ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

# SԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

# СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



Журнал издается с 5.01.1948 г. Выходит 4 раза в год

#### ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

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

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

#### EDITORIAL BOARD

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

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՑՐԱՆՅԱՆ

Հս և ձևավորումը՝

Համակարգչային շարվածքը ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

**ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ** ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2008 ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 629.113

МАШИНОСТРОЕНИЕ

#### Г.В. МУСАЕЛЯН, Э.Ж. АРУТЮНЯН

# РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КУЗОВА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Разработана расчетная модель кузова легкового автомобиля методом конечных элементов (МКЭ). Исследованы ее прочность и жесткость в различных случаях нагрузок. Представлены особенности моделирования сварочных соединений составных частей кузова, несущего кузова и его структурных элементов, а также методы управления процедурой деления структуры на конечные элементы.

*Ключевые слова:* кузов легкового автомобиля, расчетная модель кузова, жесткость кузова, метод конечных элементов.

Ввиду сложной конструкции кузова постановка и решение расчетных задач его прочности и жесткости традиционными аналитическими методами связаны с большими трудностями. В автотракторной индустрии такие исследования в основном проводятся эмпирическими методами [1].

Целью настоящей работы является разработка расчетной модели кузова легкового автомобиля (МКЭ), что дает возможность при данных нагрузках вычислить в любой точке кузова деформации, напряжения и смещения [2].

Исследуемый кузов легкового автомобиля представляет собой сложную конструкцию, состоящую из различных структурных элементов, которые связаны между собой сваркой [3]. При разработке расчетной модели кузова упомянутым методом исследуемый объект представляется как система, состоящая из различных конечных элементов, которые связаны между собой в узлах. Составные части легкового автомобиля моделируются раздельно по отношению к местным системам координат, которые задаются с помощью общей глобальной системы координат Декарта.

В данной работе в качестве исследуемого объекта рассматривается несущий кузов легкового автомобиля ВАЗ 2106. Для его моделирования был использован программный пакет ANSYS 6.0 [4], позволяющий более точно смоделировать любые сопоставления поверхностей, плоскостей и линий с помощью операции логического сложения (булевы операции) [5].

Пол несущей конструкции представляет собой поверхность, состоящую из множества ребер жесткости [6]. Она моделируется с помощью пластинчатого элемента SHELL63. Выбранный конечный элемент дает возможность принять во внимание изгибательные и мембранные напряжения. К конечному элементу могут прилагаться нормальные и поверхностные нагрузки. Каждый узелэлемента SHELL63 (рис. 1) имеет по шесть степеней свободы: смещения в направлениях координатных осей x,y,z и вращения вокруг их.



Рис.1. Схема элемента SHELL63

Конечный элемент представлен в плоскости х-у. Для точного расчета элемента SHELL63 необходимо знать инерционный момент изгиба, который может быть введен или рассчитан от введенной величины толщины, а для оценки напряжений вводятся расстояния средней плоскости от крайних плоскостей. Обе эти величины положительные, учитывая, что средняя плоскость находится между краями. Если эти величины не заданы, то оценка напряжения дается на основе изначально данных толщин.

Моделирование целесообразно начать с пола. Необходимые продольные и поперечные жесткости пола обеспечивают продольные и поперечные ребра жесткости, которые связаны между собой сваркой. В данной модели маленькие радиусы кривизны не рассчитаны, так как они не имеют большого воздействия на общую жесткость автомобиля. Все величины, данные в модели, соответствуют реальному автомобилю. При моделировании пола несущего кузова наибольшую трудность представляет точное моделирование арок задних колес.

Лонжероны и багажник моделируются в соответствии с реальным видом структуры. В половой части багажника вместо реального сложного профиля моделируются соответствующие маленькие ребра жесткости, которые имеют одинаковое влияние на общую жесткость багажника. Углы изгиба стоек, радиусы соединений и все величины соответствуют реальному автомобилю. Все сварочные соединения узлов модели смоделированы как равенство смещений соответствующих узлов. Предполагается, что сварочные соединения жесткие и не деформируются.

В разработанной программе строения модели все основные величины, толщина пластин и нагрузки заданы с помощью переменных, что дает возможность использовать модель для исследования других автомобилей идентичного класса.

Полученная модель несущего кузова в автономном режиме делится на конечно-элементную сеть. Важное значение имеет надежность получения эффективной конечно-элементной сети объекта. Необходимо избегать конечных элементов с острыми углами. Программный пакет имеет возможность управления процессом деления объекта. После получения расчетной модели прилагаются процессы ввода действующих на нее нагрузок и крайних условий структуры. На рис.2 изображен вид разработанной модели.



Рис.2. Вид разработанной модели

Задача решена при различных случаях статических нагрузок. При этом принимаются во внимание нагрузки от собственных и эффективных масс автомобиля. Нагрузки от агрегатов, пассажиров и груза автомобиля приложены как распределенные нагрузки в соответствующих местах.

После ввода крайних условий осуществляется решение полученной расчетной задачи. В итоге получаются распределения смещений в узлах конечных элементов. Далее вычисляются деформации, напряжения и другие величины каждого конечного элемента.

В результате решения задачи реализована оценка жесткости и прочности несущей конструкции. Выведены распределения полей напряжений в кузове, а также наиболее опасные участки, где можно разгрузить конструкцию с помощью разных конструкторских приемов.

В работе представлено распределение смещений. Выведены наиболее деформированные участки. Рассмотрено несколько случаев, из которых особый интерес представляет кручение кузова, которое появляется, когда одно из колес автомобиля лишается опоры (рис.3). В упомянутом случае выводятся те участки, где необходимо произвести конструктивные мероприятия. На рис.3 изображен вид деформированного автомобиля.



Рис 3. Вид деформированного автомобиля в случае кручения

В данном случае нагрузки одной из опасных частей несущего кузова является опора мотора (траверса). Распределение смещений по продольной оси траверсы приведено на рис.4.



В горизонтальной оси приведена длина траверсы (L), а в вертикальной оси - величины смещений. Как видно из графика, смещения распределены крайне неравномерно.

На рис.5 цветовым полем приведены распределения смещений по всей несущей конструкции.



Рис 5. Цветовое поле распределения смещений

Итак, разработанная модель дает возможность вывести весь процесс деформирования кузова, особенности распределения напряжений и деформации, опасные участки кузова в разных случаях нагрузок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Кац А.М. Автомобильные кузова. –М.: Транспорт, 1980. 272 с.
- 2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. -М.: Мир, 1975. 541 с.
- 3. Pippert H. Karosserietechnik. Vogel Verlag, 1998.- 303 s.
- 4. Muller G. FEM fur Praktiker. Expert Verlag, 1997.- 859 s.
- 5. **Մուսայելյան Գ.Վ.** Վերջավոր տարրերի մեթոդների կիրառումը տրանսպորտային միջոցներում։ ուսումնական ձեռնարկ / ՀՊՃՀ. Երևան, 2003. 289 էջ։
- 6. **Мусаелян Г.В., Закарян Л.О.** Исследование изгиба рамы грузового автомобиля в вертикальной плоскости методом конечных элементов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2006. Т. 59, N3.- С. 465-471.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.09.2007.

#### Գ.Վ. ՄՈՒՍԱՅԵԼՅԱՆ, Է.Ժ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

## ՄԱՐԴԱՏԱՐ ԱՎՏՈՄՈԲԻԼԻ ԿՐՈՂ ԹԱՓՔԻ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐՐԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ

Կատարվել է մարդատար ավտոմոբիլի կրող թափքի հաշվարկային մոդելի մշակում վերջավոր տարրերի մեթոդով, հետազոտվել են վերջինիս ամրությունն ու կոշտությունը տարբեր բեռնվածքների դեպքում։ Ներկայացվում են թափքի բաղկացուցիչ տարրերի եռակցման կետերի, կրող թափքի և վերջինիս բարդ կառուցվածքային տարրերի մոդելավորման առանձնահատկությունները, վերջավոր տարրերի ցանցի բաժանման գործընթացի կառավարման եղանակները։

**Առանցքային բառեր**. մարդատար ավտոմոբիլի թափք, թափքի հաշվարկային մոդել, թափքի կոշտություն, վերջավոր տարրերի մեթոդ։

#### G.V. MUSAYELYAN, E.J. HARUTYUNYAN

#### CONSTRUCTION OF COMPUTATIONAL MODEL OF AN AUTOMOBILE BODY BY METHOD OF FINITE ELEMENTS

By the method of finite elements the construction of the computational model of an automobile body and investigation of its solidity and stiffness during different cases of loads is developed. The features of modelling welding connections, the body and its structural elements and management of partition into finite elements are represented.

*Keywords*: automobile body model, computation model of body, stiffness of an automobile body, finite-element method.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

ՀՏԴ 621.762+669.15

ՆՅՈՒԹԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

#### Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ժ.Հ. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ, Ք.Լ. ՉԱՔԱՐՅԱՆ, Ն.Ն. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Մ.Լ. ՍԱՍՈՒՆՑՅԱՆ

## ՌՈԻՏԻԼԻՑ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱԹԵՐՄԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ ՏԻՏԱՆԻ ԱԼՅՈՒՄԻՆԻԴՆԵՐԻ ԿԱՌՈԻՑՎԱԾՔԱԳՈՑԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ՝ ԿԱԽՎԱԾ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆԻՉԻ ՔԱՆԱԿԻՑ

Քննարկվել է ռուտիլից ալյումինաթերմային վերականգնման եղանակով տիտանի ալյումինիդների ստացման գործընթացը և հետազոտվել են ստացված համաձուլվածքների կառուցվածքագոյացման հարցերը` կախված վերականգնիչի քանակից։ Ցույց է տրվել, որ վերականգնիչի որոշակի քանակների դեպքում կարելի է ստանալ միաֆազ TiAl կամ TiAl<sub>3</sub>։ Ստացված արդյունքները հաստատագրվել են ռենգենակառուցվածքային, մանրադիտակային և ջերմագրային վերլուծության եղանակներով։

*Առանցքային բառեր.* կառուցվածքագոյացում, ալյումինիդ, ալյումինաթերմային, ռուտիլ, տիտան, վերականգնում։

ժամանակակից մետալուրգիայի գերակա ուղղություններից մեկը նոր կառուցվածքով և հատկություններով համաձուլվածքների ստացումն է, ինչպիսիք են օրինակ տիտանի այլումինիդները (TiAl և TiAl<sub>3</sub>), որոնք ունեն բազմաֆունկցիոնայ բնույթ, աչքի են ընկնում բարձր արժեքավոր ամրությամբ, կոռոզիոն կայունությամբ, մաշակայունությամբ և այլ հատկություններով։ Տիտանի ալյումինիդները մոտ ապագայում կարող են լուրջ մրցակից լինել նիկելի և այլ մետաղների այլումինիդներին, քանի որ ավելի թեթև են, կարիք չունեն այլ, ավելի թանկ մետաղներով լեգիրման և ավելի դիմացկուն են բարձրջերմաստիճանային օքսիդացման նկատմամբ։ Այդպիսի համաձուլվածքների ստացման համար որպես հումք է ծառայում մաքուր տիտանը, որի ստացումը ժամանակակից վառարանային եղանակով ինչպես ռուտիլից, այնպես էլ հայոգենիդներից թանկ է, էներգատար և պահանջում է թանկ իներտ գազեր` արգոն և հելիում։ Մինչդեռ ավելի արդիական է այդ ինտերմետայիդների ստացումը ժամանակակից, կատարելագործված և էժան տեխնոլոգիաներով։ Այդ տեսակետից ալյումինիդների ստացման արդյունավետ տեխնոլոգիա է համարվում Ա.Գ. Մերժանովի և նրա գիտական դպրոցի կողմից հայտնաբերված բարձրաջերմաստիճան ինքնատարածվող սինթեզը (ԲԻՍ), որը բնութագրվում է իր ցածր էներգածախսերով, օգտագործված սարքավորումների պարզությամբ, էժանությամբ, գործընթացի արագ ընթացքով և սինթեզված արգասիքի մաքրությամբ։ ԲԻՍ մետայուրգիայի օրինակ է դժվար վերականգնվող տիտանի միացություններից տիտանի այլումինաթերմային վերականգնումը, որը կարելի է իրագործել անվառարան՝ այդ նպատակի համար օգտագործելով ռուտիլը, որը տիտանի ամենաէժան միացությունն է [1-3]։

Աշխատանքի նպատակն է` կախված վերականգնիչի քանակից, ռուտիլից ստանալ մոնոֆազ TiAl և TiAl₃և ուսումնասիրել ստացված ինտերմետալիդների կառուցվածքագոյացման հարցերը։ Փորձերի համար որպես ելանյութ ծառայել է 96% ТіО<sub>2</sub>, 1,5% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> և 2,5% SiO<sub>2</sub> բաղադրությամբ ռուտիլը, որպես վերականգնիչ՝ քիմիապես մաքուր ալյումինը՝ 99.9% մաքրությամբ և որպես հարուցիչ՝ Ті+С փոշեխառնուրդը։

Ըստ նախնական հաշվարկների՝ որոշակի հարաբերությամբ ընտրած բովախառնուրդը ամեն անգամ մանրամասն խառնվել է և տեղավորվել ավազի շերտով պատված գրաֆիտա-շամոտային տարողության մեջ։ Բովախառնուրդի կենտրոնում կոնական փոս է արվել և ավելացվել հարուցիչը։ Ապա շիկացած լարով սկիզբ է դրվել բարձրաջերմաստիճան ինքնատարածվող սինթեզին, որը տևել է 10...12 *րոպե*։ ԲԻՍ գործընթացի շնորհիվ զարգացել են բարձր ջերմաստիճաններ (2000...2500(C)։ Այդ պայմաններում մետաղները վերականգնվել են և առաջացրել համաձուլվածք, իսկ խառնուրդ օքսիդները առաջացրել են խարամային ֆազ։ Սառչելուց հետո ատացված արգասիքները կշռվել են և ենթարկվել քիմիական, ռենտգենաֆազ և մանրադիտակային վերլուծության։

Ուսումնասիրվել է մետաղական ֆազի ելքի կախումը վերականգնիչի քանակից (նկ.1)։ Ինչպես երևում է նկարից, վերականգնիչի՝ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավել լինելու դեպքում կորը ստանում է ծոված մաքսիմումով տեսք, ընդ որում՝ կորությունը ընկած է 10...50% ալյումինումի ավելցուկի սահմաններում։ Մակայն ամենաբարձր ելքը ստացվում է վերականգնիչի 25% տեսական քանակից ավելցուկի դեպքում։



Նկ.1. Մետաղի ելքը (1) և Ti-ի պարունակությունը համաձուլվածքում (2)՝ կախված վերականգնիչի տեսական անհրաժեշտ քանակի ավելցուկից

Այդ պայմաններում ստացված համաձուլվածքը, ըստ քիմիական վերլուծության տվյալների, պարունակել է 64% Ti և 36% Al, որը ատոմային տոկոսներով մոտավորապես համապատասխանում է 50%Ti և 50% Al-ի` այսինքն TiAl մետաալյումինիդին (նկ.2)։



Նկ.2. Ti-Al վիձակի դիագրամը

Կատարվել են նաև ջերմային ռեժիմների ուսումնասիրություններ, որոնք թույլ են տալիս հետևել բարձրաջերմաստիձան ինքնատարածվող գործընթացով տիտանի ալյումինիդների սինթեզի դինամիկային ջերմային պայթման պայմաններում։ Ուսումնասիրությունները կատարվել են նիքրոմային լարով տաքացվող մետաղական գլանաձև ռեակտորում, որն արտաքինից ունի ազբեստյա մեկուսիչ շերտ։

Ջերմաստիձանը չափվել է երկու քրոմել-ալյումել ջերմազույգերի օգնությամբ, որոնցից մեկն ընկղմվել է բովախառնուրդի մեջ, իսկ մյուսն ամրացվել է ռեակտորի արտաքին պատին։ Բովախառնուրդն էլեկտրականությամբ աստիձանաբար տաքացվել է մինչև պայթումը, ապա տաքացումը դադարեցվել է։ Տվիչը ջերմազույգերի ջերմաստիձանային ինֆորմացիան տեղափոխել է համակարգիչ, որում և կատարվել է ջերմային գրանցումը։ Կատարվել են վերը նշված բաղադրությամբ բովախառնուրդի ջերմային ռեժիմների ուսումնասիրություններ՝ ալյումինումի տարբեր պարունակությունների դեպքում։

Նկ. 3-ում ներկայացված է Ti-Al համարժեք բաղադրությամբ արգասիքի սինթեզի ջերմագիրը, 25% Al-ի տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում։



Նկ.3. Ti-Al համակարգի ջերմագրային հետազոտությունը, 25% Al-ի տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում

Ջերմագրից պարզ է դառնում, թե տաքացման որ փուլում է տեղի ունենում վերջնական արգասիքի ձևավորումը։ Այդ գործընթացը տեղի ունի առավելագույն ջերմաստիձանում, որից հետո սկսում են առաջանալ այն հավասարակշռային վիձակները, որոնք կան Ti-Al ֆազային դիագրամում (նկ. 2)

Ըստ դիագրամի՝ 50% Ti և 50 Al% (ըստ ատոմային տոկոսների) ընկած է հոմոգեն (γ լուծույթի տիրույթում։ Այդ տիրույթն ըստ Կուբաշենսկու և Դենչի [4] համապատասխանում է 55-65% ( ըստ զանգվածային տոկոսների) Ti-ին և ունի գոյացման մեծ ջերմություն, այսինքն՝ այդ համաձուլվածքը ջերմաքիմիական տեսակետից ամենակայունն է։

Նկ. 4-ում ներկայացված է TiAl ինտերմետալիդի ռենտգենագիրը, որը հաստատում է մոնոֆազ արգասիքի ստացումը։



Նկ.4. 25 % Al-ի տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում ստացված համաձուլվածքի ռենտգենագիրը

Ուսումնասիրվել է նաև 45...65% Al (ըստ զանգվածի) ավելցուկով համաձուլվածքի ստացման գործընթացը (դիագրամում՝ γ+TiAl₃ տիրույթը)։ Այս պայմաններում ստացվում է TiAl₃ համաձուլվածքը։ Համաձուլվածքը պարունակում է 64 % Al-ին և 36 % Ti։ Ի տարբերություն TiAl-ի, այս դեպքում համաձուլվածքը կառուցվածքով ավելի փխրուն է և ծակոտկեն։

Նկ. 5-ում ներկայացված է TiAl<sub>3</sub>–ի ստացման ջերմագիրը։



Նկ.5. Ti- Al համակարգի ջերմաչափական հետազոտությունը Al-ի 60 %՝ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում

Ինչպես երևում է նկարից, համաձուլվածքի սինթեզը տեղի է ունենում ոչ անմիջապես, այլ երբ ջերմաստիձանը հասնում է առավելագույն արժեքին։ Վերջնական արգասիքն անցնում է այն բոլոր հավասարակշռային վիճակներով, որոնք կան վիճակի դիագրամում։ Վերջնական արգասիքում չի նկատվում Al-h ավելցուկի անջատում, րնթանում է սառեցում։ Արգասիքը այլ համապատասխանում է TiAl<sub>3</sub> բաղադրությանը։ Սակայն սինթեզված համաձույվածքը հագեցած է Al-ի ատոմներով և անկայուն է (մետաստաբիլ)։ Այսպիսով, TiAl<sub>3</sub>-ի ստացման համար պետք է ժամանակը երկարացնել։ Այդ ժամանակահատվածում տեղի է ունենում ֆազային կազմի ռելաքսացիա, մետաստաբիլ վիմակից դեպի հավասարակշիռ վիճակը` դիֆուզիոն վերաբյուրեղացման ֆազի անցման միջոցով։

Նկ. 6-ում պատկերված է 64% Al-ի տեսականորեն անհրաժեշտ քանակությանից ավելցուկի դեպքում ստացված համաձուլվածքի ռեգտենակառուցվածքային վերլուծության արդյունքը։



Նկ.6. 64% Al-ի տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում ստացված համաձուլվածքի ռենտգենագիրը

Կատարվել են նաև ջերմածանրագրային ուսումնասիրություններ` Al-ի 75% ավելցուկ քանակության համար (դիագրամում TiAl<sub>3+</sub> Al տիրույթը)։ Քննարկվել է 75% Al-ի ավելցուկի դեպքում ստացված ջերմագիրը։

Ջերմագրի կառուցվածքը էապես տարբերվում է վերը նշված դեպքերից։ Այստեղ երևում են երկու մաքսիմումներ, որոնք հաստատում են ֆազագոյացման ավելի բարդ մեխանիզմը։ Հետաքրքիր է, որ ստացված արգասիքն այստեղ նույնպես մոնոֆազ է։



Նկ.7. Ti-Al համակարգի ջերմագիրը Al-ի 75% ըստ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում

Մտացված արդյունքի պատձառը բացատրվում է հետևյալ կերպ. բովախառնուրդի ջերմաստիձանն առավելագույն կետին հասնելուց հետո, տեղի է ունենում երկու հակադիր գործողությունների՝ քիմիական ռեակցիայով պայմանավորված ջերմատվության և կառուցվածքագոյացմամբ պայմանավորված ջերմակլանման գործընթացների ջերմությունների մրցակցություն, հետևաբար՝ գումարային ջերմաստիձանի անկում։ Այնուհետև սկսում է գերակշեռել հիմնական ֆազի ստացումը։



Նկ.8. Ti-Al համակարգի ռենգենագիրը, Al-ի 75% ըստ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակի ավելցուկի դեպքում

Վերջինս ջերմագրի վրա առաջացնում է երկրորդ մաքսիմումը (նկ.7)։ Ապա սկսվում է սառեցումը։ Ռենտգենագրում (նկ.7) ստացված արգասիքը նման է նկ.4-ի դեպքին, այն մոնոֆազ է, բայց իր բաղադրության մեջ ունի նաև չվերականգնված TiO (նկ.8)։ Տարբեր քիմիական բաղադրություն ունեցող համաձուլվածքները, որոնք ստացվել են տարբեր

քանակի Al-ի պարունակությունների պայմաններում, ենթարկվել են միկրոկառուցվածքային և մանրադիտակային հետազոտությունների։ Պատրաստվել են միկրոշլիֆներ։ Խածատման հեղուկը բաղկացած է եղել 25% ֆտորաջրածնական թթվից (48%-անոց լուծույթ), 25% ազոտական թթվից (խիտ) և 50% գլիցերինից [4]։ Այս հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ թթվածնի առկայությունը համաձուլվածքում թույլ չի տալիս Ճիշտ բնութագրել համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը։

60% Al-ի պարունակության դեպքում համաձուլվածքում արտահայտված երևում է շերտային կառուցվածք (նկ.9)։



Նկ.9. Ti-Al համակարգի միկրոկառուցվածքը (x200)։ Բաց գծերը γ ֆազն են, մուզը` α+TiO



Նկ.10. Ti-Al համաձուլվածքի միկրոկառուցվածքը. 75 % Al-ի ըստ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակի ավելցուկի դեպքում

Ըստ որոշ գիտական տվյալների [5]՝ այդ գծերը կապված են ( ֆազի մեջ TiO-ի ներկայության հետ։ Այսպիսի համաձուլվածքը համեմատաբար փխրուն է։ Al-ի քանակի մեծացումը մինչև 75 %, ըստ տեսական անհրաժեշտ քանակի, հանգեցնում է համաձուլվածքի փխրունության մեծացմանը։ Դա առաջացնում է դժվարություններ նաև շլիֆների պատրաստման գործընթացներում (շլիֆները հղկելիս մակերեսի որոշ մասերը ներկվում էին)։ Միկրոկառուցվածքի ուսումնասիրությունը թույլ տվեց բացատրել փխրունության պատձառը։ Պարզվել է, որ ամբողջ համաձուլվածքը կտրատվում է բազմաթիվ մազանման ձեղքվածքներով (նկ.10)։

Ընդ որում՝ որքան է Al-ի քանակը ավելանում է, այնքան համաձուլվածքը դառնում է ավելի փխրուն, և այդ մազանման ձեղքերն ավելանում են և հակառակը, որքան համաձուլվածքը հարուստ է Ti-ով, այնքան մեծ է մեխանիկական ամրությունը, և միկրոկառուցվածքը հոմոգեն է, իսկ լուծված թթվածնի քանակը համաձուլվածքում քիչ է։

Al-ի 25% տեսականորեն անհրաժեշտ քանակից ավելցուկի դեպքում ստացվում է ամենակայուն համաձուլվածք՝ ամենամեծ ամրությամբ, և անջատվում է ջերմության ամենամեծ քանակությունը։

Al-ի այդ ավելցուկ քանակը համապատասխանում է հետևյալ հավասարմանը.

$$\text{TiO}_2 + \frac{4}{3}\text{Al} = \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti.....}$$
 (1)

Եթե հաշվարկը տարվում է ըստ հետևյալ ռեակցիայի՝

$$TiO_2 + \frac{7}{3}Al = \frac{2}{3}Al_2O_3 + TiAl....$$
 (2)

ապա Al-ի` վերը նշված քանակը տեսական քանակից պակաս է (86,6 %)։

Սակայն Al-ի քանակի ավելացումը չի բերում տիտանի ելքի մեծացմանը համաձուլվածքում։ Հետևաբար, Al-ի այդ քանակը բավարարում է ամբողջ TiO<sub>2</sub>-ի վերականգնմանը՝ ըստ (2) հավասարման։ Այսինքն՝ այդ բանաձևը շատ թե քիչ համապատասխանում է համաձուլվածքի ստացմանը, ըստ Ti-ի տեսական քանակի։ Սակայն խարամն այս դեպքում արտաքին տեսքով անգամ նման չէ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ի։ Նրանում կան լուծված ձևով Ti –ի չվերականգնված օքսիդներ, որի պատձառով այն ստանում է մուգ գույն։ Ընդ որում՝ կախված Al-ի քանակի մեծացումից խարամի գույնն անընդհատ փոփոխվում է, հետևաբար չի կարելի խարամի բաղադրությունն արտահայտել որևէ բանաձևով։

25 % Al-ի ավելցուկի դեպքում, ըստ (1) հավասարման, ստեղծվում են թերմոդինամիկական տեսակետից ամուր համաձուլվածքի ստացման պայմաններ։ Այս դեպքում խարամը կարելի է ներկայացնել q Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pTiO<sub>2</sub>, և zTiO բանաձևով։ Ti-ի կորզման աստիձանը համաձուլվածքում այս դեպքում ամենամեծն է։

Այսպիսով, կատարված հետազոտությունների արդյունքներից եզրակացնում ենք, որ հնարավոր է բովախառնուրդում Al-ի քանակը կարգավորելով ստանալ TiAl և TiAl₃ համաձուլվածքներ, որոնք ունեն տարբեր միկրոկառուցվածք և ամրություն։ Սակայն ավելի արդյունավետ է 25 % Al-ի ավելցուկի պայմաններում ստանալ մոնոֆազ TiAl բանաձևով համաձուլվածք, որն ունի ամուր միկրոկառուցվածք և Ti-ի կորզման աստիձանը համաձուլվածքում ամենամեծն է։

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Евстигнеев В.В., Филимонов В.Ю., Яковлев В.Н., Семенчина А.С. Способ управления микроструктурностью продукта синтеза при реализации в системе Ti-Al //В сб.: Функциональные порошковые материалы и покрытия.- Пермь, 2004.-Вып.N2.- С.60-62.
- 2. Эверхарт Д.Л. Титан и его сплавы. М.: Металлургиздат, 1956.
- **3.** Мурач Н.Н., Верятин У.Д. Внепечная металлургия.- М.: Металлургиздат, 1956.
- 4. Kubachew ski O., Dench W. A. Act Metallurgia.- 1955. VII, V3, N4. P. 339-356.
- 5. Bumps E. S., Kessler H. D., Hansen M. Transactions of American Society of Metals.- 1973.- V. 45.-P.1008-1025 (пер. сб. «Тіtан». - М.: Изд-во ИЛ ,1972. - С.202-219).

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.03.2007։

#### В.А. МАРТИРОСЯН, Ж.Г. ГУКАСЯН, К.Л. ЗАКАРЯН, Н.Н. АКОПЯН, М.Э. САСУНЦЯН

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ Ті-A1 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ВОССТАНОВИТЕЛЯ ПРИ АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ РУТИЛА

Обсуждаются вопросы получения алюминидов титана при алюминотермическом восстановлении рутила. Проводится исследование структурообразования в зависимости от количества восстановителя. Выяснилось, что при определенных условиях можно получить TiAl или TiAl<sub>3</sub> в зависимости от количества восстановителя. Полученные результаты подтверждаются данными рентгеноструктурного и термографического анализа.

*Ключевые слова:* структурообразование, алюминид, алюминотермический, рутил, титан, восстановление.

#### V.A. MARTIROSYAN, Zh.H. GHUKASYAN, K.L. ZAKARYAN, N.N. HAKOPYAN, M.E. SASUNTSYAN

#### STRUCTURAL FORMATION STUDIES IN THE TI-AI SYSTEM DEPENDING ON REDUCER QUANTITY FOR ALUMINOTHERMY RUTILE REDUCTION

Problems of obtaining aluminothermy reduction of rutile and structural formation studies depending on reduction quantity are discussed. It is found out that in certain conditions TiAl or TiAl<sub>3</sub> can be obtained depending on reduction quantity. The results obtained agree with the data of X-ray crystal and thermographic analysis.

Keywords: structural formation, aluminide, aluminothermy, rutile, titanium, reduction.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

<u> Հ</u>ՏԴ 621.762.2

ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱ

#### Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՖՐԱՆԳՈՒԼՅԱՆ, Տ.Գ. ԱՓՈՅԱՆ, Ա.Ն.ՂԱՉԱՐՅԱՆ

#### ՀԵՄԱՏԻՏԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՔԱՐԵՐԻ ԹՐԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԵՎ ՍԻԼԻԿԱՏԱԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Դերիվատոգրաֆիական մեթոդով ուսումնասիրվել է հեմատիտային հանքաքարերի թրծման գործընթացը ածխածնի և սոդայի առկայությամբ։ Ցույց է տրված, որ սոդայի առավելագույն ազդեցությունը ստացվում է 10%-ի դեպքում, որը նպաստում է վերականգնման գործընթացի արագացմանը և հնարավորություն է ստեղծում ձերբազատվել տարբեր տեսակի սիլիկատային և այլ միացություններից։ Ուսումնասիրվել են նաև սիլիկատաառաջացման ռեակցիաները, որոնք ընթանում են թրծման ժամանակ վերականգնման գործընթացին զուգահեռ։

*Առանցքային բառեր.* հեմատիտ, հանքաքար, նատրիումի կարբոնատ, բովախառնուրդ, թրծում, սիլիկատաառաջացում, դիֆուզիա, վերականգնում, երկաթի օքսիդ։

Ժամանակակից մետալուրգիական արտադրությանը ներկայացվող կարևորագույն պահանջներից է նորագույն տեխնոլոգիաների ներդրմամբ հանքահումքային ռեսուրսների համալիր օգտագործումը, որը կապահովի ոչ միայն հանքանյութերում գտնվող արժեքավոր բաղադրատարրերի կորզումը, այլն կստեղծի անթափոն արտադրություն և կլուծի բնապահպանական խնդիրներ։

Հայաստանի Հանրապետությունը, ունենալով գունավոր, հազվագյուտ և ազնիվ մետաղների պարունակությամբ հանքավայրեր, որոնց պաշարները անսպառ չեն, խիստ կարևորում է հանքանյութերի և խառնուրդների համալիր օգտագործումը անթափոն արտադրության ստեղծումով, այդ թվում նաև երկաթի կորզումը, որն անրաժեշտ է ոչ միայն պողպատի և ֆերոհամաձուլվածքների արտադրության, այլ նաև երկաթափոշու ստացման և կոմպոզիցիոն նյութերի արտադրության զարգացման համար։

Այս առումով կարևորագույն խնդիր է երկաթի հեմատիտային հանքաքարերի մշակումը և երկաթափոշու ստացումը։ Հարցի լուծման դժվարությունն այն է, որ հեմատիտը (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) պարամագնիսական ֆազ է և հնարավոր չէ այն կորզել հանքաքարից՝ մագնիսական տարանջատման միջոցով։

Աշխատանքի նպատակն է՝ ուսումնասիրել ածխածնի և նատրիումի կարբոնատի մասնակցությամբ երկաթի հեմատիտային հանքաքարերի թրծման (վերականգնման) գործընթացը և սիլիկատաառաջացման ռեակցիաների ընթացքը, որոնց արդյունքում ստացվում են ֆերոմագնիսական ֆազեր, այդ թվում մագնետիտ (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) և մաքուր երկաթ (երկաթի սպունգ)։

Նշված գործընթացի ուսումնասիրման համար կատարվել են համալիր դերիվատոգրաֆիական հետազոտություններ Q-1500D դերիվատոգրաֆի վրա, որի էլեկտրոնային ինքնագրող սարքը միանգամից գրանցում է ջերմաստիձանի (T), զանգվածի (TG), զանգվածի փոփոխման արագության (DTG) և հետազոտվող նմուշի ջերմունակության (DTA) կախվածությունը ժամանակից ու ջերմաստիձանից։

Փորձերը կատարվել են 0...15% սոդա և 4...5% գրաֆիտ պարունակող բովախառնուրդի վրա, 25...1200ºC ջերմաստիձանային միջակայքում։ Նկ.1.-ում ցույց է տրված 5% սոդա պարունակող նմուշի դերիվատոգրամ։ Ինչպես երևում է, նկ.1.-ից, DTA կորի վրա առաջին մինիմումն առաջանում է ~130°C-ի դեպքում և վերարտադրվում է սոդայի քանակությունից անկախ։ Գործընթացն ուղեկցվում է ջերմության կլանումով և նմուշի զանգվածի նվազումով։ Սա բացատրվում է ադսորբցված խոնավության հեռացումով։ Հաջորդ մինիմումը նույնպես բնորոշ է տարբեր բաղադրություն ունեցող բովախառնուրդներին և գրանցվում է DTA և DTG կորերի օգնությամբ՝ 576 $\pm$ 7°C ջերմաստիձանում։ Գործընթացն ընթանում է 540...650°C միջակայքում և բացատրվում է վերականգնման առաջին փուլով՝ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $\rightarrow$  Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>։ Ջերմաստիձանի բարձրացումը մինչև 650...790°C ջերմաստիձաներ առաջ է բերում DTA կորի վրա նոր մինիմում՝ 750°C -ում, որը բացատրվում է խտանյութի մեջ եղած խառնուկների հետ սոդայի փոխազդեցությամբ՝

 $Na_2CO_3 + SiO_2 \rightarrow Na_2SiO_3 + CO_2\uparrow,$ 

 $Na_2CO_3+Al_2O_3 \rightarrow Na_2 Al_2O_4+CO_2\uparrow$ :

Միաժամանակ արագանում են վերականգնման երկրորդ փուլի ռեակցիաները՝  $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ : Այն իրականացվում է ինչպես պինդ ֆազային դիֆուզիոն մեխանիզմի՝  $Fe_3O_4+C \rightarrow FeO+CO^{\uparrow}$ , այնպես էլ գազային ֆազի մեխանիզմի համաձայն՝  $Fe_3O_4+CO \rightarrow FeO+CO_2^{\uparrow}$ : Սոդայի 5%-ոց կոնցենտրացիան համապատասխանում է բաղադրատարրերի ստեխիոմետրիկ քանակությանը, որը լիովին բավարար է խտանյութի խառնուկների հետ փոխազդելու համար։ 790...900℃ ջերմաստիՃանային միջակայքում գրանցվում է ևս մեկ մինիմում, որը նույնպես վերաբերում է Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>  $\rightarrow$  FeO գործընթացին և ըստ երևույթին նաև FeO  $\rightarrow$  Fe գործընթացին։ Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ սոդայի պարունակության ա $\Delta$ ին զուգընթաց Fe $_3O_4 \rightarrow$  FeO  $h \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ արագությունը մեծանում է։ Դա բացատրվում է սոդայի և վերականգնման երկաթի օքսիդը, խառնուկների փոխազդեցությամբ, որի արդյունքում անջատվելով միացություններից, լրացուցիչ մասնակցում է վերականգնման գործընթացին` մեծացնելով վերականգնման արագությունը։ FeO → Fe վերականգնման երրորդ փուլն ընթանում է 900...1000ºC-ում։ Դերիվատոգրամների վրա վերականգնման այս փուլը բացատրվում է DTA և DTG կորերի էքստրեմումով (970ºC), իսկ TG կորերի վրա առաջանում է որոշակի արագությամբ զանգվածի փոփոխություն։ Մինչև 5% սոդայի պարունակության դեպքում նկատվում է վերականգնման վերջնական ջերմաստիձանի և տևողության կտրուկ նվազում։ 10% սոդա պարունակող բովախառնուրդի համար 🛛 վերականգնման վերջնական ջերմաստիձանը 130...150ºC-ով 🛛 ցածր է առանց սոդալի բովախառնուրդի վերականգնման ջերմաստիձանից։ Բացի դրանից, 20%-ով կրձատվում է վերականգնման ժամանակը։ 3% և ավելի սոդա պարունակող բովախառնուրդների մոտ DTA կորերի վրա 1100ºC-ում առաջացած վերջին մինիմումը բացատրվում է երկրորդային պինդ ֆազային ռեակցիաներով՝

$$Na_2SiO_3+Na_2Al_2O_4 \rightarrow 2Na_2O \quad Al_2O_3 \quad SiO_2$$

3CaO 
$$Al_2O_3+2Al_2O_3 \rightarrow (CaO Al_2O_3)$$
:

Մոդայի հիմնական նշանակությունն այն է, որ բովախառնուրդի թրծման ընթացքում այն, փոխազդեցության մեջ մտնելով խտանյութի մեջ եղած խառնուրդների հետ, առաջացնում է ջրում լուծելի և անլուծելի միացություններ, որոնք հեշտությամբ հեռացվում են թաց մագնիսական տարանջատման ժամանակ։ Այս տեսակետից շատ կարևոր է սիլիկատաառաջացման պինդ ֆազային ռեակցիաների հետազոտումը։



Նկ.1. 5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> պարունակող բովախառնուրդի դերիվատոգրամ՝ 1, 1'- նմուշի ջերմաստիձանի փոփոխման ընթացքն է տաքացման (1) և սառեցման (1(( ժամանակ; 2, 3, 4 – ը նմուշի տաքացման ժամանակ համապատասխանաբար դիֆերենցիալ ջերմային անալիզի (DTA), զանգվածի փոփոխության (TG) և զանգվածի փոփոխության արագության (DTG) կախվածություններն են ջերմաստիձանից, իսկ 2', 3', 4'-ը նույն կախվածություններն են նմուշի սառեցման ժամանակ

Պինդ վիճակում ընթացող ռեակցիաների մեխանիզմը առայժմ ամբողջությամբ ուսումնասիրված չէ։ Նշենք, որ սահմանափակող օղակը անկասկած դիֆուզիոն գործընթացն է, որն ըստ Ֆիկի հավասարման [2] ՝

$$J=D\nabla C_{i}, \qquad C_{i}=D\Delta C, \qquad (1)$$

(2)

իսկ ջերմային կախումը ըստ Արրենյուսի հավասարման [3]`
$$D(T)=D_0 \exp(-E/RT),$$

որտեղ J-ն հոսքի խտության վեկտորն է, մոլ.սմ<sup>-2</sup>.վ<sup>-1</sup>, D-ն՝ դիֆուզիայի գործակիցը,  $\nabla$ , Δ-ն՝ համապատասխանաբար Համիլտոնի և Լապլասի օպերատորները, C<sub>i</sub>-ն՝ կոնցենտրացիայի փոփոխությունը միավոր ժամանակում, C-ն՝ կոնցենտրացիան, E-ն՝ դիֆուզիայի ակտիվացման էներգիան, իսկ D<sub>0</sub>-ն հաստատուն է։ Մակերևութային դիֆուզիան սովորաբար ընթանում է 3...4 կարգով ավելի մեծ արագությամբ, քան ծավալայինը, որն ազդում է C, D<sub>0</sub> և E մեծությունների վրա։ Ռեակցիայի արագությունը նույնպես գրվում է Արրենյուսի հավասարումով՝

$$K = A \exp[-W/RT], \qquad (3)$$

որտեղ K-ն հաստատուն է, A-ն՝ ստերիկ գործոնը, W-ն՝ ակտիվացման էներգիան։ Ընդհանուր առմամբ, սիլիկատաառաջացման պինդ ֆազային ռեակցիաների արգասիքը AB նյութն է, որը կազմավորվում է A-ի (սոդայի) և B-ի (խառնուրդների) փոխազդեցության հետևանքով։ Այս դեպքում A-ն դիֆուզվում է B-ի մեջ AB շերտի միջով աննշան փոքր արագությամբ, քան A-ի և B-ի միջև քիմիական ռեակցիայի արագությունն է։ Հետևապես դիֆուզիան լիովին բնութագրում է գործընթացի կինետիկան։

Ընդունենք, որ A և B մասնիկները ռեակցիայի սկզբնական պահին ունեն V<sub>0</sub> և V ծավալներ և ռեակցիան սկսվելուց որոշ ժամանակ անց նրանց համապատասխանում են S<sub>0</sub> և S մակերևույթները։ Այս դեպքում նրանց զանգվածները համապատասխանաբար կկազմեն PV<sub>0</sub> և PV։ Եթե ընդունենք, որ dx ժամանակում ռեակցիան գնում է B մասնիկի մեջ dx խորությամբ, որը համապատասխանում է PV -ի, ապա կստանանք՝

$$PdV = PSdx$$
,  $V_0 - V = \int_0^x Sdx$ :

B-ի վերափոխման աստիձանը միավոր բաժիններով կարող է արտահայտվել  $\lambda = (V_0 - V)/V_0$  կամ `

$$\frac{d\lambda}{d\tau} = \frac{d\left(\frac{V_0 - V}{V_0}\right)}{d\tau} = \frac{S}{V_0} \cdot \frac{dx}{d\tau}, \qquad \frac{d\lambda}{d\tau} = \frac{S_0}{V_0} \cdot \frac{S}{S_0} \cdot \frac{dx}{d\tau}, \qquad (4)$$

 ${S_0\over V_0}$  հարաբերությունը կարելի է արտահայտել հետևյալ կերպ` $S_0=1$ 

$$\frac{S_0}{V_0} = \frac{1}{\phi\delta}$$

որտեղ  $\phi$ -ը ձևի գործակիցն է (գնդի համար հավասար է 1/3, խորանարդի համար՝ 1/6 և այլն), իսկ  $\delta$ -ն՝ շերտի նվազագույն հաստությունը։  $\frac{S}{S_0}$  հարաբերությունը B-ի վերափոխման աստիձանի ֆունկցիա է։ Այդ ֆունկցիայի բացահայտ տեսքը տարբեր է և կախված է մասնիկի ձևից։ Այսպես, գնդի համար

$$\frac{S}{S_0} = \sqrt[3]{(1-\lambda)^2} = \frac{r^2}{r_0^2}, \qquad \lambda = 1 - \left(\frac{r_0 - x}{r_0}\right)^3, \tag{5}$$

որտեղ r-ը արգասիքի մասնիկի ընթացիկ շառավիղն է։

Ենթադրելով, որ B մասնիկներն ունեն սֆերիկ ձև և սիլիկատաառաջացման գործընթացը նկարագրելու համար օգտագործելով Յանդերի հավասարումը կստանանք ՝

$$\tau = K \left( 1 - \sqrt[3]{1 - \lambda} \right)^2, \tag{6}$$

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{r}_0^2}{2\mathbf{K}_1}, \qquad \mathbf{K}_1 = \frac{\mathbf{D}}{\varepsilon} \mathbf{C}_1, \tag{7}$$

որտեղ K-ն հաստատուն է՝ կախված արգասիքի հատկություններից և գործընթացի պայմաններից, Kı-ը հաստատուն է, որը բնութագրում է գործընթացի դիֆուզիոն ռեժիմը, տ-ն՝ մասնիկի սկզբնական շառավիղն է, D-ն՝ դիֆուզիայի գործակիցը A → AB միջակայքում,  $\mathcal{E}$  =pn/M` համեմատականության գործակից է, P-ն՝ տեսակարար կշիռը, M-ը՝ AB-ի մոլեկուլային կշիռը, ո-ը՝ ռեակցիայի ստեխիոմետրիկ գործակիցը։

$$C_1 = rac{M(x)}{4\pi D} \cdot rac{x}{r_0(r_0 - x)}$$
 - նյութի կոնցենտրացիան է A-AB բաժանման սահմանի վրա,

որտեղ M(x)-ը A նյութի քանակն է, որը միավոր ժամանակի ընթացքում դիֆուզվում է AB շերտի միջով որոշակի x խորությամբ։

(6) հավասարման համապատասխան ձևափոխումից և ինտեգրումից հետո կստանանք՝

$$d\lambda \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \lambda}}{\sqrt[3]{(1 - \lambda)^2}}\right) = \frac{3K_1}{r_0^2} d\tau, \qquad (8)$$
  
$$\sqrt[3]{1 - \lambda + \frac{1}{2}} \sqrt[3]{(1 - \lambda)^2} = \frac{K_1}{r_0^2} \tau - C, \qquad (9)$$

որտեղ C-ն ինտեգրման հաստատուն է։ Սկզբնական պայմաններում, երբ  $\lambda$ =0 և r=0, այն հավասար է 3/2։

Համատեղ լուծելով (5), (7), և (9) հավասարումները, կստանանք՝

$$\tau = \left[ K \left( 1 + \frac{r}{r_0} \right)^2 \right]:$$
 (10)

(6) և (10) հավասարումները տալիս են սիլիկատաառաջացման պինդ ֆազային ռեակցիաների դիֆուզիոն գործընթացների ձևական նկարագրությունը, որոնք բնութագրվում են ակտիվացման նվազ էներգիայով։ Փորձնական եղանակով  $\lambda = f(r, \tau)$  ֆունկցիայի որոշման փորձերը, և հետևապես, (6) և (10) հավասարումների գործնական օգտագործումը ցանկալի արդյունքներ չեն տալիս, որովհետև մոդելային փորձերը (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> սիլիկատներ) չեն վերարտադրում իրական գործընթացը։ Սակայն Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> և Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> խառնուրդների համար, որոնք ենթարկվել են սինթեզի 750°C ջերմաստիձանում, նշված հավասարումների ձշտությունը հաստատվում է արգասիքների վերափոխման փոքր աստիձանի համար։ Այսպես, երբ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:SiO<sub>2</sub>=1:1 (ֆրակցիա - 0,50 *մ*մ) և  $\tau$  =0,5...1,0 *մամ*, ըստ փորձի λ <sub>ψ</sub>=0,13...0,25, ըստ հաշվարկի λ<sub>h</sub>=0,10...0,23, այն դեպքում, երբ λ<sub>φ</sub>≥0,5, ապա λ<sub>h</sub>-ի նշանակությունը անհամատեղելի է։ Համենայն դեպս, (10) բանաձևը հետաքրքրություն է ներկայացնում և հետագա ուսումնասիրման անրաժեշտություն ունի։

700...1100°C ջերմաստիձանային միջակայքում վերականգնված բովախառնուրդի արգասիքների միներալոգիական անալիզը ցույց է տալիս, որ ընթացող սիլիկատաառաջացման պինդ ֆազային ռեակցիաների հետևանքով առաջանում են հետևյալ տիպի միացությունները՝ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CaO ·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, 2MnOSiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>, CaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 2Na<sub>2</sub>O ·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ·SiO<sub>2</sub>, 3CaO ·Na<sub>2</sub>O ·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>MgSiO<sub>4</sub>, որոնք հաստատում են երկակի (սկզբնական 700...800°C) և եռակի (900...1100°C) երկրորդային ռեակցիաների համակարգերը, որոնց հետևանքով կազմավորվում են սիլիկատներ, ալյումինատներ, ալյումասիլիկատներ և այլ բարդ կոմպլեքսներ՝

$$\begin{split} &Na_2CO_3+SiO_2 \rightarrow Na_2SiO_3+CO_2, \\ &Na_2CO_3+Al_2O_3 \rightarrow Na_2Al_2O_4+CO_2, \\ &Na_2SiO_3+Na_2Al_2O_4 \rightarrow 2Na_2O\bar{E}Al_2O_3\bar{E}SiO_2, \\ &Ca_2SiO_4+Mg_2SiO_4 \rightarrow Ca_2MgSiO_4, \\ &FeS+Na_2O+C \rightarrow Fe+Na_2S+CO, \\ &FeO\bar{E}SiO_2+Na_2CO_3 \rightarrow FeO+Na_2SiO_3+CO_2, \\ &FeO\bar{E}Al_2O_3+Na_2O+C \rightarrow Fe+Na_2Al_2O_4+CO: \end{split}$$

Ինչպես ցույց է տալիս ռենտգենաֆազային վերլուծությունը, հատիկավորված բովախառնուրդների վերականգնման գործընթացում 1000...1050ºC ջերմաստիՃանում տեղի է ունենում պինդ ֆազային ռեակցիաների վերածածկում (առաջնային և երկրորդային)։

Նկ.2-ում ցույց է տրված ելանյութային խտանյութի (1), վերականգնված սպունգի (2) և երկաթափոշու (3) ռենտգենագրամները։

Ռենտգենագրաֆիական անալիզները կատարվել են ДРОН-2,0 դիֆրակտոմետրի վրա` պղնձի  $K_{\alpha+\beta}$  ճառագայթումով, հետևյալ ռեժիմներով` պատրաստուկի լուսակայման ժամանակ պտտման արագությունը իր հարթության մեջ եղել է ո=30 *պտ/рոպե*, Գեյգերի հաշվիչի պտտման արագությունը -1<sup>0</sup>/*рոպե*, նկարահանման ռեժիմը` V=6 *կՎ*, J=10 *մԱ*, ճեղքի բացվածքը` 0,5 *մմ*. Ուժգնությունը գնահատվել է 100 բալանոց սանդղակով։

հնչպես երևում է ռենտգենագրամից, խտանյութի մեջ չեն հայտնաբերվել մեծ քանակությամբ խառնուրդներ (նմուշ 1)։ Հիմնական ֆազերն են՝ մագնետիտը (α=2,862 Å) և հեմատիտը (Nd)։ Մպունգի մեջ (նմուշ 2) բացի հիմնական  $\alpha$  - Fe ֆազից, ցայտուն երևում են շպինելներ և սիլիկատեր (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), ալյումինատներ (Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), և ալյումինասիլիկատներ՝ նեֆելինների տեսքով  $\alpha$  - Na(AlSiO<sub>4</sub>)։ Գոյություն ունի նաև ազատ վիձակում որոշակի քանակի Na<sub>2</sub>O, որին համապատասխանում է d/n=2,55 Å և d/n=1,805 Å ։ Երկաթափոշու մեջ (նմուշ 3) բացի  $\alpha$  - Fe, որի  $\alpha$  =2,862 Å, ոչ մի այլ մաքսիմում չի հայտնաբերվել, որը հաստատում է ստացված երկաթափոշու մաքրության աստիձանը։



Նկ. 2. Խտանյութի (1), վերականգնված սպունգի (2) և երկաթափոշու (3) ռենտգենագրամներ

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Мальян Д.Э., Агбалян С.Г. и др. Дериватографическое исследование газотранспортных реакций в порошковых смесях железа с хлоридом аммония // Порошковая металлургия. - Киев, 1992.-N 9.-С. 78-83.
- 2. **Анциферов В.Н.** и др. Взаимная диффузия и гомогенизация в порошковых материалах.-М.: Металлургия, 1988.-151с.
- **3**. **Гуров К.П., Карташкин Б.А.** Взаимная диффузия в многофазных металлических системах.-М.: Наука, 1981.- С.320-332.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.05.2006։

#### С.Г. АГБАЛЯН, А.А. ФРАНГУЛЯН, Т.Г. АПОЯН, А.Н. КАЗАРЯН

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТЖИГА ГЕМАТИТОВЫХ РУД И СИЛИКАТООБРАЗУЮЩИХ РЕАКЦИЙ

С помощью дериватографического метода исследованы процессы отжига гематитовых руд при наличии углерода и соды. Показано, что наиболее сильное влияние соды на процесс восстановления происходит при ее 10%-ом содержании, что способствует ускорению восстановительного процесса и дает возможность освободиться от разных силикатных и других соединений. Исследованы также реакции силикатообразования, которые имеют место во время отжига параллельно с процессом восстановления.

*Ключевые слова:* гематит, руда, карбонат натрия, смесь, отжиг, силикатообразование, диффузия, восстановление, оксид железа.

#### S.G. AGHBALYAN, A.A. FRANGULYAN, T.G. APOYAN, A.N. KHAZARYAN

# INVESTIGATION OF THE ANNEALING PROCESS OF HAEMITITE ORES AND SILICATE FORMATING REACTIONS

By means of derivative-graphical methods the process of annealing haematite ores with carbon and soda are examined. It is shown that the strongest influence of soda on the process of reduction takes place at 10% amount of the latter promoting the acceleration of the reduction and is given an opportunity to rack off different silicate and other impurities. The reactions of silicate formation happening during annealing process simultaneously with the reduction process have also been studied. *Keywords:* haematite, ore, sodium carbonate, compound, annealing, silicate formation, diffusion, reduction, iron oxide. ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 622.274

ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱ

#### Ս.Գ.ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, Գ.Ա. ԱՌԱՔԵԼՈՎ

# ԲԱՑԱՀԱՆՔԻ ԿՈՂԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՆՈՐ ԵՂԱՆԱԿ ԹԵՔ ԵՎ ԶԱՌԻԹԱՓ ՀԱՆՔԱՄԱՐՄԻՆՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Հետազոտության հիմնական նպատակը բացահանքերի կողերի ձևավորման նոր եղանակի մշակումն է, որը հնարավորություն է ընձեռում առանց լրացուցիչ մակաբացման ծավալների հեռացման հասնել վերջինիս կողերի առավել մեծ կայունության` կողի պրոֆիլի ձևափոխման շնորհիվ։ Տրված են առաջարկվող եղանակով բացահանքի կողերի ձևավորման կարգը և հիմնական պարամետրերի հաշվարկման մեթոդիկան։ *Առանցքային բառեր.* բացահանք, բացահանքի ոչ աշխատանքային կող, բացահանքի կողի կայունություն, փլուզման պրիզմա, սահքի մակերևույթ, կողերի ամրակապում, մակաբացման ապարներ, եզրագծային պայթեցում։

Բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի թեքման անկյունների վրա ազդում են բազմաթիվ գործոններ, որոնցից կարևորներն են՝ հանքավայրի ինժեներաերկրաբանական պայմանները, բացահանքի վերջնական խորությունը, ծառայման ժամկետը, մշակման տեխնոլոգիան, կողերը ձևավորող ապարների ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունները և այլն։

Նշված բոլոր գործոններն այս կամ այն ձևով ազդում են ապարները բնութագրող որոշակի պարամետրերի վրա (հիմնականում ապարների կապակցվածության և ներքին շփման անկյան), որոնք ընկած են բացահանքի կողերի թեքման անկյունների որոշման բոլոր հաշվարկային մեթոդների հիմքում [1,2]:

Սակայն, ինչպես ցույց է տալիս պրակտիկան [3], ոչ բոլոր դեպքերում է, որ հաշվարկային վերոհիշյալ մեթոդներն ապահովում են համապատասխան Ճշտություն, քանի որ դրանցում հաշվի չի առնվում ժամանակի գործոնը։ Դրա հետևանքով շատ բացահանքերում տեղի են ունեցել կողերի կամ նրանց առանձին տեղամասերի փլուզումներ։ Հայաստանում տարբեր տարիներին տեղի են ունեցել փլուզումներ Սոթքի, Ագարակի և բոլորովին վերջերս՝ Ջրվեժի, իսկ ԱՊՀ-ի տարածքում «Վոլչանսկի», «Ալմալիկսկի»,«Օլենեգորսկի», «Կովդորսկի», «Կոստոմուշսկի», «Մեդվեժի Ռուչեյ», «Նորիլսկի Նիկել» և «Պեչենեգ Նիկել» ԼԿՄ-ի բացահանքերում։

Պրակտիկան ցույց է տալիս նաև, որ տեղի ունեցող փլուզումները առաջացել են հիմնականում բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի վերևային տեղամասերում, որտեղ լեռնային աշխատանքները վաղուց ավարտվել են։ Սա խոսում է այն մասին, որ փլուզումների հիմնական պատՃառը տարբեր գործոնների ազդեցության տակ ժամանակի ընթացքում ապարային զանգվածի նախնական հատկությունների փոփոխություններն են։

Հաձախ կողերի կայունությունն ապահովելու և փլուզումները կանխելու նպատակով իրագործվում են մի շարք միջոցառումներ, այդ թվում՝ բացահանքի կողերի թույլ տեղամասերի ամրակապում, կողերի կայունության հաշվառմամբ վերջինիս մշակման կարգի ընտրություն, եզրագծային պայթեցման օգտագործում և

այլն։ Սակայն, նշված միջոցառումների կիրառումը, ինչ-որ չափով մեղմացնելով փլուզման

վտանգը, այն չի բացառում։

Այդ պատՃառով էլ անհրաժեշտ է բացահանքի շահագործման ժամանակ ընտրել վերջինիս ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորման այնպիսի կառուցվածք (կոնստրուկցիա), որի դեպքում ապարային զանգվածի այն ծավալները, որոնցում տեղի են ունենում սկզբնական հատկությունների փոփոխություններ, պարբերաբար ենթարկվեն հեռացման, ինչը և առաջարկվում է մեր կողմից [4]։

Առաջարկված եղանակի էությունը, որի համար ստացված է հեղինակային իրավունք, հետևյալն է. բացահանքը (նկ.1), որի վերջնական եզրագծերի մոտ ցույց են տրվում փլուզման պրիզմայի սահմանները (a), ըստ բարձրության բաժանվում է երկու մասի՝ վերևի (H<sub>4</sub>) և ներքևի (H<sub>4</sub>)։ Վերևի մասի մշակումը կազմակերպվում է այնպես, որ ձևավորվող ոչ աշխատանքային կողերը մակերևույթի կողմից ընդգրկում են փյուզման պրիզմայի սահմանններն ամբողջությամբ։ Անհրաժեշտ է նշել, որ նման դեպքերում փլուզման պրիզմայից մակաբացման ապարների հեռացումը պետք է կազմակերպվի այնպես (այսինքն` բացահանքի ներքևի մասի մշակմանը զուգընթաց), որպեսզի բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորումը բացահանքի ամբողջ խորությամբ հնարավորինս կատարվի միաժամանակ, ինչի շնորհիվ էլ կվերացվի փլուզման վտանգը։ Քանի որ նշված ձևով մշակման ժամանակ մեծանում է բացահանքի վերևի մասից հեռացվող դատարկ ապարների ծավալը (ΔV վ), ապա ներքևի մասի մշակման դեպքում ոչ աշխատանքային կողերի թեքման անկյունները պետք է վերցնել այնպիսին, որպեսզի նույն մեծությամբ (ΔV<sub>4</sub>) փոքրանա հեռացվող դատարկ ապարների ծավալը կամ վերևի և ներքևի մասերում մակաբացման գումարային ծախսերը մնան հաստատուն։ Իսկ ներքևի մասում բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի թեքման անկյունների առավելագույն մեծությունները (Yumax) պետք է ապահովեն այդ կողերում թողնվող համապատասխան բերմաների նվազագույն մեծությունների տեղադրումը։



Նկ.1. Բացահանքի կողի ձևավորման նոր եղանակի հաշվարկման սխեմա

Այսպիսով, բացահանքի վերևի մասում կողը մշակվում է նախագծայինի համեմատ ավելի սակավաթեք անկյան տակ (үч< ү), իսկ ներքևի մասում՝ ավելի զառիթափ (уч≤утах>у)։ Վերևի մասից հեռացվում է ակտիվ Ճնշման պրիզման, իսկ

ներքևում ստեղծվում է հզոր հենման պրիզմա։ Բացահանքի կողը ստանում է բեկյալ պրոֆիլ (ANC) ավանդական հարթ պրոֆիլի (AC) փոխարեն։ Ինչ վերաբերում է բացահանքի կողերին ներքևի մասում, ապա դրանց կայունությունը մեծ փոփոխություններ կրել չի կարող , քանի որ դրանց ձևավորման ժամանակը կարձ է, իսկ այդ տեղամասերի ապարները ավելի կայուն են։

Բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորման առաջարկվող եղանակի տնտեսական արդյունավետությունը կապահովվի հետևյալ պայմանի դեպքում

$$\Delta V_{\mathfrak{l}} C_{\mathfrak{l}} \leq \Delta V_{\mathfrak{b}} C_{\mathfrak{b}} , \qquad (1)$$

որտեղ  $\Delta V_{u}$ -ն բացահանքի ներքևի մասում չհանվող (թողնվող) մակաբացման ապարների ծավալն է,  $u^3$ ,  $\Delta V_{u}$ -ն բացահանքի վերևի մասում լրացուցիչ հանվող փլուզման պրիզմա կազմող մակաբացման ապարների ծավալը,  $u^3$ , Cu–ն ներքևի հորիզոններից 1  $u^3$  մակաբացման ապարների հեռացման վրա կատարվող ծախսերի մեծությունը,  $\eta p/u^3$ , Cu–ն վերևի հորիզոններից 1  $u^3$ մակաբացման ապարների հեռացման վրա կատարվող ծախսերի մեծությունը,  $\eta p/u^3$ :

Ընդհանրապես, C<sub>4</sub> > C<sub>4</sub>, քանի որ բացահանքի ներքևի հորիզոններից 1 *մա* մակաբացման ապարների հեռացման համար կատարվող ծախսերն ի հաշիվ տեղափոխման Ճանապարհի մեծացման ( $\Delta$ L) ավելի մեծ են։ Այդ պատՃառով էլ հնարավոր է, որ  $\Delta$ V<sub>4</sub> <  $\Delta$ V<sub>4</sub>: Պետք է նշել, որ ավտոմոբիլային տրանսպորտի օգտագործման դեպքում Cն =Cվ (1+0,45  $\Delta$ L/ L), իսկ երկաթգծային տրանսպորտի դեպքում Cն =Cվ (1+0,35  $\Delta$ L/ L) :

Բացահանքի վերևի և ներքևի տեղամասերի բարձրությունները (H<sub>4</sub> և H<sub>b</sub>) որոշվում են` ելնելով վերջինիս վերևի մասից մակաբացման լրացուցիչ ծավալների և ներքևի մասում թողնվող ծավալների հեռացման համար պահանջվող ծախսերի հավասարության պայմանից, (1)։ Հաշվարկման սխեման ունի նկ.1-ում բերված տեսքը։

Առաջին հերթին որոշվում է փլուզման պրիզմայի այն ծավալի մեծությունը, որը նախատեսված է հեռացնել բացահանքի մշակման ժամանակ։ Նշված ծավալը բացահանքի մեկ միավոր երկարության դեպքում կազմում է

$$\Delta V_{\rm q} = \frac{\mathrm{a}H_{\rm q}}{2}, \ u^3: \tag{2}$$

Այնուհետև որոշվում է բացահանքի ներքևի մասից չհեռացվող մակաբացման ապարների ծավալը, որը, ելնելով (1) պայմանից, կազմում է

$$\Delta V_{\mathfrak{g}} = \frac{\Delta V_{\mathfrak{g}} C_{\mathfrak{g}}}{C_{\mathfrak{g}}}, \quad u^{\mathfrak{g}}:$$
(3)

Մյուս կողմից, բացահանքի մեկ միավոր երկարության դեպքում

$$\Delta V_{g} = \frac{ADx}{2}, \ u^{3}, \tag{4}$$

որտեղ x-ը ընդունված H<sub>l</sub>-ի դեպքում ներքևում ստացվող AND եռանկյան այն բարձրությունն է, որի դեպքում ապահովվում է (3) պայմանը։ AD-ն ΔAND եռանկյան հիմքն է։

Համապատասխան արժեքները տեղադրելով (3) հավասարման մեջ` կստանանք.

Ավտոտրանսպորտի օգտագործման դեպքում

$$X = \frac{\left[2H_{p} \cdot (1 - \operatorname{ctg}\gamma \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho)/2) - 2H_{90}\right] \cdot H_{q} \cdot \sin\gamma}{\left(H_{p} - H_{q}\right) \cdot \left(1 + 0.45\Delta L/L\right) \cdot \left[\operatorname{ctg}\left(45^{\circ} - \rho/2\right) + \operatorname{tg}\left((\gamma + \rho)/2\right)\right]},$$
(5)

երկաթգծային տրանսպորտի օգտագործման դեպքում

$$X = \frac{\left[2H_{p} \cdot (1 - \operatorname{ctg}\gamma \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \rho)/2) - 2H_{90}\right] \cdot H_{q} \cdot \sin\gamma}{\left(H_{p} - H_{q}\right) \cdot \left(1 + 0.35\Delta L/L\right) \cdot \left[\operatorname{ctg}\left(45^{\circ} - \rho/2\right) + \operatorname{tg}\left((\gamma + \rho)/2\right)\right]},$$
(6)

որտեղ H<sub>F</sub>-ն բացահանքի խորությունն է, *u*, ( -ն` ոչ աշխատանքային կողերի նախագծային թեքման անկյունը, աստ., (u –ն` ապարների ծավալային խտությունը, *տ/u*<sup>2</sup>, *ρ*-ն` բացահանքի կողերը ձևավորող ապարների ներքին շփման անկյունը, աստ., K-ն` բացահանքի կողերը ձևավորող ապարային զանգվածի կապակցվածությունը, *Ն/u*<sup>2</sup>, H<sub>90</sub> –ը` բացահանքի այն խորությունը, որի սահմաններում կողերի թեքությունը կարելի է վերցնել ուղղաձիգ, *մ* 

$$H_{90} = \frac{2K \cdot \cos\rho}{\gamma_{\text{hu}} \cdot \sin^2(45^0 - \rho/2)}, \quad \text{if.}$$
(7)

Ստացված X-ի մեծությունը պետք է բավարարի հետևյալ պայմանը.

 $X_{max} = (H_p - H_q)q(ctg\gamma - ctg\gamma_{max})qsin\gamma$ :

 $X_{max}>X>0$ ,

(8)

որտեղ X<sub>max</sub> -ը բացահանքի վերևի մասի ընդունված բարձրության դեպքում բացահանքի ներքևի մասում թողնվող մակաբացման ապարների առավելագույն ծավալին համապատասխանող եռանկյան (ΔAKD) բարձրությունն է։

Նշված X<sub>max</sub> մեծությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով.

(9)

Վերոհիշյալ (5) և (9) բանաձներով կատարված հաշվարկման արդյունքները բերված են աղյուսակում։ Հաշվարկը կատարված է հետևյալ տվյալների առկայության պայմաններում. γ=40 °, γ<sub>max</sub>=50°, ρ=30°, K=10<sup>4</sup>  $u/u^2$ , γ<sub>μ</sub>=2,5  $u/u^3$ 

Հաշվարկման արդյունքները ցույց են տալիս, որ

- բացահանքի վերևի մասի խորության մեծացումը հանգեցնում է X-ի մեծացման և X<sub>max</sub>-ի փոքրացման,
- բացահանքի վերևի մասի որոշակի խորությունից սկսած X> X<sub>max</sub>։ Սա նշանակում է, որ հետագա հաշվարկման համար պետք է վերցնել Hվ-ի առավել փոքր մեծություններ,
- ΔL/L հարաբերության մեծացումը հանգեցնում է X-ի փոքրացման, բայց ոչ նշանակալի չափով։ Եվ իրոք, ΔL/L հարաբերության 2 անգամ մեծացումը հանգեցնում է X-ի փոքրացման ընդամենը 1,16 անգամ։ Իսկ դա նշանակում է, որ շատ դեպքերում այն կարելի է անտեսել։

Առաջարկվող եղանակով բացահանքի կողերի ձևավորումը կատարվում է հետևյալ կարգով (ձևավորման կարգը ցուցադրվում է մեկ կողի վրա, քանի որ մյուս կողերի ձևավորումը կատարվում է նույն մոտեցմամբ)։

Բացահանքի լայնական կտրվածքի վրա նշվում են բացահանքի նախագծային խորությունը (Η<sub>F</sub>), կողի թեքման անկյունը (γ), կողի թեքության համապատասխան կետերը բացահանքի հատակի (A) և մակերևույթի կողմից (B) (նկ. 2)։

Աղյուսակ

X և X<sub>max</sub> մեծությունների կախվածությունը H<sub>F</sub>-ից, H<sub>4</sub>-ից և  $\Delta$ L/L հարաբերությունից

21 0 211182 000	nepjneaaani qaalaq	aonephicali ng ng, ng ng a 🖬	/ H mailtar Falm	epineung
Բացահանքի	Բացահանքի	Ճանապարհի		
խորությունը	վերևի մասի	երկարացման	Х, И	$X_{max}$ , $u$
(Hp), <i>u</i>	խորությունը	հարաբերությունը		
	(Hự), <i>ư</i>	սկզբնական		
		երկարությանը ΔL/L		
1	2	3	4	5
	60		5,8	31,6
200	80	0,4	9,1	27,1
	100		15	22,6
	120		20,4	18,1
	100		10	45,2
300	140	0,4	17,7	36,2
	180		25,5	27,1
	220		50	18,1
	60		5,0	31,6
200	80	0,8	8,0	27,1
	100		13	22,6
	120		18,2	18,1
	100		8,8	45,2
300	140	0,8	15,4	36,2
	160		22,2	27,1
	220		44	18,1
		B a	C	
		$H_{ij}$ $N = D$ $\Delta V_{ij}$ $K$ $F$ $V_{max}$ $V$	Hoo F	Ι¢
$\overline{\}$		A W) B a H <sub>4</sub> N X D m F Vmax V	C H90 Hp	
		A		

բ) Նկ.2. Նոր եղանակով բացահանքի ոչ աշխատանքային կողի ձևավորման կարգը ա) երբ X-ը գտնում են ի հաշիվ բացահանքի կողի առավելագույն անկյան փոքրացման, բ) երբ X-ը գտնում են ի հաշիվ բացահանքի առավելագույն թեքությամբ կողի բարձրության փոքրացման

- Ելնելով վերոհիշյալ մեծություններից և բացահանքի տվյալ կողը ձևավորող ապարային զանգվածի հիմնական պարամետրերից` համապատասխան բանաձևով [1] որոշվում է փլուզման պրիզմայի լայնությունը` a և տեղադրվում բացահանքի ոչ աշխատանքային կողի վրա (BC)։

- Բացահանքի վերևի մասի կամայական խորությունը (H<sub>վ</sub>) տեղադրվում է բացահանքի մակերևույթից նախագծային թեքության վրա` նշելով Dկետը։

- Ելնելով բացահանքի մշակման փաստացի պայմաններից` համապատասխան բանաձևով որոշվում է բացահանքի կողի թեքման առավելագույն անկյունը γ<sub>max</sub> և այդ անկյան տակ կառուցվում է կողի թեքությունը` AM։

- Վերոհիշյալ C և D կետերով կառուցվում է բացահանքի կողի վերևի մասի թեքությունը CD և շարունակում այն՝ մինչև N կետում AM-ի հետ հատվելը։

- Չափվում է բացահանքի ներքևի մասում ստացված DNA եռանկյան NF բարձրությունը։

- Ելնելով բացահանքի վերևի մասից լրացուցիչ հեռացվող (BCD) դատարկ ապարների վրա կատարվող ծախսերի և ներքևի մասում թողնվող (DNA) ապարների հեռացման վրա չկատարված ծախսերի հավասարության պայմանից՝ որոշվում է այն X բարձրությունը, որի դեպքում ապահովվում է վերոհիշյալ պայմանը։

Եթե ստացված X մեծությունը հավասար է NF- ին, նշանակում է բացահանքի վերևի մասի խորությունը Ճիշտ է վերցված, իսկ բացահանքի կողը ընդունում է ANDC դիրքը (նկ.1)։ Սակայն հնարավոր են դեպքեր, երբ ստացված X-ը փոքր է լինում NF- ից կամ գերազանցում է այն։

Եթե X<NF, ապա կողի ձևավորումը կարող է կատարվել երեք մոտեցումներով։

 X- ը գտնում են` ի հաշիվ բացահանքի կողի առավելագույն թեքման անկյան փոքրացման։ Դրա համար բացահանքի վերևի մասի թեքության DN հատվածի վրա գտնում են այն E կետը, որից AD- ի վրա իջեցված ողղահայացի մեծությունը EK հավասար է հաշվարկային X մեծությանը։ Նման դեպքերում այդ կետը միացվում է A կետին և բացահանքի կողը ընդունում է AEDC տեսքը (նկ.2ա)։

2. X- ը գտնում են՝ ի հաշիվ բացահանքի առավելագույն թեքությամբ կողի բարձրության փոքրացման։ Դրա համար բացահանքի վերևի մասի թեքության AN հատվածի վրա գտնում են այն m կետը, որից AD- ի վրա իջեցված ուղղահայացի mn մեծությունը հավասար է հաշվարկային X մեծությանը։ Նման դեպքերում այդ կետը միացվում է D կետին և բացահանքի կողն ընդունում է AmDC տեսքը (նկ. 2 բ )։

3. X- ը գտնում են` ի հաշիվ բացահանքի վերևի մասի խորության փոփոխության։ Դրա համար H<sub>վ</sub> մեծությունը այնքան անգամ է փոփոխվում, մինչև ստացված X մեծությունը համապատասխանում է ընդունվածին։

Ինչպես երևում է բերված գծագրերից, առաջին և երրորդ դեպքերում բացահանքի կողը ստացվում է երկնիստ, իսկ երկրորդ դեպքում` եռանիստ։ Բացահանքի կողի ձևավորման այս կամ այն ձևի ընտրությունը պետք է հիմնավորվի համապատասխան կայունության հաշվարկով։

Իսկ եթե X>NF, ապա առաջին հերթին այն պետք է համեմատվի X<sub>max</sub> –ի հետ։ Այստեղ ևս հնարավոր են երկու դեպքեր.

 $w) \ \ \text{tpp NF}{<}X \leq X_{max},$ 

p)  $tpp NF < X > X_{max}$ :

Առաջին դեպքում նախ կառուցվում է X<sub>max</sub>-ը հետևյալ կարգով` նախ D կետից տարվում է հորիզոնական գիծ (նկ 3), այնուհետև շարունակվում է AN թեքությունը

մինչև հորիզոնական գծի հետ հատվելը (d), որից հետո d կետից AD թեքության վրա իջեցվում է ուղղահայաց (f), որի երկարությունը X<sub>max</sub>-ն է։



Նկ.3. Նոր եղանակով բացահանքի ոչ աշխատանքային կողի ձևավորման կարգը ա) X< X $_{\rm max}$ , p) NF<X> X $_{\rm max}$ 

Եթե ստացված X=X<sub>max</sub>, ապա կառուցումը Ճիշտ է, և բացահանքի կողը ընդունում է AdDC տեսքը։ Իսկ եթե X< X<sub>max</sub>, ապա Nd թեքության վրա գտնում են այն օ կետը, որից AD –ի վրա իջեցված ուղղահայացի OE երկարությունը հավասար **է** հաշվարկային X մեծությանը։ Տվյալ դեպքում բացահանքի կողը ընդունում է AoDC տեսքը (նկ.3 բ)։

Երկրորդ դեպքում, երբ հաշվարկային X –ը ստացվում է X<sub>max</sub> –ից մեծ, ապա դա նշանակում է, որ պետք է կատարել ընդունված H<sub>4</sub> –ի փոփոխություն և գտնել այն H<sub>4x</sub>-ը, որի դեպքում նոր ստացված X մեծությունը փոքր կամ հավասար ստացվի նոր հաշվարկային X<sub>max</sub>-ից։

Առաջարկվող եղանակով բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորումն ունի հետևյալ առավելությունները.

- բացահանքի վերևի մասի ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորման տեղափոխումը մշակման ավելի ուշ փուլեր, որի արդյունքում դրանք քիչ են ենթարկվում վերոհիշյալ գործոնների վնասակար ազդեցությանը,

 վերևի մասում ոչ աշխատանքային կողերի թեքման անկյունները անհամեմատ փոքր են նախագծայինից (մինչև 25...30<sup>0</sup>), - բացահանքի վերևի մասից փլուզման պրիզմայում ներգրավված մակաբացման ապարների ավելի լիակատար հեռացում,

- ներքևի մասում կողի թեքման անկյան մեծացում (մինչև 52...55º) և բացահանքի ներքևի մասում հզոր հենման պրիզմայի ստեղծում,

- պրիզմագոյացնող մակաբացման ապարների հեռացումը բացահանքի կողի վերևի մասից կատարվում է աստիձանաբար, սկսած որոշակի խորությունից, երբ բացահանքը արդեն հասել է իր արտադրական հզորությանը` դրանով իսկ խուսափելով մշակման սկզբնական փուլերում մակաբացման ծավալների մեծացումից,

- առաջարկվող եղանակի կիրառումն ապահովում է բացահանքի ոչ աշխատանքային կողերի կայունության բարձրացում 10-11%-ով։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Арсентьев А.И. и др. Устойчивость бортов и осушение карьеров. М.: Недра, 1982.
- 2. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. –М.: Недра, 1965.
- 3. Галустьян Э.Л., Веретельник И.П. Предупреждение крупномасштабных разрушений бортов карьеров путем поэтапной оценки их устойчивости // Горный журнал. 1999.-N2.
- 4. ՀՀ Արտոնագիր № 1880 A2 «Խորը բացահանքերի ոչ աշխատանքային կողերի ձևավորման եղանակ». 15.12.2006:

ГИУА. Материал поступил в редакцию 21.07.2007.

#### С.Г. ОВСЕПЯН, Г.А. АРАКЕЛОВ

#### НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛОГИХ И КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ

Разработан новый способ формирования бортов карьеров, который дает возможность без дополнительного удаления вскрышных пород достичь наибольшей устойчивости бортов путем изменения их профиля. Представлены порядок формирования бортов карьера предлагаемым способом и методика расчета основных параметров.

*Ключевые слова:* карьер, нерабочий борт карьера, устойчивость борта карьера, призма обрушения, поверхность скольжения, укрепление бортов, вскрышные породы, контурное взрывание.

#### S.G. HOVSEPYAN, G.A. ARAKELOV

# NEW METHOD FORMING BOARDS OF OPEN-PITS FOR MINING DEPOSITS OF CANOPY AND STEEPLY DIPPING ORE BODIES

The new method of forming boards of open-pits enabling without additional extracting overburdening rocks to achieve the most stability of boards with profile change of board is developed. The sequence of forming open-pits boards by the suggested method and calculation methodics of basic parameters is presented.

*Keywords:* open-pit, unused board of open-pit, stability of open-pit board, roof-fall prizm, sliding surface, boards strengthening, overburdening rocks, contour blast.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.311

ЭНЕРГЕТИКА

#### В.С. ХАЧАТРЯН, Н.П. БАДАЛЯН, К.В. ХАЧАТРЯН, С.Э. ГРИГОРЯН, М.А. МНАЦАКАНЯН, А.Р. ТОХУНЦ, А.Г. ГУЛЯН

### ПОСТРОЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ Z МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Предлагается метод расчета и коррекции Z матрицы обобщенных параметров, когда на отдельных участках электрической сети электроэнергетической системы (ЭЭС) функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации.

*Ключевые слова:* обобщенный параметр, трансформатор, коэффициент, матрица, узел, модель, система, схема замещения, электроэнергетическая система.

В настоящее время для решения различных режимных вопросов ЭЭС широко используются Y, Z, Y-Z матрицы пассивных обобщенных параметров схемы замещения [1-19]. При этом важным является правильный выбор этих параметров для обеспечения сходимости решения нелинейных векторных уравнений, вытекающих из соответствующих математических моделей.

С этой целью обратимся к известной работе [4], в которой доказывается несостоятельность решения задачи установившегося режима при использовании У матрицы обобщенных параметров и показывается бесспорное преимущество применения Z матрицы обобщенных параметров.

Необходимо отметить, что в [4] на основании качественных и количественных исследований задачи расчета установившегося режима ЭЭС пришли к заключению, что Y форма уравнения установившегося режима не решает задачу в случаях:

- когда электрическая схема замещения характеризуется большой неоднородностью, т.е. когда величины комплексных сопротивлений между узлами варьируются в весьма широких пределах, что является результатом параллельной работы воздушных и кабельных линий;
- когда электрическая схема замещения характеризуется отрицательным сопротивлением, которая является результатом функционирования трехфазных, трехобмоточных трансформаторов.

Как известно, современная сеть характеризуется этими свойствами.

Таким образом, в настоящее время нельзя построить обобщенную теорию расчета установившегося режима, основанную на Y форме задания пассивной части электрической сети.

В силу этого необходимо отметить, что единственным и перспективным направлением является использование Z и Y-Z матриц обобщенных параметров для построения математических моделей установившихся, оптимальных и других режимов ЭЭС.

При этом важным является вопрос учета трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации, которые функционируют на отдельных участках электрических сетей ЭЭС.

Если при Y форме задания исходной информации относительно пассивной части ЭЭС имеются работоспособные методы учета комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, то этого нельзя сказать относительно Z формы задания состояния электрической сети.

Действительно, впервые в [3] предлагается метод учета коэффициентов трансформации трансформаторов при построении численных Y матриц узловых проводимостей. Данный метод повторяется в [4], где предлагается более сложная схема замещения ветви с трансформатором. Предложенные методы в [3, 4] применимы в каждом конкретном случае и не имеют универсального характера. В [7, 8, 12] также предлагаются методы построения Y матриц узловых проводимостей с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, однако они не носят регулярного характера. В отличие от указанных работ, в [18, 19] предлагаются методы построения и коррекции Y пассивных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, которые, имея регулярный характер, применимы для электрической схемы замещения соответствующей структуры [4].

В [1, 2, 5, 6, 9, 11] рассматриваются методы построения Z пассивных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов, в которых отсутствуют соответствующие алгоритмы для их применения.

В настоящей работе предлагается метод построения и коррекции Z пассивных обобщенных параметров, когда на отдельных участках электрической схемы замещения функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации. Данный метод применим для ЭЭС любой сложности и структуры и имеет регулярный характер. Рассматривается ЭЭС, состоящая из М+1 узлов и N ветвей. На отдельных участках электрической сети ЭЭС функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации. Предполагается, что комплексные коэффициенты трансформации трансформаторов задаются, и требуется построить и скорректировать, согласно постановке задачи, Z матрицы обобщенных параметров.

В работе [18] установлено следующее выражение, связывающее комплексные напряжения на ветвях и узлах:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\hat{a}} = \dot{\mathbf{M}}_{n}^{\mathrm{T}} \dot{\mathbf{U}}_{y}, \qquad (1)$$

где  $\dot{U}_{\hat{a}}$  - многомерный вектор или столбцевая матрица падений напряжений на ветвях, имеющий порядок (N×1);  $\dot{U}_{y}$  - многомерный вектор или столбцевая матрица комплексных напряжений узлов, включая базисный узел, имеющий порядок ( $\hat{I}$  +1)×1;  $\dot{M}_{n}^{T}$  - транспонированная прямоугольная полная матрица соединений, имеющая порядок N×( $\hat{I}$  +1).

Матрица  $\dot{M}_{n}^{T}$  формируется на основании следующей модели:

 $\dot{\mathbf{M}}_{n}^{\mathrm{T}} = \begin{cases} +1, \, \text{если ветвь направлена от узла,} \\ -\dot{\mathbf{K}}_{\mathrm{T}}, \, \text{если ветвь направлена в узел,} \\ 0, \, \text{если ветвь не соединена с узлом,} \end{cases}$  (2)

где  $\hat{E}_{\dot{O}}$  - комплексный коэффициент трансформации трансформатора.

Узловые напряжения могут быть определены относительно любого узла, даже не входящего в структуру схемы замещения исследуемой ЭЭС. Однако для решения задачи, поставленной в данной работе, целесообразно узловые напряжения определить относительно напряжений базисного узла.

Если комплексное напряжение базисного узла обозначить через  $\dot{U}_{A}^{1}$  и считать последним по номеру, то получим следующее выражение относительно узловых напряжений:

$$\dot{\mathbf{U}}_{y} = \dot{\mathbf{U}}_{\dot{\mathbf{A}}} \cdot \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где Ú - многомерный вектор или столбцевая матрица комплексных напряжений относительно базисного узла,

$$\mathbf{n}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$
 (4)

Число единиц в матрице п равно порядку матрицы  $\dot{U}_v$ .

При этом матричное выражение (1) можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{B}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{M}}^{\mathrm{T}} & \dot{\mathbf{M}}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{A}} \cdot \mathbf{n} \right\}$$
  
или  
$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{B}} = \dot{\mathbf{M}}^{\mathrm{T}} \dot{\mathbf{U}},$$

где  $\dot{M}^{T}$  - транспонированная прямоугольная матрица соединений с фиксированным узлом базиса в схеме замещения, имеющая размерность  $N \times M$ .

(5)

Первый закон Кирхгофа для случая, когда в схеме замещения рассматриваемой ЭЭС функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации, представляется в виде [18]

$$\hat{\mathbf{M}}_{i}\,\dot{\mathbf{I}}=\dot{\mathbf{I}}\,,\tag{6}$$

где İ - многомерный вектор или столбцевая матрица комплексных токов ветвей, имеющий порядок  $(N \times 1); I$  - многомерный вектор или столбцевая матрица задающих комплексных токов, имеющий порядок  $(M+1) \times 1;$   $\hat{M}_{_{\rm I}}$  – прямоугольная полная матрица соединений, имеющая порядок  $(M+1) \times N$  и формирующаяся на основании следующей модели:

$$\hat{\mathbf{M}}_{i} = \begin{cases} +1, \text{если ветвь направлена от узла,} \\ -\hat{\mathbf{K}}_{T}, \text{если ветвь направлена в узел,} \end{cases}$$
  
(7)
  
0, если ветвь не соединена с узлом,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В дальнейшем принимается равным нулю.
где  $\hat{E}_{\dot{O}}$  - комплексно-сопряженный коэффициент трансформации.

Полная матрица соединений  $\hat{M}_{r}$  включает в себя все узлы. Согласно вышеизложенному, один из узлов выбран в качестве базисного и обозначен индексом Б. Относительно полной прямоугольной матрицы  $\hat{M}_{r}$  необходимо сказать, что число ее строк равно числу узлов, а число столбцов - числу ветвей. Если в схеме замещения исследуемой ЭЭС выбирается базисный узел и если отбросить строку соответствующего базисного узла, то матричное уравнение (6) принимает следующий вид:

$$\hat{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{I}}=\dot{\mathbf{I}},\qquad(8)$$

при котором матрицы  $\hat{M}, \dot{I}$  и  $\dot{I}$  будут иметь соответствующие порядки.

Можно установить также следующее выражение [18]:

$$\mathbf{Z}_{\mathbf{B}} \mathbf{\dot{\mathbf{I}}} = \mathbf{\dot{\mathbf{M}}}^{\mathrm{T}} \mathbf{\dot{\mathbf{U}}} \,. \tag{9}$$

На основании (9) можно определить

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Z}_{\mathrm{B}}^{-1} \dot{\mathbf{M}}^{\mathrm{T}} \dot{\mathbf{U}} \,. \tag{10}$$

Подставляя выражение (10) в (8), получим

$$\hat{\mathbf{M}}\mathbf{Z}_{\mathbf{B}}^{-1}\dot{\mathbf{M}}^{\mathrm{T}}\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{I}} .$$
(11)

Введем следующее обозначение:

$$\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{M}} \mathbf{Z}_{\mathbf{B}}^{-1} \dot{\mathbf{M}}^{\mathrm{T}}, \qquad (12)$$

в результате матричное выражение (11) примет вид

$$YU = I , \qquad (13)$$

которое изображает узловое матричное уравнение схемы замещения ЭЭС.

В данном случае Y является неособенной квадратной матрицей узловых комплексных проводимостей. Таким образом, получим следующую Z форму уравнения состояния при наличии трансформаторов с комплексными коэффициентами трансформации:

$$\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{Y}^{-1} \dot{\mathbf{I}} = \mathbf{Z} \dot{\mathbf{I}} , \qquad (14)$$

где с учетом (12) можем написать

$$Z = \left(\hat{M} Z_{B}^{-1} \dot{M}^{T}\right)^{-1}$$
(15)

или

$$Z = \left(\hat{M}Y_{B}\dot{M}^{T}\right)^{-1}, \qquad (16)$$

где Z является неособенной матрицей узловых сопротивлений схемы замещения для случая, когда в ее структуру входят также трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации.

Поскольку У матрица узловых комплексных проводимостей при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов является несимметричной, то, разумеется, Z матрица узловых комплексных сопротивлений также будет несимметричной. В случае, когда коэффициенты трансформации трансформаторов некомплексные, то как Y, так и Z матрицы являются симметричными.

При подключении или отключении отдельных ветвей с трансформаторами соответственно изменяется У матрица узловых комплексных проводимостей, а следовательно, и Z матрица узловых комплексных сопротивлений. При этом становится необходимым построить новую расчетную схему замещения с учетом новых ветвей и построить Y, а также Z матрицы обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов. Ставится следующая задача: вместо построения новых Y и Z матриц скорректировать те, которые получены до структурного изменения первоначальной расчетной схемы замещения.

Как известно, матричное выражение для построения и коррекции У матрицы узловых проводимостей с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов представляется в виде [19]

> $\mathbf{Y}^{\text{HOB}} = \mathbf{Y} + \mathbf{\Lambda}\mathbf{Y}$ . (17)

где Ү - существующая или известная матрица узловых комплексных проводимостей, определяемая на основании матричного выражения (12);  $\Delta Y$  - корректирующая или дополнительная матрица,

определяемая на основании следующего матричного выражения:

$$\Delta \mathbf{Y} = \hat{\mathbf{m}}_{t} \mathbf{Y}_{t} \dot{\mathbf{m}}_{t}^{\mathrm{T}}; \tag{18}$$

 $Y^{\rm HOB}\,$  - скорректированная новая матрица узловых проводимостей, определяемая на основании следующего матричного выражения:

$$\mathbf{Y}^{\text{HOB}} = \hat{\mathbf{M}} \mathbf{Y}_{\text{B}} \dot{\mathbf{M}}^{\text{T}} + \hat{\mathbf{m}}_{\text{t}} \mathbf{Y}_{\text{t}} \dot{\mathbf{m}}_{\text{t}}^{\text{T}}$$
(19)

или

$$\mathbf{Y}^{\text{HOB}} = \mathbf{Y} + \hat{\mathbf{m}}_{t} \mathbf{Y}_{t} \dot{\mathbf{m}}_{t}^{\mathrm{T}}, \qquad (20)$$

где t – индекс ветви, которая характеризуется комплексными параметрами  $K_{T}$  и  $Z_{T}$  или  $Y_{T}$  и которая включается в схему замещения.

Столбцевая матрица  $\hat{m}_{t}$ , имеющая порядок  $(M+1) \times 1$ , формируется на основании

следующей модели:

٢

ſ

$$\hat{m}_{t} = \begin{cases} +1, если ветвь соединяется с узлом через сопротивления трансформатора, -  $\hat{K}_{T}$ , если ветвь соединяется с узлом через   
идеальный трансформатор,   
0, если ветвь не связана с другими узлами. (21)$$

0, если ветвь не связана с другими узлами.

Строчная матрица  $\dot{m}_{t}$ , имеющая порядок  $1 \times (M+1)$ , формируется на основании следующей модели:

$$\dot{m}_{t}^{T} = \begin{cases} +1, \, \text{если ветвь соединяется с узлом через} \\ \text{сопротивления трансформатора,} \\ -\dot{K}_{T}, \, \text{если ветвь соединяется с узлом через} \\ \text{идеальный трансформатор,} \\ 0, \, \text{если ветвь не связана с другими узлами.} \end{cases}$$
(22)

В случае, когда в схеме замещения выбран базисный узел, вышеприведенные матрицы будут иметь порядок соответственно  $(M \times 1)$  и  $(1 \times M)$ . Если скорректированную новую матрицу узловых сопротивлений обозначить через  $Z^{HOB}$ , то она определяется на основании выражения

$$Z^{\text{HOB}} = \left(Y + \hat{m}_{t}Y_{t}\dot{m}_{t}^{\mathrm{T}}\right)^{-1}.$$
(23)

В (23) имеется обращенная матрица узловых проводимостей, т.е. матрица  $Y^{-1} = Z$ . Выражение (23) показывает, что фактически требуется скорректировать матрицу Z из-за подключения новой ветви с параметрами  $\dot{K}_{0}$  и  $Z_{T}$ . Для этого целесообразно воспользоваться тождеством Шермана-Морисона, которое в оригинале представляется в следующем виде [14]: если

$$\dot{\dot{A}} = \dot{A} + \dot{a}\dot{b}^{\mathrm{T}}, \qquad (24)$$

где все величины, входящие в (24), являются комплексными величинами, то

$$\overline{\dot{A}}^{-1} = \dot{A}^{-1} - \frac{\dot{A}^{-1} \dot{a} \dot{b}^{T} \dot{A}^{-1}}{1 + \dot{b}^{T} \dot{A}^{-1} \dot{a}},$$
(25)

где а и b - соответственно столбцевая и строчная матрицы.

В данном случае выражение (20) отождествляется выражением (24).

При этом аналогично выражению (25) получим

$$\left(Y^{\text{HOB}}\right)^{-1} = Y^{-1} - \frac{Y^{-1}\hat{m}_{t}Y_{t}\dot{m}_{t}^{\text{T}}Y^{-1}}{1 + Y_{t}\dot{m}_{t}^{\text{T}}Y^{-1}\hat{m}_{t}}$$
(26)

$$\left(Y^{HOB}\right)^{-1} = Y^{-1} - \frac{Y^{-1}\hat{m}_{t}\dot{m}_{t}^{T}Y^{-1}}{\frac{1}{Y_{t}} + \dot{m}_{t}^{T}Y^{-1}\hat{m}_{t}}.$$
(27)

Окончательно искомое выражение для корректирования известной или существующей Z матрицы узловых комплексных сопротивлений принимает вид

$$Z_{\text{HOB}} = Z - \frac{Z \hat{m}_t \dot{m}_t^{\mathrm{T}} Z}{Z_t + \dot{m}_t^{\mathrm{T}} Z \hat{m}_t}.$$
 (28)

В числителе дополнительной матрицы получается квадратная матрица с комплексными элементами, порядок которой равняется числу независимых узлов, а в знаменателе получается одно комплексное число. С другой

стороны, согласно (28), Z матрицу узловых комплексных сопротивлений необходимо скорректировать. Нетрудно заметить, что дополнительная корректирующая матрица формируется на основании известной Z матрицы.

**Практическое применение метода.** Для иллюстрации предложенного метода рассматривается расчетная электрическая схема замещения одной ЭЭС (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная электрическая схема замещения рассматриваемой ЭЭС

Рассматриваемая схема состоит из семи узлов и девяти ветвей, причем в ветвях 5, 6, 7 функционируют трансформаторы с комплексными коэффициентами трансформации.

Неособенная матрица узловых комплексных проводимостей с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов имеет следующую структуру:

$$\begin{bmatrix} Y_1 + Y_3 + Y_5 & -Y_3 & 0 & 0 & 0 & -Y_5 \dot{K}_{T5} \\ -Y_3 & Y_3 + Y_4 + Y_6 \dot{K}_{T6}^2 & -Y_4 & 0 & -Y_6 \dot{K}_{T6} & 0 \\ 0 & -Y_4 & Y_2 + Y_4 + Y_7 & -Y_7 \dot{K}_{T7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_7 \dot{K}_{T7} & Y_7 K_{T7}^2 + Y_9 & -Y_9 & 0 \\ 0 & -Y_6 \dot{K}_{T6} & 0 & -Y_9 & Y_6 + Y_8 + Y_9 & -Y_8 \\ -Y_5 \dot{K}_{T5} & 0 & 0 & 0 & -Y_8 & Y_5 K_{T5}^2 + Y_8 \end{bmatrix}$$
(29)

Учитывая численные значения пассивных параметров, фигурирующих в матрице узловых проводимостей (29), в данном случае:

$$\begin{split} \mathbf{Y}_{1} &= 0.020533 - \mathbf{j}0.033156, \quad \mathbf{Y}_{2} &= 0.010065 - \mathbf{j}0.031507, \\ \mathbf{Y}_{3} &= 0.023388 - \mathbf{j}0.039283, \quad \mathbf{Y}_{4} &= 0.030179 - \mathbf{j}0.056281, \\ \mathbf{Y}_{5} &= 0.000747 - \mathbf{j}0.027882, \quad \mathbf{Y}_{6} &= 0.000267 - \mathbf{j}0.021094, \\ \mathbf{Y}_{7} &= 0.000514 - \mathbf{j}0.019828, \quad \mathbf{Y}_{8} &= 0.020126 - \mathbf{j}0.028543, \\ \mathbf{Y}_{9} &= 0.014750 - \mathbf{j}0.025298, \\ \dot{\mathbf{K}}_{T5} &= 0.526100 + \mathbf{j}0.000000, \quad \dot{\mathbf{K}}_{T6} &= 0.500000 + \mathbf{j}0.000000, \\ \dot{\mathbf{K}}_{T7} &= 0.966600 + \mathbf{j}0.000000, \end{split}$$

матрица (29) с численными элементами принимает вид

0,044667-	-0,023388+	0	0	0	-0,000393+	
-j0,100296	+j0,039258	0	0	0	+j0,014669	
-0,023388+	0,053634-	-0,030179+	0	-0,000133+	0	
+j0,039258	-j0,100812	+j0,056281	0	+j0,010547	0	
0	-0,030179+	0,040758-	-0,000496+	0	0	
0	+j0,056281	-j0,107616	+j0,019166	0	0	(21)
0	0	-0,000496+	0,015230-	-0,014750+	0	. (51)
0	0	+j0,019166	-j0,043824	+j0,025298	0	
0	-0,000133+	0	-0,014750+	0,035144-	-0,020127+	
0	+j0,010547	0	+j0,025298	-j0,074935	+j0,028543	
-0,000393+	0	0	0	-0,020127+	0,020333-	
+j0,014669	0	0	0	+j0,028543	-j0,036260	

Можно заметить, что матрица (31) является симметричной относительно главной диагонали, что является результатом наличия в ветвях трансформаторов с действительными коэффициентами трансформации.

После обращения Y матрицы узловых проводимостей (31) получаем Z матрицу условых сопротивлений

	9,858606+	7,743436+	5,389444+	3,570185+	5,068302+	7,333606+
7	+j16,602717	+j15,053397	+j12,995069	+j8,074885	+j10,835056	+j14,594154
	8,238954+	7,577625+	6,836754+	6,047971+	10,143390+	5,068302+
3	+j17,291248	+j16,854228	+j16,266980	+j14,392842	+j20,861769	+j10,835056
	7,058972+	7,401035+	7,765849+	7,615475+	6,047971+	3,570185+
3 (22)	+j17,731213	+j18,136178	+j18,652520	+j18,989024	+j14,392842	+j8,074885
. (32)	6,274819+	8,724430+	11,094110+	7,765849+	6,836754+	5,389444+
5	+j50,660256	+j55,922825	+j62,427620	+j18,652520	+j16,266980	+j12,995069
-	15,544480+	20,631540+	8,724430+	7,401035+	7,577625+	7,743436+
3	+j68,900963	+j76,212423	+j55,922825	+j18,136178	+j16,854228	+j15,053397
-	24,606150+	15,544480+	6,274819+	7,058972+	8,238954+	9,858606+
)	+j83,468550	+j68,900963	+j50,660256	+j17,731213	+j17,291248	+j16,602717

Разумеется, что при этом также получим симметричную матрицу относительно главной диагонали.

Теперь рассмотрим вопрос коррекции Z матрицы узловых

сопротивлений. Рассматривается случай, когда отключается ветвь 2-5 с параметрами Y<sub>6</sub>, K<sub>T6</sub>, затем подключается и восстанавливается исходная расчетная электрическая схема замещения, приведенная на рис. 1.

В результате получим схему, представленную на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная электрическая схема замещения рассматриваемой ЭЭС после отключения ветви с параметрами  $\,Y_6^{}$  ,  $\dot{K}_{T6}^{}$ 

При этом неособенная квадратная матрица узловых комплексных проводимостей для схемы, приведенной на рис. 2, примет вид

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{1} + \mathbf{Y}_{3} + \mathbf{Y}_{5} & -\mathbf{Y}_{3} & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Y}_{5}\dot{\mathbf{K}}_{T5} \\ -\mathbf{Y}_{3} & \mathbf{Y}_{3} + \mathbf{Y}_{4} & -\mathbf{Y}_{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{Y}_{4} & \mathbf{Y}_{2} + \mathbf{Y}_{4} + \mathbf{Y}_{7} & -\mathbf{Y}_{7}\dot{\mathbf{K}}_{T7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{Y}_{7}\dot{\mathbf{K}}_{T7} & \mathbf{Y}_{7}\mathbf{K}_{T7}^{2} + \mathbf{Y}_{9} & -\mathbf{Y}_{9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Y}_{9} & \mathbf{Y}_{8} + \mathbf{Y}_{9} & -\mathbf{Y}_{8} \\ -\mathbf{Y}_{5}\dot{\mathbf{K}}_{T5} & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Y}_{8} & \mathbf{Y}_{5}\mathbf{K}_{T5}^{2} + \mathbf{Y}_{8} \end{bmatrix}.$$
(33)

Матрица узловых комплексных проводимостей (33) с численными элементами имеет вид

0,044667-	-0,023388+	0	0	0	-0,000393+	
-j0,100296	+j0,039258	0	0	0	+j0,014669	
-0,023388+	0,053567-	-0,030179+	0	0	0	
+j0,039258	-j0,095539	+j0,056281	0	0	0	
0	-0,030179+	0,040758-	-0,000496+	0	0	
0	+j0,056281	-j0,107616	+j0,019166	0	0	
0	0	-0,000496+	0,015230-	-0,014750+	0	
0	0	+j0,019166	-j0,043824	+j0,025298	0	
0	0	0	-0,014750+	0,034877-	-0,020127+	
0	0	0	+j0,025298	-j0,053841	+j0,028543	
-0,000393+	0	0	0	-0,020127+	0,020333-	
+j0,014667	U	U	U	+j0,028543	-j0,036260	

После обращения матрицы (34) получим матрицу узловых сопротивлений:

_						
	9,858606+	7,743436+	5,389444+	3,570185+	5,068302+	7,333606+
	+j16,602717	+j15,053397	+j12,995069	+j8,074885	+j10,835056	+j14,594154
	8,238954+	7,577625+	6,836754+	6,047971+	10,143390+	5,068302+
	+j17,291248	+j16,854228	+j16,266980	+j14,392842	+j20,861769	+j10,835056
	7,058972+	7,401035+	7,765849+	7,615475+	6,047971+	3,570185+
	+j17,731213	+j18,136178	+j18,652520	+j18,989024	+j14,392842	+j8,074885
· (	6,274819+	8,724430+	11,094110+	7,765849+	6,836754+	5,389444+
)	+j50,660256	+j55,922825	+j62,427620	+j18,652520	+j16,266980	+j12,995069
	15,544480+	20,631540+	8,724430+	7,401035+	7,577625+	7,743436+
	+j68,900963	+j76,212423	+j55,922825	+j18,136178	+j16,854228	+j15,053397
	24,606150+	15,544480+	6,274819+	7,058972+	8,238954+	9,858606+
	+j83,468550	+j68,900963	+j50,660256	+j17,731213	+j17,291248	+j16,602717

Теперь необходимо скорректировать Z матрицу узловых сопротивлений (32) с учетом подключения ветви с трансформатором между узлами 5-2 на основании следующего выражения:

$$\Delta Z = -\frac{Z\hat{m}_{6}\dot{m}_{6}^{T}Z}{Z_{6} + \dot{m}_{6}^{T}Z\hat{m}_{6}},$$
(36)  
rge  $Z_{6} = 0.6 + i47.4$ .

$$\hat{\mathbf{m}}_{6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\hat{\mathbf{K}}_{T6} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad \dot{\mathbf{m}}_{6}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dot{\mathbf{K}}_{T6} & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$
(37)  
При этом

(35)

(34)

.

	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	$\hat{E}^{2}_{\dot{O}6}$	0	0	$-\mathbf{\hat{E}}_{\grave{O}6}$	0	
$\hat{m}_{_6}\dot{m}_{_6}^{^{\mathrm{T}}} =$	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	$-\mathbf{\hat{E}}_{\grave{O}6}$	0	0	1	0	
	0	0	0	0	0	0	0	

(38)

Если убрать столбец и строки, соответствующие нулевому узлу, то получим

ŵ́.T	0	0	0	0	0	0
	0	$\hat{E}^{2}_{\check{O}6}$	0	0	$-\mathbf{\hat{E}}_{\dot{O}6}$	0
	0	0	0	0	0	0
$m_6 m_6 -$	0	0	0	0	0	0
	0	$- {\bf \hat{E}}_{\dot{O}6}$	0	0	1	0
	0	0	0	0	0	0

(39)

.

## Затем определяем $\Delta Z$ на основании (36)

	-0,795094-	-0,442167-	-0,762986-	-2,077538-	-3,793519-	-3,049781-	
	-j0,701823	-j0,500108	-j0,848104	-j4,166033	-j5,598174	-j5,094696	
	-0,442167-	-0,237374-	-0,410756-	-0,974318-	-1,935016-	-1,509531-	
	-j0,500108	-j0,346712	-j0,588989	-j2,763549	-j3,791331	-j3,419103	
	-0,762986-	-0,410756-	-0,710619-	-1,705745-	-3,362620-	-2,630027-	
17 -	-j0,848104	-j0,588989	-j1,000454	-j4,708201	-j6,450388	-j5,820570	(40)
$\Delta \Sigma =$	-2,077538-	-0,974318-	-1,705745-	-1,583429-	-6,203277-	-4,007661-	. (40)
	-j4,166033	-j2,763549	-j4,708201	-j20,373560	-j29,028940	-j25,754490	
	-3,793519-	-1,935016-	-3,362620-	-6,203277-	-14,521754-	-10,729925-	
	-j5,598174	-j3,791331	-j6,450388	-j29,028940	-j40,601292	-j36,309559	
	-3,049781-	-1,509531-	-2,630027-	-4,007661-	-10,729925-	-7,617242-	
	-j5,094696	-j3,419103	-j5,820570	-j25,754490	-j36,309559	-j32,360263	

Нетрудно заметить, что алгебраическая сумма элементов матриц (35) и (40) дает численные значения элементов исходной матрицы (32), что и необходимо было установить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Мельников Н.А. Расчет режимов работы сетей электрических систем.-М.: Госэнергоиздат, 1950.-324 с.
- 2. Фазылов Х.Ф. Теория и методы расчета электрических систем.-Ташкент: АНУ3ССР, 1953.-176 с.
- Ward J.B., Hale H.W. Digital computer solution of power flow problems // Power Apparatus and systems. -1956.-V. 75, N 24.- P. 398-404.
- 4. Brown H.E., Carter G.H., Happ H.H., Person C.E. Power flow solutions impedance matrix iterative method // IEEE Transaction.-1963.-PAS-82.-N 65.- P. 1-10.
- 5. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х.** Линейные расчетные модели сетей электрических систем.-Ташкент: ФАН УзССР, 1982.-96 с.
- 6. **Мельников Н.А.** Метод расчета рабочих режимов для схем, содержащих элементы трансформации с комплексными параметрами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1964.-N 4.-C. 427-433.
- 7. Бартоломей П.Н. Об учете коэффициентов трансформации при расчете режимов электрических сетей методом уравнений узловых напряжений // Электричество.-1971.- N 10.-C 88-90.
- 8. Сенди К.К. Современные методы анализа электрических систем.-М.: Энергия, 1971.-360 с.
- 9. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х., Брискин И.Л.** К расчету установившихся режимов энергосистем с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Электричество.-1972.-N 12.-C. 7-9.
- 10. Толстов Ю.Г. Теория линейных электрических цепей.-М.: Высшая школа, 1978.- 274 с.
- 11. **Гурский С.К., Новицкий Б.Б., Уласевич А.Ф.** Формирование обобщенных параметров и уравнений режима электроэнергетических систем с учетом комплексных коэффициентов трансформации // Известия вузов СССР. Энергетика.-1979.-N 2.-C. 8-15.
- 12. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем.-М.: Энергия, 1979.-416 с.
- 13. Горнштейн В.М., Мирошниченко Б.П. и др. Методы оптимизации режимов энергосистем.-М.: Энергоиздат, 1981.-366с.
- 14. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Метод коррекции установившихся режимов электрических систем // Электричество.- 1987.- № 3.- С.6-14.
- Александров О.И., Бабкевич Г.Г. Оперативная коррекция режима электрической сети изменением коэффициента трансформации с регулированием под нагрузкой // Изв. вузов. Энергетика.-1991.-N6.-C.-16-19.
- 16. **Хачатрян К.В.** Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество.-2005.- N 5.-C. 8-11.
- Хачатрян К.В., Бадалян Н.П., Хачатрян К.В., Григорян С.Э. Обобщенная диакоптическая математическая модель расчета установившегося режима большой электроэнергетической системы // Электричество.-2006.-N 10. - С. 19-28.
- Хачатрян В.С., Хачатрян К.В., Григорян С.Э., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р., Джаангирян В.В. Метод построения Y матрицы обобщенных параметров с учетом комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Вестник ИАА.-2007.- Т. 4, N 3.-C. 340-349.
- 19. **Хачатрян В.С., Хачатрян К.В., Григорян С.Э., Мнацаканян М.А., Тохунц А.Р., Джаангирян В.В.** Расчет и коррекция Y пассивных параметров при учете комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов // Вестник ИАА.-2007.-Т. 4, N 4.-С. 542-549.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.05.2007.

#### Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ն.Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Մ.Ա. ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ, Ա.Ռ. ԹՈԽՈՒՆՑ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ

## ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԻ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ Z ՄԱՏՐԻՑԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ԵՎ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Առաջարկվում է ընդհանրացված պարամետրերի Z մատրիցի հաշվման և Ճշգրտման մեթոդ, երբ էլեկրաէներգետիկական համակարգի էլեկտրական ցանցի տարբեր տեղամասերում գործում են համալիր տրանսֆորմացիայի գործակիցներով տրանսֆորմատորներ։ *Առանցքային բառեր.* ընդհանրացված պարամետր, տրանսֆորմատոր, գործակից, մատրից, հանգույց, մոդել, համակարգ, փոխարինման սխեմա, էլեկտրաէներգետիկական համակարգ։

## V.S. KHACHATRYAN, N.P. BADALYAN, K.V. KHACHATRYAN, S.E.GRIGORYAN, M.A. MNATSAKANYAN, A.R. TOKHUNTS, A.G. GHULYAN

## Z CONSTRUCTION AND CORRECTION OF THE MATRIX OF THE GENERALIZED PARAMETERS OF THE ELECTRIC NETWORK IN VIEW OF COMPLEX FACTORS FOR TRANSFORMATION OF TRANSFORMERS

The method of calculation and correction Z of a matrix of the generalized parameters are proposed. Transformers with complex factors of transformation function in separate sites of an electric network of electropower system.

*Keywords:* generalized parameter, transformer, factor, matrix, unit, model, system, equivalent circuit, electropower system.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.3.061

ЭНЕРГЕТИКА

Г.Д. АКОПДЖАНЯН, В.С. САФАРЯН

# НОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РЕЖИМ РАБОТЫ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ

Проведено исследование цепных схем, состоящих, в общем случае, из несимметричных четырехполюсных звеньев, относящихся к определению их передаточных функций по напряжению и току для различных ступеней цепной схемы. Получены новые соотношения для расчета режимов работы однородной линии.

*Ключевые слова*: несимметричные четырехполюсные звенья, цепные схемы, передаточные функции, однородная линия.

При решении различных практических задач и исследовании режимов работы длинных линий электропередач, линий связи и т.д. их представляют при помощи цепных схем (рис. 1), состоящих из ряда одинаковых, симметричных пассивных четырехполюсников.



В установившемся режиме работы нагруженной линии напряжения и токи в различных ее точках рассчитываются по известным соотношениям [1, 2]:

$$\dot{\mathbf{U}}_{x} = \frac{1}{2} \left( \dot{\mathbf{U}}_{2} + \mathbf{Z}_{C} \dot{\mathbf{I}}_{2} \right) e^{\gamma x} + \frac{1}{2} \left( \dot{\mathbf{U}}_{2} - \mathbf{Z}_{C} \dot{\mathbf{I}}_{2} \right) e^{-\gamma x} = \dot{\mathbf{U}}_{2} ch\gamma x + \mathbf{Z}_{C} \dot{\mathbf{I}}_{2} sh\gamma x,$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{x} = \frac{1}{2} \left( \dot{\mathbf{I}}_{2} + \frac{\dot{\mathbf{U}}_{2}}{\mathbf{Z}_{C}} \right) e^{\gamma x} + \frac{1}{2} \left( \dot{\mathbf{I}}_{2} - \frac{\dot{\mathbf{U}}_{2}}{\mathbf{Z}_{C}} \right) e^{-\gamma x} = \dot{\mathbf{I}}_{2} ch\gamma x + \frac{\dot{\mathbf{U}}_{2}}{\mathbf{Z}_{C}} sh\gamma x.$$
(1)

Здесь х - расстояние, отсчитываемое от конца линии к ее началу;  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_2$  - комплексы действующих значений напряжения и тока в конце линии;  $Z_c$  - волновое сопротивление;  $\gamma$  - коэффициент распространения однородной линии.

В настоящей статье на основе полученных авторами в [3] соотношений, определяющих передаточные функции для различных ступеней цепной схемы по напряжению и току, выводятся новые выражения, служащие для расчета режимов однородных линий.

В [3] для передаточных функций по напряжению  $\left(\mathbf{K}_{iU} = \frac{\dot{\mathbf{U}}_i}{\dot{\mathbf{U}}_0}\right)$  и току  $\left(\mathbf{K}_{iI} = \frac{\dot{\mathbf{I}}_i}{\dot{\mathbf{I}}_0}\right)$  для

различных ступеней симметричной цепной схемы получены следующие соотношения:

$$K_{iU} = \frac{1 + \alpha C^{n-i}}{1 + \alpha C^{n}} C^{\frac{i}{2}},$$

$$K_{iI} = \frac{1 - \alpha C^{n-i}}{1 - \alpha C^{n}} C^{\frac{i}{2}},$$
(2)

где  $\alpha = \frac{Z_{\rm H} - Z_{\rm C}}{Z_{\rm H} + Z_{\rm C}}; \, Z_{\rm H}$  - сопротивление нагрузки;  $Z_{\rm C}$  - повторное сопротивление симметричных

четырехполюсников, из которых состоит цепная схема (а также всей цепной схемы). Комплексная величина С является квадратом передаточных функций по напряжению и току одного четырехполюсника, загруженного на повторное сопротивление, и определяется из выражения [3]:

$$C = \frac{\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{ab}}} = \frac{Z_{a} - Z_{C}}{Z_{a} + Z_{C}},$$
(3)

где  $Z_a$  - входное сопротивление одного четырехполюсника при холостом ходе, а  $Z_{ab}$  - то же, при коротком замыкании.

Выясним связь между величиной C и мерой передачи четырехполюсника g. Известно [1], что

thg = 
$$\sqrt{\frac{Z_{ab}}{Z_a}} = \frac{e^g - e^{-g}}{e^g + e^{-g}} = A,$$
 (4)

где А - комплексное число.

Решая это уравнение относительно меры передачи четырехполюсника g, получим

$$g = \frac{1}{2} \ln \frac{1+A}{1-A}.$$
 (5)

Подставляя в (5) значение А, получим

$$g = \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z_{a}} + \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_{a}} - \sqrt{Z_{ab}}} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{C}\right),$$

откуда находим, что  $e^{g} = \frac{1}{\sqrt{C}}$ ,  $e^{-g} = \sqrt{C}$  и  $C = e^{-2g}$ .

Преобразуя передаточные функции цепной схемы (2) и подставляя в них значения  $\ C$  и  $\alpha,$  получим

$$K_{iU} = \frac{1 + \alpha e^{-2g(n-i)}}{1 + \alpha e^{-2gn}} e^{-gi} = \frac{Z_{H}ch(n-i)g + Z_{C}sh(n-i)g}{Z_{H}chng + Z_{C}shng},$$

$$K_{iI} = \frac{1 - \alpha e^{-2g(n-i)}}{1 - \alpha e^{-2gn}} e^{-gi} = \frac{Z_{C}ch(n-i)g + Z_{H}sh(n-i)g}{Z_{C}chng + Z_{H}shng}.$$
(6)

Теперь перейдем к однородной линии (рис. 2). Пользуясь равенствами (1) и учитывая, что  $\dot{U}_2 = Z_H \dot{I}_2$ , определим передаточные функции по напряжению и току для любой точки однородной линии:

$$\begin{split} \mathbf{K}_{\mathrm{xU}} &= \frac{\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{x}}}{\dot{\mathbf{U}}_{0}} = \frac{\mathbf{Z}_{\mathrm{H}} ch\gamma \mathbf{x} + \mathbf{Z}_{\mathrm{C}} sh\gamma \mathbf{x}}{\mathbf{Z}_{\mathrm{H}} ch\gamma \ell + \mathbf{Z}_{\mathrm{C}} sh\gamma \ell}, \\ \mathbf{K}_{\mathrm{xI}} &= \frac{\dot{\mathbf{I}}_{\mathrm{x}}}{\dot{\mathbf{I}}_{0}} = \frac{\mathbf{Z}_{\mathrm{C}} ch\gamma \mathbf{x} + \mathbf{Z}_{\mathrm{H}} sh\gamma \mathbf{x}}{\mathbf{Z}_{\mathrm{C}} ch\gamma \ell + \mathbf{Z}_{\mathrm{H}} sh\gamma \ell}, \end{split}$$
(7)

где  $\ell$  - длина однородной линии;  $\dot{U}_0$  и  $\dot{I}_0$  - комплексы действующих значений напряжения и тока в начале линии.



Рис. 2

Сравнивая приведенные в (6) и (7) выражения для передаточных функций по напряжению и току однородной цепной схемы и однородной линии, нетрудно заметить, что они адекватны. Действительно, заменив в (7)  $\gamma \ell$  на gn,  $\gamma x$  на g(n-i), получим соотношения (6), соответствующие равенствам (2).

Из вышеприведенных замен вытекает, что в равенствах (2) n, т.е. количество четырехполюсников в цепной схеме, можно заменить величиной  $\frac{\gamma}{g}\ell$ , а n-i - величиной  $\frac{\gamma}{g}x$ .

Учитывая, что при моделировании однородной линии симметричной цепной схемой мера передачи одного четырехполюсника (g), замещающего

единицу длины линии, равна коэффициенту распространения однородной линии ( $\gamma$ ), что вытекает из gn =  $\gamma \ell$ , считая, что каждый из четырехполюсников, входящих в состав цепной схемы, соответствует единице длины линии (а за единицу длины линии можно принять любой ее отрезок с длиной  $\frac{\ell}{n}$ ), а также имея в виду вышеприведенные замены, соотношения (2) примут вид

$$K_{(\ell-x)U} = \frac{1 + \alpha C^{x}}{1 + \alpha C^{\ell}} C^{\frac{\ell-x}{2}},$$

$$K_{(\ell-x)I} = \frac{1 - \alpha C^{x}}{1 - \alpha C^{\ell}} C^{\frac{\ell-x}{2}}.$$
(8)

Следует заметить, что в равенствах (2), например,  $C^n$  заменяется на  $C^{\frac{\gamma}{g}} = C^{\ell}$ , причем здесь степень величины C не имеет размерности, т.к.  $\gamma$  измеряется  $m^{-1}$ , а g - безразмерная величина.

Соотношения (8) дают возможность определить напряжение и ток в любой точке однородной линии при известных значениях напряжения  $(\dot{U}_0)$  и тока  $(\dot{I}_0)$  в начале линии:

$$\dot{\mathbf{U}}_{x} = \mathbf{K}_{(\ell-x)\mathbf{U}}\dot{\mathbf{U}}_{0}, \ \dot{\mathbf{I}}_{x} = \mathbf{K}_{(\ell-x)\mathbf{I}}\dot{\mathbf{I}}_{0}.$$
 (9)

В частных случаях передаточные функции по напряжению и току несколько упрощаются:

а) при работе однородной линии в режиме холостого хода  $(Z_{\rm H}=\infty), \quad \alpha=1$  и

$$\mathbf{K}_{(\ell-x)U} = \frac{1+C^{x}}{1+C^{\ell}} \mathbf{C}^{\frac{\ell-x}{2}}, \ \mathbf{K}_{(\ell-x)I} = \frac{1-C^{x}}{1-C^{\ell}} \mathbf{C}^{\frac{\ell-x}{2}};$$

б) при линии короткозамкнутой в конце ( ${
m Z}_{
m H}=0$ ),  $\,\alpha=-1\,$  и

$$K_{(\ell-x)U} = \frac{1-C^{x}}{1-C^{\ell}}C^{\frac{\ell-x}{2}}, K_{(\ell-x)I} = \frac{1+C^{x}}{1+C^{\ell}}C^{\frac{\ell-x}{2}};$$

в) при согласованной нагрузке линии  $\left( Z_{H}^{} = Z_{C}^{} \right), \alpha = 0$  и  $_{\ell-x}^{\ell-x}$ 

$$K_{(\ell-x)U}=K_{(\ell-x)I}=C^{\overline{2}}.$$

Напомним, что расстояние в (8) и (9) отсчитывается от конца линии к началу. При счете расстояния от начала линии соотношения (8) принимают вид

$$K_{xU} = \frac{1 + \alpha C^{\ell - x}}{1 + \alpha C^{\ell}} C^{\frac{x}{2}},$$

$$K_{xI} = \frac{1 - \alpha C^{\ell - x}}{1 - \alpha C^{\ell}} C^{\frac{x}{2}}.$$
(10)

Из (10) легко заметить, что при согласованной нагрузке линии (  $Z_{\rm H}=Z_{\rm C}$  и  $\alpha=0$ ), а также при линии бесконечной длины ( $\ell\to\infty$  и  ${\rm C}^\ell\to0$ ) передаточные функции по напряжению и току принимают вид

$$\mathbf{K}_{\mathrm{xU}} = \mathbf{K}_{\mathrm{xI}} = \mathbf{C}^{\frac{\mathrm{x}}{2}}.$$

Таким образом, получены соотношения (8) и (10), служащие для определения напряжений и токов в любой точке линии, отличающиеся от классических формул (1) тем, что в них вместо основания натурального логарифма основополагающей является величина  $C = e^{-2\gamma}$ , являющаяся квадратом передаточных функций по напряжению и току линии единичной длины с согласованной нагрузкой или линии бесконечной длины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. М., 1963. 440 с.
- 2. **Демирчян К.С., Нейман А.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.А.** Теоретические основы электротехники. Том II. М., 2006. 575 с.
- 3. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. Исследование однородных цепных схем // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2005. Т 58, № 2. С. 285 290.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.06.2007.

Գ.Դ. ՀԱԿՈԲՋԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

## ՀԱՄԱՍԵՌ ԳԾԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՌԵԺԻՄԸ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՂ ՆՈՐ ԱՐՏԱՀԱՅՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ոչ սիմետրիկ քառաբևեռներից կազմված շղթայական սխեմաների` լարման և հոսանքի փոխանցման ֆունկցիաների որոշման տեսակետից ուսումնասիրությունները հանգեցրին համասեռ հաղորդման գծերի աշխատանքային ռեժիմները բնորոշող նոր բանաձևերի ստացման։

*Առանցքային բառեր.* ոչ սիմետրիկ քառաբևեռային շղթաներ, շղթայական սխեմաներ, փոխանցման ֆունկցիաներ, համասեռ գիծ։

## G.D. HAKOBJANYAN, V.S. SAFARYAN

# NEW RELATIONSHIP CHARACTERIZING MODE OF OPERATION FOR UNIFORM LINE

Recurrent network studies consisting, in general, of nonsymmetric four-terminal network links referring to determination of their transfer functions for voltage and current with different stages of recurrent network a new relationship for the condition of the uniform line operation mode is obtained.

*Keywords.* recurrent networks, nonsymmetric four-terminal network, transfer function, uniform line.

ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 620.9:621.74.047.426

ЭНЕРГЕТИКА

#### В.В. АТОЯН, В.А. ТОНОЯН

# УСТАНОВКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ КАБЕЛЬНОЙ КАТАНКИ

Дано описание установки для непрерывного литья медной катанки, предназначенной для малых предприятий, выпускающих кабельную продукцию. Приведены теплотехнические характеристики для рабочей скорости вытяжки, полученные путем измерения параметров охлаждающей воды первичной и вторичной зон охлаждения. Рассчитаны значения коэффициента теплоотдачи при более высоких скоростях вытяжки и показано, что производительность установки возможно увеличить вдвое.

*Ключевые слова*: катанка, скорость вытяжки, кристаллизатор, производительность установки, температура, расход воды.

Существовавшая ранее в РА крупнотоннажная технология производства медной катанки (диаметр d=7,5...8,5 *мм*) для кабельного производства утрачена, и кабельные предприятия вынуждены завозить катанку извне, что сопряжено со значительными расходами и определенными трудностями. При наличии медного лома либо рафинированной меди эта задача может быть решена с помощью установки для непрерывного литья катанки, разработанной и изготовленной в технопарке НИИ "Андрон" совместно с кафедрой электроэнергетики ГИУА.

Схема установки приведена на рис. 1. Принцип ее работы заключается в следующем:



Рис. 1. Схема вытяжки и формирования катанки

графитовый теплоизолированный тигель 1 разогревается токами высокой частоты, вследствие чего расплавляется медь, помещенная в тигель. Индуктор 2 питается от электромашинного преобразователя либо от тиристорного преобразователя частоты. Последний предпочительнее, т.к. обладает существенно более высоким КПД, нешумный и значительно проще в эксплуатации (разработан на кафедре электроэнергетики ГИУА). Жидкий металл из отверстия на дне тигля поступает в графитовый кристаллизатор 3, снабженный водоохлаждаемым кессоном 4, кристаллизуется и далее охлаждается напрямую водой в охладителе 5. Сформированный пруток 6 (катанка) с помощью валиков 7 направляется к приемному барабану. Для снижения вероятности обрывов валики осуществляют возвратнопоступательное движение катанки с определенной скважностью. Технологические испытания катанки, проведенные на различных предприятиях республики, показали ее высокое качество, не уступающее, а в ряде случаев и превосходящее импортные аналоги.

Установка малообъемна, поскольку загрузка графитового тигля не превышает 50 *кг*, и предназначена в основном для малых предприятий, выпускающих установочные провода и кабели. При необходимости расширения производства число установок может быть увеличено без особого труда, что обусловлено их компактностью и автономностью. В этих случаях может быть применена разливка жидкого металла от более крупной плавильной печи с помощью раздатчика. Такая схема существенно повышает производительность установок за счет того, что экономится время, необходимое для расплавления меди в тигле. Кроме указанного, производительность зависит от ряда других факторов и, в первую очередь, от скорости вытяжки катанки, которая во многом определяется эффективностью охлаждения в кристаллизаторе и охладителе. Кессон и охладитель представляют собой вихревые замкнутые камеры, снабженные входным и выходным штуцерами, что позволяет легко осуществлять как измерение и регулировку расхода воды, так и, при необходимости, измерение ее температуры.

Рассмотрим вопрос повышения скорости вытяжки катанки (производительности установки), исходя из теплотехнических характеристик установки. Обычный рабочий режим вытяжки катанки характеризуется следующими параметрами: температура литья - ti=1200°C; температура катанки на выходе из вторичной зоны охлаждения - to=40°C; скорость вытяжки катанки – V<sub>K</sub>=32 *м/час*=0,0089 *м/с;* средний расход воды в кессоне кристаллизатора – V<sub>KK</sub>=0,093 *л/с;* средний расход воды в охладителе - V<sub>KB</sub>=0,151 *л/c;* температура воды как на входе кессона кристаллизатора, так и на входе охладителя t'<sub>KK</sub> = t'<sub>KB</sub> = 30,5<sup>0</sup>C; температура воды на выходе кессона кристаллизатора - t<sup>"</sup><sub>KK</sub> = 35,2<sup>0</sup>C; температура воды на выходе охладителя - t<sup>"</sup><sub>KB</sub> = 33,7<sup>0</sup>C; диаметр катанки – d<sub>K</sub>=7,5 *мм*, температура кристаллизации меди – t<sub>K</sub>=1083°C; энтальпия меди при температуре литья 1200°*C*- q<sub>K</sub>=0,7·10 <sup>6</sup> *Дж/кг* [2]; удельная теплоемкость меди – ск=380*Дж/кг*<sup>0</sup>*C*; коэффициент теплопроводности меди -  $\lambda_{\rm K}$ =386 *Вт/м*<sup>0</sup>*C*; плотность мягкой меди -  $\rho_{\rm K} = 8,9 \cdot 10^3 \, \text{Kr}/\text{M}^3$ ; удельная теплоемкость воды - c<sub>B</sub>=4190 *Дж/кг*<sup>0</sup>*C*]3.

Массовая скорость вытяжки катанки равна

$$V_{\rm KM} = V_{\rm K} \frac{\pi d_{\rm K}^2}{4} \cdot 10^{-6} \rho_{\rm K} = 3.5 \cdot 10^{-3} \ \text{KeVc}.$$

Количество тепла, отводимого от катанки за единицу времени при ее охлаждении до температуры 40°С, можно с достаточной точностью принять равным

$$Q_{\kappa} = V_{\kappa M} \cdot q_{\kappa} = 2450 \, \mathcal{A} \varkappa.$$

Количество тепла, отводимого за единицу времени в кессоне кристаллизатора, равно

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{K}\mathbf{K}} = \mathbf{V}_{\mathbf{K}\mathbf{K}} \cdot \mathbf{C}_{\mathbf{B}} (\mathbf{t}_{\mathbf{K}\mathbf{K}}'' - \mathbf{t}_{\mathbf{K}\mathbf{K}}') = 1816 \, \mathcal{A}_{\mathbf{K}\mathbf{K}}$$

Учитывая, что тепловое сопротивление от боковой поверхности катанки в окружающую среду достаточно велико, можно с некоторым приближением принять количество тепла, передаваемого за единицу времени в охладитель, равным

$$Q_{\rm TB} = \frac{t_1 - t_0}{L} \cdot \lambda_{\rm K} \cdot F_{\rm K} = 131 \, \text{Arg}$$

где L - расстояние от тигля до конца охладителя (L=0,15*м*).

Количество тепла, отводимого за единицу времени в охладителе, равно

$$Q_{KB} = V_{KB} \cdot C_B (t_{KB}'' - t_{KB}') = 1980 \, A \mathcal{K}.$$

Суммарное количество тепла, отводимого за единицу времени, равно

$$Q_{\Sigma} = Q_{KK} + Q_{KB} = 3796 \, \mathcal{AK}.$$

Разница:  $Q_{\Sigma} - Q_{\kappa} = 1346 Br$  - это то количество тепла, которое натекает на кессон кристаллизатора от тигля, минуя формирующуюся в кристаллизаторе катанку. Отсюда следует, что тепло, отводимое за единицу времени от канала кристаллизатора в кессон, равно:  $Q'_{\kappa\kappa} = 470 \ Ammathackslash r.e.$  19% от количества всего тепла, отводимого от катанки. Это свидетельствует о невысокой эффективности охлаждения металла в кристаллизаторе, что объясняется наличием слоя графита между катанкой и кессоном, а также образованием зазора между затвердевшей поверхностью катанки и стенкой кристаллизатора вследствие линейной усадки во время кристаллизатора (обычно используемого при литье заготовок большого диаметра или в технологиях электрошлакового переплава) в данном случае практически неосуществимо.

Изменение энтальпии меди от 1200 °С до завершения процесса кристаллизации равно  $q'_{\kappa} = 245 \cdot 10^3 \, A \#/\kappa r$ , за единицу времени -  $q''_{\kappa} = V_{\kappa M} \cdot q'_{\kappa} = 857 \, A \#$  [2].

До поступления во вторичную зону охлаждения суммарное количество тепла, теряемого за единицу времени катанкой, равно

$$Q_{KK}'' = Q_{KK}' + Q_{TB} = 601 \, \mathcal{A} \mathcal{K}.$$

Отсюда следует, что доля твердой фазы в катанке в момент поступления во вторичную зону охлаждения равна

$$a_{_{T\Phi}} = \frac{Q''_{_{KK}}}{q''_{_{K}}} = 0.7.$$

Существует критическое значение атф, при котором возникает опасность прорыва жидкого металла при выходе катанки из кристаллизатора. На рис 2 приведены расчетные картины продольных разрезов в момент выхода катанки из кристаллизатора.



Рис 2. Соотношение жидкой и твердой фаз при различных скоростях вытяжки катанки: а - 32*м/ч*; б - 40*м/ч*; в - 50*м/ч*; г - 60*м/ч* 

Из рисунка видно, что, начиная со скорости примерно 48 m/4, поступающая в кессон вторичной зоны охлаждения катанка содержит в себе определенную долю жидкой фазы. По мере увеличения скорости вытяжки толщина перемычки между поверхностью катанки и жидкой фазой будет уменьшаться до тех пор, пока механическая прочность ее окажется недостаточной и произойдет разрыв, сопровождающийся истечением жидкого металла в виде бесформенной струи. Опираясь на результаты наших исследований и опыт других работ [1], можно утверждать, что при скорости 60 m/4 ( $a_{rdb} = 0.37$ ) указанная опасность не возникнет, но в то же время она близка к предельной.

Переходя к теплотехническим расчетам, прежде всего отметим, что при увеличении скорости катанки количество тепла Q'кк и Q<sub>тв</sub> изменяется слабо, т.к. средняя температура поверхности предположительно остается в пределах 1000°С, а продольное тепловое сопротивление катанки практически не изменяется. Отметим, что точное определение этой температуры весьма сложно. Обычно применяемые зонды-термопары в случае катанки столь малого диаметра, к тому же движущейся с достаточно большой скоростью внутри графитового кристаллизатора, не позволили получить скольнибудь достоверного результата (применялись термопары вольфрам-рений с диаметром термо-электродов 0,3 *мм*, впаянные в кварцевую трубку диаметром 3 *мм*).

В таблице приведены расчетные характеристики для разных скоростей катанки.

Как видно из данных таблицы, подавляющая часть тепла, содержащегося в катанке, отводится в охладителе.

Согласно закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток, отводимый от поверхности, омываемой потоком жидкости, равен

$$Q_{KB} = \alpha F(t_{CT} - t_{K}),$$

где F - площадь охлаждаемой поверхности, *м*<sup>2</sup>; t<sub>ст</sub>, t<sub>ж</sub> - соответственно температуры охлаждаемой стенки (поверхности) и охлаждающей жидкости; α - коэффициент теплоотдачи, *Bt/м<sup>2</sup>* <sup>0</sup>*C*.

Vк,	Vкм,	$Q_{k},$	Q'кк, <i>Вт</i>	Q Pr	Q <sub>кв</sub> , Рт	а <sub>тф</sub>
<u></u>	$\frac{KI/C}{25 \cdot 10^{-3}}$	DI	150	DT 101	<i>DI</i> <sup>*</sup>	0.5
32	$3,5 \cdot 10^{-5}$	2450	470	131	1980	0,7
40	$4,4 \cdot 10^{-3}$	3080	470	131	2470	0,56
50	$5,7 \cdot 10^{-3}$	3990	470	131	3889	0,45
60	$6, 6 \cdot 10^{-3}$	4620	470	131	4019	0,37

Для рассматриваемого случая это уравнение имеет вид

$$Q_{KB} = \alpha_{CD} \cdot \pi d \cdot h(t_{CT} - t_{K}),$$

где d - диаметр катанки, *м*; h – расстояние, проходимое катанкой в охладителе за единицу времени; α <sub>ср</sub> характеризует теплоотдачу с учетом парообразования на поверхности катанки.

Поскольку, с другой стороны, количество тепла, отводимое водой из охладителя, равно  $Q_{\rm KB} = V_{\rm KB}C_{\rm B}(t_{\rm KB}'' - t_{\rm KB}'), \quad a \quad h = V_{\rm K}, \quad \text{то} \quad \alpha_{\rm Cp} \cdot \pi dV_{\rm K}(t_{\rm CT} - t_{\rm KB}') = V_{\rm KB} \cdot C_{\rm B}(t_{\rm KB}'' - t_{\rm KB}), \quad \text{откуда}$   $\alpha_{\rm CP} = \frac{V_{\rm KB} \cdot C_{\rm B}(t_{\rm KB}'' - t_{\rm KB})}{\pi dV_{\rm K}(t_{\rm CT} - t_{\rm KB})} \text{ (здесь принято } t_{\rm K} = t_{\rm KB}' \text{ ).}$ 

Принимая  $t_{cr} = t_{cpcr} = 520^{0}$ С и подставляя значение скорости V<sub>к</sub>=32 *м/ч*=0,0089 *м/*с, получим  $\alpha_{cp} = 18,17$  кВт/м<sup>20</sup>С. Нетрудно убедиться, что при скорости вытяжки 60 *м/час* это значение  $\alpha_{cp}$  позволяет удалить возрастающее почти вдвое количество тепла, поступающего в охладитель от катанки.

Оценим теперь производительность установки при скорости Vк=60 *м/ч*. Массовая скорость для катанки стандартного диаметра d=8 *мм* будет равна 26,7 *кг/ч*. При трехсменной работе суточная производительность составит П=640 *кг*. В принципе, из одного тигля возможна вытяжка двух параллельных катанок через отдельные или сдвоенные кристаллизаторы. В этом случае производительность удвоится П=1280 *кг/сут*.

Для учета времени загрузки шихты, разогрева тигля и плавки шихты, различного рода простоев и перерывов в работе введем коэффициент использования времени Ки, который оценивается величиной Ки=0,6...0,7.

Следовательно, расчетная максимальная производительность одноручьевой установки будет: П<sub>p1</sub>=380...450 *кг/сут*, двухручьевой–П<sub>p2</sub>=770...900 *кг/сут*.

Хотя полученная производительность принята нами как предельная, существуют решения конструктивного и технологического характера, осуществление которых может увеличить ее еще на 40...50%. Обсуждение этих вопросов выходит за пределы данной статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Кац. А.М., Шадек Е.Г.** Теплофизические особенности непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. М.: Энергия, 1983. 207 с.
- 2. Ватрушин Л.С., Осинцев В.Г. Бескислородная медь. М.: Энергия, 1982. 185 с.
- 3. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В. М. Теплообменные аппараты ТЭС.- М.: МЕН, 2005.-260с.
- 4. Հովհաննիսյան Լ.Ս. Ջերմազանգվածափոխանակություն. Երևան։ Լույս, 1988. -
- 5. 343 էջ:

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.10.2007.

#### Վ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ Վ.Ա. ՏՈՆՈՅԱՆ

#### ՄԱԼՈՒԽԱՅԻՆ ՄԵՏԱՂԱԼԱՐԻ ԱՆԸՆԴՀԱՏ ՁՈՒԼՄԱՆ ՏԵՂԱԿԱՅԱՆՔ

Բերված են մալուխային արտադրանք թողարկող փոքր ձեռնարկությունների համար նախատեսված պղնձալարի անընդհատ ձուլման տեղակայանքի նկարագրությունը, ինչպես նաև սառեցման առաջնային և երկրորդային գոտիների սառեցնող ջրի պարամետրերի չափման միջոցով ստացված ձգման աշխատանքային արագության համար տեղակայանքի ջերմաֆիզիկական բնութագիրը։ Հաշվարկվել են ջերմանջատման արժեքները առավել բարձր արագությունների դեպքում և որոշվելսահմանային արժեքը, ինչը հնարավորություն է տալիս մեծացնել տեղակայան քի արտադրողականությունը։

*Առանցքային բառեր*. բյուրեղաքար, մետաղալար, ձգման արագություն, ջերմաստիձան, ջրի ծախս, տեղակայանքի արտադրողականություն։

#### V.V. ATOYAN, V.A. TONOYAN

#### A SETUP FOR CONTINUOUS CASTS OF CABLE ROD

The description of a setup for copper rod casts for small enterprises producing cable products is given. Thermal physical characteristics of the setup for operating drawing speed obtained by measurement of cooling water parameters for primary and secondary cooling zones are considered. Collective heat exchange values at the highest speed and definitely its limited value allowing to increase twice the setup productivity are calculated.

Keywords: crystallizator, rod, drawing speed, temperature, water consumption, setup productivity.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.039.586

ЭНЕРГЕТИКА

#### Ш.В. ПОГОСЯН

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВТОРОГО БЛОКА АРМЯНСКОЙ АЭС

Разработана система управления надежностью технологического оборудования энергоблоков, которая была применена для второго блока Армянской АЭС (ААЭС) с реактором ВВЭР-440/В-270. Предложена интегральная логико-вероятностная модель надежности АЭС. Расчет модели позволил определить доминантные вкладчики в риск повреждения активной зоны, значимость оборудования, чувствительность консервативных допущений, проделанных в ходе моделирования, и оценить плотность распределения функции полученных результатов. Результаты анализа были сравнены с заданными критериями, что позволило определить ряд необходимых модернизаций и выявить проблематичные вопросы безопасности, требующие детального изучения.

Ключевые слова: риск, надежность оборудования, АЭС, реактор, повреждение активной зоны (ПАЗ).

Степень прогресса энергетического сектора страны является комплексным показателем, определяющим возможность развития прочих отраслей индустрии и экономики в целом. Влияние энергетики на прогресс государства становится все более ощутимым в свете стремительного увеличения спроса на электрическую и тепловую энергии в мире [1]. Анализируя статистику мирового энергопотребления в период с 1970 по 2007 гг., необходимо отметить стремительное увеличение темпов использования ядерной энергии (более чем в 30 раз [1]), несмотря на аварии, произошедшие в 1979 г. на 2-ом энергоблоке (ЭБ) Американской АЭС Три Майл Айланд и в 1986 г. на 4-ом энергоблоке Чернобыльской АЭС, замедлившие развитие мировой ядерной энергетики [2]. Эксплуатация энергоблока должна удовлетворять требованиям, совокупность которых направлена на выполнение в полном объеме возлагаемых задач с учетом фактора экологического риска (ядерной безопасности). Нарушение нормальной эксплуатации энергоблока является нарушением в его работе, при котором произошло отклонение от установленных эксплуатационных пределов и условий [3]. При этом могут быть нарушены пределы безопасной эксплуатации. Такое отклонение происходит при отказах оборудования (по ряду причин, таких как: внутренний дефект, внешнее воздействие, старение и т.д.) или ошибках оператора. Не является исключением и эксплуатация второго энергоблока Армянской АЭС, безопасность которого является исключительно важной задачей для энергетического сектора Республики Армения (необходимо отметить, что ААЭС производит около 40 % электроэнергии в Армении).

Таким образом, для безопасной эксплуатации ААЭС необходимо обеспечить надежность используемого технологического оборудования и оператора. Анализ международного и отечественного опыта в области надежности оборудования энергоблоков показывает, что надежность является

комплексным свойством эксплуатируемого оборудования, отражающим его способность выполнять заданную функцию и поддающимся количественной оценке с использованием ряда методов, направленных на оценивание показателей надежности и основанных на теории надежности, положениях теории вероятностей и математической статистике [4]. Наряду с вышесказанным, анализ международного опыта показал, что наиболее важным является отсутствие универсального алгоритма, отражающего связь между риском, надежностью систем, надежностью оборудования и необходимыми модернизациями, позволяющего управлять надежностью оборудования в зависимости от поставленной задачи и обеспечивающего обратную связь на основе заранее определенных критериев. Учитывая вышеуказанные недостатки существующих подходов, нами был разработан алгоритм управления надежностью оборудования с применением комбинации детерминистической оценки, вероятностного анализа, логико-вероятностных моделей, методов математической статистики и современных программных средств (рис.1) [5].

На рис. 1 приведен принципиальный алгоритм управления надежностью оборудования АЭС и ТЭС. В данной статье приводится анализ результатов применения данного алгоритма для 2-го энергоблока Армянской АЭС, на основе чего разработаны мероприятия, выполнение которых приведет к существенному снижению риска (повышению безопасности) ААЭС.



Рис 1. Алгоритм управления надежностью энергоблоков АЭС и ТЭС

Начальные условия проведения анализа следующие: 1) рассматривается режим работы ААЭС на мощности с двумя работающими турбинами; 2) в качестве нежелательного события рассматривается повреждение активной зоны (ПАЗ) реактора; 3) в качестве инициирующих событий (аварий) рассматривается повреждение активной зоны (температура оболочки ТВЭЛ, t>1200°C, оксидация оболочки ТВЭЛ >17% или образование водорода > 1%).

С учетом выбранных ограничений постановки задачи был проведен анализ систем и оборудования ААЭС, необходимых для предотвращения возникновения заявленного нежелательного события (ПАЗ) в случае аварий. Для этого, согласно алгоритму (рис.1) [5], был проведен анализ возможных аварий-инициаторов, затем путем анализа надежности систем, оборудования, оператора и анализа данных были проанализированы возможности энергоблока противостоять возникшей аварии. Вышеуказанные анализы проводились путем использования комбинации вероятностных (методы деревьев событий и отказов [6-8]) и детерминистических методов. На основе проведенных исследований была разработана интегральная модель надежности энергоблока, обеспечивающая связь между возможными авариями на энергоблоке ААЭС, комбинированными моделями деревьев событий и оператора, использованные в модели надежности, были рассчитаны при анализе статистических данных по нарушениям в работе ААЭС и других аналогичных энергоблоков с реакторами ВВЭР (Кольская АЭС, Нововоронежская АЭС, АЭС Козлодуй, АЭС Пакш, АЭС Богунице и т.д.).

Для разработки интегральной модели надежности ЭБ был использован программный код Risk Spectrum Professional [9], позволяющий производить расчет интегральной модели для определения суммарной частоты возникновения заявленного нежелательного события. В интегральную модель надежности энергоблока были включены системы и оборудование второго энергоблока ААЭС (рис. 2).

На рис. 2 представлены вспомогательные системы обоих контуров ААЭС. Системы аварийной подпитки 1-го контура (АПН) и нормальной подпитки (ПН) предназначены для восполнения запаса воды в 1-ом контуре в случае аварии с потерей теплоносителя. Система ПН имеет также функцию повышения концентрации борной кислоты в первом контуре и снижения давления 1-го контура путем впрыска в паровой объем компенсатора давления (КД). При необходимости быстрого снижения давления в 1-ом контуре используются предохранительные клапаны (ПККД-1,2), сбрасывающие теплоноситель в барботажный бак, откуда он поступает в помещения гермообъема. Для конденсации пара, возникающего в гермообъеме, используется спринклерная система (НБС). Система НБС предназначена для теплоотвода от бака Б-8, подающего воду на АПН, путем рециркуляции через охлаждающий теплообменник (ТОС). Охлаждение бака Б-8 и насосов АПН производится системой охлаждения ответственных потребителей (СООП). Охлаждение насосов ПН производится промконтуром ГЦН (ПК ГЦН), охлаждаемым, в свою очередь, системой технической воды (НТВ) или насосами дизельной станции (ДНС). Запас воды систем НТВ и ДНС восполняется системами 1-го подъема Севджур и Пруд.



Рис 2. Принципиальная схема взаимосвязи рассматриваемых систем ААЭС

Граница первого и второго контуров ААЭС проходит по парогенераторам (ПГ), предназначенным для выработки пара для турбогенераторов (ТГ). Паропроводы, соединяющие ПГ и ТГ, снабжены клапанами защиты второго контура от превышения давления – БРУ-К (сброс пара в конденсатор), БРУ-А (сброс пара в атмосферу из главного паропровода- ГПК) и ПК ПГ (сброс пара в атмосферу из ПГ). Для предотвращения холодной опрессовки при разрывах паропроводов на линии от ПГ установлены быстродействующие запорно-отсечные клапаны (БЗОК), закрывающиеся при понижении давления в ГПК. Конденсация отработанного в ТГ пара производится в конденсаторе, из которого питаются насосы 1-й ступени системы основного конденсата (КЭН-Іст.), подающие воду через обессоливающую установку (БОУ) на всас второй ступени КЭН.

После системы основного конденсата расположена группа подогревателей низкого давления (ПНД), в которых производится нагрев воды, подающейся в деаэратор (Д-р) для дегазации. Запас воды во втором контуре поддерживается системой химически обессоленной воды (ХОВ). Вода из деаэратора подается на охлаждение 1-го контура в ПГ системами нормальной (ПЭН) и аварийной питательной воды (АПЭН) через аварийный (АРУ ПГ) или штатный регулятор (РУ ПГ) уровня в ПГ (РУ ПГ). Кроме систем ПЭН и АПЭН, существуют дополнительные системы подачи воды в ПГ – сейсмостойкая система расхолаживания (АСН) и дизель-система подпитки ПГ (ДППГ). Перевод реактора в холодное состояние производится системой планового расхолаживания (НР) путем сброса пара из ГПК редукционным устройством РУР.

Таким образом, представлена принципиальная взаимосвязь систем и оборудования, участвующих при ликвидации той или иной аварии-инициатора (рис. 2). Кроме представленных систем, также были смоделированы системы электропитания собственных нужд переменным (СН) и постоянным (ПТ) токами и аварийное электроснабжение от ДГ. Для обеспечения адекватности также было рассмотрено оборудование систем контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), позволяющее автоматически активировать большинство из представленных систем (включая автоматическую аварийную защиту реактора).

Разработка интегральной модели надежности энергоблока ААЭС позволила перейти к этапу квантификации (puc.1). Процесс квантификации состоит из расчета суммарной частоты возникновения заявленного нежелательного события (определение доминантных вкладчиков), анализа неопределенностей результатов, анализа чувствительности и зависимости.

На первом этапе был произведен расчет суммарной частоты возникновения повреждения активной зоны ААЭС, которая составляет

$$Q = \sum_{i=1}^{n} F_{i}M_{i} = \sum_{j=1}^{m} MCS_{j} , \qquad (1)$$

где Q - суммарная частота возникновения заявленного нежелательного события (например, повреждения активной зоны для АЭС) [1/год]; п - количество рассмотренных аварий инициаторов; F - частота возникновения аварии-инициатора [1/год]; М - вероятность невозможности предотвращения нежелательного события вследствие отказа систем и/или оператора при конкретной аварии-инициаторе; MCS (minimal cut set) - минимальный набор одновременных отказов оборудования и/или оператора, приводящий к нежелательному событию при данной аварии-инициаторе; т – число возможных комбинаций отказов – минимальных сечений.

Для ААЭС было получено значение частоты повреждения активной зоны Q=7,58\*10<sup>-5</sup> [ *1/год*]. Полученный результат удовлетворяет международным требованиям (согласно изданию INSAG-12 МАГАТЭ, частота повреждения активной зоны реакторов ранних поколений не должна превышать значения 10<sup>-4</sup> *1/год*). Как видно из рис. 3, первые 10 вкладчиков составляют около 90% от суммарной частоты активной зоны. Таким образом, проведение мероприятий, направленных на усиление возможностей ААЭС противостоять вышеприведенным 10 авариям или снижение вероятности их возникновения, приведет к существенному снижению риска повреждения активной зоны. Детальный анализ этих аварий дал следующие результаты (табл.1).



Рис 3. Профиль риска повреждения второго энергоблока ААЭС

Таблица 1

Анализ доминантных	вкладчиков в	риск пов	реждения	активной зоны

Ν	Авария	Вклад в	Сценарии развития аварий	Вклад в	% ΣMCSj
		ΣQ		$\Sigma MCS_j$	
1	Неизоли- руемый разрыв паропровода	1.54E-05	Возникает запаривание оборудования отметки +14.7 машинного зала (место разрыва), что приводит к их отказу (консервативное допущение) и невозможности теплоотвода со стороны 2-го контура. ПАЗ наступает при отказе выполнить процедуру «подпитка-сброс» 1к (обусловленной отказом одной из систем АПН, НБС, ПК КД или обеспечивающих систем – СООП, CH, см. рис.2).	1.41E-05	91
			ПАЗ из-за иных отказов (достижение параметров первого контура холодной опрессовки - отказ БЗОК на закрытие, отказ теплоотводящих систем 2-го контура и т.д.).	1.37E-06	9
2	Разрыв корпуса реактора	1.00E-05	Разрыв корпуса реактора приводит к некомпенсируемой потере теплоносителя, что, в свою очередь, приводит к повреждению активной зоны из-за недостаточного охлаждения топлива.	1.00E-05	100
3	Некомпен- сируемая течь 1-го <i>к.</i>	7.50E-06	При течи большого диаметра (Ду500 <i>мм</i> ) происходит резкое падение давления в первом контуре, что приводит к недостаточной подаче воды от насосов АПН (недостаточное противодавление и малый расход). Также возникает проблема целостности гермообъема ввиду резкого повышения давления. Следовательно, данное событие напрямую приводит к повреждению активной зоны	7.50E-06	100

Продолжение табл. 1

				<i>r</i> - <i>r</i>	
4	Неизоли- руемая течь	7.28E-06	ПАЗ происходит при отказе системы НБС производить охлаждение бака Б-8/2.	6.79E-06	93
	Ду 932 <i>мм</i>		ПАЗ из-за иных наложений отказов (отказ системы АПН, обеспечивающих систем СООП, СН и т.д.)	4.86E-07	7
5	Неизолиру- емая течь Ду 32100 <i>мм</i>	4.63E-06	ПАЗ происходит при отказе системы НБС производить охлаждение бака Б-8/2, что приводит к кавитации насосов АПН и прекращению подачи воды на охлаждение 1-го к.	3.52E-06	76
			ПАЗ происходит при отказе системы АПН подавать воду в 1-ом к.	1.01E-06	22
			ПАЗ из-за иных наложений отказов (отказ обеспечивающих систем СООП, СН и т.д.)	1.01E-07	2
6	Течь из I к. во II к. Ду 13- 100 <i>мм</i>	3.61E-06	ПАЗ происходит при отказе системы АПН подавать воду в 1-ом к.	2.92E-06	81
			ПАЗ из-за иных наложений отказов (отказ функции снижения давления в 1-ом к, отказы систем теплоотвода со стороны 2-го к при изоляции течи и т.д.)	6.95E-07	19
7	Общий переходный процесс	2.61E-06	При возникновении общего переходного процесса есть вероятность развала энергосистемы РА (т.к. ААЭС составляет значительную часть вырабатываемой энергии в сети – 40%). В этом случае ПАЗ возникает при отказе ДГ и системы ДППГ.	7.55E-07	29
			ПАЗ может возникнуть также при достижении параметров первого контура холодной опрессовки в случае отказа СК ТГ на закрытие и наложении отказа БЗОК.	1.24E-06	48
			ПАЗ из-за иных отказов (отказ теплоотводящих систем 2-го контура и т.д)	6.10E-07	23
8	Разрыв деаэратора	2.38E-06	Возникает запаривание оборудования верхних отметок машинного зала, что приводит к их отказу (консервативное допущение), в частности, к отказу БЗОК. ПАЗ наступает при отказе на закрытие СК ТГ ввиду достижения параметров первого контура холодной опрессовки.	2.26E-06	95
			ПАЗ из-за иных отказов (отказ теплоотводящих систем 2-го контура и т.д)	1.20E-07	5
9	Потеря одного канала СООП	2.03E-06	При данной аварии становится неработоспособным один канал ДГ (отсутствие охлаждения от СООП). При возникновении общего переходного процесса есть вероятность развала энергосистемы РА (т.к. ААЭС составляет значительную часть вырабатываемой энергии в сети – 40%). В этом случае ПАЗ возникает при отказе второго канала ДГ и системы ДППГ.	1.83E-06	90
			ПАЗ из-за иных отказов (достижение параметров первого контура холодной опрессовки - отказ БЗОК на закрытие, отказ теплоотводящих систем 2-го контура и т.д.).	2.01E-07	10
10	Неизолиру- емая течь на линии АПН	1.37E-06	При данной аварии один канал АПН становится неработоспособным, т.к. подаваемая вода не достигает активной зоны. ПАЗ происходит при отказе второго канала системы АПН подавать воду в 1-ом к.	9.98E-07	73
			ПАЗ происходит при отказе системы НБС производить охлаждение бака Б-8/2, что приводит к кавитации насосов АПН и прекращению подачи воды на охлаждение 1-го к.	3.34E-07	24
			ПАЗ из-за иных наложений отказов (отказ обеспечивающих систем СООП, CH и т.д.)	4.28E-08	3
			65		

Согласно алгоритму [5], на следующем этапе квантификации необходимо выполнить анализ неопределенностей полученных результатов. Он проводится на основе метода Монте-Карло [10], состоящего в многократной (N-е количество симуляций) генерации случайных чисел в интервале от 0 до 1 и присвоении вероятностям возникновения отказа оборудования различного типа сгенерированных значений. Данный метод позволяет получить интегральную функцию распределения и плотность функции распределения для суммарного значения частоты повреждения активной зоны (рис.4).

Интегральной функцией распределения (ИФР) называют функцию IDF, определяющую вероятность того, что случайная величина Q в результате симуляции примет значение, меньшее Q[i] [10]:

#### IDF=P(Q < Q[i]).

(2)

Плотность функции распределения (ПФР) является производной от IDF (ИФР). Смысл плотности распределения состоит в том, что она показывает, как часто появляется случайная величина Q[i] в некоторой окрестности точки Q при повторении симуляций [10]. На рис. 4 представлены результаты расчета ИФР и ПФР для двух источников неопределенности: а) параметрическая неопределенность (связанная с неточностью статистических данных или с их вариативностью); б) неопределенность по оборудованию (связанная с группировкой оборудования и присвоением одинаковой вероятности отказа однотипному оборудованию – например, ручная арматура диаметром 18 *мм*, работающая на воде температурой t =20...70°C).

Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что основная неопределенность модели связана с параметрическим анализом, т.е. необходимо более детально проанализировать имеющиеся статистические данные. При этом неопределенность, связанная с группировкой оборудования, удовлетворительна, следовательно, нет необходимости проводить более детальную группировку. Также необходимо отметить, что верхняя граница значения частоты ПАЗ равна 6,6\*10<sup>-4</sup>, что не удовлетворяет критерию INSAG-12.



Рис 4. Интегральная функция распределения и плотность функции распределения для значения частоты ПАЗ ААЭС

Следующим этапом алгоритма [5] является анализ значимости оборудования. В качестве показателя выбран фактор повышения (I<sup>I</sup><sub>i</sub>) риска ПАЗ при отказе того или иного оборудования:

$$I_{i}^{I} = \frac{Q(P_{i}-1)}{Q},$$
(3)

где Q(P<sub>i</sub>) – суммарная частота возникновения ПАЗ при значении вероятности отказа рассматриваемого оборудования, равном P<sub>i</sub>; соответственно I<sup>I</sup><sub>i</sub> – степень изменения частоты ПАЗ при отказе рассматриваемого оборудования. По результатам анализа значимости оборудование было разбито на 5 групп в зависимости от значения I<sup>I</sup><sub>i</sub> для данной системы (табл. 2).

Анализ значимости систем ААЭС

Таблица 2

	1 1	number cherem finde
Группа	I <sup>I</sup> i	Системы
Группа 1	105-104	ПТ, БЗОК, СН
Группа 2	10 <sup>4</sup> -10 <sup>3</sup>	ПККД, СООП
Группа З	10 <sup>3</sup> -10 <sup>2</sup>	СКТГ, ГЗЗ, АПН, СУЗ, НБС, БРУ-А,К, АСН
Группа 4	10 <sup>2</sup> -10	АПЭН, ПЭН, ХОВ, ПН,
Группа 5	10-1	ПК ГЦН, ДППГ, ЦН, КЭН, НР, АСП, НБ, НТВ

Завершающим этапом квантификации является анализ чувствительности, направленный на определение влияния на конечные результаты допущений, сделанных в моделях. Результаты анализа позволяют сфокусировать внимание на областях, где требуется уточнение моделей и данных. Выявлена повышенная чувствительность результатов суммарной частоты ПАЗ к вопросу надежности оборудования машинного зала на отметке +14,7*м* в условиях запаривания. При условии, что в случае запаривания работоспособность оборудования не будет нарушена, суммарная частота ПАЗ понижается на 21%.

Таким образом, впервые был применен алгоритм управления надежностью для оборудования ААЭС, рассмотрен широкий спектр аварий, возможных при работе энергоблока на мощности, проанализированы надежность и влияние систем ААЭС при ликвидации аварий, на основании чего сделаны следующие выводы:

1. Необходимо провести детальный анализ работоспособности оборудования машинного зала на отметке +14.7 в случае запаривания и принять защитные меры для наиболее уязвимых компонентов. Решение данной проблемы позволит снизить частоту ПАЗ на 21%.

2. Необходимо выполнить прочностно-вероятностный анализ для реалистичной оценки частоты разрыва корпуса реактора (F<sub>RPV</sub>). Расчеты для аналогичных АЭС (Кольская, Богунице, Козлодуй и т.д.) показывают, что значение F<sub>RPV</sub> варьируется в пределах 10<sup>-6</sup>...10<sup>-7</sup> 1/год. Выполнение данного анализа позволит снизить частоту ПАЗ на 13%.

 3. Первоочередной задачей
 является внедрение концепции «течь перед разрушением»

 (LBB)
 для
 ААЭС, что приведет к существенному снижению частоты возникновения

 течей
 Ду500 мм
 (выполнение данного мероприятия позволит снизить частоту ПАЗ до 10%).

 Также
 необходимо
 редпринять
 меры
 по

67

предотвращению наступления ПАЗ при авариях с течью больших диаметров. Результаты показали (табл. 1), что для течей с диаметром выше 32 *мм* использование системы АПН становится проблематичным ввиду резкого понижения противодавления, что снижает надежность работы насосов АПН. Для решения этой проблемы необходимы установка насосов низкого давления (САОЗ НД) и проведение соответствующих комплексных мероприятий.

4. Результаты показывают (см. табл. 1), что для течей с диаметром меньше 32 *мм* существенную роль играет надежность спринклерной системы (НБС), отказ которой вносит наибольший вклад. Необходимо провести мероприятия по повышению надежности системы в целом (разбиение системы на два разделенных канала, повышение надежности арматуры на линии к форсункам 2Б-12/1-3 и рециркуляции 2Б-20, 20/1). Выполнение данных мероприятий позволит снизить частоту ПАЗ до 14%.

5.На ААЭС не существует автоматической защиты корпуса реактора от холодной опрессовки. Необходимо разработать и установить систему автоматического сброса давления 1-го контура при угрозе холодной опрессовки (отрицательное влияние данной модернизации при несанкционированном срабатывании ПК КД возможно рассчитать с применением вышеизложенного алгоритма).

6.Рекомендуется пересмотреть классификатор систем и оборудования ААЭС на основе информации от вышеприведенного анализа значимости (см. табл. 2).

Резюмируя вышеизложенное, приводим к выводу, что выполнение рекомендованных мероприятий позволит снизить риск ПАЗ на 44%, что является существенным повышением уровня безопасности ААЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Energy Information Administration / Annual Energy Review 2005, U.S. Department of Energy. Washington, DC, 2006. - 374 c.
- 2. Либманн Ж. О ядерной безопасности. 1997. 690 с.
- 3. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, ОПБ-88/97 (ПНАЭ Г-01-011-97). М., 1997. 42 с.
- 4. Трубицын В.И. Надежность электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1997. 240 с.
- 5. **Погосян Ш.В.** Разработка алгоритма управления надежностью технологического оборудования АЭС и ТЭС // Вестник Инженерной академии Армении. Ереван, 2007.- Т.4, N 3. С. 441-449.
- Procedure Guides for a Probabilistic Risk Assessment, NUREG/CR-6572. Brookhaven National Laboratory, 2005. - P. 3-20-3-32.
- 7. Գեւորգյան Ա., Պողոսյան Շ. Հայկական ԱԷԿ-ի առաջին կոնտուրից արտահոսքի դեպքում ռեակտորի անվտանգ կանգը ապահովող համակարգերի հավանականային վերլուծությունը // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. Հատոր 1. -Երևան, 2005. Էջ 307- 313:
- 8. Погосян Ш.В., Малакян Ц.А., Амирджанян А.М., Геворкян А.А. Вероятностный анализ аварийных сценариев, потенциально приводящих к холодной опрессовке корпуса реактора ВВЭР-440 при работе энергоблока на мощности и горячем останове // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2007. Т.60, №3. С. 488. 498.
- 9. Risk Spectrum Professional, User Manual, RELCON, 2003. P. 51-63.
- 10. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. М.: Наука, 1974. 122 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.09.2007.

### Շ.Վ. ՂՈՂՈՍՅԱՆ

## ՀԱՅԿԱԿԱՆ ԱԷԿ-Ի 2-ՐԴ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿԻ ՀԱՄԱՐ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Էներգաբլոկների տեխնոլոգիական սարքավորման հուսալիության կառավարման՝ հեղինակի կողմից մշակված համակարգը կիրառվել է ՋՋԷՌ-440/Վ-270 ռեակտորով Հայկական ԱԷԿ-ի (ՀԱԷԿ) 2-րդ էներգաբլոկի համար։ Արդյունքում մշակվել է ՀԱԷԿ-ի հուսալիության տրամաբանական-հավանականային ինտեգրալ մոդելը, ինչը թույլ տվեց ի հայտ բերել ռեակտորի ակտիվ գոտու վնասման ռիսկի դոմինանտ պատահարները, սարքավորման կարևորությունը, մոդելավորման ընթացքում կատարված կոնսերվատիվ ենթադրությունների զգայունությունը և գնահատել ստացված արդյունքների ֆունկցիայի անորոշությունը։ Ստացված արդյունքները համեմատվել են տրված չափորոշիչների հետ, պարզվել են մի շարք անհրաժեշտ մոդեոնիզացիաներ և ի հայտ են բերվել անվտանգության տեսանկյունից կարևոր՝ մանրամասն հետազոտություններ պահանջող, պրոբլեմատիկ հարցեր։

*Առանցքային բառեր.* ռիսկ, սարքավորման հուսալիություն, ԱԷԿ, ռեակտոր, ակտիվ գոտու վնասում։

#### Sh.V. POGHOSYAN

## RESULT ANALYSIS OF EQUIPMENT RELIABILITY MANAGEMENT SYSTEMS APPLICATION FOR ARMENIAN NPP UNIT 2

Technological equipment reliability management system applied for Unit 2 of Armenian NPP (ANPP) with WWER-440/V-270 reactor is developed. Integral reliability model for ANPP is proposed as a result of systems application. The model quantification allows to define dominant contributors of core damage risk, equipment importance, sensitivity of conservative assumptions made during modelling and calculation of results uncertainties. The results are compared with the given criterion which allows to identify the number of necessary modernizations and problematic safety-related fields are revealed.

*Keywords:* risk, equipment reliability, NPP, reactor, core damage.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

ՀՏԴ 621.311.2:.621.383.51

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

## Ա.Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ

# ՃԱՌԱԳԱՑԹՆԵՐԻ ԽՏԱՐԱՐՈՎ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱՋԵՐՄԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆՔԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ, ԳՈՐԾՈՂ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄ

Նախագծվել է հարյուրապատիկ խտացման, բարձր արդյունավետության և տնտեսական մրցունակ ցուցանիշներով համակցված ֆոտոէլեկտրաջերմային կայանք, հետազոտման համար պատրաստվել է գործող մոդել, կատարվել է վերջինիս տեխնիկական բնութագրերի տեսական հաշվարկ, բնական պայմաններում իրականացվել է ֆոտոէլեկտրական և ջերմային բնութագրերի փորձարարական ուսումնասիրություն։ Մտացված արդյունքների համաձայն՝ մշակված մոդելն ապահովում է արեգակնային էներգիայի կերպափոխման 10,5% էլեկտրական և 64 % ջերմային ՕԳԳ-ներ։

*Առանցքային բառեր*. գործող մոդել, ֆոտոէլեկտրաջերմային կայանք, Ճառագայթների խտարար, Ֆրենելի ոսպնյակ, ջերմակիր։

Մշակված ֆոտոէլեկտրաջերմային կայանքի կառուցվաքը հետևյալն է. անշարժ հենակին (1) հորիզոնական դիրքով որպես արեգակնային Ճառագայթների օպտիկական խտարար ամրացված է ֆրենելի ոսպնյակ (2), վերջինիս գլխավոր կիզակետային առանցքին (3) ուղղահայաց տեղադրված է հովացման ջերմակլանիչ հերմետիկ խցիկ (4) և ֆոտոէլեմենտ (ՖԷ) (5), որը ջերմահաղորդիչ մածուկով ամրացված է հովացման խցի մակերևույթին՝ (6) ջերմակլանիչի վրա (նկ.1) [1,2]։ Ֆրենելի ոսպնյակով Ճառագայթների հարյուրապատիկ խտացման պատձառով ֆոտոէլեմենտի ջերմաստիձանն անցնում է թույլատրելի սահմանը՝ գերազանցելով 100ºC-ը [3]։



Նկ. 1. Նախագծված կայանքի հատույթը

Այդ պատձառով մշակվել է արդյունավետ հովացման համակարգ, որտեղ կլանիչի հետ ջերմակրի շփման մակերևույթի մակերեսը մեծացնելու, հետևաբար ջերմափոխանցման արդունավետությունը բարձրացնելու նպատակով այն իրականացված է ռադիատորի տեսքով։ Կայանքը համալրված է Արեգակի շարժմանը հետևող ավտոմատ կառավարման հայելային համակարգով, որը բաղկացած է թեթև մետաղյա անկյունարդներից պատրաստված շրջանակից (7), հայելային մակերևույթներով հարթ թիթեղներից (8), որոնք միմյանց զուգահեռ և հավասարահեռ տեղակայված են շրջանակի վրա` սեփական համաչափության առանցքների (9) նկատմամբ պտտվելու հնարավորությամբ [2]։

Կայանքի աշխատանքի սկզբունքը հետևյալն է. Արեգակի Ճառագայթների զուգահեռ փունջն ընկնելով ավտոմատ կառավարմամբ հայելային համակարգի թիթեղների վրա (8), ուղղահայաց անդրադառնում է ֆրենելի ոսպնյակի (2) մակերևույթին և խտացվելով ընկնում ֆոտոէլեմենտի (5) վրա։ Ֆոտոէլեմենտը տեղադրվում է ոսպնյակի կիզակետին մոտիկ այնպես, որ Արեգակի Ճառագայթների խտացված փունջը ընդգրկի ֆոտոէլեմենտի ամբողջ մակերեսը։ Ֆոտոէլեմենտի կողմից կլանված լուսային էներգիան կերպափոխվում է էլեկտրական էներգիայի, որը հաղորդվում է սպառման դրական և բացասական ելուստներով։

Նախագծված կայանքի փորձարկման և հետազոտման համար պատրաստվել է գործող մոդել, որտեղ օգտագործվել են 18,5x18,5 *ամ*<sup>2</sup> չափսերի ֆրենելի ոսպնյակ, 10% ՕԳԳ ունեցող ալմաստանման ածխածնային թաղանթով (ԱԱԹ) պատված, 1,8x1,8 *ամ*<sup>2</sup> չափսերի Si-ային ֆոտոէլեմենտ (ՖԷ) (5) և հարակից սարքավորումներ՝ հայելիներ, շուռտվիկներ, ատամնանիվներ, քայլային շարժիչների փոխարեն ձեռքի շարժաբերներ և այլն։

Ունենալով մոդելի չափերը և օգտագործված տարրերի տեխնիկական ցուցանիշները, ինչպես նաև փորձի պայմանները` հովացնող ջրի մուտքային ջերմաստիձանը (էլ=25,5<sup>o</sup>C), որն ունի նույն շրջակայքի ջերմաստիձանը և չափված արեգակնային ձառագայթման հզորությունը (w=880 Վտ/վ<sup>2</sup>), կատարվել է կայանքի մոդելի էլեկտրական և ջերմային բնութագրերի տեսական հաշվարկ։

Ֆոտոէլեկտրական էներգիայի կերպափոխման ֆիզիկայից հայտնի է, որ ՖԷ-ի ընդունած Ճառագայթային էներգիայի հոսքի աՃը հանգեցնում է ինչպես ՖԷ-ի պարապ ընթացքի լարման՝ Սպե, այնպես էլ կարՃ միացման հոսանքի՝ Iպ աՃին և, եթե Սպե-ի աՃը շատ չնչին է, ապա Iպ գրեթե ուղիղ համեմատական է արեգակնային Ճառագայթման հզորությանը [4]

$$i_{\mu\delta} = i_{\beta} = eg\beta S, \qquad (1)$$

որտեղ g-ն մակերևույթում էլեկտրոն-խոռոչ զույգի գեներացիայի արագությունն է, որը պայմանավորված է ֆոտոէլեմենտի կողմից կլանվող լուսային Ճառագայթման քվանտների քանակով, β-ն՝ լույսով առաջացած խոռոչների այն քանակը, որոնք հասել են p-ո անցմանը, e –ն՝ էլեկտրոնի լիցքը, S –ը՝ լուսավորվող մակերեսը [4, 5]։

ՖԷ-ի առավելագույն հզորությունը՝ Բառ, իր հերթին ուղիղ համեմատական է կարձ միացման հոսանքին և որոշվում է (2) արտահայտությամբ,

$$\mathsf{P}_{\mathsf{un}} = \mathsf{U}_{\mathsf{u}\mathsf{b}\mathsf{l}} \, \mathsf{I}_{\mathsf{u}\mathsf{b}\mathsf{l}} = \mathsf{FF} \, \mathsf{U}_{\mathsf{u}\mathsf{p}} \mathsf{I}_{\mathsf{l}\mathsf{u}\mathsf{s}} = \eta \mathsf{wS}, \tag{2}$$

$$FF = U_{\mu \mu \eta} I_{\mu \mu \eta} / U_{\mu \eta} I_{\mu \eta} , \qquad (3)$$

որտեղ Սաա-ը, Iաա-ը, համապատասխանաբար, ՖԷ-ի լարման և հոսանքի անվանական արժեքներն են,  $\eta$ -ն՝ ОԳԳ-ն, V-ն և S-ն՝ համապատասխանաբար ջերմակլանիչի ծավալը՝ 25,6·10<sup>-7</sup>  $u^3$  և ջերմակրի հետ շփվող մակերեսը՝ 45,2·10<sup>-4</sup>  $u^2$ , FF-ը՝ ՎԱԲ-ի լրացման գործակիցը, որը

օգտագործված նմուշի համար 0,65 է և v-ն՝ հովացնող ջրի արագությունը՝ 0,9*լ/ր* կամ 0,0375*մ/վ*։ Հետևաբար, անտեսելով ձառագայթման հարյուրապատիկ խտացման հետևանքով Ս<sub>ԿԲ</sub>-ի աձը՝ (2) արտահայտությամբ կարելի է որոշել կայանքի զարգացրած հզորությունը՝ խտացված ձառագայթման պայմաններում.

$$P_{\text{un.pu}} = \eta w S_{1} = 0,1 \cdot 880 \cdot 14 \cdot 10^{-4} = 0,12 \quad \text{4un}, \tag{4}$$

$$P_{\text{un.hun}} = TR \eta R \eta_{2} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,1 \cdot 880 \cdot 3,42 \cdot 10^{-2} = 2,44 \quad \text{4un}, \tag{5}$$

որտեղ Տւ-ը, Տ<sub>2</sub>-ը՝ ՖԷ-ի և ոսպնյակի մակերեսներն են, R-ը, T-ն, համապատասխանաբար, կայանքի հետևող համակարգի թիթեղների անդրադարձման և ֆրենելի ոսպնյակի թափանցելիության գործակիցները։ Կայանքի կառուցվածքում կիրառվել են երկու հաջորդաբար միացված Տi-ային ՖԷներ, որոնց Ս<sub>պը</sub>-ի գումարային արժեքը՝ Ս<sub>պը</sub>=1 Վ է, իսկ I<sub>Կ</sub>ս-ն որոշվում է (2) արտահայտությամբ՝

$$I_{u\bar{u}} = \frac{P_{u\bar{u}}}{FFU_{u\bar{u}}} = \frac{2,44}{0,65 \cdot 1} \approx 3,75 \ \mathcal{U} :$$
(6)

Ավելի բարդ է կայանքի ջերմային բնութագրերի հաշվարկը, քանի որ իրականացված հովացման համակարգը կոնվեկցիոն ջերմափոխանակմամբ է։ 100-ապատիկ խտացման դեպքում ՖԷ-ն տաքանում է, և նրանից հեռացվող անհրաժեշտ ջերմաքանակը կլանվում է ալյումինե ջերմակլանիչ խցի (նկ.1) (8) մակերևույթի՝ ռադիատորի կողմից և փոխանցվում (16) խողովակով մտնող հոսող ջրին, որն էլ տեղափոխվում է կուտակման և սպառման համար նախատեսված (17) խողովակով։ Ելքային ջրի ջերմաստիձանի որոշման հաշվարկը պահանջում է կոնվեկցիոն ձանապարհով ջերմափոխանակման քանակության՝ հետևաբար՝ ջերմափոխանակման գործակցի ձշգրիտ որոշում՝ ինչն իրականացվել է ամենատարածված և փորձնականորեն ձշգրտված նմանության տեսությամբ որոշված չափայնության վերլուծության մեթոդով [6]։

Հաշվարկում ընդունվել է մոտավորություն, որ ՖԷ-ի ամբողջ ջերմային էներգիան գրեթե իդեալական ջերմահաղորդիչ մածուկով հաղորդվում է ջերմակլանիչին. այն հետագայում Ճշգրտվել է փորձնական ձանապարհով։ Հետևաբար, կարելի է ընդունել, որ ձառագայթային էներգիայի էլեկտրականի չկերպափոխված մասը՝ 89% -ը, ջերմային էներգիայի տեսքով հաղորդվում է ջերմակլանիչին, իսկ 1%-ը ՖԷ-ի մակերևույթից անդրադարձումն է [3]։

 $P_{p} = TR\eta_{p} wS_{2} = 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.89 \cdot 880 \cdot 3.42 \cdot 10^{-2} = 21.7 \, \text{dun} :$ (7)

Գտնենք ալյումինե ջերմակլանիչի ջերմաստիձանը ՖԷ-ի լուսավորման հաջորդ վայրկյանին, երբ ջերմակլանիչի սկզբնական ջերմաստիձանը 25,5ºC է.

$$Q = P_{g} \tau = cm(t_{AI} - t_{AI}) = cpV(t_{AI} - t_{AI0}),$$
  
$$t_{AI} = \frac{21,7 \cdot 1}{932 \cdot 2700 \cdot 25,6 \cdot 10^{-7}} + 25,5 = 28,86 \ ^{o}C,$$
(8)

որտեղ c-ն, ρ-ն, V-ն ալյումինե ջերմակլանիչի, համապատասխանաբար, տեսակարար ջերմունակությունը, խտությունը և ծավալն են [7]։
Հովացնող ջերմակրի` ջրի ջերմային հավասարակշռման հավասարումն ունի հետևյալ տեսքը.

$$h_{g}S(t_{AI} - t_{g}) = m_{g}C_{g}(t_{g} - t_{g0}):$$
(9)

Հավասարման ձախ կողմը կոնվեկցիոն ճանապարհով ջերմափոխանակման քանակությունն է, աջը՝ ջերմակրի տաքացման ջերմաքանակը։ Ինչպես երևում է հավասարումից է ջրի ելքային ջերմաստիճանի որոշման համար միակ անհայտ մեծությունը հկ կոնվեկցիոն ջերմափոխանակման գործակիցն է, որն էլ որոշվում է արդեն նշված չափայնության վերլուծության մեթոդով՝ օգտվելով հարթ մակերևույթի համար ճշգրտված հավասարումից [3, 4, 6].

$$Nu = \frac{h_{\downarrow} \cdot D}{k} = 0.664 \cdot Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad , \tag{10}$$

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}, \qquad (11)$$

$$\Pr = \frac{c \cdot \mu}{k} : \tag{12}$$

Nu-ն, Re-ն, Pr-ը՝ համապատասխանաբար, Նուսսելտի, Ռեինոլդսի և Պրենդտլի թվերն են, որոնք բնութագրում են նյութերի ջերմափոխանցման, հիդրավլիկական և ֆիզիկական հատկությունները։ k-ն, μ-ն, ρ-ն, c-ն ջրի ջերմահաղորդականությունը, մածուցիկությունը, խտությունը և տեսակարար ջերմունակությունն են՝ 25,5 ℃ ջերմաստիձանում։ D-ն ջերմակլանիչ խցի հիդրավլիկական տրամագիծն է, որը a և b կողերով ուղղանկյուն կտրվածք ունեցող խողովակի համար որոշվում է [3]`

$$D = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 0,04 \cdot 0,01}{0,04 + 0,01} = 0,016 \, i J, \tag{13}$$
$$Re = \frac{0,0375 \cdot 0,016 \cdot 995,8}{8,6 \cdot 10^{-4}} = 694,7, \qquad Pr = \frac{4179 \cdot 8,6 \cdot 10^{-4}}{0,614} = 5,85$$

բանաձևերով։ Ստացված արդյունքները տեղադրելով (10) արտահայտության մեջ` հաշվենք նախ Nu Նուսսելտի թիվը, այնուհետև հկ կոնվեկցիոն ջերմափոխանակման գործակիցը.

Nu = 0,664 · 694,7<sup>0,5</sup>5,85<sup>0,33</sup> = 31,35,  
h<sub>u</sub> = 
$$\frac{\text{Nu} \cdot \text{k}}{D} = \frac{31,35 \cdot 0,614}{0,016} = 1203 \text{ Jun/J}^{2} \cdot \text{J}^{2}$$

իսկ հ<sub>Կ</sub>-ի արժեքը տեղադրելով (9) արտահայտության մեջ` կորոշենք ջերմակլանիչ խցով 1*վ* - ում հոսող ջրի քանակության ելքային ջերմաստիձանը` տվյալ արագության համար.

 $1203 \cdot 45, 2 \cdot 10^{-4} \cdot (28,86 - t_{g}) = 0,015 \cdot 4179 \cdot (t_{g} - 25,5)$ , որտեղից  $t_{g} = 25,77^{o}C$ , որտեղ m<sub>2</sub>=0,015 կq/վ հոսող ջրի զանգվածն է՝ պայմանավորված հոսքի արագությամբ.

 $m_{\rho} = \rho v S_{\mu g} = \rho v a b = 995,8 \cdot 0,0375 \cdot 0,04 \cdot 0,01 = 0,015 \, \mu q / \mu : \qquad (14)$ 

Մտացված 25,77 $^o$ C ջերմաստի $\Delta$ անը դա 1 $\mu$ -ում ջերմակլանիչ խցով անցած 0,015 $\mu$ գ ջրի ելքային ջերմաստիձանն է։ Հետևաբար, մշակված գործող մոդելի աշխատանքային 1,5/ քանակությամբ հովացման ջրի 1 ժամվա տաքացման ելքային ջերմաստիձանը կորոշվի հետևյալ եղանակով՝ 3600m (t

$$\Delta t = \frac{3600m_{\varrho}(t_{\varrho} - t_{\varrho 0})}{1.5} = \frac{3600 \cdot 0.015 \cdot (25.77 - 25.5)}{1.5} = 9.72^{\circ} \text{C}: \quad (15)$$



Նկ. 2. Կառուցված կայանքի գործող մոդելի արտաքին տեսքը

Ունենալով Δt –ն` որոշենք կառուցված գործող մոդելի տեսական ջերմային ՕԳԳ-ն՝

$$\eta = \frac{\mathrm{mc(t-t_{0})}}{3600\mathrm{TR}\,\eta_{0}\mathrm{wS}_{2}} = \frac{1.5 \cdot 4179 \cdot 9.72}{3600 \cdot 21.7} \cdot 100\% = 78\%:$$
(15)

Հաշվարկված արդյունքների Ճշգրտման համար կատարվել է նախագծված կայանքի գործող մոդելի փորձարկում բնական պայմաններում ( նկ. 2)։

Արեգակնային Ճառագայթման 880 Վտ/մ<sup>2</sup> հզորության, AM 1,5 և շրջապատի, ինչպես նաև 1,5լ հովացման մուտքային շրջանառվող ջրի և ջերմակլանիչի սկզբնական 25,5°C ջերմաստիձանում իրականացվել են էլեկտրական և ջերմային բնութագրերի չափումներ։ Էլեկտրական բնութագրերը` Iա–ի և Սա–ի արժեքները, ստացվել են գործող մոդելի լուսային ՎԱԲ-ի չափումից՝ նկ.3 ա - ում պատկերված սխեմայի օգնությամբ, էլեկտրական շղթայում բերված փոփոխական դիմադրության տարբեր արժեքների համար։

Ջերմային բնութագրերը հետազոտվել են նկ. 4-ում բերված փորձարկման սխեմայի համաձայն։ Ջերմամեկուսացման պայմաններում 25,5°C ջերմաստիձան ունեցող հովացման ջուրը պոմպի միջոցով 0,9լ/ր արագությամբ շրջապտույտ կատարելով, 1*d*-ում տաքացել է մինչև 28,9<sup>o</sup>C: Արդյունքները գրանցվել են յուրաքանչյուր րոպեն մեկ՝ 1,5լ տարողությամբ բաքում տեղադրված սնդիկային ջերմաչափի միջոցով։

Չափված արդյունքներով հաշվարկվել են կայանքի գործող մոդելի էլեկտրական և ջերմային փորձարարական ՕԳԳ-ները՝ (16), (17)։

Տեսական հաշվարկների և չափումների արդյունքները բերված են աղյուսակներում (1 և 2)։



Նկ.3. Կառուցված կայանքի գործող մոդելի էլեկտրական փորձարկման սխեման (ա) և լուսային ՎԱԲ-ը (բ)

$$\eta_{t_{L}} = \frac{FFU_{u_{D}}I_{u_{D}}}{TRwS} \cdot 100\% = \frac{0.65 \cdot 1.12 \cdot 3.54}{0.9 \cdot 0.9 \cdot 880 \cdot 0.0342} \cdot 100\% = 10.5\%, \quad (16)$$
  
$$\eta_{g} = \frac{cm(t_{2} - t_{1})}{TRwS} \cdot 100\% = \frac{4179 \cdot 1.5 \cdot 9}{3600 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 880 \cdot 0.0342} \cdot 100\% = 64\%, \quad (17)$$



Նկ. 4.Գործող մոդելի ջերմային փորձարկման սխեման

Աղյուսակ 1		
Գործող մոդելի հաշվարկային և փորձարարական բնութագրերը	I <sub>ինտ</sub> = <b>880 Վտ/մ</b> ²	
	Սպը, Վ	Iկմ, <b>Ա</b>
Բն. պայմաններում՝	1 0.042	0.042
առանց խտարարի	1	0,042
Հաշվարկային	1	3,75
Փորձարարական	1,12	3,54

որտեղ ղ<sub>էլ</sub>-ը, ղ<sub>ջ</sub>-ն՝ մոդելի էլեկտրական և ջերմային ՕԳԳ-ներն են, t<sub>2</sub>-ը, t<sub>1</sub>-ը՝ ջերմակրի ջերմաստիձանը փորձի սկզբում և վերջում։ Պարզ է, որ կայանքի էլեկտրական և ջերմային ՕԳԳների ստացված արժեքները հարաբերական են և կապված են կիրառված ֆոտոէլեկտրական կերպափոխիչի ՕԳԳ-ի հետ (18) արտահայտությամբ.

$$\eta_{\varrho} = \frac{64}{100 - 10.5} (1 - \eta_{t_{L}}) = 0.71(1 - \eta_{t_{L}}):$$
(18)

Բաղդատելով հաշվարկային և փորձնական արդյունքները՝ կարելի է ենթադրել, որ I<sub>Ψ</sub> -ի չափված համեմատաբար ցածր արժեքը հիմնականում պայմանավորված է հոսանքի մեծ արժեքների դեպքում կոնտանկտային դիմադրության հետևանքով I<sup>2</sup>R ջերմային □կորուստի□, ինչպես նաև ֆոտոէլեմենտի մակերևույթի ջերմաստիձանի որոշակի աձով, իսկ U<sub>Ψ</sub> -ի աձը պատձառ է հոսանքակիրների ռեկոմբինացիայի արագության փոքրացման։ Ջերմաստիձանների՝ հաշվարկայինից փորձարարականի ունեցած մոտավորապես 10% ցածր տարբերությունն արդյունք է հաշվարկում ընդունված մոտավորության՝ ֆոտոէլեմենտից կլանիչին ոչ իդեալական ջերմահաղորդման, ինչպես նաև շրջապատի հետ բնական անխուսափելի կոնվեկցիայի, ինչը տեսական հաշվարկում նույնպես անտեսվել էր։

Հաշվարկվել է, որ նման կայանքի արտադրական 6 *Վտ* ջերմային և, հետևաբար, 1*Վտ* էլեկտրական հզորության տեղակայման ինքնարժեքը կազմում է մոտ 2 *\$/Վտ*, մինչդեռ առանձին ֆոտոէլեկտրական կայանների և հարթ ջրատաքացուցիչ կոլլեկտորների համար այն համապատասխանաբար 0,4 *\$/Վտ* և 4,5 *\$/Վտ* է [8]։

### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Panosyan Zh., Tumanyan A., Yengibaryan Y., Eghishyan K., Stepanyan A. Development and making of the new experimental photovoltaic module// Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona.- Spain, 2005.- P. 2339-2341.
- 2. **Փանոսյան Ժ., Ենգիբարյան Ե., Թումանյան Ա., Ոսկանյան Ս., Եղիշյան Կ.** Արեգակնային էներգիայի կերպափոխման սարք// ՀՀ Արտոնագիր N 1810 A2 15.06.2006։
- 3. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.- 390 с.
- 4. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Edited by / A. Luque, S. Hegedus, NY.: Wiley, 2003. -1138p.
- 5. Kreith F., Kreider J. Principles of Solar Engineering. Washington, HCP 1978.- 778p.
- 6. Теория тепломассообмена / Под ред. А. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
- 7. Даффи Дж., Бекман У. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир1977. 482 с.
- 8. Viaud M., Despotou E., Latour M., Hoffmann at alias. A global strategy for the European PV industry, Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 2004 P. 3390-3391.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 17.02.2008։

### А.А. ТУМАНЯН

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СТАНЦИИ С КОНЦЕНТРАТОРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ, РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ МОДЕЛИ И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ

Спроектирована фотоэлектротепловая станция со стократной концентрацией излучения, высокой эффективностью и с показателями экономической конкурентоспособности. Для испытания спроектированной станции изготовлена ее рабочая модель, выполнен теоретический расчет технических характеристик, а также проведены исследования ее фотоэлектрических и тепловых характеристик. Согласно полученным результатам, модель обеспечивает 10,5% электрического и 64% теплового КПД.

*Ключевые слова:* рабочая модель, фотоэлектротепловая станция, концентратор излучения, линза Френеля, теплоноситель.

# A.A. TUMANYAN

# PHOTOELECTROTHERMAL PLANT DESIGN WITH CONCENTRATE OF EMISSION, DEVELOPMENT AND TESTING OF WORKING MODEL

A photoelectrothermic plant is designed with hundred-fold concentration of emission, high efficiency and features of economic competitiveness. To test and explorate the designed plant, a working model is developed, theoretical calculation of technical indices are performed and the study of the photoelectrical and thermal characteristics are conducted in natural conditions. In accordance with the results, the model ensures 10.5% electrica $\pi$  and 64% thermal coefficient of efficiency.

*Keywords:* working model, photoelectrothermal plant, emission concentrator, Fresnel lens, heat-transfer agent.

УДК 621.314

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

### Н.Н. ПЕТРОСЯН, Ж.Д. ДАВИДЯН, П.С. МАНУКЯН

# АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С ЗАКРЫТЫМ ВХОДОМ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Приводятся две схемы (мостовая и полумостовая) резонансных инверторов для индукционного нагрева. На эквивалентных схемах рассматриваются электромагнитные процессы. Получены аналитические выражения и временные диаграммы, позволяющие определить законы изменения токов и напряжений в схемах, а также оценить их максимальные значения.

*Ключевые слова:* резонансный инвертор, индукционный нагрев, IGBT -транзистор, тиристорный преобразователь.

В настоящее время широко используются технологии, в основу которых положен индукционный нагрев, например, для термической обработки деталей, сварных соединений, сборкиразборки узлов и механизмов, сопрягаемых посредством горячей посадки и т.д. В системах индукционного нагрева нагрузкой преобразователя является параллельный или последовательный резонансный контур, образованный нагревающейся деталью (индуктором) и компенсирующей его реактивную мощность емкостью.

Существует много работ [1-3], где используется параллельный резонансный контур, питаемый преобразователем частоты (ПЧ) на основе инвертора. В этих работах недостаточно полно рассмотрены трудности, возникающие при реализации источника тока большой мощности. Дело в том, что при больших мощностях необходимо вводить регулирующее звено постоянного тока, преобразующее полный поток энергии, а это значительно ухудшает массогабаритные показатели инвертора из-за наличия дросселя.

Указанный недостаток особенно существенен в тиристорных преобразователях, т.к. рабочая частота тиристоров обычно низка (до нескольких килогерц) и массогабаритные характеристики таких преобразователей значительно низки. Даже использование преобразователей с удвоением частоты не дает желаемого результата [3].

Использование управляемого тиристорного выпрямителя, а также преобразователей на IGBTтранзисторах, построенных только на инверторе, не всегда позволяет получать требуемые мощностные параметры. Поэтому возникает необходимость использования широтно-импульсного регулятора (ШИР) на входе инвертора, т.е. построения преобразователя по структуре "выпрямитель-ШИР- резонансный инвертор (РИ) - нагрузка" (рис.1).



Рис.1. Структура преобразователя с ШИР (широтно-импульсным регулятором)

Создание таких преобразователей, обеспечивающих низкую габаритную мощность силовых элементов и высокую точность регулирования, является актуальной задачей и целью настоящей работы.

На рис.2а,б показаны схемы преобразователей по структуре рис.1, в которых резонансные инверторы с закрытым входом выполнены на IGBT- транзисторах по полумостовой и мостовой схемам соответственно.



Рис. 2. Полумостовая (а) мостовая (б) схемы инверторов

В обеих схемах ШИР реализован на одном IGBT- транзисторе с защитной RC-цепью. На выходе ШИР среднее значение напряжения оценивается следующим выражением:

$$U_{d}(t) = \frac{t_{\mu}}{T} \left( U_{d0} - I_{d}(t) \cdot r_{\tau} \right), \qquad (1)$$

где t<sub>и</sub> - время проводимости транзистора VT1; Т - период рабочей частоты импульсного регулятора; Id(t) - сглаженный ток на входе инвертора; IT - эквивалентное сопротивление транзистора VT1 в открытом состоянии; Udo - выпрямленное напряжение на выходе выпрямителя на диодах (VD1...VD6).

Допуская, что на вход инвертора подается регулируемое напряжение U<sub>d</sub>, сначала рассмотрим принцип действия полумостового преобразователя.

Эквивалентная схема полумостового инвертора для установившегося периодического режима показана на рис.3 ( $L_{k1} = L_{K2} = L_k$ ,  $C_{k1} = C_{k2} = C_k$ ).



Рис.3. Эквивалентная схема инвертора

В процессе работы происходит периодическая смена состояний инвертора. Если считать транзисторы и диоды идеальными, то возможны следующие режимы работы схемы: а) открыты вентили VT2 и VD8; б) открыты вентили VT3 и VD9, т.е. в каждом полупериоде работают транзистор и диод (рис.2а).

Для простоты описания процесса примем, что ток Id на входе инвертора постоянен, т.е. индуктивность LF по крайней мере на порядок больше, чем LK и L3 (коммутирующая и защитная индуктивности). Нагрузка показана в виде параллельного соединения RH, LH, CH элементов. При принятых допущениях для эквивалентной схемы получается следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_{Lk}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{k}} u_{Ck}(t) + \frac{1}{L_{k}} u_{H}(t), \\ \frac{du_{Ck}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_{k}} i_{Lk}(t) + \frac{1}{2C_{k}} I_{d}(t), \\ \frac{di_{LH}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{H}} u_{H}(t), \\ \frac{du_{CH}(t)}{dt} = -\frac{1}{C_{H}} i_{L_{k}}(t) - \frac{1}{C_{H}} i_{L_{H}}(t) - \frac{1}{R_{H}} u_{H}(t) + \frac{1}{2C_{H}} I_{d}(t), \end{cases}$$
(2)

где  $i_{Lk}(t)$ ,  $U_{Ck}(t)$ ,  $i_{LH}(t)$  и  $U_{CH}(t)$  - соответственно токи напряжения на элементах эквивалентной схемы.

Уравнение (2) легко представить в матрично-векторной форме:

$$X(t) = AX(t) + BU(t), \qquad (3)$$

где X(t) - вектор переменных состояния; U(t) - вектор входных сигналов; А - матрица состояния; В – матрица воздействия.

Из (2) имеем

$$\mathbf{\dot{x}}(t) = \frac{d}{dt} \begin{cases} \mathbf{\dot{i}}_{Lk}(t) \\ \mathbf{u}_{Ck}(t) \\ \mathbf{\dot{i}}_{LH}(t) \\ \mathbf{u}_{CH}(t) \end{cases} , \mathbf{A} = \begin{cases} 0 & \frac{1}{L_k} & 0 & \frac{1}{L_H} \\ -\frac{1}{C_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_H} \\ -\frac{1}{C_H} & 0 & -\frac{1}{C_H} & -\frac{1}{R_H} \end{cases} , \mathbf{X}(t) = \begin{cases} \mathbf{\dot{i}}_{Lk}(t) \\ \mathbf{u}_{Ck}(t) \\ \mathbf{\dot{i}}_{LH}(t) \\ \mathbf{u}_{CH}(t) \end{cases} , \mathbf{B} = \begin{cases} 0 \\ \frac{1}{2C_k} \\ 0 \\ \frac{1}{2C_H} \end{cases} , \mathbf{u}(t) = \mathbf{I}_d(t).$$
(4)

Уравнение (3) решено с помощью метода численного интегрирования [2], т.к. в общем виде решать его аналитически достаточно трудно.

Учитывая, что нагрузка работает в режиме резонанса токов, при котором Xcн= XLH, а поведение нагрузки можно считать как чисто активное, эквивалентную схему рис.3 можно представить в виде рис.4 а - для полумостовой схемы и в виде рис.4 б - для мостовой схемы.



Рис.4. Упрощенные эквивалентные схемы инверторов

В каждом полупериоде рабочей частоты характер изменения тока через Lk ( Lk1, Lк2 ) определяется следующим образом:

$$i_{k}(t) = \frac{U_{Ck}(0) - 0.5I_{d}R_{H}}{\omega L_{k}} e^{-\delta t} \sin \omega t + 0.5I_{d} \left[ (1 + e^{-\delta t} (\cos \omega t - \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t) \right].$$
(5)

Напряжение на коммутирующем конденсаторе Ck (Ck1,Ck2) изменяется по закону

$$u_{Ck}(t) = (0.5I_{d}R_{H} - u_{Ck}(0))e^{-\delta t}(\cos \omega t + \frac{\delta}{\omega}\sin \omega t) - \frac{I_{d}}{\omega C_{k}}e^{-\delta t}\sin \omega t + 0.5I_{d}R_{H}, \quad (6)$$
$$\delta = \frac{R_{H}}{2L_{k}}; \qquad \omega = \sqrt{\frac{1}{L_{k}C_{k}} - \left(\frac{R_{H}}{2L_{k}}\right)^{2}}. \quad (7)$$

Используя (4)И (5), можно найти напряжение закрытом транзисторе: на  $u_{VT}(t) = u_{Ck}(t) + I_d(t)R_H.$ (8)

Напряжение на  $L_k$  можно определить выражением  $u_{Lk}(t) = L_k(di_k / dt)$ .

Добротность контура Q определяется соотношением

$$Q = \frac{\omega}{2\delta} = \sqrt{\left(\frac{\rho_k}{2R_H}\right)^2 - 1} , \qquad \rho_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} . \tag{9}$$

На практике наиболее часто применяется мостовая схема, принципиальная схема которой изображена на рис.26. В отличие от инвертора, представленого в [4], здесь используются IGBT - транзисторы вместо тиристоров, а на входе используется ШИР.

Преобразователь по мостовой схеме имеет одно важное преимущество по сравнению с преобразователем по полумостовой схеме: здесь на вентилях максимальное напряжение вдвое меньше, однако надо учесть, что число последовательных вентилей в контуре цепи тока нагрузки увеличивается.

Напряжение на закрытом транзисторе можно определить из уравнения

$$u_{VT}(t) = u_{Ck}(t) + u_{Lk}(t)$$
 (10)

Используя выражения для U<sub>Ck</sub> И U<sub>Lk</sub> из (10), получим

$$\mathbf{u}_{\mathsf{VT}}(t) = \mathbf{U}_{\mathsf{d}}(t) + \mathbf{R}_{\mathsf{H}} \cdot \mathbf{I}_{\mathsf{d}}(t) - \mathbf{U}_{\mathfrak{g}}(t) \cdot \mathbf{e}^{-\delta t} \left[ (1 - \mathbf{k}_{\mathsf{L}}) \cdot \cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} (1 + \mathbf{k}_{\mathsf{L}}) \cdot \sin \omega t \right], \quad (11)$$

где коэффициент распределения индуктивности в схеме инвертора равен

$$k_{L} = L_{k} / (L_{k} + L_{3}).$$
 (12)

Для правильной работы инвертора необходимо, чтобы коэффициент распределения индуктивности kL был не ниже некоторого критического значения [4,5] (  $k_L \ge 0,7$  ) во избежание появления внутренней циркуляции токов между реактивными элементами инвертора и перегрузки транзисторов по току и по di/dt. Экстремумы напряжения на транзисторах определяются из уравнения

$$du_{VT}(t)/dt = 0$$
, (13)

откуда

$$tg\omega t_{m} = 2\delta\omega k_{L} / \left[ \omega^{2} (1 - k_{L}) + \delta^{2} (1 + k_{L}) \right], \qquad (14)$$

где t<sub>m</sub> — моменты времени, при которых напряжения на транзисторах инвертора достигают минимального и максимального значений.

С помощью вышеприведенных уравнений оценены также максимальные токи через транзистор и возвратный диод:

$$I_{VTmax} = \frac{4U_{d}}{\omega_{1}L_{k}}Bn^{2}e^{-\alpha ctg\alpha}\sin\alpha, \qquad (15)$$
$$I_{VDmax} = \frac{4U_{d}}{\omega_{1}L_{k}}Bn^{2}e^{-(\alpha+\pi)ctg\alpha}\sin(\alpha+\pi), \qquad (16)$$

$$tg\alpha = \frac{\omega}{\delta}, n = \frac{1}{1 - \exp(-\pi/2Q)}, B = \left[1 + (2n - 1)^2 - \frac{2}{\pi}(2n - 1)\sin(2\alpha)\right]^{-1}.$$
 (17)

где

На рис.5,6 приведены зависимости (15), (16) и (18). Как видно из этих зависимостей, действующее значение тока через транзистор (Ivd) и через диод (Ivd) соответственно определяется в виде

$$I_{VT} = \frac{2U_d}{\omega_0 L_k} Bn\sqrt{tg\alpha(2n-1)} , \qquad (18)$$

$$I_{VD} = \frac{n-1}{n} I_{VT},$$
 (19)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}.$$
(20)

Величину Іа входного тока инвертора можно найти, если учесть соотношение между максимальным током транзистора и Іа :

$$I_{VT \max} / I_{d} = 2\pi n^{2} \exp(-\alpha \cdot \operatorname{ctg}\alpha) / [(2n-1)\sin\alpha].$$
 (21)

С учетом (15) и (21) получим

$$I_{d} = \frac{2U_{d}}{\pi\omega_{1}L_{0}} B \cdot (2n-1)\sin(2\alpha).$$
(22)

Действующее значение тока нагрузки равно

$$I_{\rm H} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} i_{\rm H}^{2}(\upsilon) d\upsilon} \quad .$$
 (23)

Учитывая, что ток нагрузки ін определяется выражением

$$i_{\rm H}(\upsilon) = \frac{U_{\dot{y}}}{\omega L_0} \exp\left(\frac{-\delta}{\omega}\upsilon\right) - I_{\rm d}, \qquad (24)$$

для действующего значения тока нагрузки получим

$$I_{H} = \sqrt{I_{d}^{2} + \frac{2I_{d}b}{\pi(a^{2} + 1)}} (\exp(-a\pi) + 1) + \frac{b^{2}(a + 1)}{2\pi a(a + 2)} (1 - \exp(-2\pi a)), \qquad (25)$$
  
rge  
 $\vartheta = \omega t, \ a = \frac{\delta}{\omega}, \ b = \frac{U_{0}}{\omega L_{0}}, \ U_{0} = 4Bn^{2}U_{d}. \qquad (26)$ 

Максимальное значение напряжения на транзисторе определяется из (11) с учетом  $dU_{VT}/dt = 0; t = \frac{\pi + \alpha}{\omega}$ :

$$U_{VT \max} = BU_{d} \left\{ 1 + (2n-1)^{2} - 4n^{2}e^{-\delta t} \left[ (K_{L} - 1)\cos\alpha - (1 + K_{L})ctg\alpha \sin\alpha \right] \right\}.$$
(27)

На рис.5 а,б,в приведены зависимости в соответствии с (15),(16) и (27). Как видно из этих зависимостей, максимальные токи через транзистор и диод получаются при добротности Q=(0,8...1,0) (ток через транзистор примерно в два раза больше номинального тока нагрузки). При дальнейшем увеличении добротности до значения Q= 3,5 токи через вентили уменьшаются прмерно на 40%.



Рис.5. Зависимости максимальных значений токов и напряжений на ключевых элементах схемы: а,б – максимальный ток через транзистор и обратный диод соответственно в зависимости от добротности; в – максимальное напряжение на вентилях в зависимости от добротности

На рис.5 г приведены зависимости максимального напряжения Uvtmax/Ud на транзисторах в относительных единицах от добротности и коэффициента распределения индуктивностей KL. Наибольшее значение Uvtmax/Ud имеет при добротности Q= 0,8 ...1,0 и не превышает 1,70.

На рис.6 приведены временные диаграммы токов и напряжений для схемы рис.26, полученные с помощью системы "Orcad 9.2" при параметрах: Рн=40 *кВт*, f = 50 *кГц*, Q=1,25,  $k_{L}$ =0,7, $U_{d}$ =500 *B*.



На рис.7 показан гармонический состав тока нагрузки. Как видно, в данном случае коэффициент гармоники  $\kappa_r(\%) \le 12,0(\%)$ , В токе нагрузки присутствуют исключительно гармоники, кратные частоте f (в данном случае f=50 *кГц*).



Как видно из приведенных зависимостей, ток через обратный диод примерно в 4...5 раз меньше прямого максимального тока, проходящего через транзистор, что обеспечивает оптимальный режим инвертора [6].

#### Выводы

1. Получены основные расчетные формулы для оценки максимальных значений токов и напряжений на элементах схемы.

2. Получены временные и статистические характеристики преобразователя в зависимости от параметров нагрузки, в частности, от добротности.

3. На примере резонансного преобразователя мощностью 40 *кВт* рассчитан гармонический состав тока нагрузки (при активной состсвляющей R<sub>н</sub>=1,75 *Ом*).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Поляков В.Д., Чаколья Э. Высокочастотный генератор для индукционного нагрева // Электротехника . 2000. N12. C. 31-35.
- 2. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов МАТLAB 5.х. В 2-х т. Том 1. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 366с.
- 3. Шапиро С.В. Тиристорные генераторы ультразвуковой частоты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
- 4. **Канцельсон С.М.** Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов // Труды Уфимского авиационного института. Уфа: УАИ, 1971. -Вып.ХХІІ. Сборник 1. 130 с.
- 5. **Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.** Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1980. 424 с.
- 6. **Силкин Е.М.** Транзисторные преобразователи частоты для индукционного нагрева // Электротехника. 2004. N10. C. 24-30.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.07.2007.

### Ն.Ն. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Պ.Ս. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

### ԻՆԴՈւԿՑԻՈՆ ՏԱՔԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՓԱԿ ՄՈւՏՔՈՎ ՌԵՉՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ԻՆՎԵՐՏՈՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈւՆԸ

Բերված են ինդուկցիոն տաքացման համար տրանզիստորային ռեզոնանսային ինվերտորների երկու սխեմաներ՝ կամրջակային և կիսակամրջակային։ Դրանց համարժեք սխեմաների վրա դիտարկված են էլեկտրամագնիսական երևույթները։ Ստացվել են անալիտիկ արտահայտություններ և ժամանակային դիագրամներ, որոնք հնարավորություն են տալիս որոշել լարումների և հոսանքների փոփոխման օրենքները, ինչպես նաև գնահատել դրանց առավելագույն արժեքները։

*Առանցքային բառեր.* ռեզոնանսային ինվերտոր, ինդուկցիոն տաքացում, IJBT - տրանզիստոր, տիրիստորային կերպափոխիչ։

#### N.N. PETROSYAN, J.D. DAVIDYAN, P.S. MANUKYAN

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN RESONANT INVERTER WITH THE CLOSED INPUT FOR INDUCTION HEATING

Two schemes of resonant inverters for high-frequency induction are analyzed. Electromagnetic processes based on their equivalent schemes are considered. Analytical expressions and time diagrams allowing to define variation rules of electric current and voltage in schemes and to estimate their maximal values are received.

Keywords: resonant inverter, induction heating, IJBT transistor, thyristor converter.

ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 54-14.537.22

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

#### С.Н. ЕНГИБАРЯН, В.К. АБРАМЯН

# СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ ЭЛЕКТРИЗОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ЕМКОСТЯХ

Показано, что эффективность и надежность отвода зарядов электризованной жидкости в емкостях можно повысить покрытием зеркала жидкости электропроводящими поплавками, обладающими свойствами определенной ориентации и погружения в жидкость 85…90 % объема, в количествах, образующих также полностью погруженный слой поплавков, прижатых архимедовыми силами к поплавкам верхнего слоя и покрывающих 10…20 % площади сечения емкости. Пристеночные два или три поплавка с каждой стороны электрически соединяются со стенкой емкости.

*Ключевые слова:* электризация, статическое электричество, поплавок, ориентация, погружение, искровой разряд, диэлектрический, заряд.

Известно, что при загрузке емкости электризованной при транспортировке жидкостью, вследствие дополнительной электризации и накопления зарядов статического электричества (СЭ), напряженность электрического поля над поверхностью жидкости повышается. При достижении последнего пробивного напряжения паровоздушной смеси образуются искровые разряды. В зависимости от энергии искровых разрядов, минимальной энергии зажигания паровоздушной смеси и концентрации кислорода могут произойти процессы окисления паров органики, воспламенение или взрыв паровоздушной смеси [1-3]. Для уменьшения величины заряда загружаемой в резервуар жидкости предложено на загрузочном трубопроводе, непосредственно у входа в резервуар, устанавливать релаксационные емкости [4, 5] или нейтрализаторы с заземленными игольчатыми электродами [6]. Однако опыт показывает, что они малоэффективны и в лучшем случае уменьшают заряд поступающей в резервуар жидкости лишь вдвое. С другой стороны, они применимы для жидкостей с временем релаксации  $\tau_{\rm n}$  < 2 с, т.е. у которых объемное электрическое сопротивление  $\rho$  ≤ 10<sup>11</sup> *Ом(м.* С этой целью разработаны также устройства для отвода зарядов СЭ с поверхности диэлектрических жидкостей, например, покрытием поверхности электропроводящей сплошной гибкой металлизированной пластинойэлектродом, электрически соединенной со стенкой емкости и перемещающейся по вертикальной направляющей [7]. Однако следует указать, что нестационарные по величине и месте усилия жидкости под сплошным электродом, направленным вверх, возникающие при нестационарном режиме работы (транспортировка, загрузка и др.), быстро выводят из строя пружинное контактное приспособление устройства, создают возможность дополнительной электризации жидкости, отрывают электрод от жидкости, создавая возможность образования искрового разряда и др.

Согласно другой разработке [8], поверхность диэлектрической жидкости покрывается плавающим слоем металлизированных частиц смолы с размерами в пределах (2…100).10<sup>-6</sup> *м*. Частицы электропроводящего слоя соприкасаются друг с другом и простираются от стенки до стенки резервуара. Недостатками данного способа отвода зарядов являются: отвод зарядов осуществляется только с поверхности жидкости; контактная поверхность частиц смолы с жидкостью маленькая; из-за отсутствия прижимающих усилий между частицами электрическое сопротивление цепей "частица смолы-земля" высокое; частицы смолы в случаях окисляющихся и полимеризующихся смазочных масел при нестационарных режимах покрываются пленкой масла. Оказавшись в воздушном пространстве, пленки масел окисляются и полимеризуются, образуя на частицах диэлектрические пленки полимера, которые электропроводящие частицы смолы превращают в диэлектрики. В другом аналогичном устройстве поверхность электризованной жидкости покрывается полыми металлическими шарами, соприкасающимися между собой и простирающимися от стенки до стенки заземленной емкости [9]. Данное устройство тоже непригодно для отвода зарядов СЭ окисляющихся и полимеризующихся смазочных масел по тем же причинам и имеет те же недостатки.

Целью настоящей работы является разработка способа предотвращения образования искровых разрядов на поверхности электризованных жидкостей в емкостях.

Поставленной цели достигают повышением эффективности и надежности отвода зарядов СЭ путем покрытия зеркала электризованной жидкости в емкостях электропроводящими поплавками 50…60 %, массы которых сосредоточены в самой нижней части рабочего положения поплавков и определяются из условия погружения в жидкости 85…90 % объема в количествах, на 10…20 % превышающих расчетное количество поплавков для покрытия зеркала жидкости в емкости. Благодаря указанным параметрам и количеству поплавки приобретают определенную ориентацию и способность занимать определенное положение в жидкости по отношению к зеркалу жидкости (см. рис.).



Устройство отвода зарядов электризованной жидкости: а-в случае шаров; б-цилиндров; в-многогранных призм; 1-стенка емкости; 2-основа смазочного масла; 3-место сосредоточения 50…60 % массы поплавка; 4-полый металлизированный шар; 5-полый металлизированный цилиндр; 6-полая металлизированный полушар. Пристеночные 2 или 3 поплавка с каждой стороны электрически соединяются с заземленной стенкой

Вследствие этого контактная поверхность поплавков электропроводящего слоя становится определенной и постоянно погруженной в жидкость, что исключает доступ кислорода, а также

возможность протекания окислительных и полимеризационных процессов и образование диэлектрической пленки полимера на контактной поверхности; покрывает зеркало жидкости, образуя электропроводящий слой с погруженными в жидкость на 80…90 % объема поплавками, а дополнительные 10... … 20 % поплавков полностью погружаются в жидкость, образуя неполный слой с неравномерно распределенными поплавками, прижатыми архимедовыми силами к поплавкам верхнего слоя. В результате в верхнем заземленном слое образуются горизонтальные прижимающие силы между поплавками и поплавками со стенкой, которые резко уменьшают электрическое сопротивление любой цепи "поплавок-земля" электропроводящего слоя. Тем самым все поплавки находятся прижатыми друг к другу и к стенке емкости. Два или три поплавка верхнего слоя с каждой стороны электрически соединяются со стенкой емкости; металлические или металлизированные, жесткие или упругие электропроводящие поплавки с размерами  $d_{3\kappa B} = 0,03\cdots 0,1M$  - геометрически правильные тела (пустые шары, цилиндры или многогранные призмы, запаянные с двух сторон пустыми полусферами и др.), которые соприкасаются точками, линиями или площадями. Предложенный способ отвода зарядов электризованной жидкости, кроме упомянутых выше, имеет также и другие преимущества: увеличивает поверхность контакта поплавков с жидкостью; отвод заряда осуществляется не только с поверхности, но и из близлежащих к поверхности слоев жидкости, т.е. из объема жидкости; упрощает конструкцию и изготовление электропроводящих поплавков, обслуживание и срок службы системы отвода зарядов.

Устройство отвода зарядов работает следующим образом: расчетное количество элементов заполняет частично заполненную емкость. При этом они быстро ориентируются и образуют слой с прижатыми друг к другу и к стенкам емкости электропроводящими поплавками, который вместе с зеркалом жидкости в емкости при загрузке и выгрузке поднимается и опускается по вертикали.

Способ апробирован на полупромышленной установке перекачивания жидкостей (основы технологической смазки марки Укринол-2) при следующих условиях: объем жидкости - 0,2 *м*<sup>3</sup>; диаметр стального трубопровода - 0,016 *м*; скорость перекачивания - 10 *м/с*; диаметр пустых металлизированных шаров 0,05 *м* и 0,1 *м*; количество шаров - на 10 % больше расчетного количества; утяжеление - на любой небольшой части поверхности из расчета погружения в масло 90 % объема шаров. Испытания проводились следующим образом: в емкости создавали заземленный электропроводящий слой, вертикально устанавливали измеритель потенциала СЭ марки ПК-2 и фиксировали показания прибора при заполнении емкости со скоростью перекачки электризованной жидкости 10 *м/с*. Сравнением значений потенциала поля СЭ при отсутствии и наличии слоев электропроводящих поплавков оценивали эффективность их работы. Полученные данные напряженности электрического поля в зависимости от степени заполнения емкости сведены в таблицу.

Испытания показали: при подаче в емкость металлизированных шаров диаметром 0,05 *м* или 0,1 *м*, способных покрывать 110 % площади зеркала жидкости, дополнительные 10 % шаров сразу же полностью погружаются в жидкость. При этом все поплавки быстро ориентируются и образуют

покрывающий площадь зеркала жидкости заземленный слой с погруженными в жидкость на 80…90 % объема поплавками и полностью погруженный в жидкость слой с неравномерно распределенными по сечению поплавками, покрывающие 10 % площади сечения емкости.

Таблица	
---------	--

Степень заполн.	Напряженность эл. поля	Напряженность эл. поля над
емкости	над поверхностью	поверхностью жидкости после
в доли ед.	жидкости,	установки уст-ва,
	кВ/см	кВ/см
1/4	10…12	0
1/2	2028	0
3/4	2030	0

Эти поплавки прижимают архимедовыми силами поплавки верхнего слоя и образуют в нем горизонтальные прижимающие силы. Таким образом, все поплавки находятся прижатыми друг к другу и к стенке емкости и при загрузке и выгрузке вместе с зеркалом жидкости поднимаются и опускаются по вертикали; при наличии электропроводящего слоя, покрывающего почти вся площадь зеркала жидкости и электрически соединенного со стенкой емкости, жидкость оказывается окруженной эквипотенциальной поверхностью. В результате электрическое поле между верхним слоем электропроводящих поплавков, боковыми стенками и верхом емкости отсутствует, т.е. в паровоздушном пространстве исключена возможность образования искрового электростатического разряда, о чем свидетельствуют полученные данные; электрическое сопротивление любой цепи "поплавок-земля" не

100 *Ом*; эффективность отвода зарядов не меняется в случаях применения электропроводящих поплавков диаметрами 0,05 и 0,1 *м*; на основании многочисленных загрузок и выгрузок емкости в течение двух месяцев нагретой до 70…80 *°C* основы смазочного масла установлено, что на контактных поверхностях поплавков диэлектрической пленки полимера не образуется; заземленное устройство с заданными параметрами поплавков обеспечивает полный отвод зарядов СЭ, о чем свидетельствует отсутствие напряженности электрического поля над поверхностью жидкости и постоянство электрического сопротивления любой цепи "поплавок-земля".

Таким образом, предложенный способ обеспечивает эффективный и надежный отвод зарядов СЭ и предотвращает образование искрового разряда и в случае окисляющихся и полимеризующихся жидкостей. Благодаря простоте конструкции и обслуживания, эффективности и надежности отвода зарядов и универсальности, предложенный способ может найти широкое применение в различных отраслях промышленности для безопасного проведения процессов загрузки, хранения, выгрузки и транспортировки горючих диэлектрических и электризующихся жидкостей, где есть возможность образования паровоздушной смеси с воспламеняющей и взрывоопасной концентрацией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Захарченко В.В., Лрячко Н.И., Мажара Е.Ф., Севриков В.В., Гавриленко Н.Д. Электризация жидкостей и ее предотвращение .- М.: Химия, 1975.-128 с.
- 2. **Бобровский С.А., Яковлев Е.И.** Защита от статического электричества в нефтяной промышленности. -М.: Недра, 1983. –160 с.
- 3. Статическое электричество в химической промышленности. Л.: Химия, 1971. 208 с.
- 4. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1973. 60с.
- 5. Отака Д., Кобуиси. Т. //ВИНИТИ № 36568/3. -1961. -Т.10, №4. 363 с.
- 6. Максимов Б.К., Обух А.А., Зубов М.И. и др. Защита от вредного воздействия статического электричества в народном хозяйстве.- Черкассы: НИИТЭХим, 1973.- С.33.
- 7. A.c. Nº 562062, H 05 F 3/00, 1977.
- 8. Патент США <br/>  $N^{\rm o}$  2907923 от 06.10.1959, НКИ 317-2.
- 9. A.c. CCCP, 1285632, 1977.

Институт общей и неорганической химии НАН РА. Материал поступил в редакцию 06.06.2006.

# Ս. Ն. ԵՆԳԻԲԱՐՅԱՆ, Վ.Ղ. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ ՏԱՐՈՂՈՒԹՅԱՆ ՄԵՋ ԳՏՆՎՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆԱՑԱԾ ՀԵՂՈՒԿԻ ԿԱՅԾԱՅԻՆ ՊԱՐՊՄԱՆ ԿԱՆԽԱՐԳԵԼՄԱՆ ԵՂԱՆԱԿ

Ցույց է տրված, որ տարողության մեջ գտնվող էլեկտրականացած հեղուկի լիցքերի հեռացման արդյունավետությունը և հուսալիությունը կարելի է բարձրացնել հեղուկի մեջ որոշակի կողմնորոշում, 85---90% խորասուզման աստիձան ունեցող էլեկտրահաղորդիչ լողաններով հեղուկի հայելային մակերեսը լողանների այնպիսի քանակով ծածկելու ձանապարհով, որն առաջացնում է նաև լրիվ խարասուզված, արքիմեդյան ուժերով վերին շերտի լողաններին հպված և սեղմող, տարողության կտրվածքի մակերեսի 10...20%-ը ծածկող լողանների շերտ։ Պատին շփվող 2 կամ 3 լողան ամեն կողմից էլեկտրականապես միացվում են պատին։

*Առանցքային բառեր.* Էլեկտրականացում, ստատիկ Էլեկտրականություն, լողան, կողմնորոշում, խորասուզում, կայծային պարպում, մեկուսիչ, լիցք։

## S.N. YENGIBARYAN, V.K. ABRAHAMYAN THE WAY OF PREVENTING SPARK DISCHARGES OF ELECTRIFIED LIQUIDS IN CONTAINERS

It is shown that the effectiveness and relativity of tapping of charges in electrified liquids in containers can be raised by covering the surface of the liquid with current-conducting floats having certain properties and submergence by 85---90 % of the volume and in quantities forming a fully submerged layer of floats covering the 10---20 % of the sectional area (area of cut) of the container 2 or 3 parietal floats from each side are electrically connected to the wall.

Keywords: electrization, static electricity, float, orientation, sparkling discharge, dielectric, charge.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.372.2

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

#### В.В. БУНИАТЯН, Л.Э. ХАЧИКЯН

# О ВОЗМОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЧИНАХ ЗАВИСИМОСТИ С ~ f В СТРУКТУРАХ ТИПА СВЕРХПРОВОДНИК/ФЕРРОЭЛЕКТРИК

Представлены результаты теоретических исследований контакта сверхпроводник/ферроэлектрик. Анализируется общая физическая модель контакта с учетом диэлектрического зазора между ферроэлектриком и сверхпроводником при наличии поверхностных состояний в контакте.

Ключевые слова: поверхностные уровни, контакт сверхпроводник/ферроэлектрик, ловушки захвата.

В десятилетия ферроэлектрические материалы наиболее последние оказались востребованными В микроэлектронной промышленности. Фундаментальное свойство ферроэлектриков (зависимость диэлектрической постоянной от электрического поля и температуры) позволяет их использовать в качестве управляемых компонентов сверхвысокочастотных (СВЧ) схем [1]. В силу структурной совместимости с ферроэлектриками в качестве компонентов схем в поле зрения разработчиков оказались сверхпроводники. Грамотное сочетание фундаментальных характеристик сегнетоэлектриков и сверхпроводников (малые микроволновые потери) привело к созданию приборов с электрически управляемыми характеристиками. Уже сообщалось о создании конденсаторов на основе структуры сверхпроводник/ ферроэлектрик (СП/Ф), резонаторов, фильтров и других криоэлектронных устройств СВЧ диапазона [2-3,5,7,8]. Наиболее перспективными среди ферроэлектриков в качестве компонентов СВЧ схем являются SrTiO<sub>3</sub> (STO), а также КТаO<sub>3</sub> (КТО). Возросший интерес к сверхпроводникам прежде всего связан с YBa2Cu3O7 (YBCO), который имеет структурную совместимость с SiTiO<sub>3</sub> (STO) и КТаO<sub>3</sub> (КТО).

Массовое внедрение и производство схем на базе структуры типа СП/Ф должно предшествовать изучению физических и электрических характеристик этих схем. Для практического использования таких структур и устройств, построенных на их основе, необходимо более детальное изучение как условий образования потенциального барьера на границе раздела этих материалов, так и электрических характеристик, получаемых при этом переходе. Возросший интерес к структурам типа СП/Ф был отмечен рядом публикаций об экспериментально полученных результатах исследований таких структур. Так, эспериментально получены зависимости С-f и tanδ-f для конденсаторов STO с YBCO в качестве буферного слоя при комнатной температуре [6]. При этом для ~3,0  $\Gamma T \mu$  < f < (30,0  $\Gamma T \mu$  характерны зависимости типа: С ~ 0,4031f<sup>0.17</sup> и tanδ ~0,01666f<sup>0.536</sup>. Похожие зависимости наблюдались с BaTio<sub>3</sub> (BTO) [6].

Целью данной работы является теоретическая трактовка физической природы вышеуказанной зависимости, которая базируется на допущении о возможности существования ловушечных уровней на границе раздела двух сред. Эти ловушки надо рассматривать как центры захвата и рассеяния энергии. Их присутствие порождает дополнительную ловушечную емкость (Ct). В пользу этой версии склоняются и сами авторы эксперимента [3-4, 6]. Отмечается, что в структурах типа СП/Ф часть инжектированных носителей захватывается ловушками, создавая неподвижный поверхностный заряд [1,6]. Последнее может привести к изменению соотношений между приложенным к структуре напряжением и высотой потенциального барьера, что, в свою очередь, влияет на текущее значение емкости и напряженности, а это адекватно сказывается на характеристиках приборов.

На рис.1 представлена энергетическая диаграмма предполагаемой теоретической модели.



Рис.1. Энергетическая диаграмма модели

В основе модели лежит предположение, что на границе раздела СП/Ф присутствуют ловушечные уровни и их спектр описывается экспоненциальным распределением типа

$$N(W) = N_0 \cdot exp\left(\frac{W - E_c}{kT_t}\right) = N_n \cdot exp\left(\frac{W - F_0}{kT_t}\right),$$
(1)

где T<sub>t</sub> - температурный параметр, характеризующий распределение захваченных электронов на границе раздела СП/ $\Phi$ ; E<sub>c</sub> - энергия, соответствующая дну зоны проводимости; W - энергия уровней захвата; F<sub>0</sub> - энергия Ферми при тепловом равновесии; k - постоянная Больцмана; N<sub>0</sub> - некая постоянная, имеющая размерность *см*<sup>-3</sup>. Нижнюю и верхнюю границы энергетического спектра ловушек обозначим W<sub>1</sub> и W<sub>2</sub> соответственно (рис.1).

Захват носителей ловушками описывается кинетическим уравнением вида

$$\frac{\partial}{\partial t}dn_{t} = \alpha (dN_{t}(W) - dn_{t})n - P_{t}dn_{t}, \qquad (2)$$

где t – время; dnt - концентрация захваченных электронов, соответствующая интервалу энегий ∂W; n - концентрация свободных электронов; α=<σV<sub>t</sub>> - усредненное по свободной зоне произведение скорости электронов vt на эффективное сечение ловушек при данной энергии W; Pt - вероятность термической ионизации ловушек.

Обычно временные параметры всех величин в линейном приближении представляются в виде суммы двух составляющих: постоянной (индекс 0) и переменной (индекс 1). Исходя из этого выражение для концентрации захваченных электронов будет выглядеть следующим образом:

$$n_{t}(x,t) = n_{t_{0}}(x) + n_{t_{1}} \exp(i\omega t),$$
 (3)

где **Ш** - угловая частота малого сигнала.

Для постоянной составляющей концентрации захваченных носителей на границе раздела двух сред выражение (2) на случай равновесия примет вид

$$\alpha \cdot \left( \mathbf{N}_{t} - d\mathbf{n}_{t_{0}} \right) \cdot \mathbf{n}_{0} - \mathbf{P}_{t} \cdot d\mathbf{n}_{t_{0}} = 0.$$
(4)

Пользуясь соотношением типа  $P_t = \alpha \cdot \gamma(W)$ , где  $\gamma(W) = \frac{N_c}{g} exp\left(\frac{W - E_c}{kT_t}\right)$ , из (4) для  $n_{t_0}$ 

получим

$$dn_{t0} = \frac{dN_t}{1 + \frac{\gamma(W)}{n_0}},$$
(5)

где g - статистический фактор захвата ловушек; N<sub>c</sub> – эффективное число состояний в свободной зоне.

Дифференцирование уравнения для плотности полного тока

$$j = q \cdot n(x) \cdot \mu(x) + q \cdot D \cdot \frac{\partial n(x)}{\partial x},$$
 (6)

где j, E, µ, D - соответственно плотность протекающего тока, напряженность электрического поля, подвижность и коэффициент диффузии электронов, при допущении, что  $\frac{\partial j}{\partial x} = 0$  и D=0, позволяет получить следующее выражение:

$$\mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{n}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}}.$$
 (7)

С другой стороны, уравнение Пуассона для одномерного случая записывается в виде

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\mathbf{q}}{\xi_{s}} \cdot (\mathbf{n} + \mathbf{n}_{t}), \tag{8}$$

где n и n $_{\rm t}$  - соответственно концентрации свободных и захваченных электронов;  $\xi_{\rm s}$  - диэлектрическая проницаемость среды.

Сопоставляя (7) и (8), получим

$$\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{\mathbf{q}}{\xi_{s}} \cdot \mathbf{n} \cdot (\mathbf{n} + \mathbf{n}_{t}), \tag{9}$$

где  $\mathbf{n} + \mathbf{n}_{t} = \mathbf{n}_{i}$ - концентрация инжектированных электронов.

Интегрирование (1) и (3) с учетом вышеуказанных равенств приведет к следующим соотношениям для n и  $n_t$  [3]:

$$\mathbf{n} = \Gamma \cdot \mathbf{n}_0 \cdot \left\{ \frac{1 - U^{\frac{1}{1}}}{U^{\frac{1}{1}}} - \mathbf{g} \cdot \left( \Gamma \cdot \frac{\mathbf{n}_0}{\mathbf{N}_n} \right)^{1 - 1} \cdot \ln \left[ \frac{\mathbf{g} \mathbf{x}_1 + \mathbf{e} \mathbf{x} \mathbf{p} \mathbf{y}_2}{\mathbf{g} \mathbf{x}_1 + \mathbf{e} \mathbf{x} \mathbf{p} \mathbf{y}_1} \right] \right\},$$

$$\mathbf{n}_{t} = \mathbf{g} \cdot \frac{\Gamma^{1}}{\mathbf{U}} \cdot \left(\frac{\mathbf{n}_{0}}{\mathbf{N}_{n}}\right)^{\frac{1}{1}} \cdot \mathbf{N}_{n} \cdot \ln \left[\frac{\mathbf{g}\mathbf{x}_{1} + \mathbf{e}\mathbf{x}\mathbf{p}\,\mathbf{y}_{2}}{\mathbf{g}\mathbf{x}_{1} + \mathbf{e}\mathbf{x}\mathbf{p}\,\mathbf{y}_{2}}\right], \tag{10}$$

где  $W_1$  и  $W_2$  - соответственно нижняя и верхняя границы энергетического спектра ловушек,

$$\Gamma = \frac{N_n}{n_0} \cdot \left(\frac{n_0}{N_c}\right)^1, \ 1 = \frac{T_t}{T}, \ U = \frac{n_0}{n} = \frac{q \cdot n_0 \cdot \mu \cdot E}{j}, \ y_1 = \frac{W_1 - E_c}{KT_t}, \ y_2 = \frac{W_2 - E_c}{KT_t}, \ x_1 = \frac{n_0}{N_c}.$$

Аналогичный математический подход для переменной составляющей концентрации захваченных электронов выявляет следующее соотношение для **n**<sub>11</sub>:

$$dn_{t} = \frac{\alpha n_{1} \gamma(W) dN_{t}(W)}{\left[\gamma(W) + n_{0}\right] \left[\alpha \left(\gamma(W) + n_{0}\right) + i\omega\right]}.$$
(11)

Интегрирование (11) в энергетическом интервале (W<sub>2</sub> – W<sub>1</sub>), принимая, что α=const, приведет к соотношению типа

$$\mathbf{n}_{t_1} = \alpha \mathbf{n}_1 (\mathbf{B}_0 - \mathbf{i} \omega \mathbf{B}_1), \qquad (12)$$

где 
$$\mathbf{n}_{t} = \int_{\mathbf{W}_{1}}^{\mathbf{W}_{2}} d\mathbf{n}_{t}, \qquad \mathbf{B}_{1} = \frac{Z}{\alpha} \int_{\mathbf{W}_{1}}^{\mathbf{W}_{2}} \frac{\exp\left(\frac{2\mathbf{W}}{\mathbf{k}T_{t}}\right) \partial \mathbf{W}}{\left[\mathbf{n}_{0} + \gamma(\mathbf{W})\right] \cdot \left[\boldsymbol{\omega}^{2} + \alpha^{2} \left(\mathbf{n}_{0} + \gamma(\mathbf{W})\right)^{2}\right]},$$

$$B_{0} = Z \int_{W_{1}}^{W_{2}} \frac{\exp\left(\frac{2W}{kT_{t}}\right) \partial W}{\omega^{2} + \alpha^{2} [n_{0} + \gamma(W)]^{2}}, \quad Z = \frac{\alpha N_{c} N_{n} \exp\left[\frac{-(E_{c} + F_{0})}{kT_{t}}\right]}{gkT_{t}},$$
$$n_{0} = N_{c} \exp\left(\frac{F_{0} - E_{c}}{kT_{t}}\right).$$

Для переменной составляющей полного тока без учета диффузионного будет справедливо соотношение

$$\mathbf{j}_{1} = \mathbf{S} \left( \boldsymbol{\xi}_{s} \frac{\partial \mathbf{E}_{1}}{\partial t} + q\boldsymbol{\mu}_{n} \mathbf{E}_{0} \mathbf{n}_{1} + q\boldsymbol{\mu}_{n} \mathbf{E}_{1} \mathbf{n}_{0} \right), \tag{13}$$

где  $E = E_0(x) + E_1(x,t)$ . В рассматриваемой области частот  $E_1 = V_1 \frac{\partial E_0}{V_0}$ . Из (11) и (12), а также

принимая во внимание, что  $Y = \frac{j_1}{U_1}$ , получим следующее выражение:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S} \begin{cases} q\mu_{n}n_{0}\frac{\partial E_{0}}{\partial V_{0}} + \frac{q\mu_{n}E_{0}A(1+\alpha B_{0})}{(1+\alpha B_{0})^{2} + (\alpha \omega B_{1})^{2}} \\ + i\omega \left[\xi_{s}\frac{\partial E_{0}}{\partial V} + \frac{q\mu_{n}E_{0}A\alpha B_{1}}{(1+\alpha B_{0})^{2} + (\alpha \omega B_{1})^{2}}\right] \end{cases}.$$
(14)

Для теоретического обоснования экспериментальных данных предлагается представить исследуемую структуру в виде последовательного соединения следующих емкостей:

$$C(U) = \frac{C_{1}(U) \cdot C_{t}(U)}{2C_{1}(U) + C_{t}(U)} \Leftrightarrow C(U) = \frac{C_{1}(U)}{1 + \frac{2C_{1}(U)}{C_{t}}},$$
(15)

где  $C_1(U)$  – геометрическая емкость длиной Leff;  $C_t(U)$  - ловушечная емкость длиной Lt.

С другой стороны, выражение (15) путем последовательной подстановки соответствующих выражений [3] можно привести к виду

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G}_0 + \mathbf{G}_t + \mathbf{i}\omega(\mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_t), \tag{16}$$

где Со - электростатическая емкость; Сt - ловушечная емкость, которая имеет вид

$$C_{t} = \frac{2\xi_{s}S\mu U_{0}}{d^{3}} \cdot \frac{\alpha B_{1}}{\left(1 + \alpha B_{0}\right)^{2} + \left(\alpha \omega B_{1}\right)^{2}}.$$
(17)

С учетом вышепредставленных формул выражение (17) можно переписать в виде

$$C_{t} = \frac{2\mu_{n}U_{0}g^{2}C_{0}N_{n}}{\alpha l^{2}N_{c}n_{0}} \cdot \frac{\left\{e^{\frac{3W_{2}+2W_{1}}{kT_{t}}} - e^{\frac{3W_{1}+2W_{2}}{kT_{t}}}\right\}}{e^{\frac{(W_{1}+W_{2})}{kT_{t}}} \left\{\left(1+\beta x\right)^{2} + \left(\beta\beta_{1}\right)^{2}\left[e^{\frac{W_{2}}{kT_{t}}} - e^{\frac{W_{1}}{kT_{t}}}\right]\right\}}, \quad (18)$$
  
где  $\beta = \frac{gN_{n}}{n_{0}}, \ \beta_{1} = \frac{g\omega}{\alpha N_{c}}$  - безразмерная частота  $\left(f = \frac{\omega}{\alpha N_{n}}\right).$ 

( .....

.....

В результате получим

$$\frac{C_{t}}{C_{0}} = \frac{2\mu_{n}U_{0}\beta\beta_{1}}{l^{2}\omega} \cdot \frac{\left\{e^{\frac{3W_{2}+2W_{1}}{kT_{t}}} - e^{\frac{3W_{1}+2W_{2}}{kT_{t}}}\right\}}{e^{\frac{(W_{1}+W_{2})}{kT_{t}}}\left\{\left(1+\beta x\right)^{2} + \left(\beta\beta_{1}\right)^{2}\left[e^{\frac{W_{2}}{kT_{t}}} - e^{\frac{W_{1}}{kT_{t}}}\right]\right\}}.$$
 (19)

Математическое решение выражения (19) путем подстановки соответствующих значений выявляет зависимость C ~ f в виде

$$\frac{\mathbf{C}_{t}}{\mathbf{C}_{0}} = 4 \cdot 10^{n} \cdot \mathbf{f}^{-2} \Longrightarrow \mathbf{C}_{t} = 4 \cdot 10^{n} \cdot \mathbf{C}_{0} \cdot \mathbf{f}^{-2}, \qquad (20)$$

где n принимает различные значения в зависимости от  $\,N_n^{}$  .

В результате выражение (16) можно представить в виде

$$C(U) = \frac{C_{1}(U) \cdot C_{t}(U)}{2C_{1}(U) + C_{t}(U)} \Leftrightarrow C(U) = \frac{C_{1}(U)}{1 + \frac{2C_{1}(U)}{C_{t}}} = \frac{\frac{\xi \xi_{0} S}{d}}{1 + 2 \cdot f^{2}/4 \cdot 10^{n}}.$$
 (21)

На основании (21) построена диаграмма зависимости C/f для теоретической модели при различных значениях  $\xi$  и  $N_n$  (рис.2).



Рис.2. Диаграмма зависимости частоты от емкости (пунктиром обозначены диаграммы зависимости, полученные на основе теоретической модели):  $1 - \xi = 1800, N_n = 10^{22}; \quad 2 - \xi = 720; N_n = 10^{20};$  $3 - \xi = 720; N_n = 10^{18}; \quad 4 - (\xi = 720; N_n = 10^{15})$ 

Анализ двух диаграмм зависимости (теоретической и экспериментальной) обнаруживает следующую закономерность. По мере уменьшения  $\xi$  и N<sub>n</sub> диаграмма, построенная на основе теоретической модели, все больше и больше приобретает очертания экспериментально полученной диаграммы, что говорит о физической состоятельности теоретической модели. Таким образом, схожесть экспериментальной и теоретической зависимостей указывает на то, что допущение о существовании ловушечных уровней переходит из экспериментального предположения в теоретическое обоснование. Это, в свою очередь, говорит о физической актуальности предлагаемой модели в плане объяснения экспериментальных данных. Такой подход открывает большие возможности для теоретических исследований в этой области, направленных на усовершенствование качественных характеристик приборов на основе СП/Ф.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Бузин И.М., Иванов И.В., Моисеев Н.Н., Чупраков В.Ф**. Нелинейность и диэлектрические потери танталата калия//Физика твердого тела.-1980.- С. 2057-2061.
- 2. **Буниатян В. В., Хачикян Л. Э.** О диэлектрических потерях в структурах типа сверхпроводник/сегнетоэлектрик // Моделирование, оптимизация, управление.-Ереван, 2003.-С.47-52.

- Aroutiounian V., Gasparyan F., Buniatyan V., Travadjan M., Soukiassian P. Static and dynamic characteristics of monopolar current injection in SiC with non-uniform distribution of traps//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference "Mass and Charge Transport in Inorganic Mateials".-Italy, July 14-18, 2002.- P.89-95.
- 4. **Chakalov R.A., Ivanov Z.G., Boikov Yu.A., Larsson P.** Fabrication and investigation of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>/ Ba<sub>0.05</sub>Sr<sub>0.95</sub>Tio<sub>3</sub> thin film structures for voltage tunable devices //Physical C.- 1998.-P.279-288.
- 5. **Boikov Yu., Ivanov Z.G., Vasiliev A.L., Pronin I.** Epitaxial heterostructures YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>/KtaO<sub>3</sub> for microwave applications//Applied Physics Letters.-1991.- P.2708-2710.
- 6. Gevorgian S., Carlsson E., Wikborg E., Kollberc E. Tunable microwave devices based on bulk and thin film ferroelectrics//Integrated Ferroelectrics.-1998.- P.245-257.
- Gevorgian S., Petrov P.K., Avadel S., Ivanov Z. Strain induced ferroelectrosity in epitaxial SrTiO<sub>3</sub> films//Chalmers University of Technology, 41296, Gothenburg Sweden, Erisson Microwave Systems, 43184 Moendal, Sweden,

#### 2000.

- 8. Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Dedyk A.I., Karmanenko S.F., Chakalov R.A. Nich-T<sub>c</sub> Superconductivity: New applications of ferroelectrics at mikrowave ferquencies// Ferroelectrics.-1993.-P.33-43.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.07.2007.

#### Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Լ.Է. ԽԱՉԻԿՅԱՆ

# ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉ - ՖԵՌՈԷԼԵԿՏՐԻԿ ԿՈՆՏԱԿՏԻ C ~ ք ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆ ՖԻՉԻԿԱԿԱՆ ՊԱՏՃԱՌՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ներկայացվում են գերհաղորդիչ - ֆեռոէլեկտրիկ կոնտակտի տեսական հետազոտությունների արդյունքները։ Վերլուծվել է կոնտակտի ընդհանուր ֆիզիկական մոդելը մակերեսային վիձակների և գերհաղորդչի ու ֆեռոէլեկտրիկի միջև դիէլէկտրիկական առանցքի առկայությամբ։ *Առանցքային բառեր.* մակերեսային վիձակներ, գերհաղորդիչ - ֆեռոէլեկտրիկ կոնտակտ,

գրաված թակարդներ։

### V.V. BUNIATYAN, L.E. KHACHIKYAN

### ON POSSIBLE PHYSICAL REASONS FOR C ~ f DEPENDENCE IN STRUCTURES OF SUPERCONDUCTOR/FERROELECTRIC TYPE

The results of theoretical studies of superconductor/ferroelectric are given. A general physical model of the contact with a dielectric gap between the ferroelectric and superconductor in the presence of surface states in the contact is given.

*Keywords:* superficial levels, superconductor/ferroelectric contact, catch trap.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.37/.39

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

## О.В. БАГДАСАРЯН, Т.М. КНЯЗЯН, Г.Г. ЭЙРАМДЖЯН

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ, ПРОЗРАЧНОЙ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Методом единого выражения (МЕВ) проведено корректное электродинамическое моделирование отражательных и пропускательных характеристик многослойных металл-диэлектрических структур. Для слоистой структуры, состоящей из чередующихся слоев серебра и диэлектрика GaN, подбором их толщин и числа двухслоек предложена оптимальная конфигурация, обладающая высокой пропускательной способностью в видимой области спектра и непропусканием вне ее. Рассчитаны спектры пропускания, отражения и поглощения такой структуры с учетом частотной дисперсии серебра. Для областей наибольшего и наименьшего пропускания приведены распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) вдоль структуры.

*Ключевые слова:* многослойная структура, металл-диэлектрические слои, численное моделирование, электродинамическая модель, метод единого выражения, оптическая фильтрация.

Введение. Как известно, многослойные диэлектрические структуры имеют сильную отражательную способность в узкой полосе оптического спектра, благодаря чему они получили широкое применение в качестве отражательных фильтров и частотно-селективных зеркал в оптике [1, 2]. Для получения частотно-селективных пропускательных фильтров используются металлдиэлектрические слоистые структуры [3-9]. Такие фильтрующие структуры могут применяться для защиты различных оптических устройств от воздействия интенсивного электромагнитного излучения вне видимого диапазона волн, а также в качестве прозрачных электропроводящих покрытий в дисплеях и др. [6]. Для конструирования таких фильтров необходимо проведение численного моделирования перед дорогостоящим процессом их изготовления. Обычно для моделирования используются следующие традиционные расчетные методы: метод характеристической матрицы [3-6], метод инвариантного погружения [7, 8], метод быстрого преобразования Фурье [9] и др. Перечисленные методы сложны в реализации и не являются эффективными для нахождения оптимальных конфигураций структур с требуемыми спектральными характеристиками. В данной работе в качестве альтернативного метода численного моделирования металл-диэлектрических многослойных структур используется разработанный авторами статьи метод единого выражения (МЕВ) [10 - 14]. Основой МЕВ является представление решения уравнения Гельмгольца в каждом слое рассматриваемой структуры в виде единого выражения, а не в виде встречных волн, как в классическом подходе. Благодаря этому не требуется предварительное задание формы волны в каждом слое структуры, что делает МЕВ удобным инструментом в исследованиях оптических структур, состоящих из слоев с любыми комплексными значениями диэлектрических и

магнитных проницаемостей [15]. МЕВ является корректным, простым в реализации и быстрым средством для расчета многослойных структур, слои которых соизмеримы с длиной волны.

В работе приведено краткое описание МЕВ и с его помощью численно исследованы пропускательные и отражательные свойства многослойных металл-диэлектрических структур.

**МЕВ и анализ оптических характеристик металл-диэлектрических структур.** Из уравнений Максвелла в случае монохроматических волн выводится уравнение Гельмгольца, которое для линейно-поляризованной компоненты плоской электромагнитной волны имеет следующий вид:

$$\frac{d^{2}\dot{E}_{x}(z)}{dz^{2}} + k_{0}^{2}\tilde{\epsilon}(z)\dot{E}_{x}(z) = 0, \qquad (1)$$

где  $k_0 = \omega/c$  - волновое число свободного пространства;  $\tilde{\epsilon}(z) = \epsilon'(z) + i\epsilon''(z)$  -комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

Уравнение (1) применимо не только для однородных сред, но и для неоднородных - при выполнении условия  $\vec{E} \perp grad\epsilon(z)$  [11, 16].

В основе МЕВ [10-14] лежит представление решения уравнения Гельмгольца (1) в виде единого выражения

$$\dot{\mathrm{E}}_{\mathrm{x}}(z) = \mathrm{U}(z) \cdot \exp(-\mathrm{i}\mathrm{S}(z)), \qquad (2)$$

где U(z) и S(z) - реальные величины, описывающие результирующие амплитуду и фазу напряженности электрического поля. Временная зависимость  $exp(i\omega t)$  подразумевается, но опускается во время анализа. Решение в виде (2) позволяет свести уравнение Гельмгольца (1) к системе трех дифференциальных уравнений первого порядка, которые решаются численно методом Рунге-Кутта заданием начальных условий на неосвещенной стороне структуры. Этим обеспечивается единственность решения граничной задачи для многослойной структуры при однократном процессе интегрирования дифференциальных уравнений по направлению к ее освещенной стороне. В результате решения граничной задачи определяются коэффициенты отражения, прохождения и потерь в структуре, а также получаются распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности (вектора Пойнтинга) вдоль структуры. Последние являются важной информацией для понимания специфики спектральных характеристик многослойных оптических структур.

В настоящей работе с помощью МЕВ исследованы оптические характеристики многослойных металл-диэлектрических структур при нормальном падении плоской электромагнитной волны. В качестве металла с наименьшими потерями взято серебро с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\tilde{\epsilon}_{Ag} = -8,275 - i0,749$  при  $\lambda_0 = 500$  нм (значение  $\tilde{\epsilon}_{Ag}$  взято из [17]). Отдельно исследованы оптические свойства одиночного слоя серебра, окруженного с двух сторон свободным пространством. Как показывает анализ, с ростом толщины слоя серебра наблюдается монотонное возрастание коэффициента отражения R до максимального установившегося значения R = 0,945 и соответственно убывание коэффициента прохождения T до очень малых значений (рис.1).

Установившееся значение коэффициента отражения R соответствует отражательной способности толстых металлических слоев или металлического полупространства. В этом случае коэффициент поглощения A = 1 - R, так как T = 0. Коэффициент поглощения A достигает своего максимального значения  $A \approx 0,08$  при толщине слоя, равном 18,9 *нм*, когда значения R и T равны друг другу. С дальнейшим ростом толщины слоя серебра потери монотонно уменьшаются, достигая установившегося значения A = 0,055.

Из проведенного анализа следует, что для построения многослойной металл-диэлектрической структуры с высокой пропускательной способностью в видимом диапазоне волн целесообразно выбрать полупрозрачный слой серебра толщиной в пределах 20 *нм*. Ожидается, что для толщин слоя серебра, когда его R и T почти равны друг другу, многослойная металл-диэлектрическая структура обеспечит соответствующую частотную селективность при максимальной прозрачности.



Рис. 1. Коэффициенты отражения R, прохождения T и поглощения A (все по интенсивности) в слое серебра в зависимости от его толщины L<sub>m</sub> при длине волны  $\lambda_0 = 500$  *нм* 

Далее в работе рассмотрено падение плоской электромагнитной волны на многослойные структуры, состоящие из чередующихся металл-диэлектрических двухслоек. Двухслойка состоит из слоя серебра с диэлектрической проницаемостью  $\tilde{\epsilon}_{Ag} = -8,275 - i0,749$  [17] и слоя диэлектрика GaN с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{GaN} = 7,129$  при  $\lambda_0 = 500$  *нм* [18]. С целью выявления металл-диэлектрических структур с высокой пропускательной способностью в видимой области спектра проведено исследование числа двухслоек, толщин металлических, диэлектрических слоев и просветляющих покрытий на их пропускательные свойства. Заслуживающими внимания оказались металл-диэлектрические структуры типа S1 без просветляющих покрытий (вкладка на рис. 2а) и типа S2 с просветляющими покрытиями по краям (вкладка на рис. 2б). Подобные конфигурации ранее были рассмотрены в работах [4, 6-9]. Оптимальной оказалась структура S2, состоящая из пяти металлических слоев толщиной 20 *нм*, разделенных четырьмя диэлектрическими слоями, с просветляющими покрытиями толщиной 28 *нм* (рис. 26). Положительное влияние просветляющих

покрытий было описано в работах [7-9]. Данная структура позволяет получить максимальное прохождение волны и более плавную зависимость коэффициента прохождения от толщины диэлектрических слоев по сравнению со структурой S1 (рис. 2а). Периодическое поведение коэффициента прохождения с периодом  $L_d/\lambda_d = 0,5$  соответствует известной латентности полуволнового диэлектрического слоя [1]. Максимум прохождения структуры S2 имеет место при толщине диэлектрического слоя  $L_d/\lambda_d$ , равной 0,34, что соответствует его физической толщине  $L_d = 64 \ \text{нм}$  (первый максимум на рис. 26). Ожидается, что структура S2 с толщиной диэлектрического слоя  $L_d = 64 \ \text{нм}$  обеспечит максимальную прозрачность структуры в видимой области спектра.



Рис.2. Коэффициент прохождения волны через металл-диэлектрические структуры S1 (а) и S2 (б) в зависимости от относительной толщины диэлектрических слоев  $L_d / \lambda_d$  (где  $\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{GaN}}$ ) при длине волны  $\lambda_0 = 500$  нм

Учитывая дисперсионные свойства серебра [17] (см. Приложение, рис. 4), рассчитаны спектры пропускания  $T(\lambda_0)$ , поглощения  $A(\lambda_0)$  и отражения  $R(\lambda_0)$  для структуры S2 в диапазоне длин волн 0,34 … 1,24 *мкм* (рис. 3а). Видно, что структура прозрачна в видимой области спектра и непрозрачна вне ее. Неоднородность спектра пропускания в области прозрачности обусловлена наличием потерь в слоях серебра. Максимум поглощения в структуре имеет место на длине волны 780 *нм*, при которой коэффициенты отражения и прохождения равны друг другу. Резкое уменьшение поглощения с ростом длины волны обусловлено уменьшением коэффициента прохождения структуры, т.е. слабым проникновением волны в нее.

Следует отметить, что изменение толщины диэлектрических слоев на ±1 *нм* приводит к сдвигу спектров пропускания, потерь и отражения на 5 *нм*, соответственно, в длинноволновую и коротковолновую области.

Поведение амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности в структуре позволяет объяснить особенности спектральных характеристик рассматриваемой металлдиэлектрической структуры. На рис. Зб, в, г приведены распределения амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности, а также профили диэлектрической проницаемости вдоль структуры S2 и в окружающих ее полупространствах для максимального и минимального прохождения волны.





Рис. 3. Спектр пропускания T( $\lambda_0$ ), потерь A( $\lambda_0$ ) и отражения R( $\lambda_0$ ) металл – диэлектрической структуры S2 (а). Толщины диэлектрических слоев L<sub>d</sub> = 64 *нм*, толщины слоев серебра – 20 *нм*, толщины просветляющих покрытий – 28 *нм*. Профиль диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , распределение амплитуды напряженности электрического поля  $\hat{E} = U$  и плотности потока мощности Р внутри и вне структуры для следующих длин волн падающего излучения:  $\lambda_0 = 0,34$  *мкм* (6),  $\lambda_0 = 0,5$  *мкм* (в),  $\lambda_0 = 0,9$  *мкм* (г)

В области минимального пропускания при  $\lambda_0 = 0,34$  *мкм* и  $\lambda_0 = 0,9$  *мкм* (рис. 36, г) наблюдается резкое убывание амплитуды напряженности электрического поля и плотности потока мощности на освещенной стороне структуры, что характерно для многослойных оптических структур в режиме сильного отражения [14]. В области максимального пропускания при  $\lambda_0 = 0,5$  *мкм* (рис. 38) распределение амплитуды напряженности электрического поля имеет симметричный характер в структуре с узлами в слоях металла, что характерно для многослойных металлдиэлектрических структур в режиме пропускания [9].

Заключение. С помощью МЕВ решена электродинамическая задача взаимодействия плоской электромагнитной волны с металл-диэлектрической многослойной структурой. Выявлена оптимальная структура с высокой пропускательной способностью в видимом диапазоне волн и низкой пропускательной способностью вне его. Металл-диэлектрическая структура состоит из пяти слоев серебра толщиной 20 *нм*, разделенных четырьмя диэлектрическими слоями GaN толщиной 64 *нм*, с просветляющими покрытиями из GaN толщиной 28 *нм*. Получены спектральные зависимости структуры с учетом дисперсионных свойств серебра. Рассчитанная металл-диэлектрическая структура может служить защитным фильтром от нежелательного излучения вне области видимого спектра.

Следует отметить большую чувствительность спектральной характеристики структуры от толщины диэлектрических слоев. Уменьшение или увеличение толщин диэлектрических слоев на единицы нанометров приводит к сдвигу спектра в коротковолновую или длинноволновую область, соответственно. Увеличение толщины слоев серебра приводит к падению прозрачности структуры, а уменьшение их толщины - к расширению спектра. Увеличение числа металл-диэлектрических двухслоек в структуре или применение других металлов с большим поглощением приводит к снижению пропускательной способности структуры.



#### ПРИЛОЖЕНИЕ

Дисперсионные характеристики серебра (Ag) из [17].

Рис. 4. Зависимости реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости серебра от длины электромагнитной волны в области длин волн 0,34 …1,24 *мкм* 

Данная работа была осуществлена при поддержке Швейцарского национального научного фонда (грант JRP IB7320-111057/1), Армянского национального научного и образовательного фонда (грант EN-elec-923) и частично Армянского госбюджетного проекта No. 0433.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
- 2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах М.: Изд. Академии наук СССР, 1957. 502 с.
- Scalora M. et al. Transparent, Metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures // J. Appl. Phys. -1998. - Vol. 83, № 5. - P. 2377-2383.
- 4. **Sibilia C.** et al. Electromagnetic properties of periodic and quasi-periodic one-dimensional, metallo-dielectric photonic band gap structures // J. Opt. A: Pure Appl. Opt.- 1999. Vol. 1. P. 490–494.
- Contopanagos H., Yablonovitch E., Alexopoulos N.G. Electromagnetic properties of periodic multilayers of ultrathin metallic films from DC to ultraviolent frequencies // J. Opt.- Soc. Am. A. – Sept. 1999. - Vol. 16. - P. 2294-2306.
- 6. **Baglio S.** et al. Development of novel optoelectromechanical systems based on "transparent metals" PBG structures// IEEE Sensors Journal. December 2001. Vol. 1, № 4. P. 288-295.
- Choi Y-K. et al. Improved transmittance in one-dimensional metallic photonic crystals // Physica B. 2003.- Vol. 338. - P. 132-135.
- Choi Y-K. et al. Antireflection film in one-dimensional metallo-dielectric photonic crystals // Optics Communications. - 2004. – Vol. 230. - P. 239-241.
- Scalora M. et al. Negative refraction and sub-wavelength focusing in the visible range using transparent metallodielectric stacks // Optics Express. - 2007. - Vol. 15, № 2. - P. 508-523.
- Baghdasaryan H.V. Method of Backward Calculation // In Photonics Devices for Telecommunications: how to model and measure / Ed.G. Guekos. – Springer. - 1999. – P. 56-65.
- 11. Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Problem of plane EM wave self-action in multilayer structure: an exact solution // Opt. and Quant. Electron. 1999. Vol. 31, № 9/10. P. 1059-1072.
- Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Method of Single Expression Advanced Powerful Tool for Computer Modelling of Wavelength Scale Nonuniform Frequency-Selective 1D Photonic Structures // In Proc. ICTON 2002, IEEE Catalog No. 02EX551, Warsaw, Poland. - April 2002. - Vol. 2, Th. C.5. - P. 157-162.
- Baghdasaryan H.V., Knyazyan T.M. Method of single expression an exact solution for wavelength scale 1D photonic structures' computer modeling // In Proc. SPIE, Bellingham, WA, Applications of Photonic Technology 6, Ed. R.A. Lessard, G.A. Lampropoulos. 2003. Vol. 5260. P. 141-148.
- 14. **Симонян Р.И., Багдасарян О.В., Князян Т.М.** Анализ оптических характеристик распределенных брегговских отражателей с учетом потерь в слоях // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2005. -Т. LVIII, № 3. С. 555-562.
- Baghdasaryan H. V. and Knyazyan T.M. Extension of the Method of Single Expression for Analysis of Materials with Complex Permittivity and Permeability// In Proc. ICTON 2006, IEEE Catalog No. 06EX1326, Nottingham, UK. - June 2006. – Vol. 2, Mo.B2.4. – P. 13-18.
- 16. Каценеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966. 240 с.
- 17. Handbook of Optical Constants of Solids/ Ed. Palik E.D. New York: Academic Press, 1998. 804 p.
- Leung M. M.Y. et al. Refractive index of InGaN/GaN quantum well// Journal of Applied Physics. 1998. Vol. 84, № 11. - P. 6312-6317.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.02.2007.

#### Հ.Վ. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ, Թ.Մ. ԿՆՅԱՉՅԱՆ, Գ.Գ. ԷՅՐԱՄՋՅԱՆ

## ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԵՍԱՆԵԼԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ԹԱՓԱՆՑԻԿ ՄԵՏԱՂ-ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ

Միասնական արտահայտության մեթոդով (ՄԱՄ) կատարվել է բազմաշերտ մետաղդիէլեկտրիկ կառուցվածքների անդրադարձնող և թողարկող հատկությունների ձշգրիտ էլեկտրադինամիկական մոդելավորում։ Արծաթի և GaN դիէլեկտրիկի իրար հաջորդող շերտերից բաղկացած շերտավոր կառուցվածքի համար, նրանց հաստությունների և երկշերտերի քանակի ընտրության հիման վրա առաջարկվել է լավարկված կառուցվածք, որն ունի մեծ թողարկող հատկություն սպեկտրի տեսանելի տիրույթում և չթողանցում այդ տիրույթից դուրս։ Հաշվարկվել են այդ կառուցվածքի թողարկման, անդրադարձման և կլանման սպեկտրերը՝ հաշվի առնելով արծաթի հաձախային դիսպերսիան։ Թողարկման առավելագույն և նվազագույն տիրույթների համար բերվել են էլեկտրական դաշտի ամպլիտուդի լարվածության և հզորության հոսքի խտության (Պոյնտինգի վեկտոր) բաշխվածությունները կառուցվածքի երկայնքով։

*Առանցքային բառեր.* բազմաշերտ կառուցվածք, մետաղ-դիէլեկտրիկ շերտեր, թվային մոդելավորում, էլեկտրադինամիկական մոդել, միասնական արտահայտության մեթոդ, օպտիկական զտում։

# H.V. BAGHDASARYAN, T.M. KNYAZYAN, G.G. EYRAMJYAN ELECTRODYNAMICAL MODEL OF METAL-DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE TRANSPARENT IN THE VISIBLE RANGE

Correct electrodynamical modelling of reflective and transmittive characteristics of mulitilayer metal-dielectric structures is carried out by the method of single expression (MSE). For a layered structure consisting of silver and GaN dielectric alternating layers by choosing their thicknesses and number of bilayers an optimal configuration which possesses high transmittance in the visible range and low transmittance out of this range is suggested. Transmittance, reflectance and absorptance spectra of such structure are calculated by taking into account silver's frequency dispersion. For the regions of maximal and minimal transmittance the distributions of electric field amplitude and power flow density (Poynting vector) along the structure are presented.

*Keywords*: multilayer structure, metal-dielectric layers, numerical modelling, electrodynamic model, method of single expression, optical filtration.
### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621.373.826

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

#### Д.Л. ОГАНЕСЯН, А.О. ВАРДАНЯН, Б.Э. БАГРАМЯН

# КОРРЕКТНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

Исследована корректность восстановления временного профиля терагерцового импульса кросскорреляционным методом. Для восстановления квадрата модуля временного профиля терагерцового импульса из регистрируемой зашумленной кросс-корреляционной функции использован метод регуляризации. Показано, что при 10% -й зашумленности регистрируемой кросс-корреляционной функции и соответствующем выборе параметра регуляризации, минимизирующем среднеквадратичное отклонение восстановленного сигнала от исходного, можно восстановить квадрат модуля временного профиля терагерцового импульса со среднеквадратичным отклонением не хуже 5,5 %.

Ключевые слова: динамическая спектрограмма, нелинейный кристалл, электрооптическая модуляция.

При конструировании устройств измерения временного профиля терагерцового импульса основная проблема обусловлена достаточно широкой полосой спектра регистрируемого излучения. Одним из способов измерения временного профиля терагерцового импульса является электрооптический кросс-корреляционный метод. С помощью данного метода для определения временного профиля электрического поля терагерцового импульса, модулирующего фазу опорного фемтосекундного лазерного импульса в электро-оптическом кристалле, предлагается использовать нелинейно-оптический кросс-коррелятор (КК) [1,2].



Рис. 1. Оптическая схема кросс-коррелятора: E(t) – фемтосекундный лазерный импульс (ФЛИ), E0(t) – импульс терагерцового излучения (ИТИ), 1, 2 – дифракционные решетки, 3- полупрозрачное зеркало, 4 – полуволновая пластинка, 5 – поляризатор, 6 – электро-оптический кристалл, 7 – четвертьволновая пластинка, 8 – анализатор, 9 - полуволновая пластинка, 10 – амплитудный транспарант, 11 – телескоп, 12, 13, 18 – глухие зеркала, 14 – нелинейный кристалл, 15 – спектрограф, 16 – ССD камера,

17 – полупрозрачное зеркало

Целью настоящей работы является исследование корректности восстановления временного профиля терагерцового импульса с помощью кросс-корреляционного метода, предложенного нами в [1, 2]. Ниже представлена суть рассматриваемого метода. На рис.1 показана оптическая схема кросс-коррелятора, на рис.2 - блок-схема измерительного комплекса на основе кросс-коррелятора.



Рис. 2. Блок-схема измерительного комплекса на основе кросс-коррелятора: 1 – фемтосекундный лазерный импульс, 2 – импульс терагерцового излучения, 3 – дисперсер, 4 – формирователь импульса заданной формы, 5 – электрооптический кристалл, 6 – нелинейный кристалл, 7 – спектрограф, 8 – ССD камера, КК – кросс-коррелятор для измерения временного профиля лазерного импульса на выходе дисперсера

Рассмотрим случай, когда на решеточный дисперсер 3 (рис. 2), образованный парой параллельных дифракционных решеток, падает одиночный фемтосекундный лазерный импульс 1, спектр которого описывается выражением

$$\mathbf{E}_{0}(\mathbf{x},\mathbf{y},\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{E}_{0}(\boldsymbol{\omega}) \exp\left\{\frac{\mathrm{i}\mathbf{k}\left(\mathbf{x}^{2} + \mathbf{y}^{2}\right)}{2\mathbf{q}(\mathbf{z})}\right\},\tag{1}$$

где  $q(z) = z + j\pi\sigma_0^2 / \lambda_0$ ; (о - пространственная ширина пучка на уровне 1/е;  $\lambda_0$  - длина волны излучения; z – расстояние между дифракционными решетками дисперсера;

$$\mathbf{E}_{0}(\boldsymbol{\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_{0}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{e}^{i\psi(t)} \mathbf{e}^{-i\omega_{0}t} \mathbf{e}^{-i\omega \cdot t} d\mathbf{t}, \qquad (2)$$

где  $E_{\circ}(t)$  и  $\psi(t)$  - соответственно огибающая и фаза импульса;  $\omega_{\circ}$  - центральная частота спектра импульса.

Если расстояние z между решетками дисперсера меньше, чем конфокальный параметр  $\pi \cdot \sigma_0^2 / \lambda$ , то спектр уширенного во времени импульса на выходе дисперсера имеет следующий вид [3]:

$$E_{D}(x, y, \omega) = bE_{0}(\omega)exp\left(\frac{ik\beta_{0}^{2}\omega^{2}z}{2}\right) \times exp\left\{-\frac{\left(x-\beta_{0}\omega z\right)^{2}}{\sigma_{0}^{2}}-\frac{y^{2}}{\sigma_{0}^{2}}\right\},$$
(3)

где  $\beta_0 = \left(\frac{d\theta}{d\omega}\right)_{\omega_0} = -\frac{2\pi cm}{\omega_0^2 d\cos\theta_0}$ ; с – скорость света;  $\theta_0$  - угол дифракции; b - постоянная

величина; т - порядок дифракции; 1/d - постоянная решетки.

Из выражения (3) следует, что на выходе дисперсера имеет место пространственный сдвиг (по оси X) спектральных компонент спектра исследуемого импульса, т.е. можно сказать, что каждой координате оси X соответствует определенная спектральная компонента уширенного импульса. После обратного преобразования Фурье импульс (3) на выходе дисперсера может быть представлен во временной области следующим образом:

$$E_{D}(x, y, z, t) = b \exp\left(\frac{-x^{2} + y^{2}}{\sigma_{0}^{2}}\right) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} E_{0}(\tau) \times \\ \times \exp\left[-\left(t - \frac{i2xz\beta_{0}}{\sigma_{0}^{2}} - \tau\right)^{2} / 4\beta_{0}^{2}z^{2}\left(\frac{1}{\sigma_{0}^{2}} - \frac{ik}{2z}\right)\right] d\tau.$$
<sup>(4)</sup>

Расщепим выходной пучок со спектром (4) на две части. Пусть одна часть пучка направляется на электрооптический кристалл (ЭОК) 5. Туда же направляется терагерцовый импульс (ТИ) 2, где происходит фазовая модуляция уширенного во времени лазерного импульса терагерцовым излучением. В качестве электрооптического кристалла, в частности, можно использовать ZnTe, поскольку данный кристалл обладает слабой дисперсионной характеристикой при достаточно большом значении электрооптического коэффициента.

Изменение коэффициента преломления ЭОК под воздействием ИТИ можно представить в виде

$$\Delta n_i(\omega) = -\frac{1}{2} \cdot \iint n_i^3(\omega_1) \cdot r_{ij}(\omega_2) \cdot E_j(\omega - \omega_1 - \omega_2) \cdot d\omega_1 \cdot d\omega_2 , \qquad (5)$$

где  $E_j(\omega)$  - электрическое поле терагерцового импульса в j - ом направлении;  $r_{ij}(\omega)$  - электрооптический коэффициент нелинейного кристалла; i, j – индексы, соответствующие декартовым координатам при заданной пространственной ориентации электрооптического кристалла;  $n_i(\omega)$  - коэффициент преломления электрооптического кристалла. В бездисперсном режиме распространения ТИ в ЭОК лазерный импульс на выходе электрооптического кристалла можно представить в следующем виде [4]:

$$E_{M0}(x, y, z, t) = E_{D}(x, y, z, t) \cdot \exp(j \cdot \Delta \phi(t)) =$$
  
=  $E_{D}(x, y, z, t) \cdot \exp(-j \cdot \alpha \cdot E_{j}(t)),$  (6)

где 
$$\Delta \phi(t) = \frac{\omega_0}{c} \cdot \Delta n_i(t) \cdot L = -\frac{\omega_0}{2 \cdot c} \cdot n_i^3 \cdot r_{ij} \cdot L \cdot E_j(t), \alpha = \frac{\omega_0}{2 \cdot c} \cdot n_i^3 \cdot r_{ij} \cdot L;$$

L - длина кристалла по направлению распространения лазерного луча; со – несущая частота лазерного импульса. Как видно из (6), информация о временном профиле электрического поля терагерцового импульса содержится в фазе исследуемого импульса Емо(x,y,z,t).

На пути распространения второй части пучка (4) поместим амплитудный транспарант 4 (рис. 2), выполненный в виде щелевой диафрагмы, с помощью которого можно сформировать импульс с заданным временным профилем на заданной несущей частоте:

$$V(x, y, t) = b \cdot E_{0}(\omega_{i}) \exp\left\{-\frac{(x - \beta_{0}\omega_{i}z)^{2}}{\sigma_{0}^{2}} - \frac{y^{2}}{\sigma_{0}^{2}}\right\} \times \exp\left(\frac{ik\beta_{0}^{2}\omega_{i}^{2}z}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\beta_{0}z}\right) \times \exp\left(-i\omega_{i}t\right) \times \sin c\left(\frac{1 \cdot t}{2\beta_{0}z}\right),$$
(7)

где 🗠 - центральная частота, выделяемая диафрагмой; l – размер щели.

Направим импульсы, определяемые выражениями (6) и (7), на нелинейный кристалл (НК) 6 под углом фазового синхронизма, необходимым для неколлинеарной генерации суммарной гармоники (СГ). В соответствии с [5,6] в случае, когда поперечный размер взаимодействующих пучков больше продольного, в поперечном распределении энергии СГ вдоль оси X содержится информация как о временном профиле, так и о спектральном составе исследуемого импульса  $E_{M0}(x,y,z,t)$ . Следовательно, если направить излучение СГ на спектрограф 7 (дифракционная решетка с дисперсионным параметром  $\beta=\beta_0/4$ ) со щелью вдоль оси X, на выходе спектрографа будем иметь динамическую спектрограмму исследуемого импульса, которая регистрируется ССD камерой.

При этом распределение энергии вдоль оси X на динамической спектрограмме соответствует функции кросс-корреляции квадратов огибающих импульсов Емо(x,y,z,t) и V(x,y,t):

$$W(x, y = \text{const}) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin c^{2} \left( \frac{1 \cdot \xi}{2 \cdot \beta \cdot z} \right) \times$$

$$\times \left| E_{M0} \left( x, y = \text{const}, z, \xi - x \cdot \left( T_{0}^{'} + T^{'} \right) \right)^{2} \cdot d\xi,$$
(8)

где  $T_0 + T = R \cdot (2 \cdot \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \cdot \tan(\psi))/S \cdot u$  - коэффициент временной развертки кросскоррелятора; R - расстояние между НК и спектрографом (дифракционная решетка 7); S - расстояние между спектрографом и ССD камерой 8;  $\alpha$  - половина угла между опорными импульсами в НК;  $\psi$  угол между амплитудным и фазовым фронтами пучка Емо(x,y,t) в НК;  $u \approx u_0 \approx u_{oi}$  - групповая скорость импульсов накачки. Распределение энергии на динамической спектрограмме вдоль оси Y, зарегистрированное CCD камерой 8, соответствует спектральной плотности модулированного импульса:

$$W(x = \text{const}, y) \approx \left| E_{M0} \left( x = \text{const}, y, z, \frac{4 \cdot y}{S \cdot \beta} - \omega_i \right) \right|^2.$$
(9)

Как показано в [3, 6], коэффициент спектральной развертки вдоль оси Y в динамической спектрограмме (в мм/ Å) определяется как

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta y}\right)_{i}^{-1} = \frac{10^{-7}\pi \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{c}}{2\lambda_{i}^{2}} \,. \tag{10}$$

Динамическая спектрограмма на выходе кросс-коррелятора показана на рис.3.



Рис. 3. Динамическая спектрограмма на выходе кросс-коррелятора

Уравнение линии на динамической спектрограмме (рис. 3), описывающее зависимость изменения  $W_{max}(x, y)$  от Y, соответствует зависимости частоты модулированного импульса от времени. Это, в свою очередь, позволит восстановить боковые спектральные линии в спектре модулированного импульса, обусловленные фазовой модуляцией выходного импульса дисперсера ИТИ. Из зависимости длины волны  $\lambda(t)$  от времени определяется полная фаза модулированного импульса. В работе [7] приведены результаты исследования корректности восстановления временного профиля и фазы модулированного импульса Емо(t), аналитически описываемого выражениями (8) и (9). При малой глубине фазовой модуляции лазерного импульса терагерцовым импульсом (ТИ), что практически имеет место, алгоритм восстановления временного профиля ТИ может быть упрощен.

С учетом выражения (6) и условия  $\Delta \phi(t) << 1$  распределение энергии вдоль оси X (8) можно представить в виде

$$\begin{split} \mathbf{W}(\mathbf{x})\Big|_{\mathbf{y}=\mathrm{const}} &= \int_{-\infty}^{\infty} \sin c^{2} \left( \frac{1 \cdot \xi}{2\beta_{0} z} \right) \cdot \left| \mathbf{E}_{\mathrm{D}} \left( \mathbf{x}, \mathbf{y} = \mathrm{const}, \mathbf{z}, \xi - \mathbf{x} \left( \mathbf{T}_{0}^{'} + \mathbf{T}^{'} \right) \right) \right|^{2} \mathrm{d}\xi + \\ &+ \alpha^{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sin c^{2} \left( \frac{1 \cdot \xi}{2\beta_{0} z} \right) \cdot \left| \mathbf{E}_{\mathrm{D}} \left( \mathbf{x}, \mathbf{y} = \mathrm{const}, \mathbf{z}, \xi - \mathbf{x} \left( \mathbf{T}_{0}^{'} + \mathbf{T}^{'} \right) \right) \right|^{2} \times \end{split}$$
(11)
$$\times \left| \mathbf{E}_{\mathrm{j}} \left( \mathbf{x}, \mathbf{y} = \mathrm{const}, \mathbf{z}, \xi - \mathbf{x} \left( \mathbf{T}_{0}^{'} + \mathbf{T}^{'} \right) \right) \right|^{2} \mathrm{d}\xi. \end{split}$$

Как видно из (11), первое слагаемое в правой части выражения соответствует кросс-корреляции импульса на выходе дисперсера с импульсом заданной формы и не содержит информации о временном профиле ТИ. Второе слагаемое в правой части (11) соответствует кросс-корреляции произведения квадрата огибающей импульса на выходе дисперсера на квадрат огибающей временного профиля ТИ с квадратом огибающей импульса заданной формы и содержит информацию о временном профиле ТИ. Иначе говоря, из второго слагаемого кросс-корреляционного интеграла (11) можно определить временной профиль ТИ.

Таким образом, согласно выражению (11), при заданном временном профиле импульса на выходе дисперсера можно определить временной профиль ТИ. Для этого необходимо решить интегралл кросс-корреляции, соответствующий второму слагаемому в выражении (11). Для вычисления первого слагаемого в выражении (11) необходимо определить временной профиль импульса на выходе дисперсера с помощью кросс-коррелятора 2, в котором отсутствует ЭОК 5 (рис.2). Корректность восстановления временного профиля ТИ кросс-корреляционным методом определяется корректностью обращения интеграла свертки, соответствующего второму слагаемому в (11), при фиксированной несущей частоте, которое можно представить в виде

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) \cdot G(\tau - t) \cdot d\tau, \qquad (12)$$

где  $H(\tau) = \sin c^2 \left( \frac{1 \cdot \tau}{2 \cdot \beta_0 \cdot z} \right)$  аппаратная функция, искажающая входное воздействие;

 $G(\tau) = \left| E_{_{D}}(\tau) \right|^{2} \cdot \left| E_{_{j}}(\tau) \right|^{2}$ - входное воздействие;  $R\left( t = x \cdot \left( T_{_{0}}^{'} + T^{'} \right) \right)$ - выходной сигнал.

Задача восстановления временного ТИ будет корректной, если существуют решения (4), (12), которые являются единственными, и малые изменения исходных данных приводят к малым изменениям решений [8]. Как видно из (4), при расстоянии между решетками дисперсера  $z \approx \tau_0^2 / (4 \cdot k \cdot \beta_0^2)$ , где  $\tau_0$  – длительность исходного лазерного импульса, ширина спектра исходного лазерного импульса соизмерима с шириной спектра аппаратной функции дисперсера, равной

 $\exp(-j \cdot \omega^2 / \Omega^2)$ , где  $\Omega = 1/(k \cdot \beta_0^2 \cdot z)$ . Это практически равноценно единственности решения уравнения (4). Аналогично для обеспечения единственности решения уравнения, описывающего регистрируемую кросс-коррелятором и соответствующую первому слагаемому в (11) кросскорреляционную функцию:

$$R_{D}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) \cdot I(\tau - t) \cdot d\tau, \qquad (13)$$

где  $I(t) = |E_D(t)|^2$ , ширина диафрагмы должна удовлетворять условию  $1 \approx \beta_0 \cdot z/\tau(z)$ , где ((z) – длительность уширенного импульса на выходе дисперсера.

Для построения устойчивых решений уравнений (12), (13) разработаны эффективные регуляризационные методы и алгоритмы [8, 9], использующие дискретное преобразование Фурье.

В настоящей работе, следуя [7-9], для уравнений (12) и (13) вводятся точностные характеристики их решений, позволяющие проанализировать комплекс "прибор + алгоритм" и выбрать параметр регуляризации, исходя из требуемых вероятностных характеристик. Предположим, что регистрируемые сигналы  $\overline{R}_{D}(t) = R_{D}(t) + \eta(t), \overline{R}(t) = R(t) + \eta(t)$ , где  $\eta(t)$  - стационарный случайный процесс (шум измерения) с нулевым средним и некоррелированный с  $R_{D}(t), R(t)$ . Тогда приближенное решение уравнения (13), построенное методом регуляризации, в общем виде можно представить как

$$I_{\mu}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\theta}(\omega) \cdot \frac{\overline{R}_{D}(\omega)}{H(\omega)} \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega, \qquad (14)$$

где  $\overline{R}_{D}(\omega), H(\omega)$  - Фурье-образы функций  $\overline{R}_{D}(t), H(t); P_{\mu}(\omega)$  - четная убывающая функция, которая выполняет роль частотного фильтра-стабилизатора и зависит от параметра регуляризации. Для тихоновского метода регуляризации [8], использованного в настоящей работе, имеем

$$P_{\mu}(\omega) = \frac{|H(\omega)|^{2}}{|H(\omega)|^{2} + \theta \cdot \omega^{2}}.$$
(15)

От параметра регуляризации  $\mu$  зависит погрешность решения  $e_{\mu}(t) = I_{\mu}(t) - I(t)$ , поэтому выбор этого параметра должен быть согласован как с восстанавливаемой функцией I(t), так и со статистическими характеристиками шума измерения.

После восстановления функции  $I_{\mu}(t) = \left| E_{D\mu}(t) \right|^2$  приближенное решение уравнения (12), построенное методом регуляризации, можно представить в виде

$$\mathbf{G}_{\mu 1}(\mathbf{t}) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{P}_{\mu 1}(\boldsymbol{\omega}) \cdot \frac{\overline{\mathbf{R}}(\boldsymbol{\omega})}{\mathbf{H}(\boldsymbol{\omega})} \cdot \exp(\mathbf{j} \cdot \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{t}) \cdot d\boldsymbol{\omega}, \tag{16}$$

где параметр регуляризации  $\mu_1$  в нашем случае не совпадает с параметром  $\mu$ . Это определяется тем, что ширина спектра регистрируемого сигнала  $\overline{R}_{\mu}(t)$  не совпадает с шириной спектра  $\overline{R}_{D\mu}(t)$ . От параметра регуляризации  $\mu_1$  зависит погрешность решения  $e_{\mu 1}(t) = G_{\mu}(t) - G(t)$ , поэтому выбор этого параметра должен быть согласован как с восстанавливаемой функцией G(t), так и со статистическими характеристиками шума измерения.

Далее по восстановленной функции  $G_{\mu l}(\tau) = |E_{D\mu}(\tau)|^2 \cdot |E_j(\tau)|^2$  определяется квадрат модуля временного профиля ИТИ. При этом очевидно, что для корректности восстановления временного профиля ТИ длительность уширенного импульса на выходе дисперсера должна превышать длительность ТИ.

Разрешающую способность регуляризационного алгоритма (РА) принято характеризовать функцией рассеяния [9]:

$$P_{\mu}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\mu}(\omega) \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot t) \cdot d\omega.$$
 (17)

Точностной характеристикой РА, определяющей наименьшие размеры "тонких" структур I(t), G(t), которые сохраняются в восстановленных сигналах  $I_{\mu}(t), G_{\mu l}(t)$  комплекса "прибор+алгоритм", является ширина функции рассеяния  $\Delta(\mu)$  на уровне 0,4.

Для оценки корректности решения уравнений (12), (13) был проведен численный эксперимент по восстановлению временного профиля ТИ кросс-корреляционным методом и рассчитаны интегралы (12) и (13) при заданных временных профилях ФЛИ и ТИ, а также заданных значениях параметров кросс-коррелятора. Затем к рассчитанным значениям кросс-корреляционных функций добавляется шум с гауссовским распределением с нулевым средним значением и с девиацией  $\sigma$ . И, наконец, по зашумленным значениям кросс-корреляционных функций восстанавливается временной профиль ТИ. В качестве НК, используемого в корреляторе, нами рассматривается одноосный кристалл типа BBO. В частности, рассмотрен случай, когда на первую дифракционную решетку дисперсера с постоянной решетки 1/d = 600 *1/мм* падает ФЛИ гауссовой формы с длительностью 50  $\phi c$  на центральной длине волны 0,810 *мкм* под углом  $\gamma = 40^{\circ}$  к нормали к решетке. Диаметр падающего пучка выберем равным  $\sigma_{o} = 4$  *мм*. В предположении о гауссовой форме падающего на дисперсер спектрально чистого импульса ширина спектра рассматриваемого импульса составляет 44 *нм*. Пусть вторая решетка, которая расположена параллельно первой, находится на расстоянии z = 5 *см* от первой (рис. 1). В таком случае в первом дифракционном порядке угол дифракции на

центральной длине волны θ<sub>0</sub> равен 9°, дисперсионный параметр дисперсера β<sub>0</sub> - 0,211 *фс*, а угол между амплитудным и фазовым фронтами уширенного импульса в воздухе -  $\psi_0 = 26^\circ$ . В соответствии с [10] длительность импульса на выходе дисперсера  $\tau \approx \tau_0 \cdot \sqrt{1 + (k_0 \cdot \beta_0^2 \cdot z/\tau_0^2)^2} = 350 \ \phi c$ , а ширина пучка на выходе дисперсера вдоль оси X -  $\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\theta_0) / \cos(\gamma) = 5$  мм. В расчетах ширина диафрагмы амплитудного транспаранта, на выходе которого формируется импульс с заданным временным профилем sinc(t), определяется из условия  $l = 4\pi\beta_0 z/\tau$  и составляет 190 *мкм*. Ширине щели транспаранта, согласно [8], при выбранных значениях ширины диафрагмы, дисперсионного параметра и расстояния между решетками дисперсера, будет соответствовать полоса пропускания 9 (3,12 нм). Пусть падающие на НК (ВВО) импульсы имеют обыкновенную поляризацию. Из ΤГц условия векторного синхронизма для неколлинеарной генерации необыкновенно поляризованного излучения суммарной гармоники определяется половина угла между импульсами в нелинейном кристалле α, которая составляет 19,23°. Угол между фронтом волнового возмущения и фазовым фронтом уширенного импульса в НК у при заданных значениях параметров равен 11,57°. Таким образом, согласно (16), при заданных значениях параметров коэффициент временной развертки на выходе НК вдоль оси Х составит 4,79 фс/мкм. При этом следует отметить, что по мере распространения излучения на суммарной частоте от НК до детектора величина коэффициента временной развертки практически остается неизменной. Временное разрешение предлагаемого метода, очевидно, будет определяться величиной пространственного разрешения детектора, и, в частности, при пространственном разрешении, равном 2,5 мкм, временное разрешение составит 12 фс.

На рис. 4 приведены временные профили исходного сигнала  $|E_j(\tau)|^2$  и восстановленного сигнала  $|E_{Dj}(\tau)|^2$  при уровне 10 % - й зашумленности регистрируемой кросс-корреляционной функции для двух разных временных профилей квадрата модуля ТИ. В ходе численного эксперимента с учетом регуляризации восстановление временного профиля  $|E_{Dj}(\tau)|^2$  моделировалось при значениях параметров регуляризации, равных  $\mu = 0,0368$  и  $\mu_1 = 0,025$  соответственно. Данным значениям параметров регуляризации соответствует минимум среднеквадратичного отклонения (СКО) исходного сигнала  $|E_j(\tau)|^2$  от восстановленного сигнала  $|E_{Dj}(\tau)|^2$ :

$$\varepsilon = 100\% \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \left( \left| \mathbf{E}_{j}(t) - \mathbf{E}_{Dj}(t) \right| \right)^{2} \cdot dt / \int_{-\infty}^{\infty} \left| \mathbf{E}_{j}(t) \right|^{2} \cdot dt , \qquad (18)$$

при котором СКО составляет 2,4 % для временного профиля  $|E_j(\tau)|^2$ , представленного на рис. 4а, и 5,5 % - для временного профиля  $|E_j(\tau)|^2$ , представленного на рис. 46.



Рис. 4. Временные профили исходного  $|E_j(\tau)|^2$  и восстановленного сигналов  $|E_{Dj}(\tau)|^2$  при уровне шума 10 % для двух разных временных профилей квадрата модуля

## ТИ (a) и (б)

Таким образом, в настоящей работе исследована корректность восстановления временного профиля терагерцового импульса кросс-корреляционным методом. Для восстановления квадрата модуля временного профиля импульсного терагерцового излучения из регистрируемой зашумленной кросс-корреляционной функции использован метод регуляризации [8].

Показано, что при 10%-й зашумленности регистрируемой кросс-корреляционной функции и соответствующем выборе параметра регуляризации, минимизирующем среднеквадратичное отклонение восстановленного сигнала от исходного, можно восстановить квадрат модуля временного профиля терагерцового импульса со среднеквадратичным отклонением не хуже 5,5 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chaltikyan V.O., Hovhannisyan D.L., Laziev E.M., Melikyan A.O., Vardanyan A.O. Bunched Electron Beam Properties Measurement by Means of Single-Shot Multibeam Cross-Correlation Technique // Journal of Modern Optics. – 2006. - 53, 7. - P. 919 - 929.
- 2. Оганесян Д.Л., Варданян А.О., Баграмян Б.Э. Определение временного профиля терагерцового импульса с помощью многопучкового кросс-корреляционного метода // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. Т. 11, № 4.- С. 12 -18.
- Авакян Р.А., Варданян А.О., Оганесян Д.Л. Кросс-корреляционный метод определения формы одиночного УКИ // Квантовая электроника. – 1994. - 21, 1. - С. 75 -77.

- 4. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals. Wiley, New York, 1984.
- 5. **Варданян А.О., Оганесян Д.Л.** Определение формы СКИ при неколлинеарной ГВГ взаимообращенными во времени пучками // Доклады Академии наук АрмССР. 1990. 90, 2. С. 81-85.
- 6. Варданян А.О., Оганесян Д.Л. Определение фазы одиночных сверхкоротких световых импульсов // Доклады Академии наук АрмССР. -1990. -91, 4. С. 160-164.
- Варданян А.О., Маилян А.Э. Оганесян Д.Л. О корректности восстановления временного профиля одиночного УКИ света кросс-корреляционным методом // Квантовая электроника. - 1997. - 24, 9. - С. 861 -863.
- 8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
- 9. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов. М.: Радио и Связь, 1979.
- 10. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука, 1988.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.07.2007.

## Դ.Լ.ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Օ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Բ.Է. ԲԱՂՐԱՄՅԱՆ

## ՔՐՈՍ-ԿՈՐԵԼՅԱՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ՏԵՐԱՀԵՐՑԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՊՐՈՖԻԼԻ ՃՇՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հետազոտված է քրոս-կորելյացիոն մեթոդով տերահերցային իմպուլսի ժամանակային պրոֆիլի վերականգնման Ճշտությունը։ Գրանցվող աղմկոտ քրոս-կորելյացիոն ֆունկցիայից տերահերցային իմպուլսի ժամանակային պրոֆիլի մոդուլի քառակուսու վերականգնման համար կիրառվում է կարգավորման մեթոդը։ Յույց է տրված, որ գրանցվող քրոս-կորելյացիոն ֆունկցիայի 10% աղմուկի մակարդակի և կարգավորման պարամետրի համապատասխան ընտրության դեպքում, որը նվազագույնի կհանգեցնի վերականգնված ազդանշանի միջին քառակուսային շեղումը նախնականից, ՏՀց Ճառագայթման ժամանակային պրոֆիլի մոդուլի քառակուսին հնարավոր է վերականգնել 5,5% -ից ոչ մեծ միջին քառակուսային շեղումով։

**Առանցքային բառեր.** դինամիկ սպեկտրոգրամ, ոչ գծային բյուրեղ, էլեկտրաօպտիկական մոդուլյացիա։

## D.L. HOVHANNISYAN, A.O. VARDANYAN, B.E. BAGHRAMYAN

## TEMPORAL PROFILE RESTORATION CORRECTNESS OF THE PULSE TERAHERTZ RADIATION BY MEANS OF CROSS-CORRELATION METHOD

The correctness of time profile renewal of terahertz impulse using the cross-correlation method is investigated. For the renewal of the square of time profile module of terahertz impulse from the registrable noisy cross-correlation function the regularization method is used. It is shown that in case of 10% noisiness of the registrable cross-correlation function and in case of corresponding selection of the regularization parameter, which minimizes the root-mean-square deviation of renewed signal from initial one, it is possible to renew the square of time profile module of terahertz impulse with the root-mean-square deviation not less than 5.5 %.

Keywords: dynamic spectrogram, nonlinear crystal, electro-optical modulation.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 658.564:519.83

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## С.Г. КЮРЕГЯН, С.В. АБГАРЯН, А.К. ДАВТЯН, С.Р. ПИЛУНЦ

# ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ МЕТОДОМ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

Исследованы математические модели технологических процессов, построенные методом группового учета аргументов. На основании анализа среднеквадратической ошибки модели предложены рекомендации к построению адекватной модели, обладающей прогнозирующими свойствами.

Ключевые слова: случайный процесс, моделирование, дисперсия, адекватность, управление.

Современные технологические процессы представляют собой сложные объекты, входные, выходные переменные и внутренние параметры которых зависят от многочисленных, порой трудно учитываемых случайных факторов. Для управления такими процессами необходимо иметь достаточно адекватное описание взаимных зависимостей, характеризующих данный процесс. При неполной информации о механизме процесса математическое описание можно получить статистическими методами на основании соответствующей обработки экспериментальных данных наблюдений за выходной у и входными  $x=\{x_i\}$  ( $j=\overline{1,m}$ ) переменными, собранными непосредственно на действующем объекте в режиме нормальной работы.

Производственные технологические процессы обладают следующими специфическими особенностями:

- сравнительно низкая точность промышленных методов контроля и регистрации данных;
- узкие диапазоны изменения технологических переменных, зачастую соизмеримые с погрешностями контрольно-измерительной аппаратуры;
- значительные транспортные запаздывания в объекте, а также инерционный характер самих процессов;
- влияние сезонных и суточных изменений параметров окружающей среды;
- неконтролируемые изменения качественного состава сырья и переключение режимов при переходе с одного сорта продукции на другой.

В простейших случаях для стационарного случайного процесса зачастую математическую модель представляют уравнением множественной линейной или квазилинейной регрессии, коэффициенты полиномов которых вычисляют с помощью метода наименьших квадратов (МНК) [1-3], причем для квазилинейной модели требуется более длинная выборка данных наблюдений ( $i = \overline{1, n}$ ).

120

Однако перечисленные особенности накладывают дополнительные требования к построению математических моделей, в особенности предназначенных для решения задач управления технологическим процессом. Подобные модели должны обладать достаточными прогнозирующими свойствами, иначе непосредственное применение их может привести к неудовлетворительным результатам.

Один из наиболее приемлемых методов, при котором степень полинома получаемой модели мало зависит от длины выборки, основан на применении алгоритмов, реализующих многорядную селекцию моделей по критерию регулярности методом группового учета аргументов (МГУА). Получаемые при этом модели, согласно рекомендациям [3], пригодны для решения задач прогнозирования, идентификации структуры и параметров сложных объектов по результатам наблюдения их работы, оптимального управления с оптимизацией прогноза.

МГУА предписывает разбивать данные наблюдений на две части: проверочную n<sub>пp</sub> и обучающую n<sub>of</sub> последовательности. Для этого вначале выборка ранжируется по значениям дисперсий (отклонений) вектора входных переменных, вычисленных для каждого i-го наблюдения:

$$\mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{i}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} \left( \frac{\mathbf{x}_{j\mathbf{i}} - \overline{\mathbf{x}}_{j}}{\overline{\mathbf{x}}_{j}} \right)^{2}, \tag{1}$$

где  $\overline{x}_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{ji}$  - среднее значение j-й входной переменной.

Затем в качестве обучающей последовательности отбирается оптимальное количество реализаций с большими значениями отклонений, а остальные реализации образуют проверочную последовательность. Обучающая последовательность используется для оптимизации коэффициентов уравнения регрессии по МНК, как и в обычном регрессионном анализе, а проверочная – для оценки степени регулярности полученного уравнения регрессии на каждом уровне селекции по величине относительного значения среднеквадратической ошибки (СКО):

$$\sigma_{\rm p} = \left(\sum_{\rm r=1}^{n_{\rm np}} (y_{\rm r} - y_{\rm Mr})^2 / \sum_{\rm r=1}^{n_{\rm np}} y_{\rm Mr}^2\right)^{1/2}, \qquad (2)$$

где уг, умг – соответственно значения выхода г-го наблюдения и модели.

Принципиальное отличие МГУА от обычного регрессионного анализа заключается в том, что целью первого является достижение минимума целесообразно выбранного критерия селекции (СКО на проверочной последовательности), а целью второго – достижение минимума СКО на всех экспериментальных точках при заранее заданном виде (что зачастую носит субъективный характер) уравнения регрессии. Подбором соотношения ппр/поб добиваются минимума СКО модели (м. В результате получают иерархическую (многоуровневую) модель ум=f(x,nof/nnp), параметрически зависящую от nof/nnp, с оценкой в виде относительного значения СКО:

$$\boldsymbol{\sigma}_{M} = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\frac{(y_{i} - y_{Mi})^{2}}{\overline{y}^{2}}\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n_{np}}\frac{(y_{i} - y_{Mi})^{2}}{\overline{y}^{2}} + \frac{1}{n-1}\sum_{i=n_{np}+1}^{n}\frac{(y_{i} - y_{Mi})^{2}}{\overline{y}^{2}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

или же:

$$\sigma_{M}^{2} = \frac{n_{np} - 1}{n - 1} \sigma_{np}^{2} + \frac{n - n_{np} - 1}{n - 1} \sigma_{ob}^{2}, \qquad (3)$$

где  $\overline{y}$  — среднее значение выходной переменной;  $\sigma_{np}$ ,  $\sigma_{o6}$  — относительные значения СКО, вычисленные соответственно на проверочной и обучающей последовательностях:

$$\begin{cases} \sigma_{np}^{2} = \frac{1}{n_{np} - 1} \sum_{i=1}^{n_{np}} \frac{(y_{i} - y_{Mi})^{2}}{\overline{y}^{2}}, \\ \sigma_{o6}^{2} = \frac{1}{n_{o6} - 1} \sum_{q=1}^{n_{o6}} \frac{(y_{q} - y_{Mq})^{2}}{\overline{y}^{2}}. \end{cases}$$
(4)

Из (4) ясно, что представленные СКО зависят от длины  $n_{np}$  проверочной последовательности. Если модель, построенная по алгоритму регулярности МГУА, единственно оптимальная, как утверждают ее авторы [3], то, варьируя длиной  $n_{mp}$  в (3), можно получить минимум  $\sigma_{M}$ . Аналитическое решение новой задачи минимизации  $\sigma_{M}$  по параметру  $n_{mp}$  невозможно, поскольку  $\sigma_{np}(n_{mp})$  и  $\sigma_{o6}(n_{mp})$  в выражении (3) не являются априори аналитическими функциями  $n_{mp}$  и вычисляются только в результате многорядной селекции при реализации алгоритма МГУА. Авторы МГУА в [4] обращают внимание на проблематичность разбиения базы данных на обучающую и проверочную последовательности. Поэтому проанализировать выражения (3) и (4) можно только на конкретных численных примерах.

Прежде всего необходимо определить характер функций (3) и (4) в зависимости от длины п<sub>пр</sub> для моделей, построенных МГУА. В качестве примера выбран технологический процесс флотации молибденовой руды [5]. Исходные данные представляли собой п<sub>и</sub>=122 средних сменных данных наблюдений за 12-ю независимыми входными х<sub>ј</sub> и 2-мя выходными у<sub>к</sub> переменными. Проведенные байесовские оценки и статистический анализ показали [5,6], что исходные данные относятся к одной генеральной совокупности, имеют стационарный характер и подчиняются нормальному закону распределения. Для построения модели выделена выборка, состоящая из n=100 наблюдений, остальные п<sub>э</sub>=22 приняты в качестве экзаменационных данных для проверки прогнозирующих свойств моделей. На рис. 1 и 2 представлены характеристики **б**мк(n<sub>пр</sub>) и **б**прк(n<sub>пр</sub>), рассчитанные по

(3) и (4) подробно с единичным шагом для следующих моделей выходных переменных: процентное содержание молибдена в концентрате  $y_{M1}$  (k=1) и выход концентрата  $y_{M2}$  (k=2). Как видно из графиков, функции  $\sigma_{Mk}$  и  $\sigma_{\pi pk}$  являются сложными функциями  $\Pi_{\pi p}$  со множеством локальных минимумов. Очевидно, что оптимальная модель соответствует глобальному минимуму графика  $\sigma_{Mk}$ .





Рис. 1. СКО модели У1 в зависимости от длины проверочной последовательности: а – зависимость ( $_{Mk}(n_{np})$ ; б – зависимость ( $_{npk}(n_{np})$ )



Рис. 2. СКО модели У<sub>2</sub> в зависимости от длины проверочной последовательности: а – зависимость (мк(nпр); б – зависимость (прк(nпр)

Не имея априорного представления о характере графика  $\sigma_{npk}$ , исследователь мог бы путем пробного пошагового расчета остановиться на выборе в качестве оптимального соотношения  $n_{o6}/n_{np}$  точки локального минимума и построить соответствующую ей модель, которая, по-видимому, была бы неоптимальной. В нашем случае поле рассеяния СКО  $\sigma_{Mk}$  моделей достаточно узкое: от 1,89 до 2,10 – для  $y_{M1}$  и от 9,6 до 10,4 – для  $y_{M2}$ . В таких узких пределах отпадает актуальность поиска оптимальной по СКО модели, поскольку погрешность крайне неоптимальной отличается всего на 10...11% от оптимальной. Более важное значение приобретает прогнозирующее свойство моделей.

Для оценки и сравнений моделей воспользуемся значениями дисперсий выходных переменных базовой выборки ( $S_6^2$ ) и построенных моделей ( $S_M^2$ ) по формулам

$$s_{6}^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_{i} - \overline{y})^{2}}{\overline{y}^{2}}, \qquad s_{M}^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_{Mi} - \overline{y})^{2}}{\overline{y}^{2}},$$
(5)

124

на основании которых можно вычислить остаточную дисперсию модели, что для множественной линейной (или квазилинейной) регрессии совпадает с квадратом СКО модели, и индекс множественной корреляции  $R_{vx}^2$  [2]:

$$\sigma_{_{M}}^{2} = s_{_{\tilde{0}}}^{2} - s_{_{M}}^{2}, \tag{6}$$

$$\mathbf{R}_{yx}^{2} = \frac{\mathbf{s}_{M}^{2}}{\mathbf{s}_{6}^{2}}.$$
(7)

Построены альтернативные модели для различных значений отношений n<sub>oб</sub>/n<sub>пр</sub>, соответствующих некоторым точкам локальных и глобальных минимумов графиков **о**мк, показанных на рис. 1 и 2. Результаты расчетов сведены в таблицу.

Модель,	Параметры								
Ykv	y	$S_{6}^{2} x 10^{-4}$	<b>п</b> об/ <b>п</b> пр	№ вх. перем.	Кол- во ур.	S <sup>2</sup> <sub>M</sub> x10 <sup>-4</sup>	σ <sub>м</sub> ,%	<b>σ</b> որ,%	Ryx
<b>y</b> 11	48,80	5,819	37/63	1,2,4-6, 11,12	6	2,260	1,89	1,86	0,623
<b>y</b> 12	48,80	5,819	21/79	1-11	6	2,211	1,90	1,93	0,616
<b>y</b> 13	48,80	5,819	52/48	2-4,6-9, 11	5	2,127	1,92	2,10	0,605
<b>y</b> 14	48,80	5,819	75/25	1,2,4-6, 8,11	5	2,099	1,93	2,20	0,601
<b>y</b> <sub>21</sub>	5288,6	305,3	20/80	1,2,6,8, 11	5	211,8	9,67	10,08	0,833
y22	5288,6	305,3	46/54	1-4,6-12	6	205,5	9,99	10,59	0,821
<b>y</b> 23	5288,6	305,3	32/68	1,2,4-8, 10-12	6	203,6	10,08	10,87	0,817
y24	5288,6	305,3	51/49	1,2,6,9,11	6	202,8	10,12	11,03	0,815

Таблица

Как и следовало ожидать, СКО альтернативных моделей мало отличаются друг от друга и от СКО оптимальной модели. Однако при выборе модели необходимо обратить внимание на селекцию входных переменных. Например, для выходных переменных ум1 и ум2 важными входными переменными являются х1 и х2 – соответственно процентное содержание молибдена в исходной руде и количество поступающей руды. Как видно из таблицы, в модели у13 отсутствует входная переменная х1, поэтому эта модель не может быть принята в качестве адекватной. При выборе модели определенную роль может сыграть и сложность, оцениваемая количеством уровней иерархии.

Однако возвратимся к оценкам прогнозирующих свойств моделей. Если принять во внимание, что для множества распределений (равномерного, нормального, трапецеидальных, экспоненциальных и др.) с доверительной вероятностью 0,9 погрешность модели составляет  $\Delta_{M}=1,6\sigma_{M}$ [1,2], то для оптимальной модели ум1 эта погрешность составит 3,02%, а для ум2 – 15,47%. В первом случае это значение выходит за пределы рассеяния базы данных (s61=2,41%), а во втором укладывается в пределах (s62=17,47%). Надо полагать, что модель ум2 обладает прогнозирующими свойствами, по крайней мере, для 90% наблюдений из базы данных, несмотря на бтльшую погрешность, а модель ум1 – лишь для 79% наблюдений, распределенных по нормальному закону.

прогнозирующие Проверим свойства моделей на примере экзаменационной последовательности. На рис. З приведены сравнения изменений выходных переменных данных наблюдений с результатами, полученными с помощью построенных моделей. На участке базы данных, использованных для построения моделей (от 1-го до 100-го наблюдения), тенденция (направление нарастания и убывания), предсказываемая моделями, хорошо согласуется с данными наблюдений. На участке экзаменационной последовательности (от 101-го до 122-го наблюдения), зона которой отмечена пунктирными линиями, модель ум2 (рис. 36) дает хороший прогноз, поскольку правильно предсказывает тенденцию изменения процесса, хотя и с большой погрешностью - бм=9,67% (см. табл.), а модель ум1 (рис. За), обладая меньшей погрешностью **σ**<sub>м</sub>=1,89%, (см. табл.), не предсказывает тенденцию изменения процесса, как и следовало ожидать.

Таким образом, резюмируя проведенное исследование, можно предложить следующие основные рекомендации при построении моделей с использованием алгоритма МГУА.

1. Поиск оптимальной модели по минимуму СКО актуален, когда поле рассеяния СКО модели колеблется в существенных для данной задачи пределах.

2. Зависимость СКО модели от длины проверочной последовательности представляет собой сложную функцию со множествами минимумов, построение которой следует проводить подробно на каждом шаге для выявления глобального минимума.

3. Прогнозирующие свойства модели определяются из дисперсионного анализа модели (5)-(7) и оценки доверительных интервалов; только минимум СКО модели не обеспечивает адекватность модели.

126







Рис. 3. Графики изменений выходных переменных в зависимости от сменных наблюдений; а – процентное содержание молибдена в концентрате (у1); б – выход концентрата (у2); - данные наблюдений, - выход модели

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392с.
- 2. **Ф, рстер Э., Р, нц Б.** Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 302с.
- **3.** Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. М.: Сов. радио, 1976. 280с.
- 4. **Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120с.
- 5. Кюрегян С.Г., Мамиконян Б.М., Шмелев В.К., Абгарян С.В., Баласанян С.Ш. К вопросу об управлении флотационным процессом обогащения молибденовой руды // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2003. – Т. LVI, № 1. – С. 107-113.
- Абгарян С.В., Кюрегян С.Г., Айрапетян В.Г., Овакимян Р.М. Байесовская оценка параметров флотационного технологического процесса // Вестник Инженерной академии Армении. – Ереван, 2006. – Т. 3, № 3. – С. 456-461.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.06.2007.

## Ս.Գ. ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ, Ս.Վ. ԱԲԳԱՐՅԱՆ, Ա.Կ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ռ. ՓԻԼՈՒՆՑ

# ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾ ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ԿԱՆԽԱԳՈՒՇԱԿԻՉ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Հետազոտված են տեխնոլոգիական գործընթացների մաթեմատիկական մոդելները՝ կառուցված արգումենտների խմբային հաշվառման մեթոդով։ Մոդելի միջին քառակուսային սխալի վերլուծության հիման վրա առաջարկված են երաշխիքներ ադեկվատ, կանխագուշակող հատկությամբ օժտված մոդելների կառուցման համար։

**Առանցքային բառեր.** պատահական գործընթաց, մոդելավորում, դիսպերսիա, համարժեքություն, ղեկավարում։

#### S.G. KYUREGHYAN, S.V. ABGARYAN, A.K. DAVTYAN, S.R. PILUNTS

## PREDICTING PROPERTIES OF THE MODELS CONSTRUCTED BY THE METHOD OF ARGUMENT GROUP ACCOUNT

The mathematical models of technological processes constructed by the method of argument group account are investigated. On the basis of the analysis a model standard deviation is proposed for the recommendations to construct an adequate, possessing predicting properties, model.

Keywords: stochastic process, modelling, dispersion, adequacy, control.

### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 519.242.812

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## Б.С. БАЛАСАНЯН, Э.С. ХРИСТАФОРЯН, А.Б. БАЛАСАНЯН, А.В. ГАРАЯН, М.Ж. ПЕТРОСЯН

# ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОИСКУ ОПТИМУМА ДЛЯ ФУНКЦИЙ n ПЕРЕМЕННЫХ

Предпринята попытка определения глобального минимума или максимума функции n переменных путем повышения определенности n-мерной поверхности отклика минимизируемой функции относительно выбранной n-мерной системы координат.

*Ключевые слова:* метод оптимизации, математическое планирование экспериментов, поверхность отклика минимизируемой функции.

Как известно [1-2], методы прямого поиска минимума, в которых используются только значения функции, эффективны и применимы для решения ограниченного круга оптимизационных задач и приложений. Тщательное изучение известных методов поиска оптимума для функций п переменных, к числу которых относятся методы Хука-Дживса [3], Нелдера-Мида [4], Давидона-Флетчера-Пауэлла [5], симплексные методы Спендли, Хекста и Химсворота [6], градиентные методы и др. [7], показало, что все они теоретически эффективны в случаях единственного минимума функции и малопригодны для определения глобального минимума многоэкстремальной функции. При этом быстрое и точное определение минимума зависит от правильного выбора базисной точки поиска. В случаях неудачного выбора этой точки поиск может пройти по ложному направлению пмерного пространства.

Как показывает практика применения методов оптимизации, широко освещенных и опубликованных в многочисленных научных статьях и монографиях, во всех случаях минимизируемая функция является зависимостью некоторого выходного параметра от определенного числа n переменных, заданных в их натуральных значениях, которая в n-мерном пространстве представляет собой п-мерную поверхность отклика. Следует отметить, что даже в случаях экспериментального исследования многофакторного процесса, модели которых часто математического планирования экспериментов определяют методами И масштабным преобразованием переменных факторов, после реализации плана экспериментов полученную математическую модель преобразуют посредством известных формул в функцию, в которой переменные факторы снова входят в своих натуральных значениях. При таком представлении пмерной поверхности отклика минимизируемой функции она, хотя и занимает в пространстве определенное положение относительно выбранной п-мерной системы координат, однако для исследователя в начале поиска оптимума остается неопределенным, что связано с отсутствием первоначальных сведений о минимизируемой функции, а это, естественно, затрудняет правильный выбор базисной точки для поиска минимума.

129

В настоящей работе предпринята попытка определения глобального минимума или максимума функции п переменных при наличии интервальных ограничений путем повышения определенности расположения п-мерной поверхности отклика минимизируемой функции относительно выбранной п-мерной системы координат, сущность которого заключается в следующем.

Поверхности отклика минимизируемой функции относительно выбранной п-мерной системы координат, как это показано на рис. 1a, очевидно, можно построить такими ее преобразованиями, при которых они располагаются вокруг начала новой системы координат (рис.1б). В таком случае в качестве базисной точки можно принять именно начало новой системы координат.



Рис.1. Положения поверхностей отклика минимизируемой функции относительно п-мерной системы координат:

а - в натуральных значениях X<sub>i</sub>, б - в преобразованных значениях X<sub>i</sub>

Возникает вопрос: как это сделать? Оказывается, довольно просто, если применить известные формулы преобразования переменных параметров, используемые в методах математического планирования экспериментов.

Рассмотрим функцию  $Y = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_i, ..., x_n)$  при наличии следующих интервальных ограничений:  $x_i \in [a_i, b_i]$ , где  $x_i$  - i-й переменный фактор минимизируемой функции;  $a_i$   $b_i$  - соответственно нижнее и верхнее ограничения i-го переменного фактора минимизируемой функции. Произведем масштабное преобразование переменных факторов применением известной формулы преобразования [8]  $X_i = (x_i - x_{i0})/\Delta x_i$ , где  $X_i$ ,  $x_{i0} = 0.5(a_i + b_i)$  и  $\Delta x_i = 0.5(a_i - b_i)$  - соответственно преобразованное значение, средний уровень и масштаб преобразования в натуральных значениях  $x_i$ -го переменного параметра. Такое преобразование переменных позволяет получить минимизируемую функцию в виде  $Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_i, ..., X_n)$ , где верхние уровни переменных соответствуют +1, а нижние -1. В этом случае поверхность отклика преобразованной

минимизируемой функции располагается вокруг начала новой п-мерной системы координат, где переменные параметры изменяются в пределах  $X_i \in [-1, +1]$  (рис.16).

Таким образом, если в качестве базовой точки поиска принять начало новой п-мерной системы координат, то при движении от отмеченной точки в любом направлении достаточно быстро можно достигнуть поверхности отклика. Очевидно, что в этом случае поверхности равного уровня (п-мерные поверхности, на которых значение минимизируемой функции константа) будут находиться на одном и том же удалении относительно начала п-мерной системы координат. В итоге поверхности равного уровня преобразуются в сферы равного уровня.

На основе вышеизложенного можно заключить:

- применение приведенных преобразований позволяет повысить определенность положения поверхности отклика минимизируемой функции относительно начала преобразованной системы координат, при этом поверхность отклика минимизируемой функции располагается вокруг начала преобразованной п-мерной системы координат, а переменные параметры изменяются в пределах X<sub>i</sub> ∈ [-1, +1];
- п-мерные поверхности равного уровня представляют собой сферическую поверхность;
- минимальные значения функции находятся на поверхности сферы наименьшего радиуса, которые равны радиусу сферы внутреннего касания поверхности отклика минимизируемой функции, а максимальные значения функции - на поверхности сферы наибольшего радиуса и равны радиусу сферы внешнего касания поверхности отклика минимизируемой функции.

Теперь вопрос поиска оптимума стоит как задача определения радиусов сферы внутреннего и внешнего касания поверхностей отклика минимизируемой функции. Очевидно, что эти радиусы можно определить применением известных методов поиска минимума [1-8], с той только разницей, что в качестве базовой точки поиска всегда можно принять начало п-мерной системы координат. Поставленная задача решена нами применением компьютерного численного моделирования, исходя из следующих соображений.

Обычный лист программы Microsoft Office Excel 2003 включает 65536 строк, что позволяет практически мгновенно вычислить значения минимизируемой функции от 4-х до 6-ти переменных в 65000 и более точках, а также получить графическое представление этой функции, включающей до 32000 точек. Таким числом точек наверняка можно создать достаточное хорошее представление о поверхности отклика минимизируемой функции с получением ее графической зависимости. Задача поиска минимального отклика минимизируемой функции в этом случае сводится к определению из рассчитанного массива откликов его минимального значения, а также определению величин переменных параметров, при которых получен этот минимум, что достаточно просто решается в среде Microsoft Office Excel.

Отметим, что в процессе практической реализации этого метода возникли вопросы. Как варьировать переменные параметры минимизируемой функции, чтобы получить равномерное распределение точек на ее поверхности отклика? С каким шагом их варьировать? Дальнейшее изучение этоих вопросов показало, что наиболее удобным способом варьирования переменных параметров являются планы их назначения, используемые в методах математического планирования экспериментов [8], число точек которых в зависимости от числа уровней переменных параметров можно определить по известной формуле [8]  $N = n^k$ , где N - число точек плана; n - число уровней варьирования переменных параметров; k - число переменных параметров. Заметим, что  $n = 2/\Delta X + 1$ , где  $\Delta X$  - шаг варьирования переменных параметров в их преобразованных значениях. Это означает, что с уменьшением шага варьирования переменных параметров существенно увеличивается число точек плана построения поверхности отклика минимизируемой функции, в результате чего увеличивается объем программы для определения ее оптимума. С увеличением этого шага, с одной стороны, уменьшается N, а с другой - повышается риск того, что мы проскочим минимум на поверхности отклика минимизируемой функции.

Проведена апробация методики поиска оптимума с применением тестовой функции Розенброка:  $f(X_1, X_2) = 100(X_2 - X_1^2)^2 + (1 - X_1)^2$ ;  $X^* = (1; 1)$  и функции Пауэлла:

$$f(X_1, X_2, X_3, X_4) = (X_1 + 10X_2)^2 + 5(X_3 - X_4)^2 + (X_2 - 2X_3)^4 + 10(X_1 - X_4)^4; X^* = (0;0;0;0).$$

учетом числа переменных факторов минимизируемой функции для функции Розенброка шаг варьирования переменных параметров принят  $\Delta X = 0.02$ , а функции Пауэлла  $\Delta X = 0.2$ . При этом общее число точек, в которых вычислено значение функции, для первого случая оказалось равным N = 10201, а для второго - N = 14641. На основе программ, разработанных в среде Microsoft Office Excel 2003, практически мгновенно определены величины известных оптимумов тестовых функций и построены их поверхности отклика в виде лепестковых диаграмм, приведенных на рис.2а и б.

Следует отметить, что столь удачное определение величин известных оптимумов тестовых функций связано в первую очередь с тем, что оптимальные величины переменных параметров являются целыми числами. То есть, даже при варьировании переменных параметров по трем уровням оптимумы были бы определены столь же удачно. В этой связи была принята некоторая минимизируемая функция с заранее известной точкой оптимума в виде выражения  $f(X_1, X_2, X_3, X_4) = (X_1 - 0,245)^2 + (X_2 + 0,473)^2 + (X_3 - 0,871)^4 + (X_4 - 0,323)^4$ , минимум которой, очевидно, находится в точке  $X^* = (0,245;-0,473;0,871;0,323)$ .



а - Розенброка, б - Пауэлла

Разработанная программа, использованная при тестировании функцией Пауэлла, выдала первую точку  $X^* = (0,2; -0,4; 0,8; 0,4)$ , что, естественно, далеко от истинного оптимума, так как f(0,2;-0,4; 0,8; 0,4) = 0.0287.

Для его более точного установления в разработанную программу были включены дополнительные блоки таким образом, чтобы решение задачи продолжалось вокруг первой точки в пределах  $\pm \Delta X_i/2 = 0,1$ . Шаг варьирования остается прежним. В этом случае поставленная задача решается в пределах  $X_1 \in [0,1;0,3], X_2 \in [-0,5;-0,3], X_3 \in [0,7;0,9], X_1 \in [0,3;0,5]$  с новым шагом  $\Delta X = 0.02$ . На основе этого получена точка оптимума второго приближения  $X^* = (0,24; -0,48; 0,88; 0,32)$ . Третий дополнительный блок продолжает решение задачи в условиях Х₁ ∈ [0,23;0,25], Х₂ ∈ [-0,49;-0,47], Х₃ ∈ [0,87;0,89], Х₁ ∈ [0,31;0,33] с шагом  $\Delta X = 0,002$ . Здесь получена точка оптимума третьего приближения  $X^* = (0,244; -0,473; 0,871; 0,323)$ , при которой  $f(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0,000006$ . Можно считать, что точка оптимума практически достигнута.

Теперь проверим возможность определения глобального минимума или максимума применением предлагаемой методики поиска. В качестве тестовой использована функция в виде

$$f(X_1, X_2) = 0.325 + \sin(0.7 - X_1 - 12X_1^2 + 5X_1^3 + 9X_1^4 - 2.5X_1^5 + 6X_1^6)^2 + + \sin(0.7 - 2X_2 - 11X_2^2 + 3X_2^3 + 7X_2^4 - 5X_2^5 + 7X_2^6)^2,$$
(1)

в точке минимума которой, очевидно,  $f(X^*) = 0,325$ .



Рис.3. Характерная лепестковая диаграмма многоэкстремальной функции

Поверхность отклика минимизируемой функции (1) в виде лепестковой диаграммы приведена на рис.3, откуда видно, что она носит многоэкстремальный характер, оптимумы которой могут быть, по крайней мере, в девяти точках.

Посредством предлагаемой методики в первом приближении найдены эти девять точек, которые приведены в табл. 1.

N⁰	X1	X2	F(X1,X2)	N⁰	X1	X2	F(X1,X2)
1	-0,28	-0,8	0,329233	6	0,22	0,18	0,325793
2	0,22	-0,8	0,329902	7	-0,28	0,64	0,326585
3	-0,28	-0,36	0,32537	8	0,22	0,64	0,327254
4	0,22	-0,36	0,326039	9	0,22	0,84	0,326708
5	-0,28	0,18	0,325125				

*Таблица 1* Оптимумы функции (1) в первом приближении

Во втором приближении получены намного близкие к оптимуму точки, величины откликов которых при значимости знаков до трех после запятой в наихудшем случае получены с точностью до пятого знака (табл.2). Теоретически можно полагать, что глобальный минимум находится в точке  $X^* = (-0,28; 0,18)$ , где  $f(X^*) = 0,325000082$ , который получен с точностью до седьмого знака после запятой.

Таблица 2

(1)

	Оптимумы функции (1) во втором приолижении							
N⁰	X1	X2	F(X1,X2)	N⁰	X1	X2	F(X1,X2)	
1	-0,2786	-0,7962	0,325001518	6	0,2148	0,1814	0,325000096	
2	0,2148	-0,7962	0,325001533	7	0,2786	0,632	0,325000086	
3	0,2786	-0,3634	0,325000085	8	0,2148	0,632	0,3250001	
4	0,2148	-0,3634	0,3250001	9	0,2148	0,8358	0,32500015	
5	0,2786	0,1814	0,325000082					

~

Заметим, что практически все девять точек можно принять в качестве глобального минимума, тем более, если учитывать, что обычно при установлении или выявлении минимизируемой функции имеют место определенные погрешности, особенно в случаях их экспериментального определения.

Таким образом, предлагаемая методика поиска оптимума пригодна и для выявления глобального минимума или максимума, которую следует проводить в следующей последовательности.

1. Заданную в натуральных значениях минимизируемую функцию  $Y = f(x_1, x_2, x_3, ..., x_i, ..., x_n)$  преобразовывают в функцию вида  $Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_i, ..., X_n)$ , где переменные параметры преобразованы и находятся в интервале  $X_i \in [-1; 1]$ .

2. Выбирают шаг  $\Delta X_{i1}$  изменения преобразованных переменных параметров  $X_i$  и, основываясь на методах математического планирования экспериментов, строят план расчета величин преобразованной минимизируемой функции  $Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_i, ..., X_n)$ .

3. Для предварительного представления о поверхности отклика функции  $Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_i, ..., X_n)$  вычисляют ее значения во всех точках плана, строят ее лепестковую диаграмму, определяют ориентировочное число минимумов или максимумов и их координаты.

4. Строят новый план расчета величин преобразованной минимизируемой функции  $Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_i, ..., X_n)$  вокруг полученных точек оптимума  $X_i^*$  при изменении их в пределах  $\Delta X_{i2} = \pm \Delta X_{i1}/2$  и определяют уточненные значения точек минимума. Это повторяют до тех пор, пока величины оптимумов предыдущего и последующего этапов практически становятся одинаковыми, то есть отличаются друг от друга на величину погрешности выявления минимизируемой функции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Банди Б. Методы оптимизации. М.: Радио и связь. 1988. 128 с.
- 2. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. 440 с.
- Hooke R., Jeeves T.A. Direct search solution of numerical and statistical problems // J.Assn. Comp. Mach. 1961. P. 212 - 229.
- Nelder J.A., Miad R.A. A simplex method for function minimization // The Comp. Journal. 1965. 7. P. 308 -313.
- Pawell M.J. An iterative method for finding stationary values of function of several variables // The Comp. Journal. - 1962. - 5. - P.147 - 151.
- 6. **Spendliey W., Hext G.R., Himswort F.R.** Sequential applications of simplex designs in optimization and evolutionary operation // Technometrics. 1962. 4. P.441- 461.
- 7. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации в теории управления. СПб.: Питер, 2004.-256 с.
- 8. **Кацев П.Г.** Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1974. 244с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.10.2007.

## Բ.Ս. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Է.Ս. ՔՐԻՍՏԱՖՈՐՅԱՆ, Ա.Բ. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Ա.Վ. ՂԱՐԱՅԱՆ, Մ.Ժ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

#### ո ՓՈՓԽԱԿԱՆՆԵՐՈՎ ՖՈՒՆԿՑԻԱՅԻ ՕՊՏԻՄՈՒՄԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԻ ՄՈՏԵՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Փորձ է արված որոշել ո փոփոխականով ֆունկցիայի գլոբալ մինիմումը կամ մաքսիմումն ընտրված ո չափանի կորդինատային համակարգի նկատմամբ՝ մինիմալացվող ֆունկցիայի ո չափանի արձագանքման մակերևույթի որոշակիության բարձրացմամբ։

*Առանցքային բառեր.* օպտիմալացման եղանակ, փորձարկումների մաթեմատիկական պլանավորում, մինիմալացվող ֆունկցիայի արձագանքման մակերևույթ։

## B.S. BALASANYAN, E.S. KRISTAPHORYAN, A.B. BALASANYAN, A.V. GHARAYAN, M.G. PETROSYAN

## ON ONE APPROACH TO SEARCH THE OPTIMUM FOR n VARIABLE FUNCTIONS

An attempt to n-variable function's maximum and minimum in the existence of limitations by the increase of distinctness of n-dimensional minimized function surface response in regard to the chosen n-dimensional system of coordinates is made.

*Keywords:* optimization method, mathematical planning of the experiment, response surface of minimizing function.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 621

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### Ш.Е. БОЗОЯН, В.С. ЕГИАЗАРЯН, Д.А. КОЧАРОВ, Н.В. БАДАЛЯН

# ПРИМЕНЕНИЕ БУЛЕВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛОВ И АКТИВНОСТЕЙ ПЕРЕМЕННЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ СХЕМЫ

Рассматриваются булевый дифференциал и его основные свойства, активность совокупности переменных булевой функции, а также комбинационная цифровая схема с одним выходом, реализующая булеву функцию. Используя активности входов комбинационной схемы и алгоритм построения активной части схемы для тестовых эталонных схем (ISCAS-85), выделяются активные части подсхем, имеющие один выход.

*Ключевые слова:* булевый дифференциал, проектирование, цифровая схема, активная часть.

Введение. В автоматизированном проектировании интегральных схем (ИС) контролирование правильности переходов от одного этапа проектирования к следующему осуществляется верификацией и тестированием промежуточных результатов. Эти процедуры настолько трудоемки, что поглощают около 80% временных ресурсов всего цикла проектирования ИС, из чего следует, что сокращение времени верификации и тестирования просто означает сокращение времени проектирования ИС. Трудоемкость указанных процедур обусловлена не только увеличением числа элементов в современных кристаллах, а в основном числом входов схем в кристаллах, число входных наборов которых растет экспоненциально относительно числа входов. Практическая недоступность использования всех входных наборов с целью проверки исправности проекта схемы заставляет из всех этих входных наборов подобрать наиболее «ценные» (в определенном смысле), использование которых позволяет наиболее эффективно осуществить проверку работоспособности схемы. Это очень трудная задача, тем более, что каждая схема диктует свои особенности подбора этих приемлемых входных наборов.

Выделение активной части булевой функции (соответственно – схемы с одним выходом) эффективным образом решает указанную проблему [1].

**1. Производная.** Понятие производной по отдельным переменным булевой функции ввел И.С. Рид [2] и применил при изучении общей схемы декодирования систематических кодов. Здесь рассматривается более общее понятие производной [3].

**Определение 1.** Производной булевой функции  $f(x_1,...,x_{i_1},...,x_{i_k},...,x_n)$  по совокупности переменных  $x_{i_k},...,x_{i_k}$  называется функция

$$\frac{\partial f}{\partial (x_{i_1},...,x_{i_k})} = f(x_1,...,x_{i_1},...,x_{i_k},...,x_n) \oplus f(x_1,...,\overline{x}_{i_1},...,\overline{x}_{i_k},...,x_n),$$

где  $\oplus$  - операция сложения по mod2.

Совокупность переменных  $(x_{i_1},...,x_{i_k})$  обозначим через А:  $A = (x_{i_1},...,x_{i_k})$  $(1 \le i_1 < i_2 < ... < i_k \le n)$ , а также  $\overline{A} = (\overline{x_{i_1}},...,\overline{x_{i_k}})$  и, соответственно,  $f(x_1,...,x_1,...,x_k) = f(x_1,...,x_k)$ .

$$f(x_1,...,x_{i_1},...,x_{i_k},...,x_n) = f(x_1,...,A,...,x_n),$$
  
$$f(x_1,...,\overline{x}_{i_1},...,\overline{x}_{i_k},...,x_n) = f(x_1,...,\overline{A},...,x_n).$$

Приведем некоторые легко проверяемые свойства:

1.1. Для любого A имеет место равенство: 
$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial A} = \frac{\partial f}{\partial A}$$
.

1.2. Булева функция  $f(x_1,...,x_n)$  существенно не зависит от  $x_i$  тогда и только тогда, когда  $\frac{\partial f}{\partial x_i} = 0$ .

1.3. Для любых двух функций  $f_1(x_1,...,x_n)$  и  $f_2(x_1,...,x_n)$  и для любого А:

a) 
$$\frac{\partial (f_1 \oplus f_2)}{\partial A} = \frac{\partial f_1}{\partial A} \oplus \frac{\partial f_2}{\partial A},$$
  
6) 
$$\frac{\partial (f_1 f_2)}{\partial A} = f_1 \frac{\partial f_2}{\partial A} \oplus f_2 \frac{\partial f_1}{\partial A} \oplus \frac{\partial f_1}{\partial A} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial A},$$
  
B) 
$$\frac{\partial (f_1 \vee f_2)}{\partial A} = \overline{f_1} \frac{\partial f_2}{\partial A} \oplus \overline{f_2} \frac{\partial f_1}{\partial A} \oplus \frac{\partial f_1}{\partial A} \oplus \frac{\partial f_2}{\partial A}$$

1.4. 
$$f(x_1,...,x_n) = x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \oplus f(x_1,...,x_{i-1},0,x_{i+1},...,x_n)$$
.

1.5.

Доказательство. Равенства 1.1 и 1.2 непосредственно следуют из определения 1.

1.3a.

$$\frac{\partial (f_1 \oplus f_2)}{\partial A} = f_1(x_1, \dots, A, \dots, x_n) \oplus f_2(x_1, \dots, A, \dots, x_n) \oplus \\ \oplus f_1(x_1, \dots, \overline{A}, \dots, x_n) \oplus f_2(x_1, \dots, \overline{A}, \dots, x_n) = \frac{\partial f_1}{\partial A} \oplus \frac{\partial f_2}{\partial A}.$$

1.36. Для доказательства этого равенства достаточно раскрыть правую часть, согласно определению 1, и упростить полученное выражение.

1.3<br/>в. Это равенство следует из равенства 1.36, имея в виду известное равенство<br/>  $f_1 \lor f_2 = \overline{\bar{f_1} \cdot \bar{f_2}}$ и свойство 1.1.

Доказательство свойства 1.4 следует из цепочки равенств:

$$\begin{split} &f(x_1, \dots, x_n) = x_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, \dots, x_{i+1}, \dots, x_n) \oplus \\ & \oplus \overline{x_i} f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) = \\ &= x_i f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) \oplus (1 \oplus x_i) f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) = \\ &= x_i (f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) \oplus f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)) \oplus \\ & \oplus f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) = x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n). \end{split}$$

Идею доказательства свойства 1.5 продемонстрируем для n=6 и некоторой совокупности переменных. Рассмотрим функцию  $f(x_1,...,x_6)$ . Для совокупности переменных  $x_2, x_4, x_5$  получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial (x_2 x_4, x_5)} &= [f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \oplus f(x_1, \overline{x}_2, x_3, \overline{x}_4, \overline{x}_5, x_6)] = \\ &= [f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \oplus f(x_1, \overline{x}_2, x_3, x_4, x_5, x_6)] \oplus \\ &\oplus [f(x_1, \overline{x}_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \oplus f(x_1, \overline{x}_2, x_3, \overline{x}_4, \overline{x}_5, x_6)] \oplus \\ &\oplus [f(x_1, \overline{x}_2, x_3, \overline{x}_4, x_5, x_6) \oplus f(x_1, \overline{x}_2, x_3, \overline{x}_4, \overline{x}_5, x_6)] = \\ &= \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)}{\partial x_2} \oplus \frac{\partial f(x_1, \overline{x}_2, x_3, x_4, x_5, x_6)}{\partial x_4} \oplus \\ &\oplus \frac{\partial f(x_1, \overline{x}_2, x_3, \overline{x}_4, x_5, x_6)}{\partial x_5}. \end{aligned}$$

По индукции введем понятие повторной производной. **Определение 2.** Базис индукции:

$$\frac{\partial^1 f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i}.$$

Индукционный шаг:

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_{k-1}} \partial x_{i_k}} = \frac{\partial}{\partial x_{i_k}} \left( \frac{\partial^{k-1} f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_{k-1}}} \right), (k = 2, 3, \dots).$$

Повторная производная обладает следующими свойствами:

1.6. 
$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$$
, в общем случае  
 $\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_m} \dots \partial x_{i_e} \dots \partial x_{i_k}} = \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_e} \dots \partial x_{i_m} \dots \partial x_{i_k}}$ 

1.7. 
$$\frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_m} \dots \partial x_{i_k}} = 0$$
и, в частности, 
$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_i} = 0.$$

Доказательство свойств 1.6 и 1.7 непосредственно следует из определений 1 и 2.

Следующие свойства устанавливают связь между производными по совокупности переменных и повторными производными.

1.8. Для любой функции  $f(x_1,...,x_n)$  и любого набора индексов  $i_1 < i_2 < ... < i_k$   $(1 \le i_j \le n, \ j = \overline{1,k})$  справедливы равенства: 1.8a.

$$\frac{\partial^{k} f}{\partial x_{i_{1}} \dots \partial x_{i_{k}}} = \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, \dots, x_{i_{k}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, \dots, \partial x_{i_{k-1}})} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{2}}, \dots, x_{i_{k}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, \dots, x_{i_{k-2}})} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{3}}, \dots, x_{i_{k}})} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, x_{i_{2}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, x_{i_{3}})} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}}, x_{i_{k}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{2}}, x_{i_{3}})} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{2}}, x_{i_{k}})} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{k-1}}, x_{i_{k}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_{1}}} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_{2}}} \oplus \dots \frac{\partial f}{\partial x_{i_{k}}}.$$

1.8б.

$$\frac{\partial f}{\partial (x_{i_1}, \dots, x_{i_k})} = \frac{\partial^k f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}} \oplus \frac{\partial^{k-1} f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_{k-1}}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial^{k-1} f}{\partial x_{i_2} \dots \partial x_{i_k}} \oplus$$
$$\oplus \frac{\partial^{k-2} f}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_{k-2}}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial^{k-2} f}{\partial x_{i_3} \dots \partial x_{i_k}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_2}} \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_3}} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_k}} \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_2} \partial x_{i_3}} \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_2} \partial x_{i_4}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_2} \partial x_{i_k}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial^2 f}{\partial x_{i_{k-1}} \partial x_{i_k}} \oplus$$
$$\oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_1}} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_2}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_k}}.$$

Доказательство равенства 1.8 а проведем индукцией по k. Для k=1 оно верно. Пусть оно верно и для k=m-1. По индуктивному предположению:

$$\frac{\partial^{m-1}f}{\partial x_{i_{1}}\dots\partial x_{i_{m-1}}} = \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}},\dots,x_{i_{m-1}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}},\dots,x_{i_{m-2}})} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{2}},\dots,x_{i_{m-1}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}},\dots,x_{i_{m-3}})} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{3}},\dots,x_{i_{m-1}})} \oplus \dots$$
$$\dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}},x_{i_{2}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{1}},x_{i_{3}})} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_{m-2}},x_{i_{m-1}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_{1}}} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_{2}}} \oplus \dots \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_{m-1}}}.$$

Дифференцируя обе части последнего равенства по  $x_m$ и имея в виду легко проверяемое равенство

$$\frac{\partial}{\partial x_{i_m}} \left( \frac{\partial f}{\partial (x_{i_1}, \dots, x_{i_{m-1}})} \right) = \frac{\partial f}{\partial (x_{i_1}, \dots, x_{i_m})} \oplus \frac{\partial f}{\partial (x_{i_1}, \dots, x_{i_{m-1}})} \oplus \frac{\partial f}{\partial x_{i_m}},$$

получим равенство 1.8а для k = m.

Аналогично доказывается 1.8б.

## 2. Активность аргументов булевой функции.

**Определение 3.** Нормой булевой функции  $f(x_1,...,x_n)$  называется [3] число

$$||f||=2^{-n}\sum_{(\alpha_1,\ldots,\alpha_n)}f(\alpha_1,\ldots,\alpha_n),$$

где сумма берется по всем  $2^n$  наборам ( $\alpha_1, ..., \alpha_n$ ) из нулей и единиц.

Норма обладает следующими легко проверяемыми свойствами [4]:

а) для любого набора  $(\sigma_1,...,\sigma_n)$  из нулей и единиц имеет место равенство

$$\left\|f(x_1^{\sigma_1},...,x_n^{\sigma_n})\right\| = \left\|f(x_1,...,x_n)\right\|$$
, где  $x^1 = x$ ,  $x^0 = \overline{x}$ ;

6) 
$$\|\overline{f}\| = 1 - \|f\|;$$
  
в) для функций  $\varphi(x_1, ..., x_m)$  и  $\psi(x_{m+1}, ..., x_n):$   
 $\|\varphi\psi\| = \|\varphi\| \cdot \|\psi\|,$   
 $\|\varphi \lor \psi\| = \|\varphi\| + \|\psi\| - \|\varphi\| \cdot \|\psi\|,$   
 $\|\varphi \oplus \psi\| = \|\varphi\| + \|\psi\| - 2\|\varphi\| \cdot \|\psi\|.$ 

Определение 4. Активностью совокупности переменных  $A = (x_{i_1}, ..., x_{i_k})$   $(1 \le i_1 < i_2 < ... < i_k \le n)$  функции  $f(x_1, ..., x_n)$  называется число

$$\omega_A^f = \left\| \frac{\partial f}{\partial A} \right\|.$$

Перечислим некоторые наиболее важные свойства активностей переменных [2,4,5]:

2.1. Для любого А  $0 \le \omega_A^f \le 1$ .

2.2. Функция  $f(x_1,...,x_i,...,x_n)$  существенно не зависит от  $x_i$  тогда и только тогда, когда  $\omega_i^f = 0$ .

2.3.  $\omega_i^f = 1$  тогда и только тогда, когда

 $f(x_1,...,x_{i-1},x_i,x_{i+1},...,x_n) = x_i \oplus f(x_1,...,x_{i-1},0,x_{i+1},...,x_n).$ 

Это следует из 1.4.

2.4. Для любого  $A = (x_{i_1}, ..., x_{i_k})$   $(1 \le i_1 < i_2 < ... < i_k \le n)$  и функций  $\varphi(x_1, ..., x_n)$  и  $\psi(x_{n+1}, ..., x_{n+m})$ :

a) 
$$\omega_A^{\varphi+\psi} = \omega_A^{\varphi}$$
, b)  $\omega_A^{\varphi\psi} = \|\psi\|\omega_A^{\varphi}$ , b)  $\omega_A^{\varphi\vee\psi} = \|\overline{\psi}\|\omega_A^{\varphi}$ .

2.5. Для любого A и любого набора  $(\sigma_0, \sigma_1, ..., \sigma_n)$  из нулей и единиц:

Это утверждение следует из того факта, что между наборами  $(\alpha_1,...,\alpha_{i_1},...,\alpha_{i_k},...,\alpha_n)$  и  $(\alpha_1,...,\overline{\alpha}_{i_1},...,\overline{\alpha}_{i_k},...,\alpha_n)$  существует взаимно-однозначное соответствие, и для всех таких наборов  $f(\alpha_1,...,\alpha_{i_k},...,\alpha_n) \neq f(\alpha_1,...,\overline{\alpha}_{i_k},...,\alpha_n)$ .

#### 3. Допустимые наборы.

Определение 5 [4]. Набор чисел  $(\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n)$  называется допустимым, если существует булева функция  $f(x_1, x_2, ..., x_n)$  такая, что  $\omega_i = \omega_i^f$  для  $i = \overline{1, n}$ .

 $\tilde{\sigma}$ -набором назовем набор чисел  $\tilde{\sigma} = (\sigma_0, \sigma_1, ..., \sigma_n)$ , где  $\sigma_i \in \{0,1\}$ ,  $i = \overline{0, n}$ .  $\tilde{\sigma}$ -процедурой назовем применение  $\tilde{\sigma}$ -набора к некоторой функции  $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ , в результате чего получается новая функция  $f^{\sigma_0}(x_1^{\sigma_1}, x_2^{\sigma_2}, ..., x_n^{\sigma_n})$ . Множество всех функций  $f^{\sigma_0}(x_1^{\sigma_1}, x_2^{\sigma_2}, ..., x_n^{\sigma_n})$ , где  $\sigma_i \in \{0,1\}$ ,  $i = \overline{0, n}$ , называется  $\tilde{\sigma}$ -семейством функции  $f(x_1, x_2, ..., x_n)$ . Если две функции принадлежат одному  $\tilde{\sigma}$ -семейству, то они называются родственными.

Теорема. Существуют неродственные функции с одинаковыми допустимыми наборами.

**Доказательство**. Для доказательства достаточно привести пример двух неродственных функций с одинаковыми допустимыми наборами.

Таким примером может служит пара функций  $f_1 = (x_1 x_2 \lor x_1 x_3 \lor x_2 x_3) \oplus (x_4 x_5 \lor x_4 x_6 \lor x_5 x_6)$  и  $f_2 = x_1 x_2 \lor x_3 x_4 \lor x_5 x_6$ , для которых  $\omega_i^{f_1} = \omega_i^{f_2} = \frac{1}{2}$ ,  $i = \overline{1,6}$  и  $\omega_{1,2,3}^{f_1} = 1$ ,  $\omega_{1,2,3}^{f_2} = \frac{1}{2}$ .

4. Выделение активной части схемы. Из теоремы, изложенной в §4 [5], следует, что для любой булевой функции  $f(x_1, ..., x_n)$  и любого числа  $\varepsilon > 0$  существует число  $\delta > 0$  такое, что если  $\max_{1 \le i \le n} \omega_i^f < \delta$ , то  $\min \left\{ \|f\|, \|\overline{f}\| \right\} < \varepsilon$ . Этот результат является теоретическим обоснованием возможности выделения активной части схемы. Для булевой функции эти вопросы рассмотрены в работе [6], где содержится разработка алгоритма выделения активной части булевой функции. Это фактически является разработкой нового направления в теории аппроксимации в области теории булевых функций.

Поскольку одним из способов задания булевой функции является соответствующая комбинационная логическая схема с одним выходом, то, очевидно, задача выделения активной части булевой функции автоматически интерпретируется в области цифровых логических схем в виде выделения активной части схемы. Но поскольку среда описания булевой функции меняется (имеется в виду переход из описания с помощью формулы к описанию с помощью комбинационной схемы с одним выходом), то алгоритм выделения активной части функции при ее описании формулой серьезным образом подвергается изменению, когда мы переходим из формульного описания функции к схемному. Более того, в настоящее время схемы описываются с помощью специальных языков описания аппаратур (Verilog HDL, VHDL, Alex HDL [6-8]). В нашем случае предпочтительным

является использование языка Alex, так как он построен аксиоматическим принципом и в нем легко осуществить эквивалентные и иные преобразования схем и их частей [9].

Выделение активной части комбинационной схемы с одним выходом осуществляется поэтапно.

На первом этапе вычисляются активности входов схемы. Если данная схема реализует функцию  $f(x_1,...,x_i,...,x_n)$  и требуется вычислить активность аргумента  $x_i$  (т.е. входы схемы с номером i), то следует многократно вычислить сумму

$$f(\boldsymbol{\alpha}_1,...,\boldsymbol{\alpha}_i,...,\boldsymbol{\alpha}_n) \oplus f(\boldsymbol{\alpha}_1,...,\boldsymbol{\alpha}_i,...,\boldsymbol{\alpha}_n)$$

для случайных наборов ( $\alpha_1, ..., \alpha_i, ..., \alpha_n$ ) из нулей и единиц и приблизительно вычислить активность указанного i -го входа схемы следующей формулой:

$$\omega_i^f \approx m/N$$

где N - число экспериментов, т.е. число наборов ( $\alpha_1,...,\alpha_i,...,\alpha_n$ ), для которых многократно вычисляется вышеуказанная сумма, а m -число случаев, когда указанная сумма принимает значение 1. Погрешность точности вычисления этой активности равна  $n/\sqrt{N}$ , где n-длина наборов ( $\alpha_1,...,\alpha_i,...,\alpha_n$ )[10].

Вторым этапом является подбор наиболее активных входов схемы, которые должны быть сохранены как входы активной части схемы, а остальные входы, наиболее пассивные, замещаются нулями или единицами таким образом, чтобы активная часть являлась наилучшим приближением для основной схемы.

Третьим этапом является оценка точности приближения с помощью активной части. Точность регулируется увеличением или уменьшением числа наиболее активных входов. В первом случае точность увеличивается, а во втором случае - уменьшается.

В таблице приводятся результаты экспериментов выделения активных частей некоторых подсхем схемы с7552- bench [11].
Таблица

Номер	Длина	Активность	Іисло входов	Число	Длина	Точность
выхода	записи под-	входа, начи-	подсхемы	входов	записи	приближения
подсхемы	схемы на	ная с $\delta$		акт. части	активной	$(\mathcal{E})$
	языке Alex			схемы	части	
58	1176	0,0001	94	22	692	0,0001
58	1176	0,0002	94	27	478	0,00024
58	1176	0,0003	94	25	486	0,00042
58	1176	0,0004	94	24	538	0,00051
59	1381	0,0001	124	37	485	0,00025
59	1381	0,0002	124	30	1054	0,00201
59	1381	0,0003	124	24	401	0,070088
59	1381	0,0004	124	22	1032	0,04606
60	1381	0,0001	124	36	453	0,00024
60	1381	0,0002	124	32	437	0,0006
60	1381	0,0003	124	22	392	0,07101
60	1381	0,0004	124	20	381	0,148
61	1177	0,0001	94	30	422	0,0001
61	1177	0,0002	94	26	383	0,0002
61	1177	0,0003	94	25	379	0,00034
61	1177	0,0004	94	24	374	0,00048

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бозоян Ш.Е., Егиазарян В.С. О наилучшем приближении булевых функций // Вестник ГИУА. Серия «Моделирование, Оптимизация, Управление». 2006.-Вып.9, том 2.-С. 34-42.
- Read J.S. A Class of Multiple Error Correcting Codes and the Decoding Scheme// IRE Trans. Prof. Group Inform. Theory.- 1954.- 4.- P.38-49.
- 3. **Бозоян Ш.Е.** Некоторые свойства булевых дифференциалов и активностей аргументов булевых функций // Проблемы передачи информации.-1978. Т.14, №1.-С.77-88.
- 4. Бозоян Ш.Е., Егиазарян В.С. Простые и составные наборы активностей аргументов булевых функций // Годичная научная конференция РАУ.- 2006.- С. 85-89.
- 5. **Бозоян Ш.Е.** Некоторые свойства булевых дифференциалов и активностей аргументов булевых функций и вопросы построения надежных схем из ненадежных элементов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.-1975.- 5.- С. 148-160.
- 6. Palnitkar S. Verilog HDL: A Guide to Digital Design and Synthesis. SunSoftPress. Prentice Hall, 1996.
- 7. **Маршнер Ф.Е.** VHDL для моделирования, синтеза и формальной верификации аппаратуры. М., 1995. С.1-13.
- 8. Бозоян Ш.Е., Егиазарян В.С. Язык Alex описания схем // Журнал «Программирование».-2007.-№ 4.-С.65-80.
- 9. **Кочаров Д.А.** Некоторые классы булевых функций // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование.- 2007.-Т.9.- С.53-56,

- 10. Бозоян Ш.Е., Егиазарян В.С. Активная часть цифровых схем и её применение в области автоматизированного проектирования схем // Труды VI Международной конференции SICPRO`08.-М., 2008.-С.1205-1210.
- 11. **Hansen M., Yalcin H., Hayes J.P.** Unveiling the ISCAS-85 Benchmarks: A Case Study in Reverse Enginering // IEEE Design and Test. -1999.- Vol. 16, № 3. P.72-80, July-September.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 11.09.2007.

#### Շ.Ե. ԲՈԶՈՅԱՆ, Վ.Ս. ԵՂԻԱՉԱՐՅԱՆ, Դ.Ա. ՔՈՉԱՐՈՎ, Ն.Վ.ԲԱԴԱԼՅԱՆ

#### ԲՈՒԼՅԱՆ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ԲՈՒԼՅԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐԻ ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԱԿՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԽԵՄԱՅԻ ԱԿՏԻՎ ՄԱՍԻ ԱՆՋԱՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Դիտարկվում են բուլյան դիֆերենցիա<u>լը,</u> նրա հիմնական հատկությունները, բուլյան ֆունկցիայի փոփոխականների համախմբի ակտիվությունը, համակցված բուլյան ֆունկցիա իրականացնող մեկ ելք ունեցող համակցված սխեմա։ Օգտագործելով համակցված սխեմայի մուտքերի ակտիվությունները և սխեմայի ակտիվ մասի կառուցման ալգորիթմը, անջատվում են թեստային էտալոնային սխեմաների (ISCAS-85) մեկ ելք ունեցող ենթասխեմաների ակտիվ մասերը։ *Առանցքային բառեր.* բուլյան դիֆերենցիայ, նախագծում, թվային սխեմա, ակտիվ մաս։

#### SH.E. BOZOYAN, V.S. YEGHIAZARYAN, D.A. KOCHAROV, N.V. BADALYAN

#### BOOLEAN DIFFERENTIALS AND ACTIVITIES OF VARIABLE BOOLEAN FUNCTIONS FOR SEPARATING ACTIVE PART OF CIRCUIT

The Boolean differential and its main characteristics, the activity of variable Boolean function combination are examined. Combinational digital circuits are examined also with one output, realizing the Boolean function. Using activities of the combinational circuits inputs and the algorithm of building the active part of circuits for test standard circuits (ISCAS-85) the active parts of subcircuits having one output are allocated.

Keywords: Boolean differential, designing, digital circuits, active part.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК 62-50

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

#### О.Н. ГАСПАРЯН, Н.А. ВАРДАНЯН

# О ТРАЕКТОРИЯХ КОРНЕЙ ЦИРКУЛЯНТНЫХ И АНТИЦИРКУЛЯНТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

На основе метода характеристических передаточных функций исследованы свойства траекторий корней циркулянтных и антициркулянтных многомерных систем автоматического регулирования (ЦМСАР и АМСАР). Показано, что задача построения корневых годографов таких систем сводится к построению N годографов одномерных характеристических систем, где N - число отдельных каналов, причем правила построения этих годографов аналогичны известным правилам классической теории регулирования. Установлено, что в отличие от большинства других типов многомерных систем, центры асимптот траекторий корней ЦМСАР и АМСАР в общем случае являются попарно комплексно-сопряженными величинами.

*Ключевые слова*: многомерная система регулирования, циркулянтная система, антициркулянтная система, характеристическая передаточная функция, корневой годограф, устойчивость системы.

Метод корневого годографа является одним из основных инженерных методов исследования и проектирования систем регулирования с одним входом и выходом [1]. Работы [2-4] посвящены распространению метода корневого годографа на многомерные системы автоматического регулирования (МСАР). В [2-4] для исследования свойств корневых годографов квадратных МСАР общего вида используется метод характеристических передаточных функций (ХПФ). В настоящей статье, которая является продолжением работ [2,3], впервые исследуются свойства корневых годографов циркулянтных и антициркулянтных МСАР, в том числе и имеющих большое прикладное значение двумерных систем с симметричными и антисимметричными взаимными связями [1]. Показано, что для этих систем можно строго свести задачу построения корневых годографов к совокупности N одномерных задач.

*Общие условия образования корней замкнутых МСАР.* На рис.1 изображена матричная структурная схема N-мерной линейной МСАР, используемая при исследовании многомерных корневых годографов, где W(s) - передаточная матрица разомкнутой системы, I - единичная матрица, k - скалярный действительный множитель.

147



Рис. 1. Матричная структурная схема МСАР

Ставится задача построения траекторий корней замкнутой МСАР на рис.1 при изменении «коэффициента усиления» k от нуля до бесконечности. Как известно [4], характеристическое уравнение замкнутой МСАР может быть представлено в виде

$$det[I + kW(s)] = \prod_{i=1}^{N} [1 + kq_i(s)] = 0 \quad , \tag{1}$$

где через q<sub>i</sub>(S) обозначены ХПФ разомкнутой системы, при этом учтено, что при умножении матрицы на скаляр все е, собственные значения умножаютсяна тот же скаляр. Уравнение (1), очевидно, эквивалентно следующей системе уравнений:

$$1 + kq_i(s) = 0$$
 или  $kq_i(s) = -1$ ,  $i = 1, 2, ..., N$ , (2)

откуда видно, что корнями замкнутой MCAP при любом k = const могут быть только те значения комплексной переменной S, для которых выполняются при некотором i следующие два условия:

$$|\mathbf{kq}_{i}(s)| = 1$$
, arg  $\mathbf{q}_{i}(s) = \pm (2r+1)180^{\circ}$ ,  $r = 0, 1, 2, ....$  (3)

Иными словами, корнями замкнутой МСАР могут быть только те значения S, при которых некоторые XПФ  $q_i(S)$  являются действительными отрицательными числами. К сожалению, использование условий (3) для построения корневых годографов обычно невозможно, так как ХПФ  $q_i(S)$  в общем случае не имеют аналитического представления и являются алгебраическими функциями, лежащими на различных листах поверхности Римана и имеющими так называемые точки разветвления, чье нахождение для МСАР большой размерности связано с существенными трудностями и не всегда осуществимо.

Канонические представления циркулянтных и антициркулянтных МСАР. Основным отличительным признаком циркулянтных МСАР (ЦМСАР) служит циркулянтность передаточной матрицы разомкнутой системы W(s). Напомним, что в циркулянтной матрице каждая последующая строка повторяет предыдущую при сдвиге всех элементов (кроме N -го) на одно место вправо; N -й элемент предыдущей строки при этом становится первым элементом следующей [5]. Для матрицы W(s) это выглядит так:

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_0(s) & W_1(s) & \dots & W_{N-1}(s) \\ W_{N-1}(s) & W_0(s) & \dots & W_{N-2}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_1(s) & W_2(s) & \dots & W_0(s) \end{pmatrix}.$$
 (4)

МСАР, описываемые циркулянтными матрицами, составляют широко распространенный класс многомерных систем. В качестве примеров можно привести системы автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи, системы регулирования трехосных гироскопических платформ. Легко понять, что любая циркулянтная матрица полностью определяется е, первой строкой. Воспользовавшись принятыми в (4) обозначениями  $W_0(s)$  и  $W_i(s)$  (i = 1, 2, ..., N-1) для элементов первой строки циркулянтной матрицы W(s), е, можно записать в виде следующего матричного полинома:

$$W(s) = W_0(s)I + \sum_{k=1}^{N-1} W_k(s)U^k, \qquad (5)$$

где

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$
(6)

есть ортогональная матрица перестановок [5], которая удовлетворяет условиям:  $U^{-1} = U^T$ , det U = -1; все собственные значения матрицы U имеют единичный модуль. Собственные значения  $\beta_i$  матрицы перестановок U являются корнями характеристического уравнения

$$\det[\beta I - U] = \beta^{N} - 1 = 0 \tag{7}$$

и при любом N равны

$$\beta_{i} = \exp\{j2\pi(i-1)/N\}; \quad i = 1, 2, ..., N.$$
(8)

Геометрически корни  $\beta_i$  расположены на комплексной плоскости в вершинах правильного N -угольника, вписанного в окружность единичного радиуса, причем первый корень всегда действителен и равен единице (рис.2).



Рис. 2. Собственные значения матрицы перестановок U (6): а - N = 2, б - N = 3, в - N = 4

Так же просто находятся и нормированные собственные векторы  $\boldsymbol{c}_i$ матрицы U, равные [5]

$$c_i = 1/\sqrt{N} [1 \ \beta_i \ \beta_i^2 \ \dots \ \beta_i^{N-1}]^T; \quad i = 1, 2, \dots, N.$$
 (9)

Укажем, что поскольку матрица перестановок U относится к нормальным, то е, модальная матрица C, составленная из собственных векторов  $c_i$  (9), является унитарной, то есть  $C^{-1} = C^*$ .

В теории матриц доказывается, что если квадратная матрица A представляется в виде полинома со скалярными коэффициентами от некоторой другой матрицы B, то собственные значения матрицы A равны значениям соответствующего скалярного полинома, получаемого в результате подстановки вместо матрицы B собственных значений последней. Кроме того, собственные векторы матриц A и B для соответствующих друг другу собственных значений

совпадают [5]. Применительно к циркулянтной матрице W(s) (5) это значит, что ХПФ  $q_i(s)$  ЦМСАР при любом числе N сепаратных каналов могут быть представлены в аналитической форме в следующем виде:

$$q_i(s) = W_0(s) + \sum_{k=1}^{N-1} W_k(s) \exp\{j2\pi(i-1)k/N\}, \quad i = 1, 2, ..., N.$$
 (10)

Из приведенного выше утверждения следует, что канонический базис циркулянтной матрицы W(s)(5), т.е. канонический базис ЦМСАР, а вместе с ним и модальная матрица C, наследуются от матрицы перестановок U (6).

Возможность записи  $X\Pi\Phi q_i(s)$  в аналитическом виде при любой размерности N значительно упрощает процедуру исследования ЦМСАР и, в частности, процедуру построения корневых годографов. Интересно и важно отметить, что канонические базисы ЦМСАР не

зависят от комплексной переменной S и совпадают между собой для всех систем одинаковой размерности N, независимо от конкретного вида передаточных функций  $W_0(S)$  и  $W_k(S)$  (k = 1, 2, ..., N-1).

Еще один важный тип MCAP, который по структурным признакам можно выделить в самостоятельный класс, носит название антициркулянтных MCAP (AMCAP), т.е. систем с антициркулянтными передаточными матрицами W(s). Основное отличие антициркулянтных матриц от обычных циркулянтных заключается в том, что расположенные по обе стороны от главной диагонали симметричные элементы имеют противоположные знаки, т.е. каждая последующая строка получается из предыдущей сдвигом на один элемент вправо, причем последний элемент предыдущей строки становится первым элементом последующей с обратным знаком. Так, антициркулянтная передаточная матрица разомкнутой системы W(s) может быть записана в виде

$$W(s) = \begin{pmatrix} W_0(s) & W_1(s) & \dots & W_{N-1}(s) \\ -W_{N-1}(s) & W_0(s) & \dots & W_{N-2}(s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -W_1(s) & -W_2(s) & \dots & W_0(s) \end{pmatrix} .$$
(11)

Если простейшей из циркулянтных матриц является матрица перестановок U (6) и любую циркулянтную матрицу можно выразить в виде полинома от U, то в случае антициркулянтных матриц аналогичную роль играет ортогональная матрица перестановок с изменением знака последнего элемента, которую мы обозначим через U\_. Эта матрица имеет вид

$$\mathbf{U}_{-} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$
 (12)

При умножении матрицы U на вектор X вторая компонента  $X_2$  становится первой, третья – второй и т.д.; первая компонента  $X_1$  становится последней с обратным знаком. Характеристическое уравнение матрицы  $U_-(12)$  имеет вид

$$\det[\beta I - U_{-}] = \beta^{N} + 1 = 0 , \qquad (13)$$

а его корни  $\beta_i$  при любом N равны

$$\beta_i = exp\{j[2(i-1)+1]\pi/N\}; \quad i = 1, 2, ..., N \tag{14}$$

и так же, как и собственные значения матрицы перестановок U, расположены в вершинах правильного N -угольника, вписанного на комплексной плоскости в окружность единичного радиуса, как это показано для N = 2, 3, 4 на рис. 3.



Рис. 3. Собственные значения матрицы  $\,U_{-}\,$  (12): а - N=2 , б -  $\,N=3$  , в - N=4

Отметим, что если первое собственное значение  $\beta_1$  матрицы U (6) при любом N всегда действительно и равно единице, то у матрицы U\_(12) при четных N все собственные значения есть комплексно-сопряженные числа. Ортонормированные собственные векторы  $c_i$  матрицы U\_ выражаются через собственные значения  $\beta_i$  (14) теми же выражениями (9), что и в случае обычной матрицы перестановок U. Как следует из изложенного, любая антициркулянтная матрица вида (11) может быть представлена в виде полинома (N-1)-й степени от матрицы U\_:

$$W(s) = W_0(s)I + \sum_{k=1}^{N-1} W_k(s)U_-^k , \qquad (15)$$

причем для AMCAP четного порядка N, которые представляют на практике основной интерес, выражение (15) обычно удобнее преобразовать к несколько иной форме:

$$W(s) = W_0(s)I + W_{N/2}(s)U_-^{N/2} + \sum_{k=1}^{(N/2)-1} [W_k(s)U_-^k - W_{N-k}(s)(U_-^k)^{-1}].$$
(16)

На основании приведенных выше свойств полиномов от матриц XПФ  $q_i(s)$  AMCAP представляются при любой размерности системы N в аналитической форме в виде

$$q_i(s) = W_0(s) + \sum_{k=1}^{N-1} W_k(s) \exp\{jk[2(i-1)+1]\pi/N\}, \quad i = 1, 2, ..., N, \quad (17)$$

а модальная матрица C и ортонормированный канонический базис AMCAP не зависят от комплексной переменной S и совпадают с модальной матрицей и каноническим базисом матрицы перестановок с изменением знака последнего элемента U\_(12).

С практической точки зрения, наибольший интерес представляют AMCAP с четным числом каналов N, для которых можно сформулировать следующее утверждение: при четном числе N сепаратных каналов и выполнении условий

$$W_k(s) = W_{N-k}(s);$$
  $k = 1, 2, ..., N/2 - 1$  (18)

АМСАР являются антисимметричными системами регулирования.

Подставляя (18) в (16) и (17), получим для антисимметричных MCAP четного порядка:

$$W(s) = W_{0}(s)I + \left\{ W_{N/2}(s)U_{-}^{N/2} + \sum_{k=1}^{(N/2)-1} W_{k}(s)[U_{-}^{k} - (U_{-}^{k})^{-1}] \right\}, \quad (19)$$

$$q_{i}(s) = W_{0}(s) + j(-1)^{i+1}W_{N/2}(s) + 2j\sum_{k=1}^{(N/2)-1} W_{k}(s)\sin\{[2(i-1)+1]\pi k/N\}, \quad (20)$$

где фигурными скобками в (19) выделена кососимметричная матрица [5].

Таким образом, рассмотренный аппарат антициркулянтных матриц

позволяет описать аналитически важный класс антисимметричных MCAP четного порядка, что невозможно при помощи обычных циркулянтных матриц.

*Корневые годографы ЦМСАР и АМСАР.* Внутренние структурные характеристики и свойства циркулянтных и антициркулянтных систем настолько схожи, что при рассмотрении их корневых годографов можно ограничиться только случаем ЦМСАР, отметив попутно лишь некоторые особенности, присущие именно АМСАР.

Важнейшей чертой ЦМСАР является, как и в случае МОСАР [3], расположение корневых годографов одномерных характеристических систем на изолированных однолистных поверхностях Римана, т.е. и здесь задача построения траекторий корней распадается без всяких упрощений или предположений на N независимых одномерных задач. Далее ХПФ  $q_i(s)$  ЦМСАР(10) могут быть записаны аналитически в виде дробно-рациональной функции комплексной переменной S при любом числе N отдельных каналов. При этом полюсы всех ХПФ равны совокупности полюсов элементов первой строки передаточной матрицы разомкнутой системы W(s) и расположены симметрично относительно действительной оси. Что касается нулей ХПФ, то в общем случае они являются корнями полиномов с комплексными коэффициентами, и поэтому для каждой характеристической системы их расположение несимметрично относительно действительной оси. Вместе с тем любому такому расположению нулей соответствует «комплексно-сопряженное» расположение нулей некоторой другой характеристической системы, и в результате все нули ЦМСАР всегда образуют симметричную картину. Наконец, стоит указать, что число нулей всех ХПФ ЦМСАР одинаково, что вытекает из самой формы ХПФ  $q_i(s)$  (10).

Если обозначить через D(s) одинаковые полиномы знаменателей всех ЦМСАР, а через  $M_i(s)$ -полиномы числителей, то есть представить ХПФ в виде  $q_i(s) = M_i(s)/D(s)$ , то условия (2) можно записать для ЦМСАР в виде  $1 + kq_i(s) = D(s) + kM_i(s) = 0$  или  $kq_i(s) = kM_i(s)/D(s) = -1$ ,  $i = \overline{1, N}$ . (21)

Данные условия дают возможность сформулировать приведенные далее правила построения траекторий корней ЦМСАР в форме, учитывающей специфические структурные особенности рассматриваемого класса многомерных систем.

**Правило 1** (число траекторий корней). Число траекторий корней N -мерной ЦМСАР равно N  $p_0$ , где  $p_0$  - число всех полюсов элементов первой строки циркулянтной матрицы W(s).

**Правило 2** (начало и конец траекторий корней). При k = 0 траектории каждой характеристической системы начинаются в одних и тех же корнях

уравнения D(s)=0 и кончаются при  $k=\infty$  в корнях уравнения  $M_i(s)=0$ . Если обозначить через  $Z_0$  одинаковые степени всех полиномов  $M_i(s)$ , то  $Z_0$ 

траекторий корней каждой характеристической системы неограниченно стремится при  $k \rightarrow \infty \ k \ z_0$  конечным нулям ХПФ q<sub>i</sub>(s).

**Правило 3** (число траекторий, стремящихся к бесконечности). Число траекторий каждой характеристической системы, стремящихся к бесконечности при неограниченном возрастании k, одинаково и равно  $e_0 = p_0 - z_0$ . Соответственно, общее число траекторий корней ЦМСАР, стремящихся к бесконечности, равно Ne<sub>0</sub>.

**Правило 4** (наклон асимптот траекторий корней). Допустим, мы представили  $q_i(s)$  в виде произведения сомножителей:

$$q_i(s) = M_i(s) / D(s) = \left[ K_c^i \prod_{j=1}^{z_0} (s - Z_j^i) \right] / \prod_{j=1}^{p_0} (s - P_j^i) , \quad i = 1, 2, ..., N , \quad (22)$$

где через  $P_i$  обозначены полюсы (они одинаковы для всех i ),  $Z_i^i$ - нули, а

К<sub>с</sub><sup>i</sup> - в общем случае комплексный «коэффициент усиления» і -й характеристической системы.

Можно показать, что е<sub>0</sub> уходящих в бесконечность траекторий корней

і-й характеристической системы неограниченно приближаются к е<sub>0</sub>-лучевой конфигурации, лучи которой (асимптоты траекторий) составляют с положительным направлением действительной оси углы:

$$\gamma_{\rm r} = [(2r+1)180^{\circ} - \arg K_{\rm c}^{\rm i}]/e_0, \quad r = 0, 1, \dots, e_0 - 1.$$
 (23)

**Правило 5** (центры асимптот траекторий корней). Центр асимптот і -й характеристической системы расположен на комплексной плоскости в точке

$$A_{ci} = \frac{\sum_{r=1}^{p_0} P_r - \sum_{r=1}^{z_0} Z_r^i}{p_0 - z_0}, \qquad i = 1, 2, ..., N , \qquad (24)$$

где обозначения те же, что и в (22). Здесь мы столкнулись с существенным отличием центров асимптот ЦМСАР от случая МОСАР. Если у МОСАР центры асимптот всех характеристических систем лежали в одной точке на действительной оси, то в общем случае ЦМСАР эти центры могут быть комплексными. Это вызвано тем, что комплексные нули  $Z_j^i$  в (24), будучи в общем случае корнями полиномов с комплексными коэффициентами, не будут иметь в этом случае комплексно-сопряженную пару. Однако каждому комплексному центру  $A_c^i$  всегда соответствует комплексно-сопряженный центр некоторой другой характеристической системы с комплексно-сопряженным полиномом в числителе ХПФ. Число таких комплексных центров в случае ЦМСАР нечетного порядка N равно N- 1, а четного - N- 2.

Укажем, что все центры асимптот AMCAP четного порядка являются комплексными. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев расположение на единичной окружности собственных значений матрицы перестановок с изменением знака последнего элемента U\_(12) (рис. 3).

**Правило 6** (симметричные траектории корней). Рассмотрим распределение собственных значений матрицы перестановок U (6) (рис. 2). Мы знаем, что, независимо от порядка N ЦМСАР, первое собственное значение  $\beta_1$  матрицы U всегда равно единице. Далее при четных N (1+N/2)-е собственное значение  $\beta_{i+N/2}$  всегда равно минус единице. Поэтому ХПФ  $q_i(s)$ , порожденные этими собственными значениями, будут в силу (10) иметь вещественные полиномы не только в знаменателе, но и в числителе. Соответственно, траектории корней этих характеристических систем подчиняются всем обычным правилам поведения траекторий корней относительно действительной оси, участков траекторий, принадлежащих этой оси, точек пересечения и т.д.

Сформулированные выше простые правила отражают специфику внутренней структуры ЦМСАР и АМСАР. Новым и важным здесь является то, что центры асимптот траекторий корней ЦМСАР и АМСАР располагаются не только на действительной оси, но могут быть комплексносопряженными. Вместе с тем, учитывая, что для центров асимптот и их наклонов имеются простые выражения (23), (24), а также принимая во внимание, что  $X\Pi\Phi q_i(s)$  могут быть записаны в аналитическом виде при любом N, задачу построения траекторий корней ЦМСАР и АМСАР можно, как и в случае МОСАР, считать практически решенной. Пример. Рассмотрим двумерную антисимметричную систему с передаточной матрицей

$$W(s) = \frac{50}{(s+2)(s+3)(s+4)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{4}{(s+8)} \\ -\frac{4}{(s+8)} & 1 \end{pmatrix}.$$
 (25)

 $X\Pi \Phi q_{1,2}(s)$  системы равны

$$q_{1,2}(s) = \frac{50(s+8\pm j4)}{(s+2)(s+3)(s+4)(s+8)}$$

и имеют два комплексно-сопряженных нуля в  $\ Z_1{=}{-}\,8{-}\,j4$  и  $\ Z_2{=}{-}\,8{+}\,j4$  .

На рис. 4 а показан общий вид траекторий корней системы, откуда видно, что центры асимптот расположены в комплексно-сопряженных точках  $A_{c1} = -3 + j1.333$  и  $A_{c2} = -3 - j1.333$  (эти центры отмечены на рис. 4). Корневые годографы на рис. 4 построены при помощи специально разработанного на языке MATLAB [6] графического интерфейса пользователя. Как показывает распределение корней на рис. 4 (зачерненные квадратики), антисимметричная система (25) устойчива.







Рис. 4. Корневые годографы двумерной антисимметричной системы (25):

а - общий вид траекторий корней, б - первая
 характеристическая система, в - вторая
 характеристическая система



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования.-М.: Наука, 2002. 772 с.
- Гаспарян О.Н., Абгарян С.В., Варданян Н. А., Мхитарян Э.А. К построению корневых годографов многомерных систем автоматического регулирования // Вестник Гос. инж. ун-та Армении. Серия "Моделирование, оптимизация, управление": - 2006. -Вып.7, т.1. - С.117-128.
- Kouvaritakis B. and Shaked U. Asymptotic behavior of root-loci of multivariable systems // Int. J. Contr. -1976. -Vol. 23. -P.297-340.
- 4. MacFarlane A.G. J. and Postlethwaite I. Characteristic frequency functions and characteristic gain functions// Int. J. Contr. 1997. Vol. 26. -P. 265-278.
- 5. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 2003. -575 с.
- 6. Using MATLAB. The MathWorks, Inc, Natick, 2000. 874p.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.06.2007.

### Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ն.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ ԲԱԶՄԱՉԱՓ ՑԻՐԿՈՒԼՅԱՆՏ ԵՎ ՀԱԿԱՑԻՐԿՈՒԼՅԱՆՏ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՐՄԱՏԱՑԻՆ ՀԵՏԱԳԾԵՐԻ ՎԵՐԱԲԵՐՑԱԼ

Բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդի հիման վրա հետազոտվել են բազմաչափ ցիրկուլյանտ և հակացիրկուլյանտ ավտոմատ կարգավորման համակարգերի (ԲՅԱԿՀ, ՀՑԲԱԿՀ) արմատային հետագծերի հատկությունները։ Ցույց է տրված, որ այդ համակարգերի արմատային հետագծերի կառուցման խնդիրը բերվում է N առանձին միաչափ բնութագրիչ համակարգերի հետագծերի կառուցման խնդրին, որտեղ N -ը առանձին կապուղիների թիվն է, ընդ որում, այդ հետագծերի կառուցման կանոնները համանման են դասական կառավարման տեսության հայտնի կանոններին։ Հաստատված է, որ ի տարբերություն ուրիշ դասի բազմաչափ համակարգերի, ԲՑԱԿՀ-ի և ՀՑԲԱԿՀ-ի արմատային հետագծերի ասիմպտոտների կենտրոնները ընդհանուր դեպքում կոմպլեքս համալուծ մեծություններ են։

**Առանցքային բառեր.** բազմաչափ կառավարման համակարգ, ցիրկուլյանտ և հակացիրկուլյանտ համակարգեր, բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիա, արմատային հետագիծ, համակարգի կայունություն։

# O.N. GASPARYAN, N.A. VARDANYAN ON ROOT LOCI OF CIRCULANT AND ANTICIRCULANT FEEDBACK CONTROL SYSTEMS

The properties of root loci of circulant and anticirculant multi-input multi-output (MIMO) feedback control systems are investigated on the basis of the characteristic transfer function method. It is shown that the task of constructing root loci for such systems is reduced to the task of constructing N separate loci of one-dimensional characteristic systems, where N is the number of separate channels, and the rules of constructing these root loci are analogues to well known rules from the classical control theory. It is established that as opposed to the majority of other types of multivariable systems, the centres of root loci asymptotes for circulant and anticirculant MIMO systems are generally complex-conjugate values.

*Keywords:* multivariable control system, circulant system, anticirculant system, characteristic transfer function, root locus, system stability.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

*Հ*SԴ 615.477.2

ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ

#### Հ.Հ. ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ

#### ՄԻՈԷԼԵԿՏՐԻԿ ՊՐՈԹԵՉՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ

Մարդու՝ պրոթեզի օգտագործման հիմնական դժվարություններից մեկը պրոթեզի օգտագործման սկզբնական փուլերն են։ Միոէլեկտրիկ պրոթեզների հետ աշխատելիս, այդ դժվարությունները պակասում են։ Համակարգը նախատեսված է ԷՄԳ (էլեկտրամիոգրամմային( ազդանշանները գրանցելու և մշակելու համար։ ԱՌ (ավտոռեգրեսիվ( մոդելի և նեյրոնային ցանցի կապը կիրառվում է ԷՄԳ ազդանշանի ձանաչման համար։Այնուհետև նեյրոնային ցանցի ելքային ազդանշաններն օգտագործվում են վիրտուալ պրոթեզների կառավարման համար։

*Առանցքային բառեր*. Էլեկտրամիոգրամ, միոէլեկտրիկ, վիրտուալ պրոթեզ, Բարտերուորտյան ֆիլտր, ավտոռեգրեսիվ մոդել, դասակարգիչ։

Ներածություն։ Կորսված անդամը արհեստական վերջույթով փոխարինելու միտքը նոր չէ։ Դեռ 20-րդ դարի սկզբներին շատ հեղինակներ գուշակում էին, թե ինչպիսին կլինի կիբեռնետիկական մարդը 21-րդ դարում։ Մինչ այժմ մեծ աշխատանք է տարվել արհեստական վերջույթի կառավարման հարցում։ Պրոթեզային զարգացման հիմնականում արհեստական վերջույթը լիարժեք չի կառավարվում այն օգտագործողի կողմից։ Պրոթեզային կառավարման հայտնի մոտեցում է էՄԳ ազդանշանների կիրառումը, որոնք հավաքվում են մնացորդային մկաններից, որպես արհեստական վերջույթի մոտքային ազդանշաններ։ Այս սարքերը հայտնի են որպես միոէլեկտրիկ պրոթեզներ, որոնք օգտագործում են կենսաբանական ազդանշանը արհեստական վերջույթի շարժումները կառավարելու համար։ Այդ պատձառով այս աշխատանքում փորձ է արվելու գտնել միոէլեկտրիկ պրոթեզների կառավարման լավագույն ռազմավարությունն ու տեխնոլոգիան։

**Համակարգի Հարտարապետությունը։** Մենք կկենտրոնանանք մակերեսային էլեկտրոմիոգրամմային ազդանշանների օգտագործման վրա՝ վերին վերջույթների պրոթեզների չորս տարբեր ֆունկցիաներ կառավարելու համար։

Էլեկտրոմիոգրամմային ազդանշանը գրանցվում է մակերեսային էլեկտրոդների կողմից, ուժեղացվում է և զտվում։

Ստացված ազդանշանի՝ մեզ հետաքրքրող հատվածը մշակելու համար, հարկավոր է պարզել, թե որտեղ է սկսվում էլեկտրամիոգրամի ակտիվությունը և դուրս գրել այդ հատվածը (էկրանավորում, կադրավորում)։Այնուհետև ազդանշանը մշակվում է այն բնութագրերը գտնելու համար, որոնք կօգտագործվեն էլեկտրոմիոգրամմային մոդելը արհեստական նեյրոնային ցանցի կողմից շարժման չորս դասի դասակարգելու համար։ Նեյրոնային ցանցի ելքային ազդանշանը այնուհետև կարող է օգտագործվել վիրտուալ արհեստական վերջույթի Ճիշտ ֆունկցիան ակտիվացնելու համար (նկ. 1)։

**ԷՄԳ ազդանշանների առաջացումն ու գրանցումը**։ Միոէլեկտրիկ ազդանշանը (նկ.2( նեյրոմկանային ակտիվացման էլեկտրոնային տեսքն է։ Այն շատ բարդ ազդանշան է, որի վրա ազդում են տարբեր գործոններ, ինչպիսիք են մկանների անատոմիական և ֆիզիոլոգիական բնութագրերը, ծայրամասային նյարդային համակարգի կառավարող ալգորիթմը, ինչպես նաև այն սարքերի բնութագրերը, որոնք օգտագործվում են գործընթացում։

ԷՄԳ ազդանշանի ի հայտ բերումը կարևոր նշանակություն ունի։

Հիմնական խնդիրն այն է, որ այս ազդանշանը հեշտությամբ կարող է ընկնել խառնված, այսպես կոչված կեղտոտ ազդանշանների ազդեցության տակ, որոնք գալիս են աղմուկի տարբեր աղբյուրներից, ինչպիսիք են 50...60 Հց բարձր լարվածության գծերը։



Նկ. 1. Համակարգի ձարտարապետություն

Նկ. 2. Իրական ԷՄԳ ազդանշան

Մյուս շատ կարևոր գործոնը, որը պետք է պահպանվի համապատասխան գրանցման համար, երկու էլեկտրոդների և այն տեղամասի միջև հեռավորությունն է, որտեղ նրանք տեղադրված են։ Գործընթացի ժամանակ համապատասխան նյութ և համապատասխան թանձր լուծույթ է վերցվում հիվանդի մաշկը մաքրելու համար՝ էլեկտրոդի և մաշկի միջև հպումը հստակեցնելու նպատակով։



Նկ. 3. Դիֆերենցիալ ուժեղացում

**ԷՄԳ ազդանշանների ուժեղացումը և զտումը։** Օգտագործվող ուժեղարար-ների գլխավոր բնութագրերը պետք է լինեն մուտքային մեծ դիմադրությունը և սինֆազ ազդանշանի թուլացման մեծ գործակիցը։ Նկ.3-ում ցույց է տրված դիֆերենցիալ ուժեղացման հիմնական գործընթացը։ Ելքային ազդանշանը արդյունք է հետաքրքրության տարածքում տեղադրված երկու էլեկտրոդների ազդանշանի տարբերությանը այն էլեկտրոդի ազդանշանի նկատմամբ, որը

տեղադրված է ոչ ակտիվ տեղամասում։ Նշենք, որ սինֆազ ազդանշանի մեծ թուլացման գործակցի պայմաններում, խոչընդոտ ազդանշանի, ինչպիսին է լարի շարժումը կամ 50...60 Հց ինդուկցիան, առկայության դեպքում, ելքային ազդանշանը ոչ մի փոփոխության չի ենթարկվի ։

ԷՄԳ ազդանշանից անցանկանալի բաղադրիչների հեռացմանը կարելի է հասնել թողունակության զտիչի միջոցով, որն ունակ է հեռացնելու ցածր հաձախականությունները (20 *Հց*ից ցածր), որոնք կապված են արտեֆակտի շարժումների հետ։ Որպես ԷՄԳ ազդանշանների հզորության սպեկտր, նախագծված սարքն օգտագործում է երկրորդ կարգի անցողիկության Բարտերուորտյան զտիչ։

**ԷՄԳ ազդանշանների մշակումը**։ ԷՄԳ ազդանշանի մշակումը ծայրահեղ դժվար խնդիր է։ Երբ աշխատում ես նման ազդանշանի հետ, միշտ պետք է հիշել, որ այն ստոխաստիկ գործընթաց է, կանոնների չի ենթարկվում, և նրա ձևը հաձախ փոփոխվում է [1]։

Աշխատանքի հիմնական նպատակն է՝ գտնել ազդանշանից տվյալների հանման Ճիշտ մեթոդաբանությունը,դրանք արհեստական նեյրոնային ցանցերի համար որպես մուտքային ազդանշաններ օգտագործելու համար։ Նեյրոնային ցանցերից ստացված արդյունքները կվիրառվեն՝ որոշելու համար, թե որ ֆունկցիաներն են պետք պրոթեզային վերջույթի համար։

Եթե ստացված ազդանշանը պարունակում է ոչ ակտիվ հատվածներ, կարևոր է գտնել, թե կոնկրետ որտեղից է սկսվում ԷՄԳ ակտիվությունը։ Դա պետք է անել ԷՄԳ ակտիվության սկիզբը փնտրելով և օգտագործելով կադրավորումը՝ Ճիշտ հատվածը (200 *մվ* կադր) առանձնացնելու համար։ ԷՄԳ ակտիվության սահմանները գտնելու մեր ռազմավարությունը հիմնված է ազդանշանի ցրման շեմային մեծության փնտրման վրա։

Հաջորդ քայլը ԷՄԳ ազդանշանից ձիշտ տվյալների որոշման հարցն է ։ Այդ տվյալները պետք է բավարար ինֆորմացիա պարունակեն ԷՄԳ ազդանշանը համապատասխան ձևով ներկայացնելու համար։ Սակայն պետք է հաշվի առնել, որ այս համակարգի գլխավոր նպատակը պրոթեզային սարքի կառավարման մաս լինելն է։ Իրական ժամանակային կառավարման հասնելու համար, տվյալների ստացման և հաշվարկների վրա ծախսվող ժամանակը պետք է հասցվի նվազագույնի։ Ազդանշանները մոդելավորելու համար օգտագործվում է ավտոռեգրեսիվ մոդելը (ԱՌ)։ Նման մոդելը մեզ հնարավորություն կտա մի քանի գործակիցների միջոցով ներկայացնել ԷՄԳ-ն։

**ԱՌ մոդել։** Ժամանակային շարքերը մասնակի մեծության՝ այս դեպքում՝ չմշակված ԷՄԳ ամպլիտուդի չափման հաջորդականություն են։

Ժամանակային շարքերը հիմնված են ազդանշանի մոդելավորման վրա՝ գուշակելու համար հետագա մեծությունները, ինչպիսիք են նրա նախկին մեծության գծային կոմբինացիան և ներկա մեծությունը։ Համակարգի՝ միայն նախորդ ելքային մեծությունների վրա հիմնված մոդելը կոչվում է ԱՌ մոդել։ Համակարգի միայն մուտքային մեծությունների վրա հիմնված մոդելը կոչվում է շարժվող միջին մոդել (ՇՄ)։ Եվ վերջապես, մոդելը, որը հիմնված է և մուտքային, և ելքային մեծությունների վրա, կոչվում է ավտոռեգրեսիվ-շարժվող-միջին մոդել (ԱՌՇՄ)։

ՇՄ-ի վերջնական հաշվով Առ մոդելը` տրված Ճշտության աստիՃանով, կարող է ապրոքսիմացնել ցանկացած մոդել [5]։

Ըստ պաշտոնական սահմանման, ԱՌ մոդելը գծային գուշակվող բանաձևերի մեծ խմբի մաս է, որով փորձ կարվի գուշակել նախորդ ելքայինների վրա հիմնված համակարգի ելքային ազդանշանը  $(\widehat{y}(n))$ ։ Գծային գուշակող մոդելի ստացումը ներառում է  $a_1, a_2, \ldots, a_m$  գործակիցները։ (1) հավասարումը նկարագրում է ԱՌ մոդելը .

$$\hat{y}(n) = \sum_{m=1}^{M} a_m(n) y(n-m) + e(n),$$
 (1)

որտեղ  $\hat{y}(n)$ -ը ենթադրվող ազդանշանն է ո պահին, a<sub>m</sub>-ը՝ ԱՌ գործակիցը, e(n)-ը՝ ենթադրվող սխալը, M-ը՝ մոդելի կարգը։

(1) հավասարումը ցույց է տալիս, որ, օրինակ, ժամանակային հաջորդականության 9-րդ ելքային մեծությունը մոդելացված 3-րդ կարգի ԱՌ մոդելով գուշակելու համար օգտվում ենք

$$\hat{y}(9) = a_1(9)y(9-1) + a_2(9)y(9-2) + a_3(9)y(9-3) + e(9)$$

հավասարումից։

ԱՌ գործակիցների հաշվման ընդհանուր ռազմավարությունը նվազագույն միջին քառակուսային սխալի ալգորիթմի կիրառումն է, ինչը հանգեցնում է ԱՌ մոդելի պարամետրերի հաշվման առավել արագ մեթոդի։ ԱՌ գործակիցները հաշվելու համար կատարում ենք հետևյալ քայլերը.

1) զտիչի գործակիցները բերել 0-ի,

2) հաշվել մուտքային y(n) ազդանշանի ենթադրվող  $\widehat{y}(n)$  մեծությունը՝

$$\widehat{y}(n) = \sum_{m=1}^{M} a_m(n) y(n-m)$$
, (2)

3) գնահատել ենթադրվող e(n) սխալը .

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n) = y(n) + a_1(n)y(n-1) + \dots + a_m(n)y(n-M), \quad (3)$$

4) նորացնել ԱՌ am գործակիցը՝ օգտագործելով համընկնման  $\mu$  հաստատունը՝

$$a_{m}(n+1) = a_{m}(n) - 2\mu e(n)y(n-m)$$
: (4)

Նշենք, որ ԱՌ գործակիցների հաշվման հիմնական գործընթացը այնքան էլ համալիր չէ, այն միայն գործիք է (4) բանաձևի կիրառման համար՝ բոլոր ԱՌ գործակիցները հաշվելու նպատակով։ Պրակտիկ չէ փնտրել µ-ի մեծությունը յուրաքանչյուր եզակի ԷՄԳ ազդանշանի համար։ Ըստ Հեֆֆտների [5], նպատակահարմար է համընկման հաստատունի համար կիրառել շատ փոքր մեծություն (0,001)։ Այդ դեպքում ԷՄԳ-ի ալգորիթմը ամբողջ ԷՄԳ տվյալների մշակման ընթացքում ցույց կտա շատ փոքր սխալներ։ Արդյունքում ԱՌ գործակիցները այնուհետև կօգտագործվեն նեյրոնային ցանցի դասակարգիչն ուսուցանելու համար։

ԱՌ գնահատումը առավել հստակեցնելու նպատակով իտերացվում է ԷՄԳ այգորիթմը՝ որպես ամբողջականություն։ Առաջին իտերացիայի ժամանակ ԱՌ գործակիցները որոշվում են որպես զրո, ինչպես նկարագրվել էր վերևում։ Առաջին ԱՌ գործակիցների գնահատումից հետո նոր իտերացիա է կատարվում` հաշվելու համար ԱՌ գործակիցները։ Երկրորդ իտերացիայի ժամանակ ԱՌ գործակիցները որոշվում են որպես առաջին իտերացիայի ժամանակ հաշվարկված մեծություններ։ Այս պրոցեսը շարունակվում է այնքան ժամանակ, մինչև իրական ազդանշանի և ենթադրվող ազդանշանի միջև իտերացիայի առավելագույն քանակ կամ նվազագույն սխալ ստանալը։ Նկ. 4-ի ա-ից դ-ն ցույց է տալիս, թե ինչպես կարող են ԱՌ գործակիցները փոփոխվել արմունկի շարժման յուրաքանչյուր տեսակի համար։ Յուրաքանչյուր նկար ցույց է տալիս 200 ԷՄԳ օրինակ, որոնք հավաքված են մեկ հոգուց` բաժանված ձեռքի շարժման չորս մասի (արմունկի ծալում, արմունկի բացում, դաստակի պրոնացիա, դաստակի սուպինացիա)։ ԷՄԳ ազդանշանները գրանցվում են հինգ զույգ էլեկտրոդների օգնությամբ, արդյունքում հինգ խումբ ազդանշաններ են մշակվում յուրաքանչյուր շարժման համար։ Նկ.4-ր ցույց է տալիս ԱՌ գործակցի արժեքը (Ամպլիտուդ)՝ կախված գործակիցների և ձեռքի շարժման քանակից։



դ)

Նկ. 4. ԱՌ գործակիցների փոփոխություններ իզոմետրիկ և իզոտոնիկ կծկումների համար՝ օգտագործելով 10 և 4 Ճշտության ԱՌ մոդելներ։ ա) Իզոմետրիկ կծկումներ՝ օգտագործելով 10 Ճշտության ԱՌ մոդել, բ) Իզոմետրիկ կծկումներ՝ օգտագործելով 4 Ճշտության ԱՌ մոդել, գ) Իզոտոնիկ կծկումներ՝ օգտագործելով 10 Ճշտության ԱՌ մոդել, դ) Իզոտոնիկ կծկումներ՝ օգտագործելով 4 Ճշտության ԱՌ մոդել

Քանի որ համակարգը պետք է օգտագործվի ԷՄԳ ազդանշանների հիման վրա արհեստական վերջույթը կառավարելու համար, դասակարգիչը պետք է ձանաչի իրական ժամանակում կծկման ցանկացած տեսակ։ Դասակարգիչը պետք է հնարավորություն ունենա սովորելու և ապա ձանաչելու ազդանշանները, որպես շարժման նույն դասի մաս (արմունկի բացում, արմունկի փակում, դաստակի ծալում, դաստակի պրոնացիա և սուպինացիա)։ Այդ պատձառով, դրա համար կօգտագործենք արհեստական նեյրոնային ցանցը, որպես դասակարգիչ՝ բոլոր պահանջնորը բավարարելու համար։

**ԷՄԳ ազդանշանների դասակարգիչ։** Դասակարգիչը համակարգի հիմնարար տարր է։ Այն պետք է Ճիշտ ազդանշան գեներացնի՝ պրոթեզային վերջույթը կառավարելու համար և, ինչքան հնարավոր է, արագագործ պետք է լինի։ Դասակարգչի՝ Ճիշտ պատասխաններ տալու Ճշտությունը կախված է ԷՄԳ ազդանշանի գրանցման և մշակման ժամանակ առաջացած անՃշտությունների մակարդակից, որն էլ, իր հերթին, էլեկտրոդների՝ մաշկի վրա սխալ տեղադրման արդյունք է։

Վերջույթների պրոթեզների կառավարող համակարգի մեջ օգտագործվելու համար դասակարգիչը պետք է մշակի և տա «պատասխաններ» իրական ժամանակում։

Այս պահանջներն իրագործելու համար որոշվեց կիրառել MLP Ճարտարապետության վրա հիմնված արհեստական նեյրոնային ցանցեր։ MLP Ճարտարապետությունը լավ ուսումնասիրված ռազմավարություն է և կիրառվել է տարբեր ուսումնասիրություններ կատարելիս։ MLP-ի ուսուցման մեթոդն օգտագործվում է ուսուցման գորընթացում։

Ինչպես ցույց է տրված նկ.5-ում, նեյրոնային ցանցը բաղկացած է մուտքային մակարդակում ո քանակի նեյրոններից (որտեղ ո –ը ԱՌ գործակցիների քանակն է(, 80 նեյրոններից՝ թաքնված մակարդակում և 4 նեյրոններից՝ ելքային մակարդակում (յուրաքանչյուրը՝ շարժման յուրաքանչյուր տեսակի համար(։ Թաքնված մակարդակում նեյրոնների քանակը որոշվում է տարբեր քանակի նեյրոնների փորձարկումից հետո։



Նկ.5. MLP նեյրոնային ցանց

MLP տոպոլոգիան կարող է պարունակել տարբեր թաքնված մակարդակներ։ Այնուամենայնիվ, համաձայն համապիտանի ապրոքսիմացիայի թեորեմի [3], միայն մեկ թաքնված մակարդակը բավարար է MLP ուսուցումն իրականացնելու համար։ Այս թեորեմը որոշում է թաքնված մակարդակների քանակը, բայց չի որոշում մակարդակում նեյրոնների քանակը (դա որոշվում է էմպիրիկ ձևով(։

ԷՄԳ դասակարգումը բաժանված է երկու մասի՝ուսուցում և կատարում։ Յուրաքանչյուր մաս

շարժման չորս դասից յուրաքանչյուրի համար ստանում է պատահական՝ ընտրված 25 օրինակից կազմված խումբ (100 օրինակ՝ ուսուցման և 100 օրինակ տեստի համար(։Օրինակները, որոնք կիրառվում են ուսուցման համար, չեն կարող կիրառվել կատարման համար և հակառակը։ Նշենք, որ գեներացումը արհեստական նեյրոնային ցանցերի կարևոր տարրերից է, և լավ գեներացիա իրականացնելու համար գլխավոր բաղադրյալը ուսուցման փուլն է։ Ուսուցման փուլում կանգնեցման երկու այլընտրանքային չափանիշներ են օգտագործվում.

ա) երբ սխալի գումարային միջին քառակուսայինը ստացվի 0,01,

բ) ուսուցումը կանգ առնի 100 պարբերությունից հետո։

Նեյրոնային ցանցի ուսուցման պարամետրերը հետևյալն են.

1) սևեռված ուսուցման կարգը (0,01),

2) սևեռված իմպուլսը (0),

3) երկակի սիգմոիդալ ակտիվացիայի ֆունկցիան բոլոր շերտերի համար,

4) քաշի պատահական ինիցիալիզացիան (0-ից 1),

5) ուսուցման օրինակների պատահական ներկայացում,

6) նպատակային վեկտորները։

Նեյրոնային ցանցն ուսուցանվում է՝ օգտագործելով ձեռքի շարժման չորս խմբերը (նկ. 4)։ Հաջող ուսուցանումից հետո նեյրոնային ցանցը ներկայացվում է ԷՄԳ օրինակների ձևով և փորձ է արվում գտնելու, թե որ շարժումներն են համապատասխանում յուրաքանչյուր նոր օրինակին։ Աղյուսակում ցույց են տրված ԷՄԳ դասակարգչի հաջողության կարգերը, երբ դասակարգվում են այս նոր ԷՄԳ ազդանշանները՝ օգտագործելով 4 և 10 Ճշտության ԱՌ մոդելները։

Ինչպես ցույց է տրված աղյուսակում, նեյրոնային ցանցը գտնում է Ճիշտ պատասխաններ յուրաքանչյուր եզակի իզոմետրիկ կծկման համար՝ մոդելացված 10-րդ կարգի ԱՌ մոդելով։

#### Աղյուսակ

Ձեռքի շարժման տեսակները							
Կծկման տեսակներ	Արմունկի բացում, %	Արմունկի փակում, %	Դաստակի սուպինացիա, %	Դաստակի պրոնացիա, %	Միջին ,%		
Իզոմետրիկ (4)	100	92	100	92	96		
Իզոմետրիկ(10)	100	100	100	100	100		
Իզոտոնիկ(4)	96	100	92	96	96		
Իզոտոնիկ(10)	84	100	100	96	95		

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Ակայ Մ.** Կենսաբժշկական ազդանշանի մշակում. Ակադեմիկական մամուլ, 1994։
- 2. Դե Լուկա 8.Հ. Մակերևութային էլեկտրոմիոգրաֆիա. Գրանցում և մշակում։ <u>www.delsys.com/emg.shtml</u>, 1996։
- 3. Հայկին Ս. Նեյրոնային ցանցեր.- Մակմիլան հրատարակչություն, 1994։
- 4. **Սոարես Ա.Բ., Բերզին Ֆ.** Իմպուլսային Z ազդանշանի օգնությամբ ԷՄԳ ազդանշանների սպեկտրային հաշվարկը // Էլեկտրոֆիզիոլոգիայի միջազգային միության 14-րդ կոնգրեսս. Վիեննա Ավստրիա, 2002։
- 5. Հեֆֆտներ Գ. ԷՄԳ-ն որպես կառավարող ազդանշան նեյրումկանային գրգռման համար։ Մաս 1 -Ավտոռեգրեսիվ մոդելը, որպես ԷՄԳ ազդանշանային տարբերակման հիմք։ IEEE ուսումնասիրությունները կենսաբժշկական Ճարտարագիտության մեջ.- 1988:

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.04.2007։

#### А.А. ДАЛЛАКЯН

### УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ МИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ

Одной из главных трудностей для тех, кто оснащен протезными устройствами, – большое умственное усилие, необходимое в течение первых стадий обучения. Работая с миоэлектрическим протезом, это усилие резко уменьшается. Система разработана на базе реальной программной и аппаратной частей для разработки электромиограммных (ЭМГ) сигналов. Связь между авторегрессивной моделью и нейронной сетью используется для дискриминации ЭМГ структур. Выходы нейронной сети используются для управления движениями виртуального протеза, который подражает реальной конечности.

*Ключевые слова*: электромиограмма, миоэлектрик, виртуальный протез, авторегрессивная модель, классификатор, фильтр Батерворта.

#### H.H. DALLAKYAN

#### THE CONTROL OF A SYSTEM OF MYOELECTRIC PROSTHETICS

One of the major difficulties faced by those who are fitted with prosthetic devices is the great mental effort needed during the first stages of training. When working with myoelectric prosthesis, that effort decreases dramatically. The system is based on a real hardware and software for detecting and processing electromyographic (EMG) signals. The association of autoregressive (AR) models and a neural network is used for EMG pattern discrimination. The outputs of the neural network are then used to control the movements of a virtual prosthesis that imitate the real limb.

*Keywords*: electromyogram, myoelectric, virtual prosthetic, autoregressive model, classifier, Butterworth filter.

#### ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

УДК.681.2087.6

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

#### Ю.Г. АГБАЛЯН

# РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПОЛОС СЕТИ ХАРТМАНА НА ЦВЕТНУЮ ФОТОПЛЕНКУ

Показана принципиальная возможность регистрации слабого СВЧ-излучения дециметрового диапазона ( $\lambda$ =3 и 21 *см*) на цветную фотопленку высокой чувствительности. Излучение с  $\lambda$ =3 *см* зарегистрировано от стандартного СВЧ-генератора при выходной мощности 6...10 *мВт* и экспозиции 6 *ч*. Предполагается, что возможным механизмом регистрации излучения является квазирезонансное поглощение энергии излучения на характеристической частоте релаксации молекул воды, находящейся в эмульсии и в желатине фотопленки.

*Ключевые слова*: сеть Хармана, СВЧ-излучение дециметрового диапазона, характеристическая частота релаксации.

Фоторегистрация полос решетки Хартмана, которые представляют собой высокочастотное излучение дециметрового диапазона [1], было осуществлено по методике, предложенной в [2]. В действительности фиксировалось не само СВЧ-излучение, а "мягкое" рентгеновское излучение стенок полосковой линии, по которым это излучение достигает Земли из Космоса, то есть его границы. Однако в некоторых случаях при длительных экспозициях удалось получить картину СВЧизлучения и между стенками. Для того чтобы отделить излучение рентгеновских стенок от излучения между стенками, была принята следующая схема (перископ) (рис.1). Излучение полосы 1 сети Хартмана, направленное сверху вниз, через отверстие в полиэтиленовой пластине 2 направляется на зеркало 3. От зеркала 3 отражается только высокочастотное излучение, идущее между рентгеновскими стенками, так как рентгеновское излучение может отразиться от проводящей поверхности под углом менее 1 градуса - в нашем же случае угол отражения равен 45°. Излучение рентгеновских стенок не проходит дальше на пленку и поглощается свинцовой пластиной, расположенной под зеркалом. Отраженное от зеркала 3 излучение попадает на зеркало 4 и, отразившись от него, направляется на кассету, внутри которой находится фотопленка 5. Таким образом, изображение высокочастотного излучения фиксируется только на участке В (рис.1). На участке С фиксируется изображение с рентгеновскими стенками (рис.2, участки В и С). Замена диффузных зеркал из алюминиевой фольги на обычные практически не изменила картину засветки, так как для дециметрового диапазона оба этих зеркала идентичны по своим отражающим свойствам, и в обоих случаях излучение, отраженное от плоского зеркала, рассеивалось, что присуще любому излучению.



Рис.1



Рис.2

Механизм фиксации сверхвысокочастотного излучения представляется следующим образом. Как известно, светочувствительный слой фотопленки на основе галогенидов серебра может зафиксировать излучение с длиной волны от 0,01 *нм* до 1200 *мкм*, а также корпускулярное излучение [3], т.е. свервысокочастотное излучение полос сети Хартмана в этот диапазон не входит (длина волны примерно 21 *см*).

Однако эмульсия фотопленки содержит 10...15% влаги, и в желатине, составляющем по весу 30...50 % от веса эмульсии, содержится еще 5...10% воды [4]. Характеристическая частота релаксации воды находится в СВЧ-диапазоне со слабо выраженным максимумом на частоте 2450  $M\Gamma q$  (12,7 см). На этой частоте работают микроволновые печи, и этот диапазон применяют при КВЧ-терапии, поэтому и на частоте 1420  $M\Gamma q$  (примерная частота излучения полос сети Хартмана) можно ожидать нагрева молекул воды в эмульсии, поскольку известно, что на частоте 1  $\Gamma T q$  вода поглощает примерно 50% мощности излучения, а на частоте 10  $\Gamma T q$  - 90% [4]. В результате нагрева воды в эмульсии образуется скрытое изображение и происходит косвенная фиксация излучения. Однако есть еще один механизм образования скрытого изображения. На пленке, которая использовалась с обычными зеркалами, были пробиты отверстия диаметром 0,3...0,5 мм. Внешний контур отверстия в пленке представляет собой короткозамкнутый виток, так как один из слоев пленки, предназначенный для нейтрализации статического заряда, - проводящий (графит), и мощность,

выделившаяся в короткозамкнутом витке, вызывает локальный нагрев эмульсии и кольцевую засветку вокруг отверстия (рис.3). Для подтверждения факта возможности регистрации излучения дециметрового диапазона на цветную фотопленку к кассете с фотопленкой был приклеен отрезок 3сантиметрового волновода, который присоединялся к выходному фланцу стандартного СВЧгенератора. При выходной мощности 6...10 *мВт* и частоте 10 *ГГц* экспозиция составила 6 *ч*, и на пленке было получено изображение СВЧ-излучения в сечении волновода (рис.4). Неоднородность цвета и неполное совпадение снимка с сечением волновода – возможно, результат перекоса соединительного фланца и неполного прилегания фотопленки к стенкам кассеты.



Рис.3



Рис.4

Таким образом, уникальные особенности цветной фотопленки и наличие механизма СВЧнагрева воды в эмульсии и желатине пленки дают возможность регистрации СВЧ-излучения на стандартной цветной пленке, что может оказаться полезным в различных исследованиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Schweitzer P. Geopathie. Ursache und Wirkung // Erfahrungsheilkunde. 1986, Bd35 n. S.801-802.
- **2.** Агбалян Ю. Патент РА N2082A2, класс G01, "Устройство для регистрации высокочастотного электромагнитного излучения: Официальный бюллетень промышленной собственности.- 2008. N1.
- 3. Редько А. Основы черно-белых и цветных фотопроцессов. М.: Искусство, 1990. 350 с.
- 4. **Сысоев В., Лукьянов Г., Серов И**. Влияние электромагнитного излучения на здоровье человека. www.aires.spb.ru.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.12.2007.

#### Յու.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ

#### ՀԱՐՏՄԱՆԻ ՅԱՆՅԻ ԴԵՅԻՄԵՏՐԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԳՐԱՆՅՈՒՄԸ ԳՈՒՆԱՎՈՐ ՖՈՏՈԺԱՊԱՎԵՆԻ ՎՐԱ

Տույց է տրված թույլ ԳԲՀ ձառագայթման դեցիմետրային տիրույթի (λ=3 և 21) գրանցման հնարավորությունը բարձր զգայունության գունավոր ֆոտոժապավենի վրա։ Ալիքի 3*սմ* երկարություն ունեցող ձառագայթը գրանցված է ստանդարտ ԳԲՀ գեներատորից, որն ունի 10*մՎտ* ելքային հզորություն` վեց ժամվա ընթացքում։ Ենթադրվում է, որ ձառագայթման գրանցման հնարավոր մեխանիզմը բարձր հաձախականության էներգիայի կլանումն է ֆոտոժապավենի էմուլսիայի և ժելատինի մեջ գտնվող ջրի մոլեկուլներով ռելաքսացիայի բնութագրական հաձախականության տիրույթում։

*Առանցքային բառեր.* Հարտմանի ցանց, ԳԲՀ ձառագայթում, դեցիմետրային տիրույթ, ռելաքսացիայի բնութագրական հաձախականություն։

#### Yu.G. AGHBALYAN

# REGISTRATION OF RADIATION DECIMETER RANGE HARTMANN NETWORK STRIPS ON THE COLOR FILM

The basic registration opportunyty of weak VHF radiation of a decimeter range ( $\lambda = 3$  and 21 *cm*) on a color film of high sensitivity is shown. Radiation with 3 *cm* wave length is registered from a standard VHF generator at the 6...10 *mW* power and the exposition of 6 hours. It is supposed that the possible registration mechanism of radiation is absorption energy of high-frequency radiation at characteristic frequency of relaxation for the water molecules which take place both in emulsion and in gelatine of a film.

*Keywords*. Hartmann network, VHB-radiation, decimeter range, characteristic frequency of relaxation.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, № 1.

ՀՏԴ 621.396.67:621.371

ՀԱՄԱՌՈՏ ՀԱՂՈՐԴՈՒՄ

#### Վ.ባ. ՀԵՐበՒՆԻ

# ՏԱՐԲԵՐ ՄԱԿԵՐԵՄՆԵՐ ՈՒՆԵՑՈՂ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ՑՐՄԱՆ ԳՈՐԾՈՂ ՄԱԿԵՐԵՍԻ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐԸ

Ռադիոհոլոգրաֆիկ մեթոդի ուղղություններից մեկի՝ անտենայի պարամետրերի և օբյեկտների ցրման գործող մակերեսի (ՑԳՄ) մոտիկ տիրույթում չափումների զարգացման նպատակով առաջին անգամ փորձ է կատարվել ինքնաթիռի երկու մոդելների վրա՝ չափելով նրանց ՑԳՄ-ն մոտիկ տիրույթում։ Մոդելները Ճառագայթվել են դիմացից, տակից, կողքից՝ կալիմատորային անտենայի միջոցով։ Ֆուրյեի ձևափոխությունից հետո կատարվել է ՑԳՄ-ի հաշվարկ երկու մոդելների համար և համեմատվել։

*Առանցքային բառեր.* ցրման գործող մակերես (ՑԳՄ), ռադիոհալագրաֆիկ մեթոդ, հեռավոր տիրույթ, մոտիկ տիրույթ, ուժեղացման գործակից (ՈՒԳ), Ֆուրյեի երկչափ ձևափոխություն։

ծրման գործող մակերեսը (ծԳՄ) օբյեկտի հիմնական բնութագրերից մեկն է և կախված է օբյեկտի չափերից, ռադիոալիքների անդրադարձման գործակցից և այլն։ Այդ հետազոտությունների (չափումների) վրա ծախսվում են շատ մեծ գումարներ, քանի որ ծԳՄ-ն չափվում է օբյեկտի հեռավոր տիրույթում։ Ընդ որում` փորձերը շարունակվում են մինչև նվազագույն ծԳՄ-ը ստանալը։ ծԳՄ-ն որոշելու համար չափվում են գնդաձև մարմինների ծԳՄ-ն, որը նախապես հայտնի է։ Այս բոլորը պահանջում է հսկա չափիչ պոլիգոններ, երկար ժամանակ և մեծ ծախսեր։

Աշխատանքում ներկայացվում է օբյեկտների ՑԳՄ-ի չափման նոր ռադիոհոլոգրաֆիկ մեթոդ, որի հիմքում ընկած է 1965 թ.-ին Պ. Մ. Հերունու կողմից ստեղծված գիտության մեջ նոր՝ Ռադիո հոլոգրաֆիա ուղղությունը [1,2], հետագայում նաև օբյեկտների ՑԳՄ-ի չափման նոր մեթոդներ [3]։ Այս մեթոդը հնարավորություն է տալիս չափել ՑԳՄ-ն օբյեկտների մոտիկ տիրույթում, ինչը կտրուկ պակասեցնում է չափման համար անհրաժեշտ ժամանակը և ծախսերը։

Նախապես կատարվել էին պարաբոլիկ անտենայի ՑԳՄ-ի չափումները մոտիկ տիրույթում [4,5], ինչպես նաև մետաղյա գնդի մոտիկ տիրույթում [6]։

Որպես օբյեկտ օգտագործվել են երկու միանման ինքնաթիռների մոդելներ ("Air Bus" GY 9088) 62 *ամ* երկարությամբ, 58 *ամ* լայնությամբ, որոնցից մեկը պատված է մետաղական արտաքին շերտով, իսկ մյուսը՝ ռադիոալիքներ կլանող հատուկ նյութով։ Փորձը կատարվել է մոտիկ տիրույթում չափող ռադիոհոլոգրաֆիկ համակարգի օգնությամբ։ Ալիքի երկարությունը  $\lambda = 3$  *ամ*, կալիմատորային անտենայի բացվածքը D=75 *ամ*, սսկաների հորիզոնական շարժման չափը՝ 3,8 *մ*, ուղղահայաց շարժման չափը 2,5 *մ*, շարժական չափող զոնդի չափերը 23x10 *մմ*, համակարգիչ։ Արդյունքների Ֆուրյեի ձևափոխումը մոտիկից հեռու տիրույթ կատարվում է համակարգչում (նկ. 1)։

Հետազոտվող ինքնաթիռի մոդելը և մոտակա տիրույթում չափիչ ռադիոհոլոգրաֆիկ համակարգի ռադիոալիքի մասը տեղադրված է անարձագանք սենյակում։ Օբյեկտը Ճառագայթվում է զուգահեռ ալիքի փնջով, որը ստանում ենք կոլիմատորային անտենայի միջոցով ընդունիչ։ Անտենայի բացվածքի առջև տեղադրվում է շարժական զոնդը։ Վերջինս զոնդին տալիս է մատրիցի կոորդինատները, ստանում տվյալ կետի համար ամպլիտուդը ու ֆազը, որից հետո, համակարգչում կատարելով Ֆուրյեի երկչափ ձևափոխություն, ստացվում է փորձարկվող ինքնաթիռի մոդելի անդրադարձված ալիքների դիագրամը հեռավոր տիրույթում (նկ. 2)։



Նկ. 1. Չափող ռադիոհոլոգրաֆիկ համակարգ

1 - փորձարկվող ինքնաթիռի մոդել ("Air Bus" GY 9088 ), 2 - չափիչ զոնդ (ալիքատարի բաց ծայր), 3 զոնդը տեղափոխող սկաներ, 4 - Ճկուն, կոակսիալ, գերբարձր համախականային կաբել, 5 պարաբոլիկ կալիմատորային մառագայթող անտենա, 6 - ազդանշանի մոդուլյատոր, 7 - ԳԲՀ գեներատոր, 10 *ԳՀց* համախականությամբ, 8 - ԳԲՀ ամպլիֆազոմետրիկ ընդունիչ, 9 - ԳԲՀ ազդանշանի հենարանային տրակտ, 10 - ստտենյուատոր, 11 - ցածր համախականային դեմոդուլյատոր, 12 - ազդանշանի ավտոմատիկայի կառավարման բլոկ,

13 - անալոգա-թվային ձևափոխիչ, 14 - համակարգիչ տպիչով



Նկ. 2. Մոդելների` կողքից դիտված հեռավոր տիրույթի դաշտի դիագրամները նորմավորված մեկ առանցքի վրա։ Առաջին դիագրամը վերաբերում է մետաղական արտաքին շերտով պատված ինքնաթիռի մոդելի, երկրորդը` ռադիոալիք կլանող հատուկ նյութով պատված ինքնաթիռի մոդելին

Դիագրամի միջոցով կարող ենք ստանալ ուժեղացման գործակիցը (ՈւԳ), այնուհետև հաշվարկային բանաձևով կարելի է ստանալ արդյունարար մակերեսը՝  ${f S}_{ts}$ , որն էլ հավասար է ՑԳՄ-ին։

Փորձում կատարվել են երկու ինքնառիթների մոդելների չափումները դիմացից, տակից և կողքից՝ E և H հարթությունների համար։ Հաշվարկվել են ՑԳՄ-ները և համեմատվել։ Ինչպես երևում է նկ. 2-ից՝ ռադիոալիք կլանող հատուկ նյութով ծածկված օբյեկտի ՑԳՄ-ն բոլոր ուղղություններով մոտ 100 անգամ ավելի փոքր է, քան մետաղականինը։

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Геруни П.М.** и др. Поле круглого и прямоугольного отверстий в дальней зоне// РТЭ.- М., 1965.- Т.10, N 9. С. 1594-1599.
- 2. **Геруни П.М.** Устройство для измерения параметров остронаправленных излучателей// А.с. СССР, N 534128, Приоритет 1971г.
- 3. **Геруни П.М.** Способ определения Геруни (варианты) параметров объектов и антенн, рассеивающих электромагнитные волны// Патент Республики Армения, N1138, Приоритет 26.07.2001г. (на арм. яз.).
- 4. Геруни В.П. Об измерениях параметров антенн в ближней зоне// Вестник МАНЭБ -2006. Т.2, N 8. С. 92-93.
- 5. **Геруни В.П.** Измерение эффективной площади рассеяния антенн и объектов в дальней и ближней зонах// Сборник материалов годичной научной конференции Государственного инженерного университета Армении. - Ереван, 2006. (Том 2). - С. 509-511 (на арм. яз.).
- 6. **Геруни В.П.** Измерение эффективной плошади рассеяния шара в ближией зоне // Вестник МАНЭБ. -2007. Т.12, N 4. С. 127-129.
- ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 17.07.2007.

#### В.П. ГЕРУНИ

# ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ Объектов с разными покрытиями

Для развития новых радиоголографических методов измерения параметров антенн и ЭПР объектов в их ближней зоне впервые проведён эксперимент по измерению ЭПР в ближней зоне с двумя экспериментальными моделями самолета. Модели излучались сверху, снизу, сбоку с помощью параболической коллиматорной антенны. После преобразования Фурье сделан расчет ЭПР для двух моделей и проведено их сравнение.

*Ключевые слова:* эффективная площадь рассеяния (ЭПР), дальняя зона, ближняя зона, радиоголография, двумерное Фурье - преобразование, коэффициент усиления (КУ).

#### V.P. HERUNI

# COMPARISON OF THE SCATTERING CROSS SECTION OF OBJECTS HAVING DIFFERENT COVERINGS

To develop new radioholographic methods of measurements of the antenna parameters in Near Field and scattering cross section (SCS) of the objects in their near field, the first experiments to measure the SCS in the near field of the two experimental models of aircrafts are performed. The models are radiated from different sides: front, down, left or right sides by collimator (paraboloid antenna). After Fourie transform the calculation of SCS for the two models is performed and compared.

*Keywords: s*cattering cross section, radioholographic methods, far field (FF), near field (NF), Fourie – transform, gain factor.

#### ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2008. Т. LXI, №1.

УДК 389.658.56

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

#### З.А. БАБАЯН , Э.Л. ИГНАТЯН

# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА БЛЕСКОМЕРОВ НИИКС БМ-З ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ПОЛИРОВАННОСТИ КАМЕННЫХ ПЛИТ

Рассмотрен метод сравнения закона распределения случайной последовательности, разработанный для статистического моделирования и оценки погрешностей цифрового измерительного тракта блескомеров, позволяющий получать результаты с высокой скоростью в режиме накопления. Дана оценка необходимого объема выборки для получения достоверных результатов.

*Ключевые слова*: блескомер, цифровой измерительный тракт, контроль качества полированности, погрешность.

Компьютерная имитация случайных условий измерения позволяет реально оценить степень влияния каждого элемента блескомерного тракта, как аналогового, так и цифрового, на общую погрешность измерения прибора еще на стадии разработки путем численного моделирования прохождения случайного сигнала через аналого-цифровое преобразование информации в измерительном тракте. При всем разнообразии случайных распределений исходным является равномерное, из которого с помощью функциональных преобразований можно создать статистическое распределение. К основным требованиям, предъявляемым к разрабатываемой методике и алгоритму, относятся:

- высокое быстродействие алгоритма с возможностью работы в режиме реального времени и обработка данных во время их поступления при скорости исходного потока до 10 *Мбит/с*, критерий оценки распределения должен иметь пороговый уровень;
- простота программной реализации в алгоритмическом, системотехническом и аппаратном аспектах [1-5].

В качестве главного критерия оценки степени соответствия закона случайной последовательности равномерному можно использовать числовую характеристику, показывающую половину отношения разброса количества чисел к его среднему значению:

$$\varepsilon = \frac{\max(N_i) - \min(N_i)}{2\overline{N}}$$

где  $\epsilon$  - численное значение критерия; N<sub>i</sub> – количество вхождения числа і в последовательность; N - среднее количество чисел.

	Значение N, <i>байт</i> , при Р						
ε	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99	0,997	
10 <sup>-3</sup>	4,1·10 <sup>3</sup>	6,3·10 <sup>3</sup>	1,1.104	1,5·10 <sup>4</sup>	2,6.104	3,4.104	
10 <sup>-4</sup>	4,1.105	6,3·10 <sup>5</sup>	1,1.106	1,5.106	2,6.106	3,4.106	
10 <sup>-5</sup>	4,1.107	6,3·10 <sup>7</sup>	1,1·10 <sup>8</sup>	1,5·10 <sup>8</sup>	2,6·10 <sup>8</sup>	3,4.108	
10 <sup>-6</sup>	4,18·10 <sup>9</sup>	6,39·10 <sup>9</sup>	1,05·10 <sup>9</sup>	1,49·10 <sup>10</sup>	2,58·10 <sup>10</sup>	3,4·10 <sup>10</sup>	

Таблица 1 Расчетное значение необходимого количества N для разных точностей и вероятностей

Из табл. 1 следует, что необходимая для анализа длина последовательности зависит как от требуе  $\varepsilon$  мого отклонения, так и от требуемой вероятности Р. Так, при Р = 0,997 необходимый объем выборки N изменяется на 6 пор<sup>яд</sup>ков- с 3,4<sup>1</sup>04 *до* 3,43·1010 байт.

В дальнейшем будем предполагать, что исходный поток данных должен содержать в себе последовательность чисел в диапазоне 89...90 % включительно, распределенных равномерно (полированность облицовочных плит указанной методики из мрамора с номинальным значением 90% и допускаемой погре шностью 1,5 %).

Предлагаемый метод разработан для определения отклонения закона статистического распределения некоторой числовой последовательности от некоторого теоретического в режиме реального времени при высоком темпе данных. Отличительной особенностью метода является отсутствие необходимости проведения расчета для всей последовательности при добавлении к ней одного или нескольких новых значений. Таким образом, метод моментов дает возможность вести обработку данных непосредственно в процессе измерения. Количество проводимых вычислений для каждого нового значения будет постоянным при выборке

любой величины.

Вычисление начальных моментов для дискретной величины X может быть выполнено по алгоритму с накоплением суммы. Пусть  $m_x$  – математическое ожидание случайной величины x в конкретной реализации из N экспериментов; x<sub>i</sub> - частота появления события  $P_i = N_i / N$ , где  $N_i$  - число появления события x<sub>i</sub>.

Тогда математическое ожидание будет

$$m_{x} = \sum_{i=1}^{N} x_{i} P_{i} = (x_{1} N_{1} + x_{2} N_{2} + \dots + x_{i} N_{i} + \dots + x_{N} N_{N}) / N$$

При появлении в данной реализации еще одного события xi математическое ожидание преобразуется в вид

$$\mathbf{m}'_{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}_{1}\mathbf{N}_{1} + \mathbf{x}_{2}\mathbf{N}_{2} + \dots + \mathbf{x}_{i}(\mathbf{N}_{i} + 1) + \dots + \mathbf{x}_{N}\mathbf{N}_{N})/N + 1.$$

Окончательное выражение для определения математического ожидания с накоплением запишем в виде (по центру)

$$m'_{x} = \frac{N_{m_{x}} + x_{i}}{N+1}.$$
 (1)

При определении степени приближения закона распределения к теоретическому нельзя добиться полного равенства значений начальных моментов. В этом случае необходимо построить функцию невязки:

$$\mathbf{R}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2 \cdots, \mathbf{a}_M, \mathbf{a}_1^{\mathrm{T}}, \mathbf{a}_2^{\mathrm{T}}, \cdots, \mathbf{M}_M^{\mathrm{T}}),$$

где ам – значение *к* – го начального момента для реализации, вычисленное по (1);  $a_1^T$  - значение i – го начального момента для закона распределения, выбранного в качестве эталонного, рассчитанное теоретически (аналитически либо численно); М – число моментов, выбранных для сравнения. В качестве параметра оценки отклонения двух распределений выберем число S, определяемое в виде

$$S = \sum_{k=1}^{M} \sqrt[k]{a_{i} - a_{i}^{T}}.$$
 (2)

Таким образом, при S, стремящемся к нулю, закон распределения в реализации случайной величины стремится к выбранному в качестве эталонного закону распределения.

После сравнения двух распределений – теоретического  $x^{T}$  с рядом вероятности  $P_{i}^{T} = P^{T}(x_{i})$  и реального *x* с рядом вероятности, а также определения  $\Delta P_{i} = P_{i}^{T} - P_{i}$  и рассмотрения случая сравнения закона распределения исследуемой последовательности с равномерным в интервале (89...92) имеем

$$\mathbf{S} \leq \sum_{k=1}^{M} \sqrt[k]{\sum_{i=0}^{\infty} \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{x}_{i}^{k}} = \sum_{k=1}^{M} \sqrt[k]{\boldsymbol{\varepsilon} \sum_{i=89}^{92} \mathbf{x}^{k}}$$

Таким образом, можно построить функцию пороговой суммы  $S_{\text{пор}}$  в зависимости от  $\varepsilon$  и M такую, что если параметры оценки  $S < S_{\text{пор}}$ , то отклонение функции распределения  $|f(x) - f^{T}(x)| < \varepsilon$  будет

$$S_{nop} = \sum_{k=1}^{M} \sqrt{\sum_{i=89}^{92} X^{k}}$$
.

Предложенный метод оценки равномерности распределения случайной последовательности позволяет определить отклонения от равномерности  $\mathcal{E} = 10^{-3}$  и  $10^{-5}$  в больших массивных числах в реальном времени, что дает возможность осуществлять статистическое моделирование сложных случайных распределений при имитации работы блескомера (табл.2).

#### Таблица 2

Интервал,	Средн.	Час-	$f_i \cdot \overline{x}_i$	$x_i - \overline{x}$	$(x_i - \overline{x})^2$	$(x_i - \overline{x}) \cdot f_i^2$
MM	размер	тота,				< <i>i</i> > 51
	$\overline{x}_i$ , MM	$f_i$				
8989,50	89,25	2	178,50	- 0,75	0,5625	1,1250
89,590,0	89,75	45	4038,75	- 0,25	0,0625	2,7125
90,090,5	90,25	47	4241,75	+ 0,25	0,0625	2,9375
90,591,0	90,75	2	181,50	+ 0,75	0,5625	1,1250
91,091,5	91,25	2	182,50	+1,25	1,3225	2,6450
91,592,0	91,75	2	183,50	+1,75	3,0625	6,1250
$\overline{x} = 9000$ (=100 9006,5-90,05 (=15,67						
$\overline{\mathbf{x}} = \frac{\sum \mathbf{f}_{i} \cdot \mathbf{x}_{i}}{\sum \mathbf{f}_{i}}; \ \mathbf{S} = \sqrt{\frac{\Sigma(\mathbf{x}_{i} - \overline{\mathbf{x}})^{2} \cdot \mathbf{f}_{i}}{\Sigma \mathbf{f}_{i}}} = \sqrt{\frac{15,67}{100}} = \sqrt{0,156} = 0,39$						

Распределение полированности облицовочных плит по блеску с номиналом 90 % блеска в выборке (коелгинский мрамор)

Здесь *S* =0,39, что свидетельствует о точности измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Вентцель Е. С., Овчаренко Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные применения. М.: Высшая школа, 2000.- 400 с.
- 2. ГОСТ РИСО/МЭК 9126-93 «Информационная технология. Оценка погрешностей продукции». Характеристики качества и руководство по их применению.
- 3. МИ 2891-2004 «ГСИ. Общее требование к программному обеспечению средств измерений».
- 4. МИ 2174-91 «ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения».
- 5. **Бабаян З.А.** Методика выполнения измерений с применением автоматизированных информационноизмерительных систем // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2007. - Т.60, № 3. – С. 423-432.

НПП ГЗАО «Камень и Силикаты». Материал поступил в редакцию 15.05.2007.

#### Ձ.Ա. ԲԱԲԱՅԱՆ, Է.Լ. ԻԳՆԱՏՅԱՆ

# ՓԱՅԼԱՉԱՓԻՉ ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՓԱՅԼԵՑՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՈՐԱԿԻ ՎԵՐԱՀՍԿՈՒՄԸ՝ ՄԽԱԼԱՆՔՆԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՉՎՓԻՉ ՏՐԱԿՏԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ

Դիտարկված է պատահական հաջորդականության բաշխման օրենքի մեթոդի համեմատումը ենթադրվող տեսականի հետ, որը մշակված է վիձակագրական մոդելավորման և փայլաչափիչի թվային չափիչ տրակտով՝ սխալանքների գնահատման համար, որոնք հնարավորություն են տալիս կուտակման ռեժիմում ստանալ արագընթաց արդյունքներ։ Ճշգրիտ արդյունքների ստացման համար ընտրանիի անհրաժեշտ ծավալի գնահատում է անցկացված։

**Առանցքային բառեր.** փայլաչափիչ, թվային չափիչ տրակտ, փայլեցվածության որակի հսկում, սխալանք։

#### Z.A. BABAYAN, E.L. IGNATYAN

#### ESTIMATION METHOD OF DIGITAL MEASURING LUSTREMETER TRACT ON QUALITY CONTROL OF GRANITE SLAB POLISHNESS

A comparison method of random sequences of distribution law with supposed theoretical ones, developed for statistic modelling and error estimation of the digital measuring unit of opticalelectronic (lustremeter) instruments allowing to obtain results with high velocity in accumulation mode is considered. Estimation for a sample volume to obtain reliable results is given.

*Keywords:* lustremeter, digital measuring tract, polishness quality control, error.

# ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Վ.Վ., ԽԱՉԻԿՅԱՆ Լ.Է.	
ԳԵՐՀԱՂՈՐԴԻՉ - ՖԵՌՈԷԼԵԿՏՐԻԿ ԿՈՆՏԱԿՏԻ C ≈ ք ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅԱՆ	
ՀԱՎԱՆԱԿԱՆ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՊԱՏՃԱՌՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ	93
FULLIUULISUU L.Y., YUSULSUU P.U., ESLUULSUU 9.9.	
ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՏԵՍԱՆԵԼԻ ՏԻՐՈՒՅԹՈՒՄ ԹԱՓԱՆՑԻԿ ՄԵՏԱՂ-ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ	
ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ	101
ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Դ.Լ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ա.Օ., ԲԱՂՐԱՄՅԱՆ Բ.Է.	
ՔՐՈՍ-ԿՈՐԵԼՅԱՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ՏԵՐԱՀԵՐՑԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍԻ	
ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՊՐՈՖԻԼԻ ՃՇՏՈՒԹՅՈՒՆԸ	109
ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ Ս.Գ., ԱԲԳԱՐՅԱՆ Ս.Վ., ԴԱՎԹՅԱՆ Ա.Կ., ՓԻԼՈՒՆՅ Ս.Ռ.	
ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾ	
ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ԿԱՆԽԱԳՈՒՇԱԿԻՉ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ	120
ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ Բ.Ս., ՔՐԻՍՏԱՖՈՐՅԱՆ Է.Ս., ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ Ա.Բ.,	
LUCUBUU U.L., NESCOUBUU U.H.	
ո ՓՈՓԽԱԿԱՆՆԵՐՈՎ ՖՈԻՆԿՑԻԱՅԻ ՕՊՏԻՄՈՒՄԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԻ	
ՄՈՏԵՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ	129
ԲՈԶՈՅԱՆ Շ.Ե., ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Վ.Ս., ՔՈՉԱՐՈՎ Դ.Ա., ԲԱԴԱԼՅԱՆ Ն.Վ.	
ԲՈՒԼՅԱՆ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ԲՈՒԼՅԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐԻ	
ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԱԿՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԽԵՄԱՅԻ	
ԱԿՏԻՎ ՄԱՍԻ ԱՆՋԱՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	137
GUUNUISUV O.V., YULAUVSUV V.U.	
ԲԱԶՄԱՉԱՓ ՑԻՐԿՈՒԼՅԱՆՏ ԵՎ ՀԱԿԱՑԻՐԿՈՒԼՅԱՆՏ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԱՐԳԱ-	
ՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՐՄԱՏԱՅԻՆ ՀԵՏԱԳԾԵՐԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ	147
ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ Հ.Հ.	
ՄԻՈԷԼԵԿՏՐԻԿ ՊՐՈԹԵԶՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՌԱՎԱՐՈՒՄԸ	158
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Յու.Գ.	
ՀԱՐՏՄԱՆԻ ՑԱՆՑԻ ԴԵՑԻՄԵՏՐԱՅԻՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ	
ԳՐԱՆՑՈՒՄԸ ԳՈՒՆԱՎՈՐ ՖՈՏՈԺԱՊԱՎԵՆԻ ՎՐԱ	166
ረԵՐՈՒՆԻ Վ.¶.	
ՏԱՐԲԵՐ ՄԱԿԵՐԵՍՆԵՐ ՈՒՆԵՑՈՂ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ՑՐՄԱՆ ԳՈՐԾՈՂ	
ՄԱԿԵՐԵՍԻ ՉԱՓՈՒՄՆԵՐԸ	170
FUFU3UV Q.U., ÞAVUS3UV F.I.	
ՓԱՅԼԱՉԱՓԻՉ ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՓԱՅԼԵՑՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ՈՐԱԿԻ	
ՎԵՐԱՀՍԿՈՒՄԸ՝ ՍԽԱԼԱՆՔՆԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՉԱՓԻՉ ՏՐԱԿՏԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ	174
## СОДЕРЖАНИЕ

МУСАЕЛЯН Г.В., АРУТЮНЯН Э.Ж.	
РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КУЗОВА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ	
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	3
МАРТИРОСЯН В.А., ГУКАСЯН Ж.Г., ЗАКАРЯН К.Л., АКОПЯН Н.Н., САСУНЦЯН	
М.Э.	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ Ti-Al В	
ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ВОССТАНОВИТЕЛЯ ПРИ	
АЛЮМИНОТЕРМИЧЕСКОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ РУТИЛА	9
АГБАЛЯН С.Г., ФРАНГУЛЯН А.А., АПОЯН Т.Г., КАЗАРЯН А.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТЖИГА ГЕМАТИТОВЫХ РУД И	
СИЛИКАТООБРАЗУЮЩИХ РЕАКЦИЙ	18
ОВСЕПЯН С.Г., АРАКЕЛОВ Г.А.	
НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ	
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛОГИХ И КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ	
	26
ХАЧАТРЯН В.С., БАДАЛЯН Н.П., ХАЧАТРЯН К.В., ГРИГОРЯН С.Э., МНАЦАКАНЯН	
М.А., ТОХУНЦ А.Р., ГУЛЯН А.Г.	
ПОСТРОЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ Z МАТРИЦЫ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ	
ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ	34
АКОПДЖАНЯН Г.Д., САФАРЯН В.С.	
НОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РЕЖИМ РАБОТЫ	
ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ	47
АТОЯН В.В., ТОНОЯН В.А.	
УСТАНОВКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ КАБЕЛЬНОЙ КАТАНКИ	53
ПОГОСЯН Ш.В.	
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	
НАДЕЖНОСТЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВТОРОГО БЛОКА АРМЯНСКОЙ АЭС	
	59
ТУМАНЯН А.А.	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СТАНЦИИ С КОНЦЕНТРАТОРОМ	
ИЗЛУЧЕНИЯ, РАЗРАБОТКА РАБОЧЕЙ МОДЕЛИ И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ	70
	70
ΔΗΔΠΑΆ DESOHAHCHOFO ΙΔΗΡΕΦΤΟΡΑ C SAVDLITTINA DVO TOM TTO	
АПАЛИЗ ГЕЗОПАЛСЛОГО ИПВЕГТОГА С ЗАКРВІТВІМ ВАОДОМ ДЛЯ ИНПУКЦИЛИНОГО НАГВЕВА	78
ΝΠΑΥΚΥΝΟΠΠΟΙ Ο ΠΑΙ ΓΕΔΑ	70
СПОСОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ ЭЛЕКТРИЗОВАННЫХ УКИЛКОСТЕЙ В ЕМИОСТИХ	QQ
ΛΥΙΔΚΟΓΙΕΝ Β ΕΝΙΚΟΓΙΧΑ	00

## БУНИАТЯН В.В., ХАЧИКЯН Л.Э.

О ВОЗМОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИЧИНАХ ЗАВИСИМОСТИ С ~ f в
СТРУКТУРАХ ТИПА СВЕРХПРОВОДНИК / ФЕРРОЭЛЕКТРИК
БАГДАСАРЯН О.В., КНЯЗЯН Т.М., ЭЙРАМДЖЯН Г.Г.
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ, ПРОЗРАЧНОЙ В ВИДИМОМ
ДИАПАЗОНЕ ВОЛН
ОГАНЕСЯН Д.Л., ВАРДАНЯН А.О., БАГРАМЯН Б.Э.
КОРРЕКТНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИМПУЛЬСА С ПОМОЩЬЮ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОН-
НОГО МЕТОДА
КЮРЕГЯН С.Г., АБГАРЯН С.В., ДАВТЯН А.К., ПИЛУНЦ С.Р.
ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ МЕТОДОМ
ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ 120
БАЛАСАНЯН Б.С., ХРИСТАФОРЯН Э.С., БАЛАСАНЯН А.Б.,
ГАРАЯН А.В., ПЕТРОСЯН М.Ж.
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОИСКУ ОПТИМУМА ДЛЯ ФУНКЦИЙ n
ПЕРЕМЕННЫХ
БОЗОЯН Ш.Е., ЕГИАЗАРЯН В.С., КОЧАРОВ Д.А., БАДАЛЯН Н.В.
ПРИМЕНЕНИЕ БУЛЕВЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛОВ И АКТИВНОСТЕЙ
ПЕРЕМЕННЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ
ЧАСТИ СХЕМЫ 137
ГАСПАРЯН О.Н., ВАРДАНЯН Н.А.
О ТРАЕКТОРИЯХ КОРНЕЙ ЦИРКУЛЯНТНЫХ И АНТИЦИРКУЛЯНТНЫХ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ 147
ДАЛЛАКЯН А.А.
УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ МИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ 158
АГБАЛЯН Ю.Г.
РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ПОЛОС СЕТИ ХАРТМАНА НА ЦВЕТНУЮ ФОТОПЛЕНКУ 166
ГЕРУНИ В.П.
ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ
ОБЪЕКТОВ С РАЗНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ 170
БАБАЯН З.А., ИГНАТЯН Э.Л.
ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА
БЛЕСКОМЕРОВ НИИКС БМ-З ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА
ПОЛИРОВАННОСТИ КАМЕННЫХ ПЛИТ 174

## CONTENTS

MUSAYELYAN G.V., HARUTYUNYAN E.J.	
CONSTRUCTION OF COMPUTATIONAL MODEL OF AN AUTOMOBILE	
BODY BY METHOD OF FINITE ELEMENTS	3
MARTIROSYAN V.A., GHUKASYAN Zh.H.,	
ZAKARYAN K.L., HAKOPYAN N.N., SASUNTSYAN M.E.	
STRUCTURAL FORMATION STUDIES IN THE TI-AI SYSTEM DEPENDING	
ON REDUCER QUANTITY FOR ALUMINOTHERMY RUTILE REDUCTION	9
AGHBALYAN S.G., FRANGULYAN A.A., APOYAN T.G.,	
KHAZARYAN A.N.	
INVESTIGATION OF THE ANNEALING PROCESS OF HAEMITITE ORES	
AND SILICATE FORMATING REACTIONS	18
HOVSEPYAN S.G., ARAKELOV G.A.	
NEW METHOD FORMING BOARDS OF OPEN-PITS FOR MINING	
DEPOSITS OF CANOPY AND STEEPLY DIPPING ORE BODIES	26
KHACHATRYAN V.S., BADALYAN N.P., KHACHATRYAN K.V.,	
GRIGORYAN S.E., MNATSAKANYAN M.A., TOKHUNTS A.R.,	
GHULYAN A.G.	
Z CONSTRUCTION AND CORRECTION OF THE MATRIX OF THE	
GENERALIZED PARAMETERS OF THE ELECTRIC NETWORK IN VIEW OF	
COMPLEX FACTORS FOR TRANSFORMATION OF TRANSFORMERS	34
HAKOBJANYAN G.D., SAFARYAN V.S.	
NEW RELATIONSHIP CHARACTERIZING MODE OF OPERATION FOR	. –
	47
AIOYAN V.V., IONOYAN V.A.	- 0
A SETUP FOR CONTINUOUS CASTS OF CABLE ROD	53
POGHOSYAN Sh.V.	
RESULT ANALYSIS OF EQUIPMENT RELIABILITY MANAGEMENT	
SYSTEMS APPLICATION FOR ARMENIAN NPP UNIT 2	59
IUMANYAN A.A.	
PHOTOELECTROTHERMAL PLANT DESIGN WITH CONCENTRATE OF	
EMISSION, DEVELOPMENT AND TESTING OF WORKING MODEL	70
ANALYSIS OF FLECTROMACNETIC DROCESSES IN DESCMANT	
	70
	78
THE WAT OF PREVENTING SPARK DISCHARGES OF ELECTRIFIED	00
	88

## BUNIATYAN V.V., KHACHIKYAN L.E.

ON I DEDEL I ITTOIORE READOND I DR O I DEI ENDENDE IN	
STRUCTURES OF SUPERCONDUCTOR/FERROELECTRIC TYPE	93
BAGHDASARYAN H.V., KNYAZYAN T.M., EYRAMJYAN G.G.	
ELECTRODYNAMICAL MODEL OF METAL-DIELECTRIC MULTILAYER	
STRUCTURE TRANSPARENT IN THE VISIBLE RANGE	101
HOVHANNISYAN D.L., VARDANYAN A.O., BAGHRAMYAN B.E.	
TEMPORAL PROFILE RESTORATION CORRECTNESS OF THE PULSE	
TERAHERTZ RADIATION BY MEANS OF CROSS-CORRELATION	
METHOD	109
KYUREGHYAN S.G., ABGARYAN S.V., DAVTYAN A.K., PILUNTS S.R.	
PREDICTING PROPERTIES OF THE MODELS CONSTRUCTED BY THE	
METHOD OF ARGUMENT GROUP ACCOUNT	120
BALASANYAN B.S, KRISTAPHORYAN E.S., BALASANYAN A.B.,	
GHARAYAN A.V., PETROSYAN M.G.	
ON ONE APPROACH TO SEARCH THE OPTIMUM FOR n VARIABLE	
FUNCTIONS	129
BOZOYAN SH.E., YEGHIAZARYAN V.S., KOCHAROV D.A.,	
BADALYAN N.V.	
BOOLEAN DIFFERENTIALS AND ACTIVITIES OF VARIABLE BOOLEAN	
FUNCTIONS FOR SEPARATING ACTIVE PART OF CIRCUIT	137
GASPARYAN O.N., VARDANYAN N.A.	
ON ROOT LOCI OF CIRCULANT AND ANTICIRCULANT FEEDBACK	
CONTROL SYSTEMS	147
CONTROL SYSTEMS	147
CONTROL SYSTEMS	147 158
CONTROL SYSTEMS	147 158
CONTROL SYSTEMS DALLAKYAN H.H. THE CONTROL OF A SYSTEM OF MYOELECTRIC PROSTHETICS AGHBALYAN YU.G. REGISTRATION OF RADIATION DECIMETER RANGE HARTMANN	147 158
CONTROL SYSTEMS	147 158 166
CONTROL SYSTEMS	147 158 166
CONTROL SYSTEMS DALLAKYAN H.H. THE CONTROL OF A SYSTEM OF MYOELECTRIC PROSTHETICS AGHBALYAN YU.G. REGISTRATION OF RADIATION DECIMETER RANGE HARTMANN NETWORK STRIPS ON THE COLOR FILM HERUNI V.P. COMPARISON OF THE SCATTERING CROSS SECTION OF OBJECTS	147 158 166
CONTROL SYSTEMS DALLAKYAN H.H. THE CONTROL OF A SYSTEM OF MYOELECTRIC PROSTHETICS AGHBALYAN YU.G. REGISTRATION OF RADIATION DECIMETER RANGE HARTMANN NETWORK STRIPS ON THE COLOR FILM HERUNI V.P. COMPARISON OF THE SCATTERING CROSS SECTION OF OBJECTS HAVING DIFFERENT COVERINGS	147 158 166 170
CONTROL SYSTEMS	147 158 166 170
CONTROL SYSTEMS	147 158 166 170

«Հայաստանի Գիտությունների Ազգային Ակադեմիայի և Հայաստանի պետական Հարտարագիտական համալսարանի տեղեկագիր . տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, նյութագիտություն, շինարարական կառուցվածքներ, և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էլեկտրատեխնիկա, հիդրավլիկա էներգետիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխնիկա և ինֆորմատիկա, ռադիոէլեկտրոնիկա, լազերային տեխնիկա, ավտոմատացում և կառավարման համակարգեր։

Հանդեսում լուսաբանվում են ակադեմիական և Ճյուղային գիտահետազոտական ինստիտուտների, բուհերի, գիտաարտադրական միավորումների և այլ կազմակերպությունների գիտական գործունեության առավել կարևոր արդյունքները։

Հանդեսի հիմնական նպատակն է՝ խթանել գիտատեխնիկական առաջընթացը և նպաստել արտադրության մեջ այդ արդյունքների ներդրմանը։

Հանդեսը նախատեսված է ձարտարագետների, հետազոտողների և գիտնականների լայն շրջանների համար։ Լույս է տեսնում երեք ամիսը մեկ անգամ։

В журнале "Известия Национальной Академии наук РА и Государственного инженерного университета Армении. Серия технических наук" публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих основные разделы технических наук: машиностроение, материаловедение, строительные конструкции, гидравлика и гидротехнические сооружения, энергетика, электротехника, научное приборостроение и измерительная техника, вычислительная техника и информатика, радиоэлектроника, лазерная техника, автоматизация и системы управления.

Журнал является периодическим изданием, освещающим наиболее важные результаты научной деятельности академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и др.

Основная цель журнала - пропагандировать фундаментальные и прикладные исследования в области технических наук, способствовать внедрению их результатов и ускорению научнотехнического прогресса в производстве.

Журнал рассчитан на широкий круг ученых, исследователей и инженеров. Выходит один раз в три месяца.

The journal "Reports of the National Academy of Sciences and the State Engineering University of Armenia. Series of Technical Sciences" publishes the results of theoretical and experimental investigations concerning the main branches of technical sciences: mechanical engineering, material sciences, civil engineering constructions, hydraulics and hydrotechnical constructions, power and electrotechnical engineering, measurement techniques, computer sciences and informatics, radioelectronics, laser techniques, automation and control systems.

The journal is a periodical that represents the most important results of the scientific activities at academic and branch scientific-research institutions, Universities, research industrial companies, etc.

The main task of the journal is the propaganda of fundamental and applied investigations in the field of technical sciences and promotion of their introduction and acceleration of the scientific and technological progress in industry.

The journal is oriented towards the wide range of scientists, researchers and engineers. It is published once in three months.

>