и стеллажей взяты из соответствующей проектной документации и Отчета по анализу безопасности [8, 9]. На рис. 3 приведены осевые и радиальные поперечные сечения модели РК и БВ ОЯТ. Темными и светлыми цветами отмечены ноды с разными выгораниями. Модель разработана при помощи программы MCNP6.1 [10].



Рис.3. Осевое и радиальное сечения модели ТВС и БВ ОЯТ

Одной из сложных задач при расчете критичности с профилями осевого выгорания по методу Монте-Карло является обеспечение достаточной выборки нейтронов на верхних и нижних частях РК и АРК. Для обеспечения правильной выборки нейтронов и сходимости источника нейтронов, а также статистической достоверности расчетных значений были использованы следующие параметры моделирования по методу Монте–Карло: число нейтронов в одном поколении – 500000, количество моделируемых нейтронных поколений – 500, количество поколений отбрасываемых нейтронов – 300.

Сходимость источника нейтронов контролировалась сходимостью энтропии Шеннона. Во всех моделируемых случаях пропуск начальных 300 нейтронных поколений позволяет достичь хорошо сходящихся решений.

Анализ критичности проводился на основе проектных данных топливной сборки (номинальные размеры, материалы и изотопный состав) с учетом установленных производственных допусков. Таким образом, для РК и АРК и ячеек стеллажей ОЯТ были проанализированы следующие допуски для включения их в расчеты неопределенности  $k_{eff}$  [8,9]: плотность урана - 10,4...10,7  $c/cm^3$ ; обогащение урана - 3,82% ± 0,05; диаметр центрального отверстия в топливной таблетке – 0,14...0,16 *см*; диаметр топливной таблетки - 0,754...0,757 *см*; шаг твэлов - 12,3 ± 0,12 *мм*; внешний диаметр оболочки TBC - 145+ 0,15 *мм*; шаг стеллажа ОЯТ - 11,25 ± 0,2 *см*.

Отдельно были оценены независимые параметры неопределенности, а общая величина неопределенности  $k_{eff}$  рассчитана как корень квадратный из суммы квадратов отдельных значений неопределенностей в  $k_{eff}$ :

$$\Delta k = \sqrt{\sum_{i} (\Delta k_i)^2}.$$

Суммарная неопределенность  $k_{eff}$  из-за производственных допусков, неопределенности выгорания и статистической неопределенности была оценена как  $\Delta k = 0,037$ .

Максимальное значение  $k_{eff}$  было определено путем добавления к номинальной расчетной ( $k_{eff}^{nom}$ ) величине систематических отклонений ( $\Delta k_{meth}$ ) и применимых неопределенностей (*Bias*) с использованием формулы

$$k_{\max} = k_{\text{eff}}^{\text{nom}} + \Delta k_{\text{meth}} + \sum_{j} Bias_{j} + \sqrt{\sum_{i} (\Delta k_{i})^{2}}$$

Нулевое систематическое отклонение было принято для расчетов выгорания в соответствии с рекомендациями [2]. Систематическое отклонение в размере 0,0001 было использовано на основе валидации MCNP6.1 при многочисленных экспериментах на критических сборках [11]. Систематическое отклонение  $\Delta k_{meth} = 1\%$  было принято с учетом метода Монте-Карло.

В дополнение к неопределенностям в  $k_{\rm eff}$  из-за производственных допусков также были учтены статистическая неопределенность в размере трехкратного

стандартного отклонения от среднего значения  $k_{eff}$  (3 $\sigma$ ) и неопределенность в систематическом отклонении в результате применения программы MCNP 6.1 в размере 0,00142 [11].

При расчете номинального  $k_{\rm eff}^{\rm nom}$  были сделаны следующие допущения: наличие растворимого бора в БВ не учитывалось, и 6 свежих ТВС загружено в центральную часть БВ. Результаты второго допущения для конечной геометрии БВ показали незначительный вклад в  $k_{\rm eff}^{\rm nom}$ .

В соответствии с регулирующими требованиями, действующими в Республике Армения [12], должны быть использованы те конфигурации плотности замедлителя, которые могут привести к максимальной величине реактивности системы. По этой причине  $k_{\rm eff}^{\rm nom}$  был рассчитан с различными сочетаниями плотности воды. При нарушении теплоотвода из объема БВ естественная конвекция воды в результате подогрева на топливной части кассет приводит к перераспределению плотности теплоносителя, при которой плотность воды/пароводяной смеси внутри чехлов кассет (в объеме топливного пучка) меньше плотности воды межчехлового объема, что приводит к снижению эффективного коэффициента размножения нейтронов (см. табл) [9]. Итеративные расчеты критичности проводились с целью определения минимально допустимого шага топливных сборок в стеллаже БВ, удовлетворяющего нормативному критерию приемки  $k_{\rm max} < 0,95$  [12]. Результаты анализов представлены в таблице.

Таблица

Шаг РК/ТВС в БВ, см	Плотность воды между РК/ТВС, г / см <sup>3</sup>	Плотность воды внутри РК/ТВС, г / см <sup>3</sup>	<b>k<sub>eff</sub></b> PK	<b>k</b> <sub>eff</sub> TBC
10,56	1,0	1,0	0,89484	0,89579
10,56	0,96	0,96	0,94717	0,94895
10,56	0,96	0,626	0,93233	0,93439

Результаты анализа критичности БВ

Так как ОЯТ в номинальном режиме эксплуатации БВ находится в состоянии, при котором соотношение замедлитель/топливо больше оптимального для топливной решетки ВВЭР-440, то снижение величины плотности замедлителя  $(0,96 \ c/cm^3)$  приводит к увеличению  $k_{eff}^{max}$  из-за сравнительно большого сечения поглощения нейтронов в воде. Впоследствии, из-за снижения плотности пароводяной смеси до величины  $0,626 \ c/cm^3$ ,  $k_{eff}^{max}$  уменьшается.

Заключение. Результаты анализа уплотнения БВ реакторов типа ВВЭР-440 методом Монте-Карло показали, что использование консервативного (реактивного) значения повысотного распределения выгорания с применением подхода "Учет выгорания" в сочетании с методом "Только актиноиди" позволяет уменьшить
шаг между топливными сборками от 11,25 до 10,56 *см* (при глубине выгорания не менее 40 *MBm сут/кгU*), что дает возможность создать дополнительные ячейки для 136 РК/АРК в БВ реакторов типа ВВЭР-440.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Jardine L.J.** Radiochemical Assays of Irradiated VVER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burnup Credit Activities. UCRL-TR-212202, 2005.
- Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transport and Storage Casks, US NRC Spent Fuel Project Office Interim Staff.-Guidance 8, Rev-03, 2003.
- 3. Guidance for Performing Criticality Analyses of Fuel Storage at Light Water Reactor Power Plants, NEI 12-16. -Revision 1, 2014.
- Gauld I.C., Hermann O.W., Westfall R.M. ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup And Decay, and Associated Radiation Source Terms. - Version 6, Vol. II, Sect. F7, ORNL/TM-2005/39.
- Investigation of Nuclide Importance to Functional Requirements Related to Transport and Long-Term Storage of LWR Spent Fuel / B.L. Broadhead, et al. - ORNL/TM-12742, Oak Ridge National Laboratory, 1995.
- Wagner J.C., DeHart M.D., Parks C.V. Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6801 (ORNL/TM-2001/273). - Oak Ridge National Laboratory, 2003.
- 7. Lancaster D. Utilization of the EPRI Depletion Benchmarks for Burnup Credit Validation. -EPRI, Palo Alto, CA, 1025203, 2012.
- 8. Fuel Assembly of WWER-440, Technical Specifications.-2005.
- Техническое обоснование безопасности эксплуатации виброустойчивих профилированних кассет среднего обогощения 3,82% на 2 блоке Армянской АЭС.- 2016.
- 10. MCNP6 USER'S MANUAL, F. Brown, et al. Version 1.0
- 11. **Mosteller R.D.** Results for the MCNP Criticality Validation Suite and Other Criticality Benchmarks.-LA-UR-07-6284, Los Alamos National Laboratory, 2007.
- Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии. - НП-061-05, 2005.

Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности, Ереван, Армения Ереванский государственный университет. Брукхейвенская национальная лаборатория, Аптон, Нью-Йорк, США. Материал поступил в редакцию 12.04.2016.

#### Ս.Ա. ԲՉՆՈւՆԻ, Ն.Հ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Ա.Մ. ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ, Պ. ԿՈՈւՏ

# ՋՋԷՌ-440 ՏԻՊԻ ՌԵԱԿՏՈՐՈՒՄ ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՎԱՌԵԼԻՔԻ ՊԱՀՊԱՆՄԱՆ ԱՎԱԶԱՆԻ ԽԻՏ ՎԵՐԱԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներկայացված են ՀԱԷԿ-ում օգտագործված միջուկային վառելիքի (ՕՄՎ) պահպանման ավազանի վերաբեռնավորման անվտանգության վերլուծության արդյունքները։ Վերլուծությունն իրականացված է «Այրման խորության հաշվառում» հայեցակարգի «Միայն ակտինոիդներ» մեթոդով։ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորի ՕՄՎ պահպանման ավազանի մոդելը մշակվել է MCNP6.1 ծրագրով, իսկ ՕՄՎ իզոտոպային կազմի հաշվարկները՝ SCALE 6.1 ծրագրային փաթեթի ORIGEN-S ծրագրով։ Մշակված մոդելը Ճշգրտվել է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորի ջերմանջատիչ հավաքվածքի համար իրականացված քիմիական անալիզի փորձարարական տվյալների հիման վրա։

*Առանցքային բառեր*. կրիտիկականություն, պահպանման ավազան, օգտագործված վառելիք, խտացված վերաբեռնավորում։

# S.A. BZNUNI, N.H. BAGHDASARYAN, A.M. AMIRJANYAN, P. KOHUT ANALYSIS OF RE-RACKING OF THE SPENT FUELPOOL OF THE WWER-440 REACTOR

The results of the re-racking analysis of the spent fuel pool of the Armenian Nuclear Power Plant are presented. The criticality analysis of the spent fuel pool is carried out by applying the "Actinides-only" option of the "Burnup Credit" approach. The model of the WWER-440 reactor spent fuel pool is developed by MCNP6.1 code. A bounding isotopic composition of the WWER-440 spent fuel is calculated by using the ORIGEN-S program of the SCALE 6.1 package. The developed model of the WWER-440 fuel assembly is verified and validated against the WWER-440 reactor fuel chemical analysis data.

Keywords: criticality, Storage pool, Spent Fuel, Re-racking.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

УДК 621.3.084.865

ЭНЕРГЕТИКА

#### Ж.Р. ПАНОСЯН, Г.П. ВАРДАНЯН, А.А. ДРНОЯН

# РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ФРЕНЕЛЕВСКИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ, СЛЕДЯЩЕГО ЗА ДВИЖЕНИЕМ СОЛНЦА

С целью преобразования солнечной энергии, имеющей большой потенциал в РА, в электрическую разработан устанавливаемый на крышах зданий новый фотоэлектрический подвижный модуль с френелевскими концентраторами, автоматически следящий за движением Солнца. Модуль занимает маленькую площадь, лёгкий, прочный и с высокой производительностью.

*Ключевые слова:* фотоэлектрический модуль, следящий за движением Солнца, микроконтроллер, френелевский концентратор лучей, высокая производительность.

Введение. Республика Армения не имеет ископаемых углеводородных энергоносителей, и её базовая энергетика до 1970 года основывалась на гидроэнергетике. В конце 60-х годов в республике начали внедряться теплоэлектростанции, а в 70-е - также атомные электростанции. Энергетический кризис 1990-х годов показал неспособность защиты энергетической независимости Армении, опирающейся на импортируемые энергоносители. Энергетическая независимость и безопасность РА, в этом смысле, и сегодня остаются наиболее уязвимыми проблемами. Это обусловлено тем, что, с одной стороны, водные ресурсы Армении ограничены, а число водохранилищ неудовлетворительно, с другой - питьевая вода как для нашего региона, так и для всего земного шара получает большее стратегическое значение, чем нефть. Для РА, как и для любой другой страны, самым мощным собственным и возобновляемым источником энергии является солнечная энергия. Каждый день от Солнца получают ≈165000 *ТВт* энергии, а для полного обеспечения энергетических потребностей земного шара необходимо приблизительно ≈20 *ТВт* энергии [1]. Таким образом, необходимо падающую на очень маленькую площадь солнечную энергию с большим КПД прямо преобразовать в электрическую энергию, накопить ее с помощью гидроаккумулирующих электростанций и доставить потребителям в несолнечные часы [2].

Гидроаккумулирующие электростанции продуктивны и имеют низкую себестоимость для территорий с горным ландшафтом, в частности для Армении, которая также имеет развитую сеть гидроэлектростанций и большой опыт управления их режимами. Страны Евросоюза, имеющие соответствующий горный рельеф, давно используют гидроаккумулирующие электростанции. Например, в Швейцарии значительная часть электроэнергии обеспечивается за счёт покупаемой дешевой ночной электроэнергии атомных электростанций из Франции. Такое взаимовыгодное международное сотрудничество между этими странами является примером начальной глобализации в электроэнергетике. Рассмотрены преимущества глобализации электроэнергетики, возможные сценарии и модели использования источников возобновляемой энергии, вопросы создания комбинированных комплексов энергосистем [3]. Моделями сотрудничества выступают создание единых электроэнергетических систем Евросоюза или Северной Америки, а для межконтинентального сотрудничества - чаще всего обсуждаемый сценарий производства электроэнергии из солнечной энергии в Африке и передача её потребителям в Европе. В этих моделях приборы, использующие солнечную энергию вместе с гидроаккумуляцией, рассматриваются как основные средства, и их себестоимость, постоянно снижаясь в последнее время, стала конкурентоспособной. Для их широкомасштабного использования, кроме технологических задач, необходимо привести в соответствие юридические и экономические законы всех стран [4].

1. Мощные фотоэлектрические модули с френелевскими концентраторами, следящие за движением Солнца. На сегодняшний день наиболее обсуждаемыми международными темами являются возможная мощность потребления солнечной фотоэлектрической энергетики, интегрируемая в общую сеть электроэнергии, методы разработки и их особенности. Выделяют некоторые преимущества модулей: солнечные фотоэлектрические элементы являются возобновляемыми, экологически чистыми, бесшумными; их можно использовать как в квартире, так и в степи, в космосе и т.д.; мощный неиссякаемый источник энергии, для которого после внесения капитальных расходов почти не требуется расходов на обслуживание; производительность фотоэлектрических модулей не зависит от конечной мощности электростанции; сначала их можно построить с малой мощностью, затем увеличить число модулей и довести общую мощность до ГВт. Применение френелевских концентраторов солнечных лучей существенно уменьшает использование дорогостоящих полупроводниковых материалов и себестоимость, одновременно увеличивая КПД [5], а применение гелиотехнических френелевских концентраторов позволяет, уменьшая общие потери, довести необходимую площадь солнечных фотоэлектрических каскадных элементов (ФЭКЭ) до 1 кв.см и использовать большую часть солнечного спектра [6]. Применение туннельного каскадного фотоэлектрического элемента с четырьмя различными запрещенными зонами (полупроводники GaInP, GaAsInP, GaAs, Ge) в случае концентрации френелевского концентрата в 500 раз обеспечивает КПД, равный 46%. Этот показатель в настоящее время считается самым большим реализованным значением КПД для солнечных ФЭКЭ [7].



Рис. 1. Солнечная электростанция общей мощностью 35 МВт, площадью 91 га, изготовленная с френелевскими концентраторами и установленная американской компанией "Амоникс"

Мощные электростанции, работающие на солнечной энергии, строятся обычно на ровной местности и занимают большие площади.

Как видно на рис. 1, модули фотоэлектрической станции с френелевскими концентраторами, изготовленные для слежения за движением Солнца по двум осям, чтобы они не затеняли друг друга, занимают большой земельный участок [8]. Система, расположенная на задней части модулей, следящих за движением Солнца, весьма трудоёмкая. Их используют в большом количестве; при этом металлические конструкции постоянно дорожают. В такой малоземельной стране, как РА, необходимо, по возможности, солнечные станции устанавливать на крышах зданий [9]. Необходимо разработать новый модуль, который должен быть, по возможности, мощным, лёгким и быстро устанавливаться на маленькой площади крыши.

Целью настоящей работы является создание лёгкого и прочного модуля маленьких размеров, устанавливаемого на крышах зданий, следящего за движением Солнца по двум осям, с высокой производительностью и простой конструкцией.

2. Разработка фотоэлектрического модуля с френелевскими концентраторами, следящего за движением Солнца. Спроектирован лёгкий фотоэлектрический модуль, занимающий площадь до 3  $m^2$ , устанавливаемый на крыше зданий, следящий за движением Солнца по двум осям. Структура модуля изображена на рис. 2. Для устойчивого закрепления на крыше модуль имеет массивное основание 1, изготовленное из дюралюминия. К этой опоре прикреплены четыре вертикальные опорные стойки 2, на которых закреплена система, следящая за движением Солнца. На поверхности основания плотно установлена медная пластина 3 толщиной 2 *мм*, которая обеспечивает теплоотвод с каскадных фотоэлек-

трических элементов. Медная пластина, защищающая ФЭКЭ от пыли и снега, является нижней гранью коробки 5, а верхняя грань – уплотненные френелевские концентраторы 4. Оптимизация размеров френелевских гелиотехнических концентраторов показала, что они не должны превышать площадь 23х23 *кв. см* и могут быть изготовлены целиком в форме из прозрачного и дешёвого полимера - полиметилметакрилата [6].



Рис. 2. Схематическая структура фотоэлектрического модуля с френелевскими концентраторами, следящего за движением Солнца по двум осям

Защищённость ФЭКЭ от пыли и грязи в коробке (см. рис. 3), а также гладкая внешняя поверхность френелевских концентраторов облегчают очистительные работы прибора, установленного на крыше.



Рис. 3. Схематическое изображение коробки с френелевскими концентраторами 4 и ФЭКЭ 5

Установленные в фокусах концентраторов ФЭКЭ 5 площадью 1 см<sup>2</sup> находятся под солнечными лучами, сконцентрированными в ≈500 раз. По этой причине для обеспечения теплоотвода и электроизоляции в местах их расположения медная поверхность покрывается алмазоподобными углеродными плёнками толщиной до 1 мкм [10]. Кольцо 8, вращающееся с помощью электродвигателя с трансмиссией 7, укреплено на опорных стойках 2 (см. рис.1), обеспечивая вращение движущейся части модуля вокруг фокусных осей френелевских концентраторов. К прикреплённой на опорных стойках дюралюминиевой рамке 12 крепят систему пластин 13, имеющих зеркальные поверхности, и второй электродвигатель с трансмиссией 9, которые обеспечивают вращение зеркальных пластин вокруг их оси симметрии. Эти пластины, имеющие зеркальные поверхности, обеспечивают перпендикулярное падение солнечных лучей на поверхности френелевских концентраторов. Электродвигатели с трансмиссией управляются посредством контроллера 15, который в любое время дня выбирает те углы поворота зеркал и кольца, с помощью которых ФЭКЭ обеспечивают максимальный ток. ФЭКЭ установлены от френелевских концентраторов на расстоянии 31 см, а фокусное расстояние концентраторов - 32 см. Это различие делается для того, чтобы солнечные лучи полностью покрывали 1 см<sup>2</sup> поверхности элемента.



Рис. 4. Схема контроллера, следящего за движением Солнца по двум осям

Благодаря схеме, изображённой на рис. 4, в любое время дня при помощи команды, данной микроконтроллеру ATMEGA 8 (15), выбирается та позиция системы зеркал, в случае которой ФЭКЭ обеспечивают наибольший ток. Микро-

контроллер, получая команду от программы, расшифровывает её и передаёт двум элекродвигателям с трансмиссией. Получив команду посредством ножки 1, она передаётся ножке 28, обеспечивая вращение со стороны двигателя 9, а команда, полученная посредством ножки 2, передаётся посредством ножки 27 двигателю 7. Сравнив полученные от ФЭКЭ значения токов в случае различных углов отклонения зеркал, близких перпендикулярным, программа выбирает оптимальный для данного момента угол отклонения зеркал. После этого выдаётся команда о выполнении того же процесса для вращения вокруг фокусных осей френелевских концентраторов.



Рис. 5. Проекция сверху коробки с френелевскими концентраторами и ФЭКЭ, соединёнными проводами

ФЭКЭ соединяются проводами последовательно, затем значение выработанного элементами тока выдаётся программе 14, которая, в свою очередь, управляет микроконтроллером 15. На рис. 5 в качестве примера изображены девять френелевских концентраторов с девятью ФЭКЭ. В модуле с френелевскими кон-

центраторами, следящем за движением Солнца, использовались трехкаскадные ФЭКЭ с полупроводниками, имеющими три различные запрещённые зоны, схематическое изображение которых приведено на рис. 6. В проектируемом модуле предполагается установить 48 френелевских концентраторов с 48 ФЭКЭ, где используются фотоэлектрические элементы с n-р переходами, состоящие из полупроводников, имеющих три различные запрещённые зоны, которые электрически соединены друг с другом двумя туннельными переходами (см. рис. 6). Непосредственно освещаемый элемент изготовлен из полупроводника GaInP, запрещённая зона которого имеет значение 1,9 эВ, затем следует фотоэлектрический элемент, изготовленный из полупроводника GaAs, с более меньшим значением запрещённой зоны - 1,4 эВ, а в самом конце размещён изготовленный из Ge фотоэлектрический элемент, запрещённая зона которого имеет значение 0,7 эВ. Такое каскадное строение фотоэлементов обеспечивает поглощение большей части солнечного спектра и преобразование в электрическую энергию с КПД 35,9%. В этом случае фотоэлектрический модуль обеспечит мощность 911 Вт и займёт территорию площадью 1,9 *м*<sup>2</sup>.



Рис. 6. Схематическое изображение каскадного фотоэлектрического элемента, изготовленного из трёх полупроводниковых материалов

Для увеличения производительности модуля можно использовать также четырехкаскадные ФЭКЭ из полупроводников, имеющих четыре различные запрещённые зоны, которые обеспечат КПД 46% [7]. В этом случае занимающий ту же площадь фотоэлектрический модуль обеспечит уже мощность 1168 *Bm*. Для обеспечения мощности 2 *кBm* необходимы 96 однотипных френелевских концентраторов и 96 ФЭКЭ. Приборы, следящие за движением Солнца по двум осям, обеспечивают использование прямых солнечных лучей с раннего утра до позднего вечера (рис. 7).



Рис. 7. Зависимости выходных мощностей ФЭКЭ, следящих за движением Солнца, от дня суток: 1 - по двум осям, 2 - по одной оси и 3 - не следящих за движением Солнца

Из рисунка видно, что использование прямых солнечных лучей в зоне географической широты 40° весной начинается с 7-ми часов утра до 19-ти часов вечера. В этом случае фотомодуль, следящий по двум осям за движением Солнца, использует на 30% больше энергии, чем в случае установленных под оптимальным углом солнечных модулей, не следящих за движением Солнца.

### Заключение

- Разработан следящий за движением Солнца по двум осям подвижный новый модуль высокой производительности, устанавливаемый на крыше зданий. Модуль лёгкий, имеет следящую за движением Солнца автоматизированную систему.
- В модуле использованы 48 френелевских концентраторов, 48 трехкаскадных фотоэлектрических элементов, микроконтроллер, которые обеспечивают мощность ≈1 кВт. Показано, что установка подобных 96 френелевских концентраторов и 96 четырехкаскадных фотоэлектрических элементов вырабатывает ≈2 кВт мощности.

- Подвижная система состоит из плоских металлических пластин с зеркальной поверхностью, которые, следя за движением Солнца по двум осям, направляют солнечные лучи в любое время дня перпендикулярно поверхности френелевских концентраторов.
- Разработана схема контроллера, посредством которого реализуется вращение подвижной системы зеркал, следящих за движением Солнца, и в каждый момент времени выбирается тот угол вращения системы, в случае которого модуль обеспечивает силу тока максимальной мощности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Фостер Л.** Нанотехнология и глобальная энергетика // В кн.: Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности.- М.: Техносфера, 2008.- С. 34-40.
- Բուոնաչյան Հ.Ա., Գզրարյան Ռ.Վ., Մարուխյան Ո.Չ., Փանոսյան Ժ.Ռ. Ֆոտոէլեկտրական և հիդրոկուտակիչ համակցված կայանի ռեժիմների մշակում և հետազոտում // ՀՊՃՀ Լրաբեր-76. Գիտական և մեթողական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2009.- Հատ. 1.էջ 627-630:
- Փանոսյան Ժ.Դ. Վերականգնվող էներգիայի բնագավառի ինովացիոն տեխնոլոգիաներ // Վերականգնվող և մաքուր էներգիայի հիգերորդ միջազգային համաժողովի աշխատություններ.- Երևան, 2014.- էջ 20-25:
- 4. UCTE Operation Handbook. Union for the Coordination of Transmission of Electricity.-Brussels, 2009.
- 5. **Փանոսյան Ժ.Ռ., Մարուխյան Ո.Զ.** Արդյունավետ և մրցունակ արեգակնային էլեկտրակայանների արտադրության նոր տեխնոլոգիական մշակումներ // Վերականգնվող էներգետիկան Հայաստանում, գիտաժողովի նյութեր.- Երևան, 2003.- էջ 96-104։
- Վարդանյան Գ.Պ., Փանոսյան Ժ.Ռ. Ֆրենելային հելիոտեխնիկան խտարարներում կորուստների վերլուծությունը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.-Երևան, 2015.- Մաս 2.- էջ 447-452:
- 7. Schneider Karin. Pressinformation Fraunhoffer // New world record for solar cell efficiency.- 2014.- No. 26/14.- P. 4.
- 8. Patent US H01L 31/052. Method of improving the efficiency of loosely packed solar cells in dense array applications / V. Garboushian, A.M. Slade.- Amonix, CA (US), Nov. 8, 2012.
- Design, construction and monitoring of a solar photovoltaic station of AUA / Zh. Panosyan, A. Hambaryan, K. Touryan, et al // The 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference.- Dresden, Germany, 2006. - P. 2285-2288.
- Patent US 7459188 B2. Alliance for Sustainable Energy / F.J. Pern, K.J. Touryan, Zh.R. Panosyan, A.A. Gippius.- LLC. Golden, CO (US), Dec. 2, 2008.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 25.11.2015.

#### Ժ.Ռ. ՓԱՆՈՍՅԱՆ, Գ.Ղ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԴՌՆՈՅԱՆ

# ԱՐԵՎԻ ՇԱՐԺՄԱՆԸ ՀԵՏԵՎՈՂ ՖՐԵՆԵԼԱՅԻՆ ԽՏԱՐԱՐՆԵՐՈՎ ԼՈՒՄԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՆՈՐ ՄՈԴՈՒԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

ՀՀ-ում մեծ պոտենցյալ ունեցող արևային էներգիան էլեկտրականի կերպափոխելու նպատակով մշակվել է ֆրենելային խտարարներով արևի շարժմանը ավտոմատ հետևող նոր լուսաէլեկտրական շարժական մոդուլ՝ քաղաքային շենքերի տանիքների վրա տեղադրելու համար։ Մոդուլը զբաղեցնում է փոքր մակերես, թեթև է, ամուր և բարձր արդյունավետությամբ։

**Առանցքային բառեր.** արևի շարժմանը հետևող լուսաէլեկտրական մոդուլ, միկրոկոնտրոլեր, Ճառագայթների ֆրենելային խտարարներ, բարձր արդյունավետություն։

### ZH.R. PANOSYAN, G.P. VARDANYAN, A.A. DRNOYAN

# DEVELOPING A RESEARCH OF NEW PHOTOVOLTAIC MODULE WITH FRESNEL LENSES, FOLLOWING THE SUN MOVEMENT

To transform the solar energy, having a big potential in Republic of Armenia, into electrical energy, a new photovoltaic mobile module with Fresnel lenses, which is developed automatically follows the movement of the Sun and can be installed on the roofs of city buildings. The module has a small surface, it is light, solid and is highly efficient.

*Keywords:* photovoltaic module, following the movement of the Sun, microcontroller, Fresnel lenses of rays, high efficiency.

# ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2016. Հ. LXIX, N 3.

### <u> ረ</u> አንጉ 621.3.05

#### ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

#### Ն.Ն. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ, Ռ.Հ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

### ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՆՊԱՏԱԿՆԵՐՈՎ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԲԱԺՆԱՉԱՓԱՑԻՆ ՓՈԽՆՅՈՒՄՈՎ ՄՆՄԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒՅՅՈՒՆԸ

Վերլ;ուծված են էներգիայի բաժնաչափային փոխանցմամբ կերպափոխչի աշխատանքային ռեժիմները հաձախա-իմպուլսային կարգավորման (ՀԻԿ) դեպքում։ Արտածված են ՀԻԿ ռեժիմում անցողիկ և ստատիկ բնութագծերը, գնահատված են ելքային հոսանքի բաբախումները միջկոմուտացիոն միջակայքերում՝ կախված կերպափոխչի աշխատանքային ռեժիմներից։ Ստացված են կերպափոխչի մաթեմատիկական մոդելը և մոտարկված անալիտիկ արտահայտությունները, որոնք հնարավորություն են տալիս դիտարկելու աշխատանքային բոլոր ռեժիմները և ընտրելու սխեմայի հիմնական տարրերը։

*Առանցքային բառեր.* էլեկտրատեխնոլոգիական տեղակայանքներ, բաժնաչափային կոնդենսատոր, տիրստորա-կոնդենսատորային կերպափոխիչ, իմպուլսային կարգավորիչ, հա-Ճախա-իմպուլսային կարգավորում։

**Ներածություն.** Ժամանակակից էլեկտրատեխնոլոգիայի ներդրումն արդյունաբերության մեջ՝ բարձրարդյունավետ տեխնոլոգիական գործընթացների օգտագործմամբ, անօգուտ է՝ առանց մասնագիտացված սնման աղբյուրի ստեղծման։ Էլեկտրատեխնոլոգիական սարքերի բեռների հոսանքի և լարման խոր կարգավորման ու կայունացման անհրաժեշտությունը խիստ պահանջներ է առաջադրում սնման աղբյուրի էներգետիկ և դինամիկ բնութագրերին [1–3]։

Գործող կերպափոխիչների էլեկտրատեխնոլոգիական նպատակներով հարմարեցումը հնարավորություն չի տալիս օգտվելու նոր տեխնոլոգիաների բոլոր առավելություններից և, հետևաբար, սահմանափակում է դրանց արտադրողականությունը։ Միայն էլեկտրատեխնոլոգիական մասի և սնման աղբյուրի համատեղ մշակման հնարավորության համալիր ուսումնասիրման միջոցով կարելի է ստեղծել բարձրարդյունավետ էլեկտրատեխնոլոգիական սարքեր՝ ապահովելով բարձր հուսալիություն և տեխնիկա-տնտեսական ցուցանիշներ [4–7]։

Տեխնոլոգիական տեղակայանքների հզորության բարձրացման միտումը լրացուցիչ պահանջներ է առաջադրում էներգիայի կերպափոխիչների բնութագրերին՝ կապված, մասնավորապես, սնող ցանցի էլեկտրամագնիսական համատեղելիության հետ [8–11]:

Այժմ կենցաղում և արդյունաբերության տարբեր Ճյուղերում լայն կիրառություն են գտել նաև լուսային դիոդային մատրիցները, որոնք ունեն լուսատվության մեծ արդյունավետություն, ապահովում են համաչափ լուսավորվածություն, անվտանգ են, հուսալի և համեմատաբար էժան [8]։ Սակայն դրանց ներդրումը նույնպես կապված է լուրջ պրոբլեմների հետ։ Պահանջվում է լարման և հոսանքի կայունություն։ Դիոդային մատրիցների հաջորդական միացման դեպքում հոսանքի կայունացումն իրականացվում է մեկ սնման աղբյուրի միջոցով, որի աշխատանքի հուսալիությունը խիստ կարևոր է, քանի որ մեկ դիոդի շարքից դուրս գալը կհանգեցնի լուսավորության ընդհատման։ Դիոդների զուգահեռ միացման դեպքում յուրաքանչյուր դիոդի համար պահանջվում է մեկ հոսանքի կայունարար, որը, դիոդների մեծ թվի դեպքում, արդյունավետ չէ։

Այսպիսով՝ վերը նշվածից հետևում է, որ տեխնոլոգիական տեղակայանքների, սարքերի և այլ պատասխանատու բեռների համար սնման աղբյուրների ստեղծումը խիստ կարևոր, **արդիական խնդիր է**։ Աշխատանքը նվիրված է այդ խնդրի լուծմանը։

էլեկտրատեխնոլոգիական տեղակայանքի սնման աղբյուրը պետք է ունենա հոսանքի աղբյուրի բնութագիր, հաձախ պարունակի կարգավորման երկու գոտի, որոնցից մեկն օժտված է լարման, իսկ մյուսը՝հոսանքի աղբյուրի բնութագրով։ Բացի դրանից, տեխնոլոգիական գործընթացների մեծ մասի դեպքում (իոնային ու էլեկտրաէրոզիոն մշակում, էլեկտրակոնտակտային եռակցում, կիսահաղորդչային սարքերի արտադրության դիֆուզիոն տեղակայանք) պահանջվում է մեծ արագագործությամբ լարման կամ հոսանքի կարգավորում։ Տեխնոլոգիական գործընթացների պայմաններից հետևում է, որ սնման աղբյուրի անջատումը պետք է կատարվի շատ կարձ՝ միկրովայրկյան տևող ժամանակահատվածում։ Բարձր արտադրողականության ապահովման համար անհրաժեշտ է սարքը նորից արագ միացնել։

Ինչպես ցույց են տվել նշված ուղղությամբ ուսումնասիրությունները, առաջադրված պահանջները լիովին բավարարում են էներգիայի բաժնաչափային փոխանցումով կերպափոխիչները, մասնավորապես, ռեզոնանսային և տիրիստորա-կոնդենսատորային կերպափոխիչները։ Կանգ չառնելով ռեզոնանսային սկզբունքով աշխատող կերպափոխիչների առավելությունների և թերությունների վրա՝ նշենք միայն, որ դրանք օգտագործվում են համեմատաբար ավելի ցածր դինամիկական բեռների դեպքում [9]։ Քանի որ բեռի փոփոխությունը լայն դիապազոնում կհանգեցնի ռեզոնանսային հաձախության փոփոխության, որն իր հերթին կհանգեցնի կերպափոխչի ելքային բնութագրերի վատացման, ուստի բարձր դինամիկական բեռների դեպքում շատ հաձախ օգտագործում են էներգիայի բաժնաչափային փոխանցումով կերպափոխիչներ [3,5]։ Դրանք հնարավորություն են տալիս կարգավորելու բեռի վրա հզորությունը լայն դիապազոնում և, բացի այդ, անհրաժեշտության դեպքում կայունացնում են ելքային լարումը կամ հոսանքը։

Այստեղ կդիտարկենք էներգիայի բաժնաչափային փոխանցումով տիրիստորակոնդենսատորային կերպափոխիչները (ԷԴՏԿԿ)։

Նկ. 1-ում բերված են ԷԴՏԿԿ-ի հիմնական բջջի՝ իմպուլսային կարգավորիչի (ԻԿ) ուժային պարզեցված սխեման և կառավարման համակարգի (ԿՀ) կառուցվածքային սխեման [4,5], իսկ նկ. 2-ում՝ համարժեք սխեման տարբեր միջկոմուտացիոն միջակայքերում։ Գոյություն ունեն ԻԿ-ների բազմաթիվ սխեմաներ [8], սակայն կդիտարկենք միայն հիմնական՝ կամրջակային կառուցվածքով սխեման՝ Vk1...Vk4 վենտիլների վրա, քանի որ բաժնաչափային փոխանցումով իմպուլսային կերպափոխիչների գերակշիռ մասն իրականացված է համաձայն այդ սխեմայի։ Մխեմայի աշխատանքը նկարագրող ժամանակային դիագրամները ներկայացված են նկ. 3-ում։ Տիրիստորներն աշխատում են զույգերով՝ Vk1,Vk3 կամ Vk2,Vk4՝ իրագործելով բաժնավորող կոնդենսատորի հաջորդական միացումը սնման աղբյուրին և բեռին։ Կոնդենսատորի վերալիցքավորումից հետո տիրիիստորները փակվում են, և բեռի հոսանքն անցկացվում է Vo հակառակ դիոդը։ Այս սխեմայում տարրերի վրա լարումը չի գերազանցում սնման լարման արժեքը։ Բացառություն է կազմում Vo դիոդը, որի վրա լարումը հավասար է 2*E*-ի։

Ելքային ազդանշանի կարգավորումն իրականացվում է տիրիստորների փոխանջատման հաձախության փոփոխման հաշվին։ Մեկ տակտի ընթացքում բեռին փոխանցվող էներգիան սահմանափակված է և որոշվում է *C*<sub>\*</sub> կոնդենսատորի ունակությամբ և դրա թիթեղների վրա *Ա*լարման փոփոխությամբ՝

$$W_H = \frac{C_k \Delta U_C^2}{2}:$$

Եթե, օրինակ, մեկ տակտի ընթացքում  $C_k$  կոնդենսատորի վրա լարումը փոփոխվում է –E–ից +E, ապա լարման փոփոխությունը կոնդենսատորի վրա կլինի  $\Delta U_C = 2E$ , հետևաբար՝

$$W_H = 2C_k E^2:$$

Բեռի վրա անջատված *P*# հզորությունը աշխատաքային T պարբերության ընթացքում կորոշվի՝

$$P_H = \frac{1}{T} 2C_k E^2 = 2C_k E^2 f,$$

որտեղ *f=1/T*–ն աշխատանքային հաձախությունն է։

Այսպիսով՝ ինչպես երևում է բերված բանաձևերից, բեռին փոխանցվող էներգիայի բաժնաչափը սահմանափակված է, իսկ բեռի վրա հզորությունը կարելի կարգավորել՝փոփոխելով բանաձևում ներկայացված երեք մեծությունները (լարում, ունակություն և հաձախություն)։ Գործնականում հարմար է փոփոխել հաձախությունը, ուստի այս տիպի կերպափոխիչներն անվանվում են հաձախա-իմպուլսային մոդուլացմամբ (ՀԻՄ) կերպափոխիչներ։

Կերպափոխչի (սնման աղբյուրի) աշխատանքի սկզբունքը և սխեմայական իրականացումը։ Հարման (հոսանքի) կայունարարի սխեման իրականացված է երկտակտ ԷԴՏԿԿ-ի հիմքով, որը ներկայացված է նկ. 1–ում։ Հետադարձ կապի ազդանշանը, որը համեմատական է ելքային լարմանը կամ հոսանքին, լարման կամ հոսանքի տվիչներից (ԼՏ, ՀՏ) տրվում է կառավարման սխեմայի մուտքին, որտեղ այն համեմատվում է առաջադրվող *Մա* լարման հետ։ Հերթական կառավարման իմպուլսը ձևավորվում է, երբ բեռի *Մ*ո լարումը նվազում է մինչև *Մ*ա լարումը։

Այդ պահին գործարկվում են զրոյի սարքը (ԶՍ) և կոմպարատորը,իսկ C բաժնավորող կոնդենսատորով, *ic* հոսանքի բացակայության դեպքում, համապատասիան լարման մակարդակը ՀՏ1-ից տրվում է համընկնման սխեմային, որի ելքից թույլատրող ազդանշանը տրվում է իմպուլսների ձևավորիչին (ԻՁ)։ ԻՁ-ի ելքից իմպուլսները ԻԲ իմպուլսների բաշխիչի միջոցով, միմյանց նկատմամբ 180<sup>0</sup> փուլով շեղմամբ, տրվում են *ԻՈւ1* և *ԻՈւ2* կառվարման իմպուլսների ուժեղարարաներին, որոնց ելքերից այդ իմպուլսները տրվում են համապատասխանաբար *Vk1, Vk3* կամ *Vk2, Vk4* տիրիստորների կառավարման էլեկտրողներին։ Տեղի է ունենում տիրիստորների հերթական զույգի միացում, և սկսվում է բաժնավորող կոնդենսատորի վերալիցքավորումը։



Նկ. 1. Մնման աղբյուրի ուժային պարզեցված և կառավարման բլոկ-սխեմաները



Նկ. 2. Համարժեք սխեմաները միջկոմուտացիոն ժամանակահատվածներում

Այն պահին, երբ կոնդենսատորի լարումը հավասարվում է սնման E լարմանը, բացվում է հակառակ  $V_0$  դիոդը, որով փակվում է L դրոսելի հոսանքը, որն այնուհետև սկսում է նվազել՝ հոսելով միաժամանակ նաև բեռի շղթայով։ Լարումը բեռի վրա մեծանում է և կրկին սկսում է նվազել։ Երբ  $U_{H}$  լարումը հավասարվում է  $U_{un}$ -ին, տեղի է ունենում կոմպարատորի վերագործարկում, և գործընթացները սխեմայում կրկնվում են։ Հոսանքի կայունացման ռեժիմը նման է լարման կայունացման ռեժիմ I-ին, միայն թե հետադարձ կապի ազդանշանը տրվում է ՀՏ2–ից, իսկ առաջադրող ազդանշանը համեմատական է պահանջվող հոսանքին։

**Կերպափոխչի մաթեմատիկական մոդելը։** Նկ.1–ում բերված մեկդիրքանի հետևման համակարգի վերլուծությունը կատարենք թվային մաթեմատիկական մոդելավորման միջոցով։ Կայունացված ռեժիմների վերլուծության դեպքում օգտագործվում են նաև մոտավոր մեթոդներ, երբ կերպափոխչում որոշակիորեն մոտարկվում են լարման և հոսանքի կորերը։

Մաթեմատիկական մոդելը կառուցելիս կատարվել են հետևյալ մոտարկումները՝

ա) կիսահաղորդչային վենտիլները իդեալական բանալիներ են,

բ) ռեակտիվ տարրերն ունեն գծային բնութագրեր,

գ) կորուստները կերպափոխչում հաշվի են առնվում ակտիվ դիմադրություն միացնելու Ճանապարհով։

Այս ենթադրությունները կատարելիս հաշվի է առնում միայն վենտիլների ոչ գծայնությունը՝ պայմանավորված դրանց՝ ուղիղ և հակառակ միացումների դեպքում տարբեր հաղորդականություններ ունենալով։

Կերպափոխչի ամբողջ աշխատանքային ցիկլը բաղկացած է առանձին ժամանակային միջակայքերից, որոնց ընթացքում կառուցվածքը և պարամետրերը մնում են անփոփոխ, և վերլուծվող շղթաները դիտարկվում են գծային։ Էլեկտրամագնիսական գործընթացների հաշվարկի և վերլուծության համար օգտագործվում է կտոր առ կտոր փոխանցման մեթոդը։

Կերպափոխչի նախնական վերլուծության արդյունքում կարելի է գալ այն եզրակացությանը, որ ինչպես կայունացված, այնպես էլ անցողիկ ռեժիմներում կան աշխատանքային երեք հիմնական միջակայքեր (նկ.2), որոնցից յուրաքանչյուրին համապատասխանում է փոխարինման համարժեք սխեման (նկ.2ա,բ,գ). *առաջին մի-ջակայք*՝ բաժնավորող *C* կոնդենսատորի վերալիցքավորում, *երկրորդ միջակայք*՝ հակադարձ դիոդի միացման ժամանակ։ Նկ. 2–ում ցույց է տրված դրոսելով անընդհատ հոսանքի դեպքը, երբ բացակայում է երրորդ ռեժիմը, սակայն այն կարող է լինել ընդհատ հոսանքի դեպքում, երբ *L* դրոսելի հոսանքը դառնում է զրո (ընդհատվում է), իսկ ելքային կոնդենսատորի բեռի միջև տեղի է ունենում էներգիայի ազատ փոխանակում (*երրորդ միջակայք*)։

Յուրաքանչյուր միջկոմուտացիոն միջակայքի համար կարելի գրել հետևյալ պայմանները.

<u>առաջին միջակայ</u>ը՝  $i_C > 0$ ,  $U_C < 0$ ,  $U_C = E$ :  $U_C = E$  հավասարությանը համապատասխանում է V₀ հակառակ դիոդի բացման պահը (INT =1, F1=1, F2=1),

<u>երկրորդ միջակայ</u>ը՝  $i_C > 0$ ,  $i_C = 0$ ,  $U_C < 0$ :  $i_C = 0$  հավասարությանը համապատասխանում է V<sub>0</sub> հակառակ դիոդի փակման պահը (INT =2, F1=0, F2=1),

<u>երրորդ միջակայք</u>՝ ic > 0,i $\mu$ = 0 , երբ i $\mu$ = 0, և ic = 0 ավարտվում է երրորդ միջկոմուտացիոն ժամանակահատվածը (INT =3, F1=1, F2=0)։

Նկատենք, որ նշված երեք միջակայքերի գոյությունը կարելի է ներկայացնել նաև տրամաբանական F1և F2 երկու միավոր ֆունկցաներով։ INT-սիմվոլը մտցված է կոնկրետ դիտարկվող միջակայքի ամրակցման համար (եթե միջակայքերի քանակը չորսից ավելի լիներ, կօգտագործեինք ավելի մեծ թվով տրամաբանական ֆունկցիաներ, օրինակ՝ մինչև ութ վիՃակի դեպքում՝ երեք տրամաբանական ֆունկցիա, մինչև 16-ի դեպքում՝ չորս, և այդպես շարունակ)։

*Առաջին միջակայքի* համար կարելի գրել հետևյալ հավասարումների համակարգը՝ (համարժեք սխեման՝ նկ. 2ա)՝

$$\begin{cases}
C_k \frac{du_{C_k}}{dt} = i_C = i_L, \\
C_H \frac{du_H}{dt} = i_H - i_L, \\
L \frac{di_L}{dt} = -u_{Ck} - u_H - r_n i_L + E, \\
L_H \frac{di_H}{dt} = u_H - r_H i_H + U_0,
\end{cases}$$
(1)

*երկրորդի* համար (համարժեք սխեման՝ նկ. 2բ)՝

$$\begin{cases}
C_H \frac{du_H}{dt} = i_H - i_L, \\
L \frac{di_L}{dt} = -u_H - r_n i_L, \\
L_H \frac{di_H}{dt} = u_H - r_H i_H + U_0,
\end{cases}$$
(2)

իսկ *երրորդի* համար (համարժեք սխեման՝ նկ. 2գ)՝

$$L_{H} \frac{di_{H}}{dt} = u_{H} - r_{H}i_{H} + U_{0}:$$
(3)

Օգտվելով փոխանջատման տրամաբանական ֆունկցիաներից՝ բերված երեք հավասարումները ներկայացնենք մեկ համակարգով.

$$\begin{cases} \frac{d\dot{i}'_{L}}{dt} = a_{1}\dot{i}'_{L} + a_{2}U'_{Ck} + a_{3}U'_{H} + a_{4}U', \\ \frac{dU'_{Ck}}{dt} = a_{5}\dot{i}'_{L}, \\ \frac{dU'_{H}}{dt} = a_{6}\dot{i}'_{L} + a_{7}\dot{i}'_{H}, \\ \frac{d\dot{i}'_{H}}{dt} = a_{8}U'_{H} + a_{9}\dot{i}'_{H} + a_{10}U'_{0}; \end{cases}$$

$$(4)$$

Վերջին (4) հավասարման գործակիցները որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով՝

$$a_{I} = \left(-\frac{r_{n}^{*}}{\tau_{L}^{*}}\right)F_{2}, \ a_{2} = \left(-\frac{1}{\tau_{L}^{*}}\right)F_{I}F_{2}, \ a_{3} = \left(-\frac{1}{\tau_{L}^{*}}\right)F_{2}, \ a_{4} = \left(\frac{1}{\tau_{L}^{*}}\right)F_{I}F_{2}, \ a_{5} = \left(\frac{1}{\tau_{Ck}^{*}}\right)F_{I}F_{2}, \ a_{6} = \left(\frac{1}{\tau_{C_{H}}^{*}}\right)F_{2}, \ a_{7} = -\frac{1}{\tau_{C_{H}}^{*}}, \ a_{8} = \frac{1}{\tau_{L_{H}}^{*}}, \ a_{9} = -\frac{r_{H}^{*}}{\tau_{L_{H}}^{*}}, \ a_{10} = -\frac{1}{\tau_{L_{H}}^{*}},$$
(5)

որտեղ  $\tau_L^* = \frac{L}{RT_{nom}}$ -ը ելքային ինդուկտիվ L ֆիլտրի շղթայի,  $\tau_{Ck}^* = \frac{C_k R}{T_{nom}}$ -ը բաժնավորող  $C_k$  ունակության շղթայի,  $\tau_{C_H}^* = \frac{C_H R}{T_{nom}}$ -ը՝ ելքային ունակային շղթայի, իսկ  $τ_{L_{H}}^{*} = \frac{L_{H}}{RT_{nom}}$ -ը՝ բեռի ինդուկտիվության շղթայի հարաբերական ժամանակի հաստատունները,  $r_{H}^{*} = \frac{r_{H}}{R}$ -ը՝ բեռի ակտիվ դիմադրության,  $U_{0}^{'} = \frac{U_{0}}{E}$ -ը՝ բեռի հակաէլշույի, իսկI' = i/Inom, u' = u/E-ն՝ համապատասխանաբար հոսանքի և լարման հարաբերական մեծությունները,  $R = \frac{E}{I_{nom}}, U^{'} = \frac{U}{E}$  (տվյալ դեպքում U=E սնման լար-

մանը համապատասխանում է $U^{'} = I$ ),  $I_{nom}$ -ը անվանական աշխատանքային ռեժիմում բեռի հոսանքի միջին արժեքն է,  $T_{nom}$ -ը՝ անվանական հոսանքի դեպքում մոդուլացման պարբերությունը, երբ բացակայում են ընդհատումները (հակառակ դիոդը հոսանք չի անցկացնում)։

(4) հավասարումների համակարգը կարելի է ներկայացնել կանոնավոր հավասարման տեսքով.

Uտացված հավասարումների համակարգը լուծվել է MatLab ծրագրային միջավայրում, որի արդյունքները ներկայացված են նկ. 4-ում՝ սխեմայի տարրերի հետևյալ արժեքների դեպքում. բեռի հզորության միջին արժեքը ՝ $P_{H=}100 \ \mu < u$ , սնման լարման մեծությունը՝  $E=500 \ < d$ , բեռի հոսանքի անվանական մեծությունը՝ Inom=200U, բեռի դիմադրության ակտիվ բաղադրիչը՝  $R_{H=}0,5 \ Ou$ , բեռի ինդուկտիվ բաղադրիչի և ինդուկտիվ ռեակտորի գումարային մեծությունը՝  $L_{H+}L=1,5 \ u2bu$ , բաժնաչափային կոնդենսատորի ունակությունը՝  $Ck=100 \ u4bu$ :



Նկ. 3.Կերպափոխչի ժամանակային դիագրամները՝ ստացված MatLab ծրագրային համակարգում՝ ա-բաժանաչափային կոնդենսատորի լարման և բ-ելքային ինդուկտիվ ռեակտորի հոսանքի կախվածությունները

Նկ. 4–ում ներկայացված է ինդուկտիվ ռեակտորի հոսանքի կախվածությունը ռեակտորի ինդուկտիվությունից։



Նկ. 4. Ռեակտորի հոսանքի կախվածությունը ռեակտորի ինդուկտիվությունից

Ինչպես երևում է ստացված դիագրամներից, ինդուկտիվությունով հոսանքը հաստատվում է 3-4 պարբերության ընթացքում, իսկ ոեակտորի ինդուկտիվության մեծացմանը զուգընթաց բաբախումները նվազում են։

**Կերպափոխչի ստատիկ բնութագրերը։** Մոտավոր անալիտիկ արտահայտություններ ստանալու համար կատարենք լրացուցիչ մոտարկումներ. ա) կերպափոխչի տարրերում կորուստները բացակայում են, բ) ֆիլտրի դրոսելի հոսանքի որոշման ժամանակ լարման բաբախումները բեռի ունակային ֆիլտրի վրա բացակայում են  $(u_H = U_H)$ , գ), բեռի ունակային ֆիլտրի վրա լարման որոշման ժամանակ բեռի հոսանքի բաբախումները բացակայում են ( $i_H = I_H$ )։

Վերը նշված մոտարկումների դեպքում դրոսելի հոսանքը առաջին միջկոմուտացիոն միջակայքում որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [5].

$$i_L(t) = \sqrt{I_L^2(0) + \left(\frac{2E - U_H}{\rho}\right)^2} \sin(\omega t + \varphi), \qquad (7)$$

որտեղ՝

$$\rho = \sqrt{L/C_k}, \ \omega = \frac{1}{\sqrt{LC_k}}, \ \varphi = \arctan \frac{I_L(0)\rho}{2E - U_H}.$$
(8)

Երկրորդ միջկոմուտացիոն միջակայքում դրոսելի հոսանքը որոշվում է՝

$$i_L(t) = i_L(t_n) - \frac{U_H}{L}t$$
(9)

բանաձևով, որտեղ

$$i_{L}(t_{n}) = \sqrt{I_{L}^{2}(0) + \frac{4E(E - U_{H})}{\rho^{2}}},$$
(10)

իսկ $t_n$ -ը կոնդենսատորի լիցքավորման ավարտման պահն է (նկ. 3) :

Դրոսելի հոսանքի անընդհատ ռեժիմի դեպքում մոդուլացման պարբերությունը հաստատված ռեժիմում որոշվում է հետևյալ բանաձևով [5].

$$T = t_n + t_{VO}, \tag{11}$$

$$t_{n} = \frac{1}{\omega} \left[ a \operatorname{rccos} \left( \frac{-U_{H}}{\sqrt{\left(\rho I_{L}(0)\right)^{2} + \left(2E - U_{H}\right)^{2}}} \right) - \arccos \left( \frac{2E - U_{H}}{\sqrt{\left(\rho I_{L}(0)\right)^{2} + \left(2E - U_{H}\right)^{2}}} \right) \right], \quad (12)$$
$$t_{V0} = \frac{1}{\omega} \left[ \frac{1}{U_{V}} \sqrt{\left(\rho I_{L}(0)\right)^{2} + 4E\left(E - U_{H}\right)} - \rho I_{L}(0) \right], \quad (13)$$

$$t_{V0} = \frac{1}{\omega} \left[ \frac{1}{U_H} \sqrt{(\rho I_L(0))^2 + 4E(E - U_H) - \rho I_L(0)} \right],$$
(13)

որտեղ  $t_{V0}$  -ն հակադարձ դիոդի հոսանքի անցկացման ժամանակն է։

Բեռի հոսանքի միջին արժեքը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ՝

$$I_{H} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{H}(t) dt = \frac{2E^{2}}{\rho U_{H} \omega (t_{n} + t_{V0})}$$
(14)

Օգտվելով բեռ փոխանցվող միջին հզորության բանաձևից՝ կարող ենք ստանալ կերպափոխչի արտաքին բնութագրերը՝

$$P_H = U_H I_H = 2E^2 C_k \frac{1}{T} = 2E^2 C_k f:$$
 (15)

Հարաբերական միավորներով (15)-ը կարելի ներկայացնել՝

$$U'_H = f' / I'_H, \tag{16}$$

npuntu 
$$f' = \frac{f}{f_{nom}}, U'_H = \frac{U_H}{E}, I'_H = \frac{I_H}{I_{nom}}, f_{nom} = \frac{I}{T_{nom}}, T_{nom} = 2RC_k, R = \frac{E}{I_{nom}}$$
:

Ֆիլտրի դրոսելի հոսանքի բաբախումը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_L(0) = \sqrt{\left(I_L(0)\right)^2 + \left(\frac{2E - U_H}{\rho}\right)^2} - I_L(0):$$
(17)

Հոսանքի բաբախումների համար ավելի հարմար բանաձև կարելի է ստանալ, եթե ընդունենք, որ *Uo=0*, իսկ բաժնաչափային կոնդենսատորի վերալիցքավորումն իրականացվում է իդեալական հարթեցված հոսանքով, որը համապատասխանում է կոնդենսատորի գծային լիցքավորմանը։ Այս պայմանների դեպքում հոսանքի բաբախման գնահատման համար կարելի օգտագործել [5]-ում ստացված հետևյալ բանաձևը՝

$$\Delta I_L = \frac{E^2 C_k}{2I_H L} \left(2 - \gamma\right)^2,\tag{18}$$

որտեղ՝

$$\gamma = \frac{t_n}{T} = \frac{U_H}{E} = \frac{2EC_k}{I_H T},$$
(19)

կամ հարաբերական մեծություններով՝

 $\Delta I_{L}^{*} = \frac{1}{4L^{*}I_{H}^{*}} (2-\gamma)^{2},$ 

որտեղ՝

$$\Delta I_L^* = \frac{\Delta I_L}{I_{nom}}; L^* = \frac{L}{RT_{nom}}:$$
(20)

Ֆիլտրի դրոսելի հոսանքի գրաֆիկական կախվածություները, հաշվարկված հարաբերական մեծություններով, ներկայացված են նկ. 5-ում։



Նկ. 5. Ֆիլտրի դրոսելի հոսանքի բաբախումները՝ կախված բեռի հոսանքի մեծությունից

Հարման բաբախման մեծությունը բեռի հոսանքի՝ իդեալական հարթեցված լինելու դեպքում որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\Delta U_{CH} = \int_{t_i}^{t_2} (i_L - I_H) dt :$$
 (21)

Հաշվի առնելով, որ բաժաչափային կոնդենսատորի վերալիցքավորման ժամանակ դրոսելի հոսանքը որոշվում է (7) բանաձևով, երբ դրոսելի հոսանքը վերալիցքավորման ավարտման պահին՝  $i_L(t_n)$ -ը, գերազանցում է բեռի հոսանքը, (21) արտահայտությունը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$\Delta U_{H} = \frac{C_{k}}{C_{H}} \left\{ A + U_{H} + \frac{1}{2U_{H}} \left[ \sqrt{I_{L}^{2}(0)\rho^{2} + 4E(E - U_{H})} - I_{H}\rho \right]^{2} - I_{H}\rho \operatorname{arccos} \left[ \frac{I_{H}\rho \sqrt{4E(E - U_{H})} - U_{H}A}{\sqrt{(2E - U_{H})^{2} + I_{L}^{2}(0)\rho^{2}}} \right] \right\},$$
(22)

$$\Delta U_H = \frac{2C_k}{C_H} \left\{ A - I_H \rho \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left( \frac{I_H \rho}{\sqrt{\left(2E - U_H\right)^2 + I_L^2(0)\rho^2}} \right) \right] \right\}$$
(23)

Նկատենք, որ  $i_L(t_n)$ -ն որոշվում է (7) բանաձևով։ Նկ. 6 և 7-ում բերված են ելքային լարման բաբախումների գրաֆիկները՝ վերը նշված երկու դեպքերի համար։



Նկ. 6. Ելքային բաբախումները՝ կախված բեռի հոսանքի մեծությունից, դրոսելի ֆիլտրի ինդուկտիվության տարբեր արժեքների դեպքում, երբ Iւ(0)>Іпот

Հարման և հոսանքի բաբախումների գրաֆիկներից հետևում է, որ առավելագույն բաբախումները ստացվում են բեռի լարման և հոսանքի նվազագույն արժեքների դեպքում, ուստի՝ առավելագույն բաբախման փոքրացման համար հարկավոր է, օգտվելով (18)–ից, ֆիլտրի դրոսելի ինդուկտիվությունն ընտրել հետևյալ պայմանից՝

$$L = \frac{E^2 C_k}{2\Delta I_{H \max} I_{H \min}} \left( 2 - \frac{U_{H \min}}{E} \right):$$
(24)



Նկ. 7. Ելքային բաբախումները՝ կախված բեռի հոսանքի մեծությունից, դրոսելի ֆիլտրի ինդուկտիվության տարբեր արժեքների դեպքում, երբ և(0)<Inom

### Եզրակացություն.

1․ Էներգիայի բաժնաչափային փոխանցումով կերպափոխիչները հնարավորություն են տալիս իրականացնելու բեռի հզորության խոր կարգավորում՝ կիրառելով կառավարման պարզ՝ հաձախա-իմպուլսային համակարգ։

2. Լարման և հոսանքի բաբախումների գրաֆիկներից հետևում է, որ առավելագույն բաբախումները ստացվում են բեռի լարման և հոսանքի նվազագույն արժեքների դեպքում։

3.Ստացված են կերպափոխչի մաթեմատիկական մոդելը և մոտարկված անալիտիկ արտահայտությունները, որոնք հնարավորություն են տալիս դիտարկելու աշխատանքային բոլոր ռեժիմները և ընտրելու սխեմայի հիմնական տարրերը։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Ланцов В., Эраносян С. Электромагнитная совместимость импульсных источников питания: проблемы и пути их решения. Часть І // Силовая электроника. – 2006. – №4. – С. 58-67.
- Булатов О.Г., Иванов В.С, Панфилов Д.И. Тиристорные схемы включения высокоинтенсивных источников света. – М.: Энергия, 1975. – 176 с.
- Булатов О.Г., Поляков В.Д., Царенко А.И. Преобразователи с дозированной передачей энергии для привода постоянного тока // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. – 1980. – Вып.2 (82). – С. 8-12.
- 4. **Чванов В.А.** Преобразователи с дозированной передачей электроэнергии // Электричество. – 2005. – №6.- С. 46-53.

- 5. Булатов О.Г., Царенко А.И., Поляков В.Д. Тиристорно-конденсаторные источники питания для электротехнологии. М.: Энергоатомиздат, 1989. 200 с.
- 6. Васильев А.С., Конрад Г., Дзлиев С.В. Источники питания высокочастотных электротермических установок. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 426 с.
- 7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2 изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. -160 с.
- 8. Мовсисян В.М., Барегамян Г.В., Петросян Н.Н., Арутюнян А.Ш. Исследование электромагнитных помех и электромагнитной совместимости в источниках вторичного электропитания // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 1997. Т.50, №2. С. 114-119.
- Розанов Ю.К., Логинов А.А., Сухинин А.М. Анализ гармонического состава первичных токов в преобразователях со звеном повышенной частоты // Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. – 1984. – Вып.1 (159). – С. 3-6.
- Воронин А.А., Кравцов С.Ф., Старостин Ю.П. Функциональные элементы систем управления с повышенной помехоустойчивостью для тиристорных источников питания электротехнологических установок // Труды МЭИ. – Вып. 178. – С. 25-30.
- 11. Чередниченко В.С., Аныпаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки: Учебник для ВУЗ-ов - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. - 508 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.03.2016։

### Н.Н. ПЕТРОСЯН, В.С. МЕЛКОНЯН, Р.А. КАЗАРЯН

### АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДОЗИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены тиристорно-конденсаторные преобразователи с дозированной передачей энергии в нагрузку при осуществлении в них частотно-импульсного регулирования (ЧИР) выходной мощности. Получены переходные и статические характеристики в режиме ЧИР. Оценены коммутационные пульсации выходного тока в зависимости от режимов преобразователя.

*Ключевые слова:* электротехнологические установки, дозирующий конденсатор, тиристорноконденсаторный преобразователь, импульсный регулятор, частотно-импульсное регулирование.

#### N.N. PETROSYAN, V.S. MELKONYAN, R.H. GHAZARYAN

### ANALYSIS OF POWER SUPPLY WITH A DOSED POWER TRANSFER FOR ELECTRIC TECHNOLOGIES

Thyristor-capacitor converters with a dosed transfer of energy into load are considered when pulse-frequency regulation of the output power is implemented in them. Transient and static characteristics are obtained in the PFR mode. The switching ripples of the output current are estimated, depending on the modes of the converter.

*Keywords:* electro-technological installations, dosing capacitor, thyristor-capacitor converter, pulse regulator, frequency-pulse control.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

УДК 621.315

### НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

#### М.Г. АЗАРЯН

### О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ ЗАЗОРА ЗОНД-ПОВЕРХНОСТЬ НА ИНФОРМАТИВНОСТЬ ТУННЕЛЬНО-ТОКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из геометрических параметров конфигурации туннельно-токовый твердотельный зонд вблизи исследуемой поверхности и зависимости протекающего через зонд тока от величины зазора между ними, получено аналитическое выражение, описывающее ток с этого зонда. На основе полученного выражения в графической программной среде созданы модель туннельно-токового зонда и виртуальный измерительный стенд. Проведенные на этом стенде исследования, подтверждая справедливость положений, лежащих в основе модели, продемонстрировали также и перспективность предлагаемого метода выделения информативной составляющей из сигнала с туннельно-токового зонда, работающего в жидкости с конечной проводимостью.

*Ключевые слова:* туннельно-токовый зонд, аналитическое выражение, модель, виртуальный стенд, метод выделения информативной составляющей.

Введение и постановка задачи. В зондовой микроскопии (3М) информативный канал формируется природой взаимодействия исследуемой поверхности (ИП) с располагающейся вблизи нее поверхностью твердотельного кончика зонда. Ею же определяется и зависимость величины регистрируемого сигнала с зонда от зазора (*h*) между кончиком зонда и ИП. Это же обстоятельство обуславливает и необходимые масштабы (наноразмерные) диапазона рабочих зазоров в ЗМ.

Функционирование родоначальника класса ЗМ - сканирующего туннельного зондового микроскопа (СТМ) - обусловлено квантово-механической природой туннельного эффекта, выявляющего сильную (экспоненциальную) зависимость туннельного тока с зонда ( $J_{ft}$ ) от зазора *h* между зондом и ИП [1].

Природа информативного канала наделяет туннельно-токовый зонд наивысшим латеральным разрешением, возможностью измерять, помимо прочего, и электрофизические параметры объектов. Вместе с тем использование СТМ требует наличия проводимости у исследуемых материалов.

Нередко естественной средой существования объектов исследований являются проводящие жидкости. Очевидно, что сложность СТМ-исследований таких объектов будет связана с шунтированием гальванической проводимостью туннельно-токовой составляющей регистрируемого тока – информативного канала туннельного микроскопа.

Можно попытаться с помощью некоторых подходов расширить область применения СТМ.

Одним из способов выделения в регистрируемом сигнале информативной составляющей может послужить реализация метода динамического конденсатора в микроскопе [2]. Метод предполагает стимулирование механического колебания зонда. Это приводит к формированию переменного туннельного тока за счет модуляции *h*. Тогда из-за разных законов зависимостей от *h* составляющих токов (для гальванического она значительно слабее экспоненциальной [3]) можно ожидать формирования в спектре сигнала с зонда соответствующих гармоник. В таком случае появляется возможность использовать гармонику (стимулированную туннельной составляющей тока) в качестве информативного канала.

Представляется перспективным:

- исходя из условий и особенностей функционирования СТМ-зонда и используя геометрические параметры конфигурации зонд-поверхность и отмеченные закономерности для токов, попытаться получить аналитическое описание для сигнала с зонда;
- о создать на его базе (уже компьютерную) модель;
- варьируя этими параметрами, отследить поведение информативного сигнала с модели зонда;
- исследовать возможность реализации предлагаемой идеи выделения сигнала, информативного для СТМ-микроскопии;
- решением этих задач параллельно осуществить наглядную демонстрацию основополагания роли описанных выше обстоятельств в осуществлении туннельного микроскопирования.

**Расчетное обоснование.** На рис. 1 приведено схематическое изображение конфигурации кончик твердотельного зонда вблизи ИП, разъясняющее положения, лежащие в основе модели.



Рис. 1. Конфигурация зонд-поверхность

На ней основан вывод зависимости туннельного тока  $J_{ft}$  от величины зазора h и радиуса кривизны r зонда.

Из простых геометрических построений следует, что отрезок  $A_nB_n$  равен  $OA_n \cdot sin(n\alpha)$ , где  $\alpha$  – единичный угол, а n - целое число. Поскольку отрезок  $CB_n$  равен приросту  $\Delta$  к наикратчайшему расстоянию DC, то величина зазора  $h_n$  между каждой очередной n - й точкой (на приведенном схематическом рисунке точка на кривой сечения сферической поверхности) будет  $h_n = h_{min} + \Delta_n$ . Из рассмотрения треугольника  $A_nOB_n$  следует, что  $\Delta_n = r \cdot r \cdot cos(n\alpha)$ , и, следовательно, можно записать

$$h_n = h_{min} + r[1 - \cos(n \propto)].$$

Можно предположить, что туннельный ток  $J_t$  в системе зонд-ИП формируется, в первую очередь, из суммы "отдельных" плотностей туннельных токов вдоль параллельных друг к другу (и нормальных к ИП) треков  $h_n$ .

Следует отметить, что в развитие первой работы [4] здесь несколько изменены число и вид слагаемых треков для туннелирующих электронов, формирующих конечное значение туннельного тока с предлагаемой модели зонда, и она доработана с учетом ее работы с погружением в проводящую жидкость.

Для общности необходимо учесть и вклад возможных "косых" треков. В точку  $A_{n+1}$  сходятся треки  $E_{n-1}A_{n+1}$ ,  $E_nA_{n+1}$ ,  $E_{n+1}A_{n+1}$ ,  $E_{n+2}A_{n+1}$ ,  $E_{n+3}A_{n+1}$ и  $N_{n+1}A_{n+1}$ .

Неучет большего числа подобных треков вполне оправдан из-за резкого (экспоненциального) спада плотности туннельного тока с ростом длины треков.

Длины учитываемых треков описываются следующими выражениями:

$$\begin{split} L_{E_{n+3}A_{n+1}} &= \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+3}B_{n+3}) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} = \\ &= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - \cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\sin[(n+3) \propto] - r\sin[(n+1) \propto]\}^2} , \quad (1) \\ L_{E_{n+2}A_{n+1}} &= \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+2}B_{n+2}) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} = \\ &= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - \cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\sin[(n+2) \propto] - r\sin[(n+1) \propto]\}^2} , \quad (2) \\ L_{E_{n+1}A_{n+1}} &= DC + CB_{n+1} = h_{min} + r[1 - \cos[(n+1) \propto)] , \quad (3) \\ L_{E_{n}A_{n+1}} &= \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+1}1) - (A_{n+1}B_{n+1})]^2} = \\ &= \sqrt{\{h_{min} + r[1 - \cos[(n+1) \propto)]\}^2 + \{r\sin[(n+1) \propto] - r\sin[(n+1) \propto]\}^2} , \quad (4) \\ L_{E_{n-1}A_{n+1}} &= \sqrt{(E_{n+1}A_{n+1})^2 + [(A_{n+1}1) - (A_{n-1}B_{n-1})]^2} = \\ \end{split}$$

$$=\sqrt{\{h_{min} + r[1 - cos[(n+1)\alpha]]\}^2 + \{rsin[(n+1)\alpha] - rsin[(n-1)\alpha]\}^2}, \quad (5)$$

$$L_{N_{n+1}A_{n+1}} = \frac{DDC + COCO}{\cos(n+1)\alpha} - CO = \frac{h_{min} + r[1 - \cos[(n+1)\alpha)]}{\cos(n+1)\alpha}.$$
 (6)

Отметим, что в этой модели все туннельно-токовые треки "упираются" в точки аксиально-расположенных окружностей, совокупность которых формирует

сферическую поверхность кончика зонда (на рис. 1 изображен радиус  $A_{n+2}B_{n+2}$  одной из подобных окружностей).

Длина каждой очередной такой окружности может быть описана выражением

$$L_n = 2\pi r \sin(n \propto). \tag{7}$$

Для соответствующих плотностей трековых туннельных токов можно записать

$$\begin{split} J_{E_{n+3}A_{n+1}} &= Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]\}^2 + \{r \sin[(n+3)\alpha] - r \sin[(n+1)\alpha]\}^2}}, \\ J_{E_{n+2}A_{n+1}} &= Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]\}^2 + \{r \sin[(n+2)\alpha] - r \sin[(n+1)\alpha]\}^2}}, \\ J_{E_{n+1}A_{n+1}} &= Ae^{-bh_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]}, \\ J_{E_{n}A_{n-1}} &= Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]\}^2 + \{r \sin[(n+1)\alpha] - r \sin[(n+1)\alpha]\}^2}}, \\ J_{E_{n-1}A_{n+1}} &= Ae^{-b\sqrt{\{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]\}^2 + \{r \sin[(n+1)\alpha] - r \sin[(n+1)\alpha]\}^2}}, \\ J_{N_{n+1}A_{n+1}} &= Ae^{-b\frac{h_{min}+r[1-cos[(n+1)\alpha)]}{cos(n+1)\alpha}}. \end{split}$$

С учетом (7) для результирующего туннельного тока, составленного из проходящих через точки таковых окружностей плотностей трековых токов, можно записать

$$I_{tn} = 2A\pi \cdot \sin((n+1)\alpha) \cdot e^{-b\left[J_{E_{n+3}A_{n+1}} + J_{E_{n+2}A_{n+1}} + J_{E_{n+1}A_{n+1}} + J_{E_{n}A_{n-1}} + J_{E_{n-1}A_{n+1}} + J_{N_{n+1}A_{n+1}}\right]}.$$

Окончательное выражение для туннельного тока  $J_t$  (все треки, проходящие через поверхность зонда, образованную совокупностью из всех окружностей) будет иметь вид

$$I_t = Ae^{-bh_{min}} + \sum_n I_{tn}.$$
(8)

Представим себе, что туннельный зонд функционирует, будучи погружен в среду с конечным удельным сопротивлением (например, жидкость). В этой ситуации очевидно, что, помимо туннельного тока, через него будет протекать и ток проводимости  $I_G$ , который, как отмечено выше, будет шунтировать информативный туннельный ток. Можно предположить, что гальванический ток, "замыкающий" зонд с поверхностью, подчиняется закону Ома и складывается из плотностей такового тока вдоль каждой силовой линии электрического поля [5] между зондом и ИП:

$$J_{Gn} = \frac{V}{\rho l_n} ,$$
283

где V – напряжение между зондом и поверхностью;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $l_n$  – длина силовой линии.

Можно заменить силовые линии прямолинейными NA-треками. Представляется, что такая замена незначительно нарушает картину процесса – "укорочение" пути из-за спрямления силовых линий особенно в рассматриваемых здесь масштабах столь мало, что вызываемым им изменением "сопротивления" (а значит, и значения плотности тока) можно пренебречь.

Таким образом,

$$J_{Gn+1} = \frac{Vs}{\rho L_{N_{n+1}A_{n+1}}}$$

И

$$I_G = \frac{V_S}{\rho h_{min}} + \frac{V_S}{\rho} \sum_n 2\pi rsin((n+1)\alpha) \frac{h_{min} + r[1 - cos[(n+1)\alpha)]}{cos((n+1)\alpha)}.$$
(9)

Присутствие первого слагаемого в (8) и (9) вызвано тем, что при суммировании (второе слагаемое) из-за специфики используемого аналитического выражения для треков "исключается" член с  $((n+1)\alpha)=0$ .

Очевидно, что сумма (8) с (9) определяет финальное значение выходного тока для выдвинутой модели зонда:

$$I_{fin} = I_t + I_G. \tag{10}$$

Нас интересуют зависимости  $I_{fin}$  от  $r, n, \rho$  и h.

Полученный вид аналитического выражения позволил в программной среде LabVIEW создать компьютерную виртуальную модель, спроектировать программный испытательский стенд, в котором, помимо прочего, строились и наглядные графические отображения разнообразных зависимостей. В стенде предусмотрено также формирование модуляции зазора  $h_{min}$  (имитация колебания зонда) с последующим отображением спектра результирующего тока с такового зонда. Этот виртуальный измерительный стенд предоставляет возможность, рисуя одновременно кривые ходов каждого из слагаемых суммы, их различных комбинаций, наглядно регистрировать их влияние на итоговую зависимость. Такая "сервисность" помогла и в толковании получаемых результатов.

#### Обсуждение результатов

Функционирование в отсутствие шунтирующих токов. В качестве иллюстрации приведено семейство, сформированное зависимостями (8) постоянного тока  $I_t(r_i(na))$ , полученными при разных значениях r (рис. 2).



Рис. 2. Семейство зависимостей I<sub>t</sub>(r<sub>i</sub>(na)) с разными r

Диапазоном изменения  $\Delta \alpha$  в  $I_{fin}(na)$  определяется учитываемая поверхность для каждого из *i* зондов, а кривые  $I_{fin}(na)$  отображают динамику роста тока. Наблюдаемое насыщение указывает на прекращение роста тока. Очевидно, что точка достижения насыщения определяет долю всей учитываемой поверхности зонда, которая "обеспечила" сбор всего тока. Видно, что по мере роста *r* эта поверхностная доля уменьшается, "концентрируясь" у кончика зонда. Все это свидетельствует о пространственной локализации "информативного канала" в этом модельном туннельном зонде.

Будучи хорошо известной в зондовой микроскопии, локализация поверхности сбора тока у кончика реального туннельного зонда, на наш взгляд, является аргументом правомерности выдвинутой модели.

Рассмотрим теперь результаты моделирования ее работы в режиме с модуляцией величины туннельного зазора.

Работа в присутствии шунтирующих токов. Здесь использовались как (10), так и в отдельности его составляющие (8) и (9). Именно такая возможность позволяет проследить за вкладом и влиянием слагаемых на полный ток с зонда.

На рис. 3 приведены сопоставления спектров слагаемых компонент  $\tilde{I}_G(r_i(na))$  (рис.3а),  $\tilde{I}_i(r_i(na))$  (рис.3б) и "прошунтированного" тока  $\tilde{I}_{fin}(r_i(na))$  (рис.3в), полученных при возрастающих значениях удельного сопротивления, и значения их гармоник. Эти переменные токи формировались при задаваемом фиксированном значении величины зазора  $h_{min}$ .



Рис. 3. Сопоставление спектров слагаемых:

колонка а - только шунтирующей составляющей тока; колонка б - только туннельной составляющей тока; в - всего тока

Как видим, в спектрах результирующих токов  $\tilde{l}_{fin}(r_i(na))$  "проявившиеся" первая и высшие гармоники демонстрируют слабую зависимость от величины  $\rho$ . На спектрах же  $\tilde{l}_G(r_i(na))$  величины этих же гармоник сильно зависят от  $\rho$ , а высшие гармоники имеют на порядки меньшие амплитуды.

Сопоставление спектров указывает на то, что в спектре  $\tilde{l}_{fin}(r_i(na))$  высшие гармоники практически равны этим же гармоникам в спектре для туннельной составляющей  $\tilde{l}_t(r_i(na))$ . Легко заметить, что в спектре "зашунтированного" тока  $\tilde{l}_{fin}(r_i(na))$  влияние изменения величины  $\rho$  сказывается только на значении первой гармоники.

В итоге можно констатировать, что в "зашунтированном" сигнале уже начиная с третьей гармоники влияние шунтирующей составляющей исчезает, и их амплитуды совпадают с амплитудами соответствующих гармоник информативной туннельной составляющей тока.

Таким образом, описанное подтверждает принципиальную справедливость высказанного выше способа выделения информативного канала.

Трансформация в семействах из немодулированных составляющих тока с зонда (подобных приведенным на рис. 2), но уже полученных для зонда, работающего в проводящей среде с разными значениями  $\rho$  (рис. 4), дополняет этот вывод.



Рис. 4. Сопоставление семейств кривых I<sub>fin</sub>(r<sub>i</sub>(na)), демонстрирующее возрастание, по мере роста удельного сопротивления жидкой среды, роли туннельной составляющей в "итоговом" немодулированном токе

На кривых (рис. 4) хорошо заметен рост роли в спектре постоянного тока информативной составляющей – по мере роста удельного сопротивления жидкости вид семейства для полного тока уподобляется виду семейства для (не зависящего от  $\rho$ ) туннельного тока.

Таким образом, полученные при моделировании зависимости подсказывают, что если туннельно-микроскопические исследования в штатном (нединамическом) режиме можно проводить *лишь* при соответствующем высоком значении  $\rho_{\kappa}$ , то предлагаемый режим с модуляцией *может позволить* их проведение при значениях  $\rho$  почти на четыре порядка меньших  $\rho_{\kappa}$ .

### Выводы

Основываясь на приведенных результатах компьютерных испытаний виртуальной модели туннельно-токового зонда, можно констатировать, что:

- демонстрация характеристик, свойственных реальному ТМ-зонду, подтверждает справедливость выдвинутой модели;
- на основе этого вывода можно предположить, что идея с применением "модуляционного" режима работы на практике может быть использована для СТМ-исследований в жидких средах, имеющих конечную проводимость;
- модель наглядно демонстрирует, что "локализатором" информационного канала является крутизна закономерности спада величины сигнала взаимодействия зонда с ИП.

Автор выражает особую благодарность В.М. Арутюняну за проявленный интерес к работе и сделанные ценные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Быков В.А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: Дис. ... д.т.н. М., 2000.- 393 с.
- Измерение контактной разности потенциалов методом динамического конденсатора / Составители: Е.Н. Бормонтов, Т.Г. Меньшикова, Е.А. Тутов: Учебно - методическое пособие для вузов. – Воронеж, 2006.- 19 с.
- 3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1968. 939 с.
- 4. Azaryan M.H. On the influence of the probe-surface configuration on descriptiveness of the tunneling-current studies// International Workshop on ionizing and non-ionizing radiation influence on structure and biophysical properties of living cells. Tsaghkadzor, Armenia, September, 2015. P. 25-27.
- 5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники М.: Высшая школа, 1978.-528 с.

Ереванский государственный университет. Материал поступил в редакцию 16.02.2016.
#### Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ

## ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻՉԱՆ ՎՐԱ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ԶՈՆԴ-ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹ ԲԱՑԱԿԻ ԵՐԿՐԱՉԱՓԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱԶԴՅՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Թունելային հոսանքի պինդմարմնային զոնդ-հետազոտվող մակերևույթ փոխդասավորվածության երկրաչափական պարամետրերի և զոնդ-մակերևույթ բացակի մեծությունից զոնդի հոսանքի կախվածության հիման վրա ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն, որը նկարագրում է զոնդով հոսող հոսանքը։ Գրաֆիկական ծրագրավորման միջավայրում այդ արտահայտության հիման վրա ստեղծվել են թունելային հոսանքի զոնդի մոդելը և վիրտուալ ստենդը։ Վերջինով կատարված հետազոտությունները, հաստատելով մոդելի հիմքը կազմող դրույթների Ճշմարտացիությունը, ցուցադրում են նաև առաջարկվող մեթոդի հեռանկարայնությունը՝ վերջավոր հաղորդականությամբ օժտված հեղուկում աշխատող թունելային զոնդից ստացված ազդանշանից ինֆորմատիվ բաղադրիչ անջատելու համար։

*Առանցքային բառեր*. թունելա-հոսանքային զոնդ, անալիտիկ արտահայտություն, մոդել, վիրտուալ ստենդ, ինֆորմատիվ բաղադրիչի բացահայտման մեթոդ*։* 

#### M.H. AZARYAN

## THE IMPACT OF THE GAP GEOMETRY PROBE–SURFACE ON THE INFORMATION DENSITY OF TUNNEL–CURRENT INVESTIGATIONS

The analytic relation, describing the current flowing through the probe is obtained from geometrical parameters of configuration of the tunnel-current solid-state probe close to the investigated surface, and from the surface- probe gap size dependence of the probe current. The model of the tunnel-current probe, as well as the virtual measuring test bench are realized using this relation in the graphic al programming environment. The studies conducted with the help of the measuring stand have confirmed the correctness of the concepts underling the model and demonstrated the prospect of the method for separating the information component from the tunnel-current probe signal operating in liquid with finite conductivity

*Keywords:* tunnel-current probe, analytic expression, model, virtual stand, method of separating the information component.

#### ISSN 0002-306X. ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. 2016. Հ. LXIX, N 3.

*Հ*SԴ 681.3.002

#### ՌԱԴԻՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ

#### Դ.Մ. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ, Դ. Հ. ՀՈՒՍԻԿՅԱՆ

### ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՅԻ ՀԱՐԹԱԿԻ ՄՈՆՏԱԺԱՅԻՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՂՈՐԴԱՇԵՐՏԵՐԻ ՔԱՆԱԿԻ ՍԻՆԹԵԶԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Հավանականային մոդելի միջոցով մշակվել է մեթոդ, որով որոշվել են ինտեգրալ սխեմայի հարթակի մոնտաժային դաշտի հաղորդաշերտերի քանակի միջին արժեքը, ստանդարտ շեղումը և հաղորդաշերտերի անբավարարության ռիսկը։

**Առանցքային բառեր.** ինտեգրալ սխեմա, մոնտաժային դաշտ, հարթակ, հաղորդաշերտերի քանակ, բաշխման ֆունկցիա, ստանդարտ շեղում։

Ինչպես հայտնի է, ինտեգրալ սխեմայի (ԻՍ) հարթակի հաղորդաշերտերի քանակի (ՀՇ) որոշումը նախագծման վաղ փուլում կարևորագույն խնդիրներից մեկն է [1-6]։

Հայտնի է, որ ԻՍ հարթակի ՀՇ քանակի ավելացումը խիստ պայմանավորված է տարրային բազայի ինտեգրման աստիձանի մեծացմամբ և որոշակիորեն արտահայտվում է հաղորդաշերտերի թվի ընդհանուր աձով։ Եթե ԻՍ-ի ծրագծման դաշտի մակերեսի հնարավորությունները կառուցվածքային և տեխնոլոգիական տեսանկյունից սահմանափակ են, ապա հաղորդաշերտերը՝ որպես միջտարրային կապեր իրականացնողներ, պահանջում են ավելի մեծ մակերեսներ, և մյուս կողմից՝ գոյություն ունի ԻՍ-ի միկրոմանրաչափավորման պարտադիր պայման, որի անհրաժեշտությունը հանգեցնում է բազմահաղորդաշերտ ԻՍ-երի օգտագործմանը։ Բազմահաղորդաշերտ ԻՍ-ի նախագծումը շատ դժվար է, իսկ հաղորդաշերտերի քանակը հանդիսանում է սահմանափակում, քանի որ հաղորդաշերտերի քանակի *՚* մեծության աձին զուգահեռ կտրուկ աձում է խոտանի տոկոսը։

Գոյություն ունեցող ԻՍ-երի հարթակների ՀՇ քանակների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ հաղորդաշերտերի ոչ բոլոր հնարավորություններն են ամբողջությամբ օգտագործվում։ Հայտնի է, որ յուրաքանչյուր տեխնիկական մակարդակին համապատասխանում է ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի ինչ-որ միջին քանակ, որից մեծ լինելու դեպքում տվյալ տեխնիկական մակարդակի ՀՇ-երի քանակը իրագործելի չէ (քանի որ կա սահմանափակում), իսկ փոքրի դեպքում հաղորդաշերտերը չեն բավարարում, այսինքն՝ տվյալ ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-ի քանակը պիտանի չէ։ Այդ պատձաոով անհրաժեշտ են մաթեմատիկական մոդելներ, որոնցից օգտվելով հնարավոր կլինի վերլուծել ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի քանակը և տարբեր որոշումների հետևանքները ԻՍ-ի հարթակի կառուցվածքային բնութագրերի վրա։

ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ քանակի և դրանց վրա տարրերի թվի սինթեզը որոշվում է երկու փուլով։ Առաջին փուլում որոշվում է ԻՍ-ի հարթակի մոնտաժային դաշտում տարրերի N<sub>1</sub> քանակը, որոնք կարող են տեղադրվել հարթակում, իսկ երկրորդում` ԻՍ-ի հարթակի մոնտաժային դաշտի ՀՇ-երի γ<sub>1</sub> քանակը [3-5](նկ.)։ Ներկայացնենք յուրաքանչյուր փուլն առանձին խնդրի տեսքով։

ԻՍ-ի տարրերի քանակն ընտրելիս հարկ է լինում հաշվի առնել բազում գործոններ։ Այլ գործոնները հաշվի առնելով՝ ընտրվում է ԻՍ-ի տարրերի *N* որոշակի քանակ։ Սակայն, անկախ այն բանից, թե ինչ նկատառումներով և ինչ քանակով է ընտրվել *N* տարրերի քանակը, միշտ անհրաժեշտ է ապահովել դրանց միջև լարային միացումներով էլեկտրական անխափան կապ։

Ինչպես ցույց են տվել [3-5] վերլուծության արդյունքները, հիմնական գործոններից մեկը, որն ազդում է ԻՍ-ի տարրերի միջև էլեկտրական լարային միացումների անխափան կապի վրա, ԻՍ-ի հարթակի հաղորդաշերտերի γթիվն է։

Խնդիրն այն է, որ  $N_1$  քանակով տարրերի պահանջարկի հաղորդաշերտերի  $\bar{\gamma}(N)$  թիվը պատահական մեծություն է։ Սա նշանակում է, որ տարրերի միննույն քանակով տարբեր ԻՍ-երի հարթակների համար պահանջվում են ՀՇ-երի տարբեր քանակներ։ Հետևաբար, այն դեպքում, երբ  $N_1$  տարրերի քանակի համար պահանջվող ՀՇ-երի  $\gamma$  թիվն ավելի մեծ կլինի, քան ԻՍ-ի հարթակի առկա ՀՇ-երի  $\gamma_1$  թիվը, ապա ԻՍ-ի ոչ բոլոր էլեկտրական միացումների լարային երկարությունների կապերը կիրականանան։ Այսպիսով, ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի բավարարման հավանականությունը կարելի է իրականացնել որպես այն բանի հավանականություն, որ տարրերի  $N_1$  քանակի պահանջվող հաղորդաշերտերի թիվը կլինի ոչ ավելին, քան ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի  $\gamma_1$  թիվը (նկ.)՝

$$P_{\gamma} = P[\gamma(N_1) \le \gamma_1] = P(N_{\text{shp}} = N_1), \qquad (1)$$

որտեղ  $N_{\mathrm{dhg}}$  -ը ԻՍ-ի հարթակի տարրերի քանակն է։

Արտահայտելով այդ հավանականությունը տարրերի  $N_1$  քանակով պահանջվող ՀՇ-երի թվի բաշխման խտությամբ` կունենանք.

$$P_{\gamma} = \int_{0}^{\gamma_{1}} f(\gamma, N_{1}) d\gamma, \qquad (2)$$

որտեղ  $f(\gamma, N_1)$ - ը մակերևույթի հավասարումն է ( նկ.) [4,6]։

Ներածենք ԻՍ-ի հարթակի հաղորդաշերտերի թվի անբավարարության ռիսկ հասկացությունը, որը ներկայացնում է հավանականություն, որ  $N_{
m I}$ քանակությամբ տարրերի հանմար պահանջվող ՀՇ-երի թիվն ավելի մեծ կլինի, քան առկա ՀՇ-երի թիվն է։

$$R = P[m(N_1) > m_1] = 1 - P_n :$$
(3)

Ինչպես երևում է (2)-ից և (3)-ից, որքան մեծ է հաղորդաշերտերի <sub>71</sub> թիվը, այնքան փոքր է նրանց անբավարարության ռիսկը, հետևաբար՝ այնքան մեծ է բոլոր տարրերի էլեկտրական միացումների լարային երկարություններն իրականացնելու հավանականությունը։ Որպեսզի ԻՍ-ի տարրեր էլեկտրական կապերի լարային միացումները հուսալիորեն իրականանան, անհրաժեշտ է ՀՇ-երի անբավարարության ռիսկը հասցնել զրոյի։



Նկ. Հաղորդաշերտերի $\gamma$  թվի կախումը տարրերի N քանակից

Համաձայն ԻՍ-ի հարթակի մոնտաժային դաշտի ՀՇ  $\gamma$  թվի՝ տարրերի Nքանակից կախվածության հավանականային մոդելի,  $\gamma(N_1)$ -ն ունի հավանականությունների նորմալ բաշխում։ Դա նշանակում է, որ ցանկացած  $\gamma_1$  վերջավոր արժեքի համար (2)-ից և (3)-ի համաձայն՝  $P_{\gamma} < 1, R > 0$ :

Սակայն հայտնի է [7], որ ցանկացած նորմալ բաշխման X պատահական մեծությունների համար, որոնց մաթեմատիկական սպասումը  $\gamma_x$  է, ստանդարտ շեղումը՝  $\sigma_{\gamma}$ , տոկոսի տասնորդական մասի ճշտությամբ, իրավացի են հետևյալ արտահայտությունները.

$$\begin{cases}
P(x < \gamma_x) = 0.5, \\
P(x < \gamma_x + \sigma_x) = 0.84, \\
P(x < \gamma_x + 2\sigma_x) = 0.98, \\
P(x < \gamma_x + 3\sigma_x) \approx 1:
\end{cases}$$
(4)

Մրա հիման վրա կարելի է որոշել  $N_1$  տարրերի քանակով ԻՍ-ի հաղորդաշերտերի  $\gamma_1$  թիվը, որն ապահովվում է հաղորդաշերտերի անբավարարության ռիսկի ամրակցված արժեքով։

$$\begin{cases} \gamma_{1}(R = 0,5) = \bar{\gamma}(N_{1}), \\ \gamma_{1}(R = 0,16) = \bar{\gamma}(N_{1}) + \sigma_{\gamma}(N_{1}), \\ \gamma_{1}(R = 0,02) = \bar{\gamma}(N_{1}) + 2\sigma_{\gamma}(N_{1}), \\ \gamma_{1}(R = 0) = \bar{\gamma}(N_{1}) + 3\sigma_{\gamma}(N_{1}), \end{cases}$$
(5)

որտեղ  $ar{\gamma}(N_1)$  և  $\sigma_{\gamma}(N_1)$ ը համապատասխանաբար  $N_1$  տարրերի հաղորդաշերտերի թվի միջին արժեքն ու ստանդարտ շեղումն են։

Ինչպես հետևում է (5)-ից՝

$$\gamma_1(R=0) = \overline{\gamma}(N_1) + 3\sigma_{\gamma}(N_1):$$
(6)

Այս դեպքում ապահովվում է հաղորդաշերտերի թվի անբավարարության զրոյական ռիսկը, հետևաբար և՝ ԻՍ-երի լցման առավելագույն գործակիցը։ Հաղորդաշերտերի թվի հետագա մեծացումը իմաստ չունի, քանի որ այն բանի հավանականությունը, որ ԻՍ-երի հարթակի ՀՇ-երի թվի [ $\overline{\gamma}(N_1)$ +3 $\sigma_{\gamma}(N_1)$ ]- ից մեծ լինելու հավանականությունը գործնականում հավասար է զրոյի։

Մյուս կողմից՝ առանց նկատելի կորստի կարելի է նվազեցնել ՀՇ-երի թիվը ստանդարտ շեղման մեծության չափով։ Ըստ որում, (5)-ի համաձայն, ԻՍ-ի տարրերի  $N_1$  քանակի էլեկտրական միացումների իրականացման հավանականությունը կկազմի 0,98, իսկ հաղորդաշերտերի թվի անբավարարության ռիսկը՝ ընդամենը 0,02։ Դա նշանակում է, որ բոլոր ԻՍ-երից միայն երկու տոկոսի դեպքում կարող է հաղորդաշերտերի թիվն ավելի փոքր լինել, քան պահանջվում է տարրերի էլեկտրական միացումների լարային երկարությունների համար։ Դա գործնականում չի ազդում ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի միջին լցվածության վրա։ Այսպիսով, կարելի է հանձնարարել ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի թվի ընտրության հետևյալ սկզբունքը՝

$$\gamma_1 = \overline{\gamma}(N_1) + (2 \div 3)\sigma_{\gamma}(N_1), \tag{7}$$

որտեղ  $\bar{\gamma}(N_1)$  -ը ԻՍ-ի  $N_1$  տարրերի հաղորդաշերտերի թվի միջին արժեքն է,  $\sigma_{\gamma}(N_1)$ -ն՝ հաղորդաշերտերի ստանդարտ շեղումը։

ԻՍ-ի հարթակի ՀՇ-երի թվի նման ընտրության դեպքում դրանց անբավարարության ռիսկը կազմում է  $R \approx 0 \div 0,02$ , և գործնականում ապահովվում է ԻՍ-ի  $N_1$ տարրերի էլեկտրական կապերի լարային միացումների հուսալի իրականացումը։

**Եզրակացություն.** Այն հավանականությամբ, որ ԻՍ-ի տարրերի *N* քանակով պահանջվող հաղորդաշերտերի γթիվը մեծ է, քան ԻՍ-ի առկա (գործող) հաղորդաշերտերի թիվը, կարելի է դիտարկել ԻՍ-ի հաղորդաշերտերի անբավարարության ռիսկը։

ԻՍ-ի տարրերի ամրակցված քանակի դեպքում հաղորդաշերտերի թվի աձին զուգընթաց դրանց անբավարարության ռիսկը նվազում է, իսկ հաղորդաշերտերի թվի նվազման դեպքում` մեծանում։

ԻՍ-ի ՀՇ-երի սինթեզի դեպքում պետք է ձգտել նրա հաղորդաշերտերի թվի անբավարարության ռիսկերի փոքրացմանը։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Routing Density Analysis of ASICs, Structured ASICs, and FPGAs. Programmable Logic Design Line (0/19/2005) http://www.soccentral.com/results.asp? CategoryID=563&EntryID=16716
- Theis T.N. The Future of Interconnection Technology // IBM J.Res. Develop.- May, 2000.- Vol. 44, No 3.- P. 379-390.
- Husikyan D.H., Aharonyan A.K. The New Definition Method of the Conduction Printed Layers, Quantity, Area and Elements Putting Step in the Large Integral Scheme Platform of Basic Crystal // Proceedings of the Sixth International Symposium on CSNDSP, 23-25 July, 2008. Graz University of Technology.- Graz, Austria, 2008. – P. 606-608.
- Husikyan D.L., Aleksanyan D.M., Husikyan L.D. Defining the Conducting Layers Number of a Circuit Field of a Basic Construction Board by the Probability Model // 8th IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Poznan University of Technology.- Poznan, Poland, 18-20 July, 2012. 10.1109/CSNDSP.2012.6292714
- Усикян Д.О., Алексанян Д.М., Агаронян А.К. Определение числа слоев базового кристалла больших интегральных схем // Труды Восьмой Международной научно – практической конференции "Современные информационные и электронные технологии "СИЕТ"-2007".- Одесса, Украина, 2007.- С. 252.

- Усикян Д.О., Алексанян Д.М., Аветисян К.Г., Матевосян О.Т. Определение числа слоев проводников монтажного поля ИС // Труды Восьмой Международной научно– практической конференции "Современные информационные и электронные технологии "СИЕТ"-2014".- Одесса, Украина, 2014. - С. 252.
- 7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1962. 564 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.02.2016։

#### Д.М. АЛЕКСАНЯН, Д.О. УСИКЯН

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ЧИСЛА ПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ МОНТАЖНОГО ПОЛЯ ПОДЛОЖКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

С помощью вероятностной модели разработан метод, посредством которого определяются среднее значение числа проводящих слоев монтажного поля подложки интегральной схемы, стандартное отклонение и риск нехватки числа проводящих слоев монтажного поля.

*Ключевые слова:* интегральная схема, монтажное поле, подложка, число слоев, функция распределения, стандартное отклонение.

#### D.M. ALEKSANYAN, D.H. HUSIKYAN

## DEVELOPING A METHOD FOR THE SYNTHESIS OF THE TRANSMITTING LAYER NUMBER OF THE INTEGRAL SCHEME SUBSTRATE INSTALLATION FIELD

A method has been developed with the help of the probabilistic model by which the average value of the number of the transmitting layer of the installation field of the IC substrate, the standard deviation and the risk of deficiency of the transmitting layer of the installation field are determined.

*Keywords:* integrated circuit, installation field, substrate, number of layers, distribution function, standard deviation.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

#### УДК 621.3

#### АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## А.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, Т.Р. МЕЛКОНЯН О ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ОТ РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Проанализированы эффективности различных алгоритмов случайного поиска при решении задачи оптимизации модели электрической машины, а также их зависимость от размерности пространства поиска. Проведены численные эксперименты оптимизации модели электрической машины с большим числом варьируемых параметров для некоторых часто применяемых алгоритмов случайного поиска. Полученные численные результаты хорошо согласуются с результатами теоретического анализа.

*Ключевые слова:* оптимальные алгоритмы, синхронный генератор, критерий оптимальности, целевая функция, активный объем.

**Введение.** Решение задачи оптимизации модели электрической машины в значительной степени зависит от выбора алгоритма и управляющих параметров (см.[1,2]). На эффективность решения задачи (время расчета, число итераций) влияет также размерность пространства, т.е. число *d* варьируемых параметров модели. Особенно сильно проявляется зависимость эффективности решения задачи от размерности пространства в алгоритмах случайного поиска.

Целью работы является сравнительный анализ зависимости эффективности решения задачи оптимизации модели электрической машины от размерности пространства для различных алгоритмов случайного поиска. Исследованы преимущества и недостатки различных алгоритмов случайного поиска в зависимости от особенностей решаемой оптимизационной задачи.

Гиперсферический случайный поиск. Наиболее распространенным методом оптимизации является гиперсферический случайный поиск без обучения (см.[3,4]). Вокруг текущей точки  $\overline{X_t}$  в многомерном пространстве строится гиперсфера с текущим радиусом  $h_t$ . В многомерном пространстве выбирается случайное направление  $\overline{\lambda}$ , и следующая точка  $\overline{x_{t+1}}$  поиска строится по формуле

$$\overline{x_{t+1}} = \overline{x_t} + \frac{\lambda}{\left|\overline{\lambda}\right|} h_t \quad . \tag{1}$$

Изменения шага происходят следующим образом:

$$\begin{cases} ecnu \xi \ge \Delta, mo h_{t+1} = h_t * K_h^{-1}, \\ ecnu \xi < \Delta, mo h_{t+1} = h_t * K_h, \\ h_{max} \ge h_t \ge h_{min}, \end{cases}$$
(2)

где  $\xi$  - отклонение целевой функции;  $\Delta$  - данное число.

Из линейности формулы (1) следует важная особенность гиперсферического случайного поиска: сложность алгоритма (в смысле количества требуемых операций) зависит от размерности пространства линейным образом. Следовательно, гиперсферический поиск предпочтителен для многомерного пространства. Будем говорить, что гиперсферический случайный поиск имеет порядок сложности *d*.

Метод реверса повторяет тот же метод гиперсферы, за исключением того, что когда в результате проверки выясняется, что внутри данной гиперсферы сделанный шаг является неудачным, то случайное направление  $\overline{\lambda}$  заменяется без дополнительной проверки на противоположное (реверс). Следовательно, сложность алгоритма метода реверса зависит от размерности пространства в основном линейным образом, за исключением ситуации, когда и случайное направле-

ние  $\overline{\lambda}$ , и его противоположное направление являются неудачными.



Рис. 1. Зона нелинейности метода реверса

На рис. 1 через O обозначено положение текущей точки  $\overline{X_t}$ , вокруг которой построена гиперсфера H с текущим радиусом  $h_t$ ; через B обозначена многомерная силовая поверхность целевой функции, которая проходит через точку O. Условное положение искомого оптимума обозначено значком \*. Случайное направление будет неудачным, если оно попадает в ту часть гиперсферы H, которая лежит ниже поверхности B.

На рисунке заштрихована зона нелинейности метода реверса, т.е. те точки гиперсферы H, которые и сами, и их противоположные точки лежат ниже поверхности B.

Площадь поверхности зоны нелинейности метода реверса возрастает с возрастанием размерности пространства. В одномерном случае, когда есть только два пути: направо и налево, зона нелинейности метода реверса исчезает. Можно ожидать, что в многомерном пространстве при решении экстремальных (оптимальных) задач метод реверса уступит гиперсферическому методу. Будем говорить, что метод реверса имеет порядок сложности больше, чем *d*.

Гиперконический метод учитывает предысторию выполненных рабочих шагов. Вокруг текущей точки с помощью текущего шага строится гиперконус с данным углом  $\alpha$  и медианой, совпадающей с вектором предыстории. В разных точках гиперконуса вычисляется величина целевой функции. Если на гиперконусе не находится точка лучше текущей, то угол  $\alpha$  увеличивается. Если угол  $\alpha$  неограниченно увеличивается, то гиперконус расширяется вплоть до гиперсферы, и задача переходит в гиперсферическую задачу случайного поиска.

Так как для нахождения угла между векторами приходится считать их произведения, то сложность построения гиперконуса имеет квадратичную зависимость от размерности пространства. Следовательно, и сложность гиперконического метода имеет квадратичную зависимость от размерности пространства. Можно ожидать, что в многомерном пространстве при решении экстремальных (оптимальных) задач гиперконический метод уступит гиперсферическому. Будем говорить, что гиперконический случайный поиск имеет порядок сложности  $d^2$ .

Метод наилучшей пробы зависит от заранее заданного числа шагов k. Вокруг текущей точки  $\overline{X_t}$  в многомерном пространстве строится гиперсфера с текущим радиусом  $h_t$ , после этого на гиперсфере строится выборка из k случайных направлений и выбирается наилучшее из них для построения следующей точки поиска  $\overline{x_{t+1}}$ . Если k=1, то метод наилучшей пробы совпадает с гиперсферическим, если же k - достаточно большая величина, то наилучшее направление будет стремиться к направлению градиента. Следовательно, при большом k и большом числе d варьируемых параметров модели сложность метода наилучшей пробы такого же порядка, что и у градиентных методов.

Оценим, каким должно быть число шагов k (при фиксированном большом числе d), чтобы сложность метода наилучшей пробы была такого же порядка, что и у градиентных методов. Так как для нахождения градиента силовой гиперповерхности целевой функции приходится считать произведения векторов, то сложность построения градиента имеет квадратичную зависимость от размерности пространства. Следовательно, сложность градиентных методов случайного поиска имеет порядок  $d^2$ .

Количество требуемых операций для построения новых точек имеет порядок d, а количество обращений к модели электрической машины пропорционально размеру выборки k. Можно ожидать, что сложность метода наилучшей пробы имеет порядок kd. Следовательно, сложность метода наилучшей пробы будет такого же порядка, что и у градиентных методов (т.е.  $d^2$ ) при k>d.



Рис. 2. Зона удачного шага в случае сильной кривизны

Эффективность метода наилучшей пробы зависит от вероятности p удачного шага в случайном направлении  $\overline{\lambda}$ , а последняя вероятность зависит от кривизны силовой гиперповерхности целевой функции в текущей точке  $\overline{X_t}$  (см.[5]). На рис. 2 представлен случай сильной кривизны гиперповерхности целевой функции. Вероятность p удачного шага равна отношению площади поверхности заштрихованной части гиперсферы, которая находится выше силовой гиперповерхности целевой функции, к площади поверхности всей гиперсферы. Обратная величина 1/p равна среднему ожидаемому размеру выборки, имеющей пробу более удачную, чем в текущей точке. Если k<1/p, то часто будут получаться пустые выборки, наилучшая проба которых будет хуже, чем в текущей точке.

На рис. 3 представлен случай нулевой кривизны гиперповерхности целевой функции. Шаг будет удачным, если вектор случайного направления попадает в заштрихованную половину гиперсферы, которая находится выше силовой гиперповерхности целевой функции. Понятие "выше" определяется относительно условного положения искомого оптимума, обозначенного на рисунках значком \*.

Таким образом, в случае бесконечно малой кривизны гиперповерхности целевой функции вероятность p удачного шага близка к 0,5, а средний ожидаемый размер выборки равен двум. Следовательно, сложность метода наилучшей пробы при k=2 и малой кривизне гиперповерхности целевой функции будет такого же порядка, что и у гиперсферического метода случайного поиска, и количество требуемых операций зависит от размерности пространства линейным образом.



Рис. 3. Зона удачного шага в случае нулевой кривизны

Исходя из этого, обычно при небольшом количестве переменных и большой кривизне гиперповерхности, когда часто значения целевой функции в новой точке получаются хуже, чем в текущей точке, применяют градиентный метод, а при большом количестве переменных и малой кривизне гиперповерхности целевой функции предпочтительнее применять гиперсферический метод случайного поиска.

**Численные результаты исследования**. Эксперименты проводились для 10 следующих варьируемых величин модели электрической машины:

Х<sub>1</sub> - внешний диаметр статора;

Х<sub>2</sub>, Х<sub>3</sub>, Х<sub>4</sub> и Х<sub>8</sub> - геометрические коэффициенты;

Х<sub>5</sub> - длина пакета статора;

Х<sub>6</sub>-число активных проводов;

Х7 - коэффициент полюсного перекрытия;

Х9 - отношение максимального воздушного зазора к воздушному зазору;

Х<sub>10</sub> - плотность тока в обмотке возбуждения.

На основе полученных результатов построены графики зависимости целевой функции от числа обращения к модели для различных методов случайного поиска (рис. 4 - 7).



Рис. 4. Зависимость активного объема от числа обращений к модели, полученной гиперсферическим методом



Рис. 5. Зависимость активного объема от числа обращений к модели, полученной наилучиим методом выбора



Рис. 6. Зависимость активного объема от числа обращений к модели, полученной гиперконическим методом



Рис. 7. Зависимость активного объема от числа обращений к модели, полученной методом реверса

Из графиков, полученных экспериментальным путем, видно, что для гиперсферического метода система входит в допустимую область за 62 итерации, для гиперконического метода – за 42 итерации, для метода реверса - за 15 итераций и для метода наилучшего выбора - 315 итераций. Экстремум целевой функции методом гиперсферы получается, когда число обращений к модели становится 246, в случае гиперконического метода - 440 итераций. При оптимизации методом реверса экстремум целевой функции получается через 551 итерацию, а методом наилучшей пробы - 1650 итераций.

На основе данных, полученных в результате программной реализации оптимизации электрических машин, был произведен расчет относительного отклонения  $\frac{|X-\overline{X}|}{\overline{X}}$ ,  $\frac{|F-\overline{F}|}{\overline{F}}$  варьируемых параметров. Ниже приведены значения относительного отклонения  $\Delta_k$  соответствующих варьируемых параметров  $X_k$ :

$$\Delta_1 = 3,72 \%, \Delta_2 = 0,23\%, \Delta_3 = 2,52\%, \Delta_4 = 2,38\%, \Delta_5 = 5,03\%, \Delta_6 = 0\%, \Delta_7 = 0,05\%, \Delta_8 = 7,75\%, \Delta_9 = 7,54\%, \Delta_{10} = 6,84\%.$$

При этом относительное отклонение активного объема синхронного генератора составило 4,4%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Терзян А.А.** Автоматизированное проектирование электрических машин. М.: Электроатомиздат, 1983. 249 с.
- Терзян А.А. Алгоритмы принятия решений в электромеханике // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. - N2 -C. 18 – 27.

- 3. Растригин Л.А., Рипа К.К., Тарасенко Г.С. Адаптация случайного поиска. Рига: Зинатне, 1978. 243с.
- Թերզյան Հ.Ա. Ավտոմատացված նախագծման համակարգերի տեսություն.- Երևան, Լոս-Անջելս, Աթենք, 1995. – 432 էջ:
- 5. Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Казарян Д.Г., Григорян А.Е. К автоматической адаптации в задачах принятия решения // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. 56, №3. С. 468-475.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.07.2016.

#### Հ.Ա. ԹԵՐՉՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Տ.Ռ. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ

## ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ԽՆԴՐՈՒՄ ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ ՈՐՈՆՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ ՉԱՓՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԻՑ

Վերլուծված է էլեկտրական մեքենայի մոդելի օպտիմալացման խնդիրների լուծման դեպքում տարբեր ալգորիթմների պատահական որոնումների արդյունավետությունը, ինչպես նաև դրանց կախվածությունը որոնման տիրույթի չափողականությունից։ Ներկայացված են էլեկտրական մեքենայի մոդելի օպտիմալացման դեպքում համախակի կիրառվող մի շարք ալգորիթմների մեծ թվով փոփոխարկվող փոփոխականներով պատահական որոնումների թվային փորձերը։ Ստացված արդյունքները համեմատվել են տեսականորեն կատարված վերլուծության հետ։

**Առանցքային բառեր.** օպտիմալացման ալգորիթմներ, սինքրոն գեներատոր, օպտիմալության չափանիշ, նպատակային ֆունկցիա, ակտիվ ծավալ։

#### H.A. TERZYAN, H.S. SUKIASYAN, T.R. MELKONYAN

# THE EFFICIENCY DEPENDENCE OF THE RANDOM SEARCH ON THE SPACE DIMENSION AT OPTIMIZING THE ELECTRICAL MACHINES

The efficiencies of different algorithms of the random search at solving the optimization problem of the electrical machine model, as well as their dependence on the space dimension of the search are analyzed. Numerical experiments for optimizing the model of the electrical machine with a great number of varying parameters for some frequently used algorithms of random search are carried out. The obtained numerical results well agree with those of the theoretical analysis.

*Keywords:* optimal algorithms, synchronous generator, optimality criterion, efficiency function, active volume.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН. 2016. Т. LXIX, N3.

#### УДК 621.52+511.52

## С.О. СИМОНЯН, Г.В. АДАМЯН, А.А. АЙВАЗЯН К РЕШЕНИЮ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА A(t)·X(t)+B(t)·X<sup>T</sup>(t)=C(t)

Рассмотрены однопараметрические транспонированные аналоги матричных уравнений типа Сильвестра. Предложены аналитический, а также основанные на дифференциальных преобразованиях Г.Е. Пухова последовательный и параллельный численноаналитические методы их решения. Аналитический метод ограничен в практических приложениях, однако он служит основой для разработки численно-аналитических методов, легко реализуемых средствами современных информационных технологий. Для всех методов получены соответствующие условия однозначной разрешимости рассмотренных матричных уравнений. Приведен модельный пример, на основе решения которого введено понятие неоднозначной разрешимости задачи.

Ключевые слова: однопараметрический транспонированный аналог матричного уравнения, редукция, аналитическое решение, дифференциальные преобразования, последовательный и параллельный численно-аналитические методы, модельный пример, условия однозначной и "неоднозначной разрешимости" задачи.

**Введение.** Вопросы решения непрерывных матричных уравнений Сильвестра

$$A \cdot X + X \cdot B = C \tag{1}$$

(где A, B, C и X - числовые матрицы порядка m, причём X - неизвестная матрица, подлежащая определению) рассмотрены, в частности, в работах [1,2]. Методы решения транспонированных аналогов (1), т.е. матричных уравнений

$$A \cdot X + X^T \cdot B = C, \qquad (2)$$

рассмотрены, в частности, в работах [3-7], а методы решения подобных (2) матричных уравнений

$$A \cdot X + B \cdot X^{T} = C \quad - \tag{3}$$

в работах [8,9].

Методы решения однопараметрических непрерывных матричных уравнений типа Сильвестра

$$A(t) \cdot X(t) + X(t) \cdot B(t) = C(t) \tag{4}$$

(где A(t), B(t), C(t) и X(t) - функциональные матрицы порядка m, причём X(t) - неизвестная матрица, подлежащая определению), соответствующих (1), предложены в работах [10,11], а методы решения однопараметрических транспонированных аналогов

$$A(t) \cdot X(t) + X^{T}(t) \cdot B(t) = C(t), \qquad (5)$$

соответствующих (2), - в работе [12].

В настоящей работе рассматриваются методы решения однопараметрических матричных уравнений типа

$$A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot X^{T}(t) = C(t),$$
(6)

соответствующих (3) и, с первого взгляда, достаточно похожих на (5), однако значительно отличающихся от него по существу.

Редукция и аналитическое решение задачи. Допустим, что однопараметрические матрицы A(t) и B(t) невырожденные на рассматриваемом интервале параметра t. Тогда, умножив (6) на  $A^{-1}(t)$ , получим

$$X(t) = A^{-1}(t) \cdot [C(t) - B(t) \cdot X^{T}(t)],$$

откуда

$$X^{T}(t) = C^{T}(t) \cdot A^{-T}(t) - X(t) \cdot B^{T}(t) \cdot A^{-T}(t).$$
<sup>(7)</sup>

С другой стороны, из того же уравнения (6) при умножении его на матрицу  $B^{-1}(t)$  имеем

$$X^{T}(t) = B^{-1}(t) \cdot [C(t) - A(t) \cdot X(t)],$$

откуда

$$X^{T}(t) = B^{-1}(t) \cdot C(t) - B^{-1}(t) \cdot A(t) \cdot X(t).$$
(8)

Сопоставление (7) и (8) приводит к следующему:

$$B^{-1}(t) \cdot A(t) \cdot X(t) - X(t) \cdot B^{T}(t) \cdot A^{-T}(t) = B^{-1}(t) \cdot C(t) - C^{T}(t) \cdot A^{-T}(t)$$

или

$$P(t) \cdot X(t) - X(t) \cdot Q(t) = B^{-1}(t) \cdot C(t) - C^{T}(t) \cdot A^{-T}(t),$$
(9)

где  $P(t) = B^{-1}(t) \cdot A(t)$ , или

$$A(t) = B(t) \cdot P(t), \tag{10}$$

а  $Q(t) = A^{-1}(t) \cdot B(t)$ или

$$B(t) = A(t) \cdot Q(t). \tag{11}$$

Очевидно, что при соотношениях (10) и (11) имеет место условие

$$P(t) \cdot Q(t) = Q(t) \cdot P(t) = E, \qquad (12)$$

где Е - единичная матрица порядка т.

Теперь в соответствии с результатами, полученными в [10], имеем

$$[P(t) \otimes E - E \otimes Q(t)] \cdot \hat{X}(t) = D(t) \cdot \hat{X}(t) = [B^{-1}(t) \cdot C(t) - C^{T}(t) \cdot A^{-T}(t)] = \hat{D}_{1}(t), \quad (13)$$

откуда при условии гиперрегулярности кронекеровой гиперматрицы *D*(*t*) получим решение исходной задачи в виде гипервектора

$$\hat{X}(t) = D^{-1}(t) \cdot \hat{D}_{1}(t).$$
 (14)

Таким образом, условием однозначной разрешимости задачи (6) является одновременное выполнение:

- условия гиперрегулярности:

$$rangD(t) = m^2; (15a)$$

- условия регулярности:

$$rangA(t) = m; \tag{156}$$

- условия регулярности:

$$angB(t)=m.$$
 (15b)

Что касается практического применения аналитического решения (14), то, естественно, оно весьма ограничено из-за присутствия в нем функциональных обратных матриц  $A^{-1}(t)$  и  $B^{-1}(t)$ , а также кронекеровой обратной матрицы  $D^{-1}(t)$ . Поэтому перейдём к более эффективным численно-аналитическим методам, основанным на дифференциальных преобразованиях [13].

r

**1.** Последовательный численно-аналитический метод решения. Предположим, что в центре аппроксимации  $t=t_v$  для матриц A(t), B(t), C(t), $A^{-1}(t)$ , $B^{-1}(t)$ и X(t) имеют место дифференциальные преобразования

$$A(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K}A(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{v}}, \quad K = \overline{0,\infty} \quad \overline{\bullet} \quad A(t) = \chi_{1}(t,t_{v},H,A(K)), \quad K = \overline{0,\infty}), \quad (16)$$

$$B(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K}B(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{v}}, \quad K = \overline{0,\infty} \quad \overline{\bullet} \quad B(t) = \chi_{2}(t,t_{v},H,B(K), K = \overline{0,\infty}), \quad (17)$$

$$C(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K}C(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{\nu}}, \quad K = \overline{0,\infty} \quad \overline{\bullet} \quad C(t) = \chi_{3}(t,t_{\nu},H,C(K), K = \overline{0,\infty}), \quad (18)$$

$$A^{-1}(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K} A^{-1}(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{\nu}}, K = \overline{0,\infty} - A^{-1}(t) = \chi_{4}(t,t_{\nu},H,A^{-1}(K),K=\overline{0,\infty}), (19)$$

$$B^{-1}_{\nu}(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K}B^{-1}(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{\nu}}, K = \overline{0,\infty} - B^{-1}(t) = \chi_{5}(t,t_{\nu},H,B^{-1}_{\nu}(K),K=\overline{0,\infty}), (20)$$

$$X(K) = \frac{H^{K}}{K!} \cdot \frac{d^{K}X(t)}{dt^{K}} \Big|_{t=t_{\nu}}, K = \overline{0,\infty} \quad \overline{\bullet} \quad X(t) = \chi_{6}(t,t_{\nu},H,X(K)), K = \overline{0,\infty}).$$
(21)

В (16)-(21) матрицы  $A(K), B(K), C(K), A^{-1}_{\vee}(K), B^{-1}_{\vee}(K)$  и X(K) - матричные дискреты матриц  $A(t), B(t), C(t), A^{-1}(t), B^{-1}(t)$  и X(t) соответственно (заметим, что  $A^{-1}(K)$  и  $B^{-1}(K)$  - матричные дискреты обратных матриц  $A^{-1}(t)$  и  $B^{-1}(t)$ , а не обратные матрицы матричных дискрет A(K) и B(K));  $K = \overline{0, \infty}$  - целочисленный аргумент; H - масштабный коэффициент; символ  $\overline{\cdot}$  - знак перехода из области оригиналов в область дифференциальных изображений и наоборот;  $\chi_1(\cdot) - \chi_6(\cdot)$  - некоторые аппроксимирующие функции, восстанавливающие оригиналы  $A(t), B(t), C(t), A^{-1}(t), B^{-1}(t)$  и X(t) соответственно.

Теперь, с учётом правил алгебры дифференциальных преобразований [13], соотношения (10) и (11) переведём в область дифференциальных изображений.

Имея в виду (10), получим:

<u>при *K=0*:</u>

$$A(0) = B(0) \cdot P(0),$$

откуда

$$P(0) = B^{-1}(0) \cdot A(0), \tag{22}$$

если, конечно, имеет место условие регулярности rangB(0)=m;

<u>при *K=1*:</u>

$$A(1) = B(1) \cdot P(0) + B(0) \cdot P(1),$$

откуда

$$P(1) = B^{-1}(0) \cdot [A(1) - B(1) \cdot P(0)];$$
(23)

<u>при *K*=2:</u>

$$A(2) = B(2) \cdot P(0) + B(1) \cdot P(1) + B(0) \cdot P(2),$$

откуда

$$P(2) = B^{-1}(0) \cdot [A(2) - B(2) \cdot P(0) - B(1) \cdot P(1)];$$
(24)

•••

<u>при К=К:</u>

$$A(K) = \sum_{l=0}^{K} B(l) \cdot P(K-l),$$

откуда

$$P(K) = B^{-1}(0) \cdot \left[ A(K) - \sum_{l=1}^{K} B(l) \cdot P(K-l) \right].$$
(25)

Аналогично, имея в виду (11), получим:

<u>при *K=0*:</u>

$$B(0) = A(0) \cdot Q(0),$$

откуда

$$Q(0) = A^{-1}(0) \cdot B(0), \tag{26}$$

если, конечно, имеет место условие регулярности *rangA(0)=m;* <u>при *K=1*:</u>

 $B(1) = A(1) \cdot Q(0) + A(0) \cdot Q(1),$ 

откуда

$$Q(1) = A^{-1}(0) \cdot [B(1) - A(1) \cdot Q(0)];$$
(27)

<u>при *K*=2:</u>

$$B(2) = A(2) \cdot Q(0) + A(1) \cdot Q(1) + A(0) \cdot Q(2),$$

откуда

$$Q(2) = A^{-1}(0) \cdot [B(2) - A(2) \cdot Q(0) - A(1) \cdot Q(1)];$$
(28)

•••

$$B(K) = \sum_{l=0}^{K} A(l) \cdot Q(K-l),$$
308

откуда

$$Q(K) = A^{-1}(0) \cdot \left[ B(K) - \sum_{l=1}^{K} A(l) \cdot Q(K-l) \right].$$
 (29)

Теперь, имея в виду соотношения (22) - (25) и (26) - (29), переведём гиперматрично-гипервекторную линейную систему (13) из области оригиналов в область дифференциальных изображений. Получим:

<u>при *K=0*:</u>

$$[P(0) \otimes E - E \otimes Q(0)] \cdot \hat{X}(0) = D(0,0) \cdot \hat{X}(0) =$$
  
=  $[B^{-1}_{\vee}(0) \cdot C(0) - C^{T}(0) \cdot A^{-T}_{\vee}(0)] = \hat{D}_{1}(0),$  (30)

откуда

$$\hat{X}(0) = D^{-1}(0,0) \cdot \hat{D}_1(0), \tag{31}$$

если, конечно, имеет место условие гиперрегулярности

$$rangD(0,0)=m^2; \tag{32}$$

\_

<u>при *K=1*:</u>

$$[P(0) \otimes E - E \otimes Q(0)] \cdot \hat{X}(1) + [P(1) \otimes E - E \otimes Q(1)] \cdot \hat{X}(0) =$$
  
=  $D(0,0) \cdot \hat{X}(1) + D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(0) = B^{-1}_{\vee} (1) \cdot C(0) + B^{-1}_{\vee} (0) \cdot C(1) - C^{T}(1) \cdot A^{-T}_{\vee} (0) - C^{T}(0) \cdot A^{-T}_{\vee} (1) = \hat{D}_{1}(1),$   
(33)

откуда

$$\hat{X}(1) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{D}_{1}(1) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(0)];$$
(34)

<u>при K=2:</u>

$$[P(0) \otimes E - E \otimes Q(0)] \cdot \hat{X}(2) + [P(1) \otimes E - E \otimes Q(1)] \cdot \hat{X}(1) + + [P(2) \otimes E - E \otimes Q(2)] \cdot \hat{X}(0) = D(0,0) \cdot \hat{X}(2) + D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(1) + + D(2,0;0,2) \cdot \hat{X}(0) = B^{-1}_{\vee} (2) \cdot C(0) + B^{-1}_{\vee} (1) \cdot C(1) + B^{-1}_{\vee} (0) \cdot C(2) - - C^{T}(2) \cdot A^{-1}_{\vee} (0) - C^{T}(1) \cdot A^{-1}_{\vee} (1) - C^{T}(0) \cdot A^{-1}_{\vee} (2) = \hat{D}_{1}(2),$$
(35)

откуда

$$\hat{X}(2) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{D}_{1}(2) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(1) - D(2,0;0,2) \cdot \hat{X}(0)];$$
(36)

•••

#### <u>при *К=К*:</u>

$$\begin{split} & [P(0) \otimes E - E \otimes Q(0)] \cdot \hat{X}(K) + [P(1) \otimes E - E \otimes Q(1)] \cdot \hat{X}(K-1) + \dots \\ & \dots + [P(K-1) \otimes E - E \otimes Q(K-1)] \cdot \hat{X}(1) + [P(K) \otimes E - E \otimes Q(K)] \cdot \hat{X}(0) = \\ & = D(0,0) \cdot \hat{X}(K) + D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(K-1) + \dots + D(K-1,0;0,K-1) \cdot \hat{X}(1) + \\ & + D(K,0;0,K) \cdot \hat{X}(0) = B^{-1}_{\vee} (K) \cdot C(0) + B^{-1}_{\vee} (K-1) \cdot C(1) + \dots + B^{-1}_{\vee} (1) \times \\ & \times C(K-1) + B^{-1}_{\vee} (0) \cdot C(K) - C^{T}(K) \cdot A^{-1}_{\vee} (0) - C^{T}(K-1) \cdot A^{-1}_{\vee} (1) - \dots \\ & \dots - C^{T}(1) \cdot A^{-1}_{\vee} (K-1) - C^{T}(0) \cdot A^{-1}_{\vee} (K) = \hat{D}_{1}(K), \end{split}$$
(37)

откуда

$$\hat{X}(K) = D^{-1}(0,0) \cdot [\hat{D}_{1}(K) - D(1,0;0,1) \cdot \hat{X}(K-1) - \dots \dots - D(K-1,0;0,K-1) \cdot \hat{X}(1) - D(K,0;0,K) \cdot \hat{X}(0)].$$
(38)

Таким образом, имея матричные дискреты (23), (26), (28) и (30), в соответствии с (21) можно найти решение X(t) исходной задачи (6) или матричного уравнения (9). Очевидно также, что условием однозначной разрешимости задачи (6) является одновременное выполнение:

- условия гиперрегулярности (32); (39а)

- условий регулярности:

$$rang A^{-1}(K) = m, \forall K = \overline{0, \infty};$$
(396)

- условий регулярности:

$$rang B^{-1}_{\vee}(K) = m, \forall K = \overline{0, \infty}.$$
(39b)

**2. Параллельный численно-аналитической метод решения.** Объединив соотношения (30), (33), (35) и (37), получим следующее гиперматрично-гипервекторное представление:

	D(0,0)	0	0		0		$\hat{X}(0)$	(.	$\hat{D}_{1}(0)$	(40)
	D(1,0;0,1)	D(0,0)	0		0		$\hat{X}(1)$	-	$\overline{\hat{D}_1(1)}$	(40)
	D(2,0;0,2)	D(1,0;0,1)	D(0,0)		0	×	$\hat{X}(2)$	=	$\hat{D}_{1}(2)$	
	:	:	:	·.	:		<u> </u>		<u>.</u>	
	$\overline{D(K,0;0,K)}$	D(K-1,0;0, K-1)			D(0,0)		$\hat{X}(K)$	1	$\hat{D}_{1}(K)$	
$(K+1)\cdot m^2 \times (K+1)\cdot m^2$				(K	(+1	)· $m^2 \times l$		$(K+1) \cdot m^2 \times I$		

или в компактной записи:

$$D(\bullet) \cdot \hat{X}(\bullet) = \hat{D}_1(\bullet), \tag{41}$$

откуда

$$\widehat{X}(\bullet) = D^{-1}(\bullet) \cdot \widehat{D}_1(\bullet), \tag{42}$$

если, конечно, имеет место условие гиперрегулярности

$$rangD(\bullet) = (K+1) \cdot m^2, \tag{43}$$

немедленно следующее из условия гиперрегулярности (32).

Далее нетрудно убедиться, что гиперматрица

$$D^{-1}(\bullet) = \begin{bmatrix} \frac{D_0 & 0 & 0 & \dots & 0}{D_1 & D_0 & 0 & \dots & 0} \\ \frac{D_2 & D_1 & D_0 & \dots & 0}{\dots & \dots & \ddots & \vdots} \\ \frac{D_K & D_{k-1} & D_{k-2} & \dots & D_0 \end{bmatrix},$$
(44)

где

$$D_{0} = D^{-1}(0,0) = D^{-1}(0,0) \cdot E = D^{-1}(0,0) \cdot \overline{D}_{0},$$

$$D_{1} = -D^{-1}(0,0) \cdot [D(1,0;0,1) \cdot D^{-1}(0,0)] = D^{-1}(0,0) \cdot \overline{D}_{1},$$

$$D_{2} = -D^{-1}(0,0) \cdot [D(2,0;0,2) \cdot D^{-1}(0,0) - (D(1,0;0,1) \cdot D^{-1}(0,0))^{2}] = D^{-1}(0,0) \cdot \overline{D}_{2},$$

$$(45)$$

$$D_{K} = -D^{-1}(0,0) \cdot \sum_{P=1}^{K} D(P) \cdot D_{K-P} = D^{-1}(0,0) \cdot \overline{D}_{k}.$$

Таким образом, имея гипервектор (42), в соответствии с правой частью (21) можно восстановить решение X(t) исходной задачи (6) (или (9)). Очевидно также, что при использовании параллельного численно-аналитического метода для однозначной разрешимости задачи (6) должны быть одновременно выполнены:

- условие гиперрегулярности (43); (46a)
- условия регулярности (39б); (46б)
- условия регулярности (39в). (46в)

Модельный пример. Пусть имеется матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & t \end{bmatrix} \cdot X(t) + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -t & -t \end{bmatrix} \cdot X^{T}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -2t^{2} & 0 \end{bmatrix}$$

Тогда

$$A^{-1}(t) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1/t \end{bmatrix}, B^{-1}(t) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1/t \end{bmatrix},$$
$$A^{-1}(t) \cdot B(t) = \begin{bmatrix} (-1+t) & t \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, B^{-1}(t) \cdot A(t) = \begin{bmatrix} -1 & -t \\ 1 & (-1+t) \end{bmatrix},$$

$$B^{-1}(t) \cdot \mathcal{C}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0\\ 2t & 0 \end{bmatrix}, \mathcal{C}^{T}(t) \cdot A^{-T}(t) = \begin{bmatrix} 2t^{2} & -2t\\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

а гиперматрично-гипервекторное уравнение (13) имеет вид

-t	-t	-t	0		$\left(x_{11}(t)\right)$		$\left(-2t^{2}\right)$	
1	0	0	-t		$x_{12}(t)$	_	2 <i>t</i>	
1	0	0	-t	•	$\overline{x_{21}(t)}$	=	2t	
0	1	1	t		$(x_{22}(t))$		0	J

Очевидно, что матрица этой системы D(t) особенная, ввиду чего нарушено условие гиперрегулярности (15а) об однозначной разрешимости задачи. Иными словами, эта задача ввиду ее недоопределенности (2-е и 3-е уравнения одинаковы) обладает бесчисленным множеством решений. В частности, такими решениями являются гипервекторы (матрицы), в абсолютной точности которых удостовериться нетрудно их подстановкой в исходное матричное уравнение:

$$\hat{X}_1(t) = \begin{pmatrix} t \\ t \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \Rightarrow X_1(t) = \begin{bmatrix} t & t \\ 0 & -1 \end{bmatrix} u \quad \hat{X}_2(t) = \begin{pmatrix} 4t \\ -2t \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} \Rightarrow X_2(t) = \begin{bmatrix} 4t & -2t \\ 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

Ввиду отмеченного обстоятельства естественно введение следующего понятия о неоднозначной разрешимости матричного уравнения (6).

Определение. Если кронекерова гиперматрица D(t) эквивалентной задачи (13) вырожденная, т.е. нарушено условие гиперрегулярности (15а)  $(rangD(t) < m^2)$ , а матрицы A(t) и B(t) невырожденные, т.е. имеют место условия регулярности (15б) и (156), то исходная задача (6) разрешима неоднозначно.

Заключение. Таким образом, для решения однопараметрических транспонированных аналогов матричных уравнений типа (6) в настоящей работе предложены аналитический, а также приближенные последовательный и параллельный численно-аналитические методы, основанные на дифференциальных преобразованиях. При них решение исходной задачи сначала сводится к некоторым рекуррентным численным процедурам, которые могут быть эффективно реализованы средствами современных информационных технологий [14]. Восстановление непрерывного решения X(t) выполняется достаточно легко - применением некоторого обратного дифференциального преобразования (21).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 2010. 560 с.
- 2. Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений. М.: Наука, 1984.- 190 с.
- 3. **Piao F.X., Zhang Q.I., Wang Z.F.** The solution to matrix equation A·X+X<sup>T</sup>·C=B // Journal of the Franklin Institute.- 2007.- 344.- P.1056-1062.
- 4. **Икрамов Х.Д., Воронцов Ю.О.** Об однозначной разрешимости матричного уравнения А·Х+Х<sup>T</sup>·C=В в сингулярном случае // Доклады РАН.- 2011.- Т. 438, №5.- С. 599-602.
- 5. Воронцов Ю.О., Икрамов Х.Д. Численный алгоритм для решения матричного уравнения А·Х+Х<sup>T</sup>·C=В // Журнал вычислительный математики и математической физики.- 2011.- Т. 51, № 5.- С.739-747.
- Воронцов Ю.О., Икрамов Х.Д. О численном решении матричных уравнений A·X+X<sup>T</sup>·C=B и X+ A·X<sup>T</sup>·C=B с прямоугольными коэффициентами A и B // Записки научных семинаров ПОМО.- 2012.- Т. 405.- С.54-58.
- 7. Воронцов Ю.О., Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений A·X+X<sup>T</sup>·C=В и A·X+X\*·C=В в самосопряжённом случае // ЖВМ и МФ.- 2014. – T. 54, № 2.- С.179-182.
- 8. **Икрамов Х.Д. Воронцов Ю.О.** Матричные уравнения А·Х+Х<sup>Т</sup>·С=В и А·Х+Х\*·С=В // Доклады РАН.- 2013.- Т.449, № 5.- С.513-515.
- 9. Воронцов Ю.О., Икрамов Х.Д. Численные алгоритмы для решения матричных уравнений А·Х+Х<sup>T</sup>·C=В и А·Х+Х\*·C=В // Журнал вычислительной математики и математической физики.- 2013.- Т.53, № 6. С. 843-852.
- 10. Симонян С.О. Методы решения однопараметрических матричных непрерывных уравнений типа Сильвестра A(t)·X(t)+X(t)·B(t)=C(t) // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН. -2015.- Т. LXVIII, № 3.- С.370-380.
- 11. Симонян С.О. Декомпозиционные методы решения однопараметрических матричных непрерывных уравнений типа Сильвестра A(t)·X(t)+X(t)·B(t)=C(t) //Известия НАН РА и НПУА. Сер.ТН.- 2015.- Т. LXVIII, №4. С.497-510.
- 12. Симонян С.О. К решению однопараметрических транспонированных аналогов матричных уравнений типа Сильвестра A(t)·X(t)+X<sup>T</sup>(t)·B(t)=C(t) // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2016.-Т.LXIX, № 1.- С.49-60.
- 13. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений.- Киев: Наукова думка, 1984.- 420с.
- 14. **Straustrup B.** The C++ programming language. 4<sup>th</sup> edition. Boston: Addison-Wesley Professional, 2013.- 1368 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 09.04.2016.

#### Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Գ.Վ. ԱԴԱՄՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՅՎԱՉՅԱՆ

### $A(t)\cdot X(t)+B(t)\cdot X^{T}(t)=C(t)$ SPAP UPUAULUUESLUAUU UUSLPAUSPU לעקעטערחדיטרד בחדסטעט קברעדברפעב

Դիտարկվել են Միլվեստրի տիպի միապարամետրական մատրիցային հավասարումների տրանսպոնացված նմանակները։ Առաջարկվել են դրանց լուծման անալիտիկ, ինչպես նաև Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա հիմնված հաջորդական և զուգահեռ թվաանալիտիկ մեթոդներ։ Անալիտիկ մեթոդը սահմանափակված է գործնական կիրառություններում, սակայն այն հիմք է հանդիսանում ժամանակակից տեղեկատվական տեխնոլոգիաների միջոցներով հեշտությամբ իրականացվող թվաանալիտիկ մեթոդների մշակման համար։ Բոլոր մեթոդների համար ստացվել են դիտարկված մատրիցային հավասարումների միարժեքորեն լուծելիության համապատասխան պայմանները։ Ներկայացված է մոդելային օրինակ, որի լուծման հիման վրա ներմուծվել է խնդրի «ոչ միարժեքորեն լուծելիություն» հասկացությունը։

**Առանցքային բառեր.** միապարամետրական մատրիցային հավասարման տրանսպոնացված նմանակ, ռեդուկցիա, անալիտիկ լուծում, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, հաջորդական և զուգահեռ թվաանալիտիկ մեթոդներ, մոդելային օրինակ, խնդրի միարժեք և ոչ միարժեք լուծելիության պայմաններ։

## S.H. SIMONYAN, G.V. ADAMYAN, A.A. AYVAZYAN

# SOLUTION OF ONE-PARAMETRIC MATRIX EQUATION OF THE $A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot X^T(t) = C(t) \text{ TYPE}$

One-parametric transposed analogs of matrix Silvester – type equations of the problem are considered. An analytical, as well as serial and parallel numerical methods are proposed for their solution based on the differential transformations of G.E.Pukhov. The analytical method is limited in practical applications, however, it serves as a basis for the development of numerical-analytical methods easily implemented by means of modern information technologies. Appropriate conditions of unique solvability for the considered matrix equations are obtained for all the methods. A model example is introduced, and on the basis of its solution, the concept of the non-unique solvability is presented.

*Keywords:* one-parametric transposed analog of matrix equation, reduction, analytic solution, differential transformations, parallel and serial numerical-analytical methods, model example, unique and non-unique solvability conditions.

#### ISSN 0002-306X. 24UU h 2U12 Stn. Sthub. ghm. utphw. 2016. 2. LXIX, N 3.

#### Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՇԱՀԲԱՉՅԱՆ, Ն.Վ. ԱՊԵՏՅԱՆ

#### ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԿԱԽՈՑԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ

Մշակվել է Էլեկտրամագնիսական կախոցի, մասնավորապես, մագնիսական բարձով արագընթաց գնացքների կախոցի ավտոմատացված նախագծման համակարգը։ Ձևակերպվել և լուծվել են Էլեկտրամագնիսական կախոցի կառավարման փաթույթի օպտիմալ նախագծման և կախոցի կառավարման խնդիրները։

*Առանցքային բառեր.* Էլեկտրամագնիսական կախոց, մագնիսական բարձ, կառավարման փաթույթ, ավտոմատացված նախագծման համակարգ։

Տեխնոլոգիական գործընթացներում, ավտոմատացման ու կառավարման համակարգերում մեխանիկական բեռը օդում կախված վիձակում պահելու նպատակով օգտագործվում են մագնիսական կախոցներ, որոնք մարմնի վրա ազդող ծանրության ուժը հավասարակշռում են էլեկտրամագնիսական ուժով։ Մագնիսական կախոցները կիրառվում են, մասնավորապես, ժամանակակից տրանսպորտային համակարգերում՝ արագընթաց գնացքներում՝ գնացքը շարժուղուց վեր բարձրացնելու և օդում կախված վիձակում պահելու և դրանով իսկ շփման ուժի ազդեցությունը վերացնելու նպատակով [1]։ Կախոցների շնորհիվ գնացքը, գծային էլեկտրաշարժիչով կամ որևէ այլ բնույթի շարժիչով ստեղծված քարշիչ ուժի ազդեցությամբ, ոչ թե ընթանում է ռելսերի վրայով, այլ թռչում-ձախրում է շարժուղու վրայով։ Շարժուղու և օդում կախված գնացքի միջն առաջացած օդային շերտը, որին «հենվում-թիկնում» է գնացքը, պայմանականորեն անվանվում է «մագնիսական բարձ»։

Շահագործվող արագընթաց գնացքներում կիրառվում են էլեկտրամագնիսական (EMS համակարգ) և էլեկտրադինամիկական (EDS համակարգ) մագնիսական կախոցներ [1]։

էլեկտրամագնիսական կախոցներով (EMS) աշխատող գնացքներում ձգող ուժը, որը շարժուղուց վեր է բարձրացնում գնացքը, ստեղծվում է էլեկտրամագնիսական դաշտի շնորհիվ։ Այս դեպքում գնացքը շարժվում է T-աձև շարժուղու վրայով։ Ձգող- բարձրացնող էլեկտրամագնիսները տեղադրվում են գնացքի ու շարժուղու եզրամասերում։ EMS տեխնոլոգիայի հիմնական առանձնահատկությունն այն է, որ կախոցի աշխատանքը պետք է կառավարվի՝ վերահսկվի և կարգավորվի ավտոմատացված համակարգի միջոցով։ Կախոցն աշխատում է հաստատուն հոսանքի մարտկոցներով, որոնք տեղադրված են գնացքի վրա և լիցքավորվում են գծային գեներատորով։ EMS համակարգն ունի համեմատաբար պարզ տեխնոլոգիական լուծումներ և բավականին փոքր արժեք։ Էլեկտրամագնիսական կախոցներով է աշխատում, մասնավորապես, Շանհայի արագընթաց գնացքը՝ Transrapid SMT-ը, որը մշակվել է Գերմանիայում 2003թ. և զարգացնում է 501  $\muu/d$  արագություն։ Նկ.1 -ում ներկայացված են Էլեկտրամագնիսական կախոցով գնացքի պայմանական սխեման և կախոցի կառուցվածքային սխեման։



Նկ. 1. Էլեկտրամագնիսական կախոցով արագընթաց գնացքի ա) պայմանական, բ) կառուցվածքային սխեման.

1- շարժուղին հենասյան հետ, 2- գնացքը, 3- էլեկտրամագնիսական կախոցի շարժական մագնիսալարը, 4- կախոցի կառավարման փաթույթը, 5- ուղղանկյուն հատույթով պողպատե գծաշերտը

Ուղղանկյուն հատույթով պողպատե գծաշերտը կախոցի համար խարսխի դեր է կատարում (այսուհետ՝ խարիսխ)։ Կախոցի կառավարման փաթույթը՝ ՍԱ սնման աղբյուրին է միացվում Ա անջատիչի միջոցով (նկ.1, բ)։ Փաթույթի I հաստատուն հոսանքի արժեքը պայմանավորված է փաթույթի R<sub>փ</sub> էլեկտրական դիմադրության և սնման աղբյուրի ելքային Ս<sub>ս</sub> լարման արժեքներով.

$$I = \frac{U_u}{R_{th}} :$$
 (1)

Հոսանքը ստեղծում է մագնիսական դաշտ, որի Փ մագնիսական հոսքը հիմնականում փակվում է կախոցի 3 մագնիսալարով ու 5 խարսխով և դրանց միջև առկա ծ չափով օդային բացակով (նկ.1, բ)։ էլեկտրամագնիսի 1 մագնիսալարի և խարսխի միջև առաջանում է ձգող էլեկտրամագնիսական Բ<sub>է</sub> ուժը, որի արժեքը կարելի է որոշել էներգետիկական հայտնի բանաձևով [2].

$$P_{\xi} = -\frac{1}{2} (IW)^2 \frac{d\Lambda}{d\delta}, \qquad (2)$$

որտեղ W-ն կառավարման փաթույթի գալարների քանակն է, Λ-ն՝ համակարգի լրիվ մագնիսական հաղորդականությունը։

էլեկտրամագնիսական Ք<sub>է</sub> ուժը «ձգտում է» փոքրացնել աշխատանքային օդային բացակի ծ չափը՝ ձգել և անշարժ խարսխին մոտեցնել մագնիսալարը։ Այս տեղաշարժի շնորհիվ է շարժուղուց վեր բարձրանում գնացքը։ Այդ ուժին հակազդում է P<sub>գ</sub> ուժը՝ գնացքի կշռի այն մասը, որը համապատասխանում է մեկ առանձին կախոցին։ Հետևապես, կախոցը Բ<sub>է</sub> ձգող ուժի ազդեցությամբ վեր կբարձրանա միայն այն դեպքում, եթե ձգող ուժը գերազանցի հակազդող ուժը.

$$P_{t} > P_{q} : \tag{3}$$

Այս պայմանը ներկայացնենք գրաֆիկով։ Էլեկտրամագնիսի քարշային և հակազդող բնութագրերը տրված են նկ.2 ա - ում. քարշային բնութագիրը ձգող էլեկտրամագնիսական  $P_t$  ուժի արժեքի կախվածությունն է բացակի ծ չափից՝  $P_t = f(\delta)$ , իսկ հակազդող բնութագիրը՝ մեխանիկական հակազդող  $P_4$  ուժի կախվածությունը ծչափից՝  $P_q = f(\delta)$  [2]։ Գրաֆիկի վրա  $P_4$  -ը հակազդող ուժի հնարավոր նվազագույն արժեքն է, իսկ  $P_{4^+}$  -ը՝ առավելագույն։ I<sub>1</sub> -ը հոսանքի այն արժեքն է, որի դեպքում կախոցը բանեցվում է։



 $U_h$ . 2. Чифилдի էլեկտրամագնիսական համակարգի քարշային  $P_t = f(\delta)$  և հակազդող  $P_h = f(\delta)$ гնпւթագրերը. ա) гանեցման պայմանը և г) опшуһն гացակի չափի ապահովման պայմանը

Նկարից հետևում է, որ կախոցի փաթույթի հոսանքի I<sub>1</sub> արժեքի դեպքում Բ<sub>է</sub> ուժի արժեքը օդային բացակի ամբողջ երկարությամբ գերազանցում է հակազդող ուժի արժեքը։ Սա նշանակում է, որ եթե մագնիսալարի շարժումը դեպի խարիսխ (դեպի δ<sub>վ</sub> վերջնական բացակ) չարգելակվի, ապա մագնիսալարի բևեռը կկպչի խարսխին, և օդում գտնվող գնացքը կամ չի կարողանա շարժվել, կամ կվթարվի։ Նշված երևույթը կանխելու համար անհրաժեշտ է մագնիսալարը, ձանապարհին δ<sub>կ</sub> բացակին համապատասխանող որևէ դիրքում, կանգնեցնել այնպես, որ գնացքը շարժուղու նկատմամբ գտնվի նախընտրելի բարձրության վրա և թույլատրելի սահմաններում պահպանի այդ բարձրությունը։ Խնդիրը կարելի է լուծել, եթե մագնիսալարի δ<sub>կ</sub> բացակին համապատասխանող դիրքում հավասարակշովեն ձգող Բ<sub>է</sub> և հակազդող Բ<sub>հ</sub> ուժերը։ (2) բանաձևի համաձայն՝ սա կարելի է իրագործել՝ փոքրացնելով կախոցի փաթույթի I հոսանքի արժեքն այնքան, որ  $\delta_{ij}$  բացակի համար ստանանք  $P_{t} = P_{q}$  պայմանը, որը գրաֆիկորեն ներկայացված է նկ.2 բ-ում։ Գրաֆիկի վրա նշված են նաև բացակի արժեքի թույլատրելի առավելագույն՝  $\delta_{ij+}$  և նվազագույն՝  $\delta_{ij-}$  արժեք-ները։

Նշենք, որ հոսանքի արժեքի որոշակի օրինաչափությամբ փոփոխությունը՝ կախոցի բանեցման ու կախոցի աշխատանքի կառավարման նպատակով, հնարավոր կլինի կատարել, եթե հոսանքի յուրաքանչյուր հանձնարարված արժեքի դեպքում հայտնի լինի Ք<sub>է</sub> (ծ) կախվածությունը։ Սա կարելի է իրագործել կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելի առկայության դեպքում, որի համաձայն կմշակվի կախոցի ավտոմատացված նախագծման համակարգը, և արդյունքում՝ կստեղծվի կախոցի կայուն աշխատանքն ապահովող կառավարման համակարգը։

Կախոցի էլեկտրամագնիսական համակարգի մաթեմատիկական մոդելը հեղինակների կողմից մշակվել է կախոցի մագնիսական դաշտի FEMM միջավայրում [3]՝ թվային մոդելավորման արդյունքների վերլուծության Ճանապարհով, էլեկտրամագնիսական համակարգերի հաշվարկի ու նախագծման շղթայական մեթոդների [4, 5] կիրառմամբ, մագնիսալարի ու խարսխի նյութի (պողպատ) մագնիսական հատկությունների ոչ գծային բնույթի հաշվառմամբ, նպատակ ունենալով ծ-ի ընթացիկ արժեքների համար բացահայտել Ք ուժի և կառավարման փաթույթի F=IW մագնիսաշարժ ուժի (ՄՇՈՒ) փոխադարձ կապը։

Մագնիսական կախոցի ավտոմատացված նախագծման համակարգը մշակելիս ելակետային են ընդունվել հետևյալ հիմնական նախնական տվյալները.

 էլեկտրամագնիսի (մագնիսալարի) վրա գործող P<sub>4</sub> հակազդող ուժի արժեքը և, δ -ից կախված, դրա փոփոխության օրինաչափությունը (հակազդող բնութագիր),

2. սնման լարման անվանական արժեքը,

3. աշխատանքային միջավայրի պայմանները,

4. էլեկտրամագնիսի աշխատանքի բնույթը (ռեժիմը)։

Ավտոմատացված նախագծման համակարգը (ԱՆՀ) մշակելիս դիտարկվել և կախոցի մաթեմատիկական մոդելի հիման վրա ու Էլեկտրամագնիսական համակարգերի հաշվարկի և նախագծման հայտնի մեթոդների [4-6] կիրառմամբ լուծվել են Էլեկտրամագնիսական համակարգերի նախագծման հետևյալ խնդիրները.

 Կախոցի բոլոր հանգույցների չափերի որոշում, պողպատե տեղամասերի (մագնիսալար և խարիսխ) նյութի ընտրություն, Բ<sub>է</sub> ձգող էլեկտրամագնիսական ուժի և կախոցի բանեցման հոսանքի (ՄՇՈՒ-ի) արժեքների որոշում (էլեկտրամագնիսի նախագծային հաշվարկ)։

2. Կառավարման փաթույթի հոսանքի (ՄՇՈՒ-ի) հանձնարարված արժեքների համար Ք<sub>է</sub> ուժի արժեքների որոշում և քարշային բնութագրերի կառուցում (ստուգողական հաշվարկ)։  Կառավարման փաթույթի չափերի և հաղորդալարի տեսակի ընտրություն, գալարների քանակի, հզորության, ջերմաստիձանի որոշում։

ԱՆՀ-ում վերոհիշյալ բոլոր խնդիրները լուծվում են փոխհամաձայնեցված, անհրաժեշտության դեպքում՝ հաշվարկված արժեքների Ճշգրտման հնարավորությամբ։

Նախագծման համակարգը մշակելիս առաջնային է համարվել կախոցի ծախսած էլեկտրական էներգիայի հնարավորինս փոքր ծախսը։ Այս նպատակով ձևակերպվել է կառավարման փաթույթի օպտիմալացման խնդիրը, որում որպես օպտիմալացման չափանիշ ընտրվել է էլեկտրական հզորության մինիմալացումը։

Խնդիրը լուծվել է կառավարման փաթույթի պարամետրերը փոփոխելու Հանապարհով։ Որպես փոփոխականներ ընտրվել են փաթույթի հաղորդալարի տրամագիծը և սնման լարումը։ Այսպես, պղնձե մեկուսացված փաթույթային հաղորդալարերը արտադրվում են որոշակի տրամագծերով, որոնք տրվում են տեղեկագրքերում, իսկ սնման լարման համար կարող են կիրառվել գործող ստանդարտներով սահմանված, օրինակ, հետևյալ արժեքները՝ 110 գ, 220 գ, 400 գ և 600 գ։

Այսպիսով, օպտիմալացման խնդրի ձևակերպումը հետևյալն է. տրված ՄՇՈՒ-ի արժեքի և մագնիսալարի չափերի պայմաններում գտնել հաղորդալարի *d<sub>հաղ</sub>* տրամագծի և փաթույթի *Ս<sub>ս</sub>* սնման լարման այնպիսի արժեքներ, որոնց դեպքում կբավարարվեն սահմանափակումները, և կապահովվի փաթույթի նվազագույն էլեկտրական հզորությունը։

Խնդրի մաթեմատիկական մոդելն ունի հետևյալ տեսքը՝

- նպատակային ֆունկցիան

$$P(d_{huu\eta}, U_u) \rightarrow \min_{d_{huu\eta}, U_u},$$

- սահմանափակումները՝

$$\begin{split} h_{ih}(d_{huu\eta}, U_u) &\leq h_{ifmax}, \\ h_{ih}(d_{huu\eta}, U_u) &\geq h_{ifmin}, \\ \theta_{qbp}(d_{huu\eta}, U_u) &\leq \theta_{max}, \\ \theta_{abp}(d_{huup}, U_u) &\geq \theta_{min}, \end{split}$$

որտեղ P-ն էլեկտրական հզորությունն է, հ<sub>փ</sub>-ն՝ փաթույթի պատուհանի բարձրությունը, <sub>θգեր</sub>-ը՝ փաթույթի գերտաքացումը, հ<sub>փmax</sub>-ը՝ փաթույթի առավելագույն բարձրությունը՝ պայմանավորված փաթույթի պատուհանի վերջավոր չափերով, հ<sub>փmin</sub>-ը՝ փաթույթի նվազագույն բարձրությունը, <sub>θmax</sub> –ը՝ թույլատրելի առավելագույն գերտաքացումը՝ կախված հաղորդալարի մեկուսչի տեսակից և աշխատանքային ջերմաստիձանից [6], <sub>θmin</sub>-ը՝ նվազագույն գերտաքացումը։ Ձևակերպված խնդիրը ոչ գծային դիսկրետ ծրագրավորման խնդիր է, որտեղ հաղորդալարի տրամագիծը՝ d<sub>հաղ</sub>, փաթույթի սնման լարումը՝ U<sub>u</sub>, որոշակի դիսկրետ արժեքներ ունեցող փոփոխականներ են, և որոնց օպտիմալ արժեքների դեպքում ստացվում է փաթույթի նվազագույն հզորությունը։ Խնդրի լուծման համար կիրաովել են լրիվ ընտրանքների և կոորդինատային վայրէջքի եղանակները [7], որոնց մեքենայական իրականացումներն ընդգրկվել են ԱՆՀ-ում։

ԱՆՀ-ի ծրագրային միջոցը մշակվել է ծրագրավորման c++ լեզվով, Qt Creator միջավայրում [8]։ Այն հնարավորություն է տալիս կախոցի նախագծման ընթացքում ստանալու դրա ֆիզիկական չափերը, ընտրելու մագնիսալարի ու խարսխի նյութերը, որոշելու պարամետրերի արժեքները և կառուցելու աշխատանքային բնութագրերը։ Ինչպես նշեցինք, կարելի է ստանալ կառավարման փաթույթի հաղորդալարի տրամագծի և կոՃը սնող լարման այն օպտիմալ արժեքները, որոնք ապահովում են էլեկտրաէներգիայի նվազագույն ծախս։

Համառոտ նկարագրենք փաթեթի աշխատանքը։ Designer.exe ֆայլը թողարկելիս բացվում են երկխոսության երկու պատուհաններ։ Ծրագրի հիմնական պատուհանը (նկ. 3) նախատեսված է մուտքային տվյալները փոփոխելու համար։ Ծրագիրը թողարկելիս մուտքային տվյալներին նախապես վերագրվում են արժեքներ, և այդ արժեքների համար որոշվում են էլեկտրամագնիսական կախոցի բնութագրերն ու արտածվում հաջորդ պատուհանում (նկ. 4)։ Ծրագրային ապահովումը նախագծողին հնարավորություն է տալիս փոփոխելու մուտքային փոփոխականների արժեքները տրված միջակայքում և միաժամանակ՝ հետևելու էլեկտրամագնիսական կախոցի պարամետրերի փոփոխություններին։ Նման մոտեցման շնորհիվ նախագծողը բավականին կարձ ժամանակահատվածում կարողանում է ստանալ էլեկտրամագնիսական կախոցի նախագծային տարբերակը։

Ծրագրային ապահովման երկրորդ պատուհանը (նկ. 4) բաղկացած է 4 ներդիրներից՝ *էլեկտրամագնիսական կախոցի ֆիզիկական չափեր, էլեկտրամագնիսական կախոցի մագնիսական բնութագրեր, կատավարման փաթույթի պարամետրեր, կախվածություններ։* Այսպես, առաջին ներդիրում (նկ. 4) պատկերված է էլեկտրամագնիսական կախոցը, արտածված են կախոցի բոլոր ֆիզիկական չափերը և ձգող էլեկտրամագնիսական ուժը (P<sub>E</sub>), որ զարգացնում է կախոցը։

8000	8		* *
ւլեկտրամագնիսակա	սն կախոցի պարամետրերը		
Ելեկտրամագնիսի	միջուկի մետաղի տեսակը	20880	•
PE/Pyzha (1.1-1.3)	)	1.200	*
Ինդուկցիայի արժե	ւքը(Տլ) (0.6-1.3)	0.970	-
Միջուկի ուղղանկյ	ունության գործակիցը (1-5)	2.0	-
Լմիջուկ/aհիմք (2-	4)	3.00	-
Լհիմք/aհիմք (4-6)	)	4.00	* *
Տիսարիսիս/Տմիջուկ	(0.5-0.8)	0.800	-
δ (J) (0.01-0.03)		0.020	-
δ <mark>կ (վ) (</mark> 0.005-0.03)		0.005	* *
Սսն (Վ) (100-240)		220	* *
kլg (0.85-0.95)		0.90	* *

Նկ. 3. Ծրագրի հիմնական պատուհանը

Երկրորդ ներդիրում (նկ. 5) պատկերված է կախոցի մագնիսական շղթայի փոխարինման սխեման, և արտածված են շղթայի տեղամասերի մագնիսական բնութագրերը՝ մագնիսական ինդուկցիաներն ու մագնիսական լարվածություները, մագնիսական հոսքերը, մագնիսական պոտենցիալների տարբերությունները, կառավարման փաթույթի ՄՇՈՒ-ն։ Երրորդ ներդիրում (նկ. 6) արտածված են կառավարման փաթույթի (կոհի) ֆիզիկական չափերը, փաթույթի հոսանքի և գերտաքացման արժեքները։ «Օպտիմալացնել կոհի պարամետրերը» գործիքը նախատեսված է կոհի էլեկտրական հզորությունը մինիմալացնելու համար։ Երբ լուծվում է օպտիմալացման խնդիրը, բացվում է հաղորդագրությունների պատուհանը (նկ. 7), որտեղ արտածվում են այն պարամետրերի արժեքները, որոնք օպտիմալացման արդյունքում փոփոխվել են։ Նախագծողը կարող է պահպանել ստացված էլեկտրամագնիսական կախոցի նախագծված տարբերակը «Պահպանել արդյունքները» գործիքի միջոցով։ Այս դեպքում ստեղծվում է տեքստային ֆայլ՝ նպատակահարմար թղթապանակում և անվամբ, որտեղ գրանցվում են կախոցի բոլոր բնութագերը (նկ. 8)։





Նկ. 4. Ծրագրային ապահովման երկրորդ պատուհանի առաջին ներդիրը

Նկ. 5. Ծրագրային ապահովման երկրորդ պատուհանի երկրորդ ներդիրը

Չորրորդ ներդիրում պատկերվում են կախոցի որոշ բնութագրերը գրաֆիկների տեսքով։



Նկ. 6. Ծրագրային ապահովման երկրորդ պատուհանի երրորդ ներդիրը

111 <b>6</b> 12	
	Օպտիմալացման արդյունքում ստացվել են պարամետրերի հետևյալ արժեքները d=1.68 մմ Սսն=220 Վ P=394.256 Վտ I=1.792 Ա j=0.809 Ա/Jմ2 θգեր=68.036 °C հփ=0.136 մ Լմիջ=1.311 մ W=11526.791 գալար
	ОК Պահպանել արդյունքները) Կայունացում

Նկ. 7. Օպտիմալացման արդյունքում ստացված պարամետրերի պատուհանը



Նկ. 8. Կախոցի բնութագրերով տեքստային ֆայլը

Ինչպես վերը նշվեց, մշակված ԱՆՀ-ն հնարավորություն է տալիս լուծելու կախոցի կառավարման խնդիրը, որը հանգում է որոշակի թույլատրելի սահմաններում կախոցի օդային աշխատանքային բացակի չափի, կամ, որ նույնն է, շարժուղու նկատմամբ գնացքի անվտանգ բարձրության պահպանմանը։ Նկ. 9-ում տրված են ԱՆՀ-ով ստացված՝ կախոցի բանեցումը կարգավորող քարշային բնութագրերը։ Կառավարման համակարգը ոչ միայն լուծում է ձգող և հակազդող ուժերի հավասարակշոման խնդիրը, այլև կարգավորում է կախոցի բանեցման գործընթացը։



Նկ. 9. Կախոցի բանեցումը կարգավորող քարշային բնութագրերը՝ ստացված Էլեկտրամագնիսական կախոցի կառավարման ծրագրային փաթեթով

Այսպիսով, էլեկտրամագնիսական կախոցի մշակված մաթեմատիկական մոդելի և նախագծման եղանակի հիման վրա ստեղծվել է կախոցի ավտոմատացված նախագծման համակարգը։ Այն հնարավորություն է տալիս առաջադրված ելակետային տվյալներով նախագծելու էլեկտրամագնիսական կախոց, որը կարելի է կի-
րառել, մասնավորապես, մագնիսական բարձով արագընթաց գնացքներում։ Ձևակերպվել և ԱՆՀ-ում լուծվել են էլեկտրամագնիսական կախոցի կառավարման փաթույթի օպտիմալ նախագծման և կախոցի կառավարման խնդիրները։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. http://itc.ua/articles/poezda-na-magnitnoy-podushke-transport-sposobnyiy-izmenit-mir/
- Գրիգորյան Ա.Խ. Կառավարման էլեկտրական ապարատներ։ ՈՒսումնական ձեռնարկ.-Եր.: ՀՊՃՀ, Ճարտարագետ, 2011.-176 էջ։
- 3. http://www.femm.info/wiki/HomePage
- 4. Электрические и электронные аппараты / Под ред. Ю. К. Розанова. -2-е изд., испр. и доп.- М.: Информэлектро, 2001.-420 с.
- Գրիգորյան Ա.Խ. Կառավարման և մեքենայացման էլեկտրամագնիսական համակարգեր (հետազոտություն, հաշվարկ և նախագծում, նոր համակարգերի մշակում). Դոկտ. ատեն. սեղմագիր. - Եր., 1996:
- Соболев С.Н. Расчет и конструирование низковольтной электрической аппаратуры.-М.: Высшая школа, 1981.-224 с.
- 7. **Terzyan H.** Simulation of Electromechanical Systems: Numerical Methods and Solutions. VDM Verlag, 2009. 280 p.
- Ezust Alan, Ezust Paul Introduction to Design Patterns in C++ with Qt (2nd Edition).-Prentice Hall, 2011.- 768 p.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան։ Նյութը ներկայացվել է իսմբագրություն 23.08.2016։

### А.Х. ГРИГОРЯН, А.Г. АВЕТИСЯН, А.А. ШАХБАЗЯН, Н.В. АПЕТЯН АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Разработана автоматизированная система проектирования электромагнитных подвесов, в частности, подвесов, применяемых в высокоскоростных поездах на магнитной подушке. Сформулированы и решены задача оптимального проектирования обмотки управления электромагнитным подвесом и задача управления подвесом.

*Ключевые слова:* электромагнитный подвес, магнитная подушка, обмотка управления, автоматизированная система проектирования.

## A.KH. GRIGORYAN, A.G. AVETISYAN, A.A. SHAHBAZYAN, N.V. APETYAN AN AUTOMATED DESIGN SYSTEM OF ELECTROMAGNETIC SUSPENSION

An automated design system of electromagnetic suspensions, in particular suspensions used in high-speed magnetic levitation trains is developed. The problem of optimal design of the electromagnetic suspension control winding, and the suspension control problem are formulated and solved.

*Keywords:* electromagnetic suspension, magnetic levitation, control winding, automated design system.

### ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՍԱՀՐԱԴՅԱՆ Ա.Ի., ՍԻՄՈՆՅԱՆ Վ.Ս., ՓԱՓԱԶՅԱՆ Ա.Հ.	
ՊԼԱՍՏԻԿ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ ԳՈՐԾԻՔԻ ԱՌՋԵՎԻ	
ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՀՊՄԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՇԵՐՏԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ	
ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	219
ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ Ն.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Կ.Վ. , ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Ն. ,	
ՍԱՐՈՅԱՆ Վ.Վ.	
ՄԵՏԱՂԱՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ՇՓԱՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐՈՒՄ ԻՆՔՆԱՅՈՒՂՄԱՆ	
ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ՀԵՏԱՉՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ԴԻՖՈՒՉԻՈՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	228
ՄԻՆԱՍՅԱՆ Չ.Ա., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Հ.Գ.	
ԿՈՇԻԿԻ ՆԵՐՔԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՋԵՌՈՒՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱ	236
ՖՐԱՆԳՈՒԼՅԱՆ Ա.Ա.	
ԵՐԿԱԹԻ ԿՈՐԶՈՒՄԸ ՊՂԻՆՁ-ԿՈԼՉԵԴԱՆԱՑԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ՍՈՒԼՖԱՏԱՑՎԱԾ	
ԲՈՎՎԱԾՔԻ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ ՈՍԿԵՏԱՐ	
ՍՈՐԱԽՑՈՒԿԻՑ	240
ԲԶՆՈւՆԻ Ս.Ա., ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ Ն.Հ., ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ Ա.Մ., ԿՈՈւՏ Պ.	
ՋՋԷՌ-440 ՏԻՊԻ ՌԵԱԿՏՈՐՈՒՄ ՕԳՏԱԳՈՐԾՎԱԾ ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՎԱՌԵԼԻՔԻ	
ՊԱՀՊԱՆՄԱՆ ԱՎԱԶԱՆԻ ԽԻՏ ՎԵՐԱԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ	
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ	245
ՓԱՆՈՍՅԱՆ Ժ.Ռ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Ղ., ԴՌՆՈՅԱՆ Ա.Ա.	
ԱՐԵՎԻ ՇԱՐԺՄԱՆԸ ՀԵՏԵՎՈՂ ՖՐԵՆԵԼԱՅԻՆ ԽՏԱՐԱՐՆԵՐՈՎ	
ԼՈՒՍԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՆՈՐ ՄՈԴՈՒԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	255
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ն.Ն., ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Վ.Ս., ՂԱՉԱՐՅԱՆ Ռ.Հ.	
ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՆՊԱՏԱԿՆԵՐՈՎ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԲԱԺՆԱՉԱՓԱՅԻՆ	
ՓՈԽԱՆՑՈՒՄՈՎ ՄՆՄԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ	265
ԱԶԱՐՅԱՆ Մ.Հ.	
ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻՎՈՒԹՅԱՆ	
ՎՐԱ ԹՈՒՆԵԼԱՅԻՆ ԶՈՆԴ-ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹ ԲԱՑԱԿԻ ԵՐԿՐԱՉԱՓԱԿԱՆ	
ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԱՉԴՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ	280
ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ Դ.Մ., ՀՈՒՍԻԿՅԱՆ Դ.Հ.	
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՅԻ ՀԱՐԹԱԿԻ ՄՈՆՏԱԺԱՅԻՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՂՈՐԴԱՇԵՐՏԵՐԻ	
ՔԱՆԱԿԻ ՍԻՆԹԵՉԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	290
ԹԵՐՉՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Տ.Ռ.	
ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԵՔԵՆԱՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ԽՆԴՐՈՒՄ ՊԱՏԱՀԱԿԱՆ	
ՈՐՈՆՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ	
ՉԱՓՈՂԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԻՑ	296
ՍԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱԴԱՄՅԱՆ Գ.Վ., ԱՅՎԱՉՅԱՆ Ա.Ա.	
$A(t)\cdot X(t)+B(t)\cdot X^{T}(t)=C(t)$ Sኮባኮ ሆኮሀባሀՐሀሆԵՏՐԱԿԱՆ ሆሀՏՐԻՑԱՅԻՆ	
ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ	304
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ա.Խ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՇԱՀԲԱՉՅԱՆ Ա.Ա., ԱՊԵՏՅԱՆ Ն.Վ.	
	315
	010

# СОДЕРЖАНИЕ

САГРАДЯН А.И., СИМОНЯН В.С., ПАПАЗЯН А.А.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ	
НА КОНТАКТЕ ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПОД	
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	219
МЕЛИКСЕТЯН Н.Г., ОГАНЕСЯН К.В., КАРАПЕТЯН А.Н., САРОЯН В.В.	
РАЗРАБОТКА ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА	
САМОСМАЗЫВАНИЯ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ	228
МИНАСЯН З.А., АКОПЯН Г.Г.	
МЕТОДИКА РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРООБОГРЕВА	
ОБУВИ	236
ФРАНГУЛЯН А.А.	
ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО КЕКА, ПОЛУЧЕННОГО	
МЕТОДОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФАТИЗИРОВАННОГО ОГАРКА МЕДНО-	
КОЛЧЕДАННОГО КОНЦЕНТРАТА	240
БЗНУНИ С.А., БАГДАСАРЯН Н.Г., АМИРДЖАНЯН А.М., КОУТ П.	
АНАЛИЗ УПЛОТНЕННОЙ ЗАГРУЗКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО	
ТОПЛИВА В СТЕЛЛАЖАХ БАССЕЙНА ВЫДЕРЖКИ РЕАКТОРА ВВЭР-440	245
ПАНОСЯН Ж.Р., ВАРДАНЯН Г.П., ДРНОЯН А.А.	
РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С	
ФРЕНЕЛЕВСКИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ, СЛЕДЯЩЕГО ЗА ДВИЖЕНИЕМ	
СОЛНЦА	255
ПЕТРОСЯН Н.Н., МЕЛКОНЯН В.С., КАЗАРЯН Р.А.	
АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ С ДОЗИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ	
ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ	265
АЗАРЯН М.Г.	
О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ ЗАЗОРА ЗОНД-ПОВЕРХНОСТЬ НА	
ИНФОРМАТИВНОСТЬ ТУННЕЛЬНО-ТОКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	280
АЛЕКСАНЯН Д.М., УСИКЯН Д.О.	
РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ЧИСЛА ПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ	
МОНТАЖНОГО ПОЛЯ ПОДЛОЖКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ	290
ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., МЕЛКОНЯН Т.Р.	
О ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА ОТ	
РАЗМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ	
МАШИН	296
СИМОНЯН С.О., АДАМЯН Г.В., АЙВАЗЯН А.А	
К РЕШЕНИЮ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ ТИПА	
$A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot X^{T}(t) = C(t) \dots$	304
ГРИГОРЯН А.Х., АВЕТИСЯН А.Г., ШАХБАЗЯН А.А., АПЕТЯН Н.В.	
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ	
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА	315

#### CONTENTS

SAHRADYAN A.I., SIMONYAN V.S., PAPAZYAN A.H.
INVESTIGATING THE CHARACTERISTICS CHANGES OF THE SURFACE LAYERS
ON THE CONTACT OF THE FRONT SURFACE OF A TOOL UNDER THE INFLUENCE
OF PLASTIC DEFORMATION
MELIKSETYAN N.G., HOVHANNISYAN K.V., KARAPETYAN A.N.,
SAROYAN W.V.
DEVELOPING THE DIFFUSION MODEL AND INVESTIGATING THE SELF-
LUBRICATING MECHANISM IN METAL-POLYMER TRIBOUNITS
MINASYAN Z.A., HAKOBYAN H.G.
A METHOD FOR CALCULATING THE INTERNAL ELECTRIC HEATING OF SHOES 236
FRANGULYAN A.A.
IRON RECOVERY FROM GOLD-CONTAINING CAKE OBTAINED BY THE
LEACHING METHOD OF SULPHATIZED CALCINE OF THE COPPER-PYRITE
CONCENTRATE
BZNUNI S.A., BAGHDASARYAN N.H., AMIRJANYAN A.M., KOHUT P.
ANALYSIS OF RE-RACKING OF THE SPENT FUELPOOL OF THE WWER-440
REACTOR
PANOSYAN ZH.R., VARDANYAN G.P., DRNOYAN A.A.
DEVELOPING A RESEARCH OF NEW PHOTOVOLTAIC MODULE WITH
FRESNEL LENSES, FOLLOWING THE SUN MOVEMENT
PETROSYAN N.N., MELKONYAN V.S., GHAZARYAN R.H.
ANALYSIS OF POWER SUPPLY WITH A DOSED POWER TRANSFER FOR ELECTRIC
TECHNOLOGIES
AZARYAN M.H.
THE IMPACT OF THE GAP GEOMETRY PROBE – SURFACE ON THE INFORMATION
DENSITY OF TUNNEL – CURRENT INVESTIGATIONS
ALEKSANYAN D.M., HUSIKYAN D.H.
DEVELOPING A METHOD FOR THE SYNTHESIS OF THE TRANSMITTING LAYER
NUMBER OF THE INTEGRAL SCHEME SUBSTRATE INSTALLATION FIELD 290
TERZYAN H.A., SUKIASYAN H.S., MELKONYAN T.R.
THE EFFICIENCY DEPENDENCE OF THE RANDOM SEARCH ON THE SPACE
DIMENSION AT OPTIMIZING THE ELECTRICAL MACHINES
SIMONYAN S.H., ADAMYAN G.V., AYVAZYAN A.A.
SOLUTION OF ONE-PARAMETRIC MARTIX EQUATION OF THE
$A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot X^{T}(t) = C(t) TYPE \dots 304$
GRIGORYAN A.KH., AVETISYAN A.G., SHAHBAZYAN A.A., APETYAN N.V.
AN AUTOMATED DESIGN SYSTEM OF ELECTROMAGNETIC SUSPENSION