

Журнал издается с 5.01. 1948 г.
Выходит 3 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵԳԻԱ

Ռ. Մարտիրոսյան (գլխավոր խմբագիր), Ռ. Աթոյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Ն. Թերզյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Ս. Ղազարյան, Ռ. Մարտիրոսյան, Ն. Մանուկյան, Ֆ. Սարգսյան, Յու. Սարգսյան, Վ. Սարգսյան, Մ. Ստակյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ. Ստեփանյան (պատասխանատու քաղ. տեղալ.), Վ. Խաչատրյան, Հ. Զոչինյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. Мартиросян (главный редактор), Р.В. Атоян (зам. глав. редактора), С.М. Казарян, Г.А. Кочинян, Н.В. Манукян, В.З. Марухян, В.С. Саркисян, Ф.Т. Саркисян, Ю.Л. Саркисян, М.Г. Стакян (зам. глав. редактора), З.К. Степанян (ответственный секретарь), А.А. Терзян (зам. глав. редактора), В.С. Хачатрян.

EDITORIAL BOARD

R.M. Martirossyan (Editor-in-Chief), R.V. Atoyan (Vice-Editor-in-Chief), S.M. Ghazaryan, V.S. Khachatryan, H.J. Kochinyan, N.V. Manoukyan, V.Z. Maroukhyan, F.T. Sarkissyan, V.S. Sarkissyan, Yu.L. Sarkissyan, M.G. Stakyan (Vice-Editor-in-Chief), Z.K. Stepanyan (Secretary-in-Chief), H.A. Terzyan (Vice-Editor-in-Chief).

**ՀԱՆՐԵՍԸ ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ Է ԱՄԵՐԻԿԱՅԻ ՀԱՅ ԿՐԹԱԿԱՆ
ՀԻՄՆԱՐԿՈՒԹՅԱՆ ՆՎԻՐԱՏՎՈՒԹՅԱՄԲ ՀԻՄՆԱԴՐՎԱԾ
ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՀՐԱՏԱՐԱԿՉԱԿԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆՈՒՄ**

**THE JOURNAL IS PUBLISHED IN THE COMPUTER
PUBLISHING CENTER ESTABLISHED BY THE
DONATION OF THE ARMENIAN EDUCATIONAL
FOUNDATION (USA)**

**Համակարգչային շարվածքը եւ ձեւավորումը՝
ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ**

© Издательство ГИУА

Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 1996

М.Г. СТАКЯН, Н.С. ИСАХАНИЯН, Н.А. ГАЛЕЧЯН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МИКРОТВЕРДОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ СОВРЕМЕННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Լազերային ճառագայթման ազդեցության տեղական բնույթի, բարձր ջերմային զրադիենտի և ջերմամշակման արագության շնորհիվ կառուցվածքային պողպատներից պատրաստված պատասխանատու մեքենամասերը ձեռք են բերում զգալի կարծրություն, քան ջերմամշակման հայտնի մեթոդների կիրառման դեպքում: Ծառագայթափարված բարակ մակերևութային շերտերի ֆիզիկամեխանիկական պարամետրերի և տեխնոլոգիական գործոնների միջև քանակական առնչությունները քաջահայտնելու և այդ շերտերում ճառագայթման գործընթացն ուսումնասիրելու նպատակով իրականացված են միկրոկարծրության զանգվածային չափումներ: Նույն մեթոդով իրականացված է լիսեռների հոգնածային կոտրվածքների քայքայարանական հետազոտություն: Փորձարկումների և միկրոկարծրության չափումների առդյունքները մշակված են հավանականությունների տեսության և մաթեմատիկական վիճակագրության մեթոդներով, քաջահայտված են միկրոկարծրության բաշխման ֆունկցիաները և ստացված են կոոնյացիոն կապեր միկրոկարծրության և մակերևութային շերտերի խորության միջև:

Локальный характер воздействия лазерного луча, сравнительно высокий температурный градиент и скорость термобработки приводят к значительному повышению твердости ответственных деталей машин из конструкционных сталей, чем при известных методах термобработки. Для установления количественных связей между физико-механическими параметрами, технологическими факторами и размерами излученного тонкого поверхностного слоя и исследования в этих слоях процесса трещинообразования произведены массовые измерения микротвердости. Этими же методами реализовано исследование усталостных изломов валов. Результаты измерения микротвердости разработаны методами теории вероятностей и математической статистики, выявлены корреляционные связи между микротвердостью и глубиной поверхностных слоев.

Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

The local effect of a laser beam due to high thermal gradient and heat treatment speed results in significant increasing the hardness of machine parts made of structural steels than in case of applying the well-known methods of heat treatment. To establish quantitative relations between physical, mechanical and technological parameters of radiated thin surface layers and to study the process of cracking, mass measurements of microhardness have been realized. The investigation of fatigue fractures has been realized by the same method. The results of microhardness measurements are obtained by the method of probability and mathematical statistics, microhardness distribution functions and correlations are found.

Ил. 3. Tables 2. Ref. 6.

Поломки большинства тяжело нагруженных и ответственных деталей машин (примерно 80 %) происходят под действием переменных напряжений в результате возникновения и роста микротрещин в опасном сечении детали. Как правило, этот процесс развивается в тонком поверхностном слое,

преимущественно в зонах расположения концентраторов напряжений при наличии отдельного или совместно действующих повреждающих факторов.

Это диктует необходимость выполнения наряду с упрочнением поверхностных слоев и зон концентрации напряжений фрактографических исследований, т.к. в строении усталостного излома четко отражены все стадии процесса разрушения, фронта продвижения трещины и степень микропластических деформаций подповерхностных слоев излома.

В ранее выполненных работах [1-3] изучены усталостные изломы образцов, испытанных при высоком и низком уровнях перенапряжений. Для оценки физико-механического состояния поверхностных слоев изломов предложен метод измерения микротвердости HV. В [4] рассмотрено изменение HV при лазерном термоупрочнении торцовых поверхностей деталей. Показано, что процесс лазерной закалки сталей из-за резко выраженного локального характера воздействия лазерного луча и высокого температурного градиента поверхностных слоев приводит к значительному повышению HV, чем при известных методах термообработки.

Процесс усталостного разрушения и продвижения фронта кольцевой трещины также сопровождается изменением физико-механического состояния поверхностных слоев, непосредственно прилегающих к поверхности излома, но в гораздо меньшей степени, чем при поверхностно-пластическом деформировании. В [5] показана разная степень микропластического деформирования зон вязкого и хрупкого изломов от уровня перенапряжений σ .

Результирующий эффект складывается из двух последовательно протекающих процессов - деформирования микрообъемов на вершине кольцевой сужающейся трещины, зависящего от величины σ , и контактного смыкания берегов трещины, усиливающегося по мере продвижения фронта трещины вглубь опасного сечения детали (зависит от циклической долговечности N). При этом влияние σ на указанный процесс считается преобладающим.

Применение метода микротвердости позволяет установить не только закон распределения HV [2], но и выявить количественные связи между глубиной деформированного поверхностного слоя и параметрами технологического процесса закалки или режимами периодического нагружения. Это важно для определения оптимальных режимов лазерной закалки или диагностирования причин усталостного разрушения закаленных и высокопрочных деталей машин. На поверхностях усталостных изломов этих деталей визуально трудно или вовсе невозможно определить размеры и взаимное расположение зон вязкого и хрупкого разрушения, по которым можно судить о степени перегрузки, предшествующей разрушению.

Материалы данной статьи являются развитием ранее выполненных работ по установлению количественных соотношений между HV и указанными параметрами.

Микроструктурный анализ поверхностных слоев закаленных образцов показывает, что при лазерной термообработке имеются две зоны термического воздействия, которые фактически являются результатом затухания термического режима, вызванного высокой скоростью термообработки и температурным градиентом поверхностных слоев. Первая зона (белый слой) возникает сразу из жидкой фазы металла и имеет дендритную структуру, которая в основном состоит из мартенсита. Глубина зоны колеблется в пределах $h=(0,1...0,3)$ мм и при повышении скорости перемещения лазерного луча убывает. Вторая зона состоит из

мелкодисперсного мартенсита и его переходных фаз с незначительным количеством аустенита. На глубине $h > 1,0 \dots 1,2$ мм устанавливается исходное состояние микроструктуры.

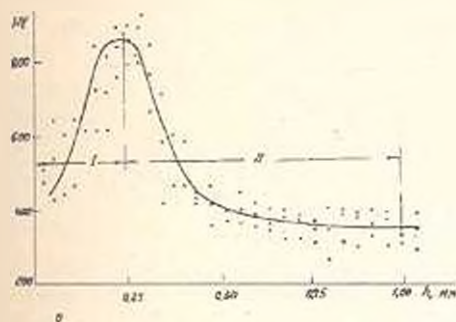


Рис. 1. Распределение микротвердости в поверхностном слое при лазерном термоупрочнении стали 40X

Характер изменения HV соответствует вариации составляющих микроструктуры - из-за наличия на поверхности оплавленного дефектного слоя ($h = 0,001 \dots 0,003$ мм) микротвердость достигает максимума на стыке зон I и II (рис. 1) и затем убывает до исходного значения. Шероховатость обработанной поверхности изменяется в пределах $R_a = 45 \dots 65$ мкм. При этом на поверхности имеются гранулы, полученные после оплавления, которые исчезают с

увеличением скорости обработки. Это вызывает необходимость для получения точных сопряженных поверхностей после лазерной закалки выполнения дополнительной финишной обработки для удаления дефектного слоя.

Установление количественных соотношений между изучаемыми параметрами реализовано согласно программе [6]. В [4] выбраны оптимальные линеаризующие системы координат, обеспечивающие значения выборочного коэффициента корреляции $|r| = 0,795 \dots 0,948$ и позволяющие связь $HV = f(h)$ выразить в виде степенных функций (рис. 2):

$$\overline{HV}_I = a_1 + b_1 h^2, \quad \overline{HV}_{II} = a_2 + b_2 h^{-1}. \quad (1)$$

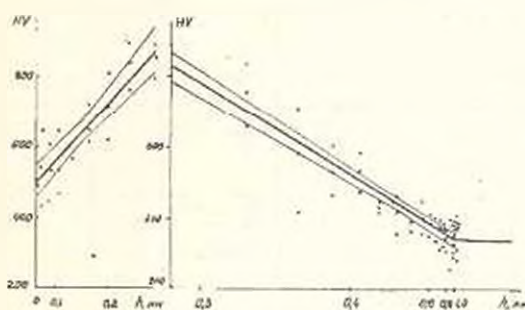


Рис. 2. Медианные линии регрессии и их 90%-ые доверительные границы: 1 - в зоне I (коорд. система $HV-h^2$); 2 - в зоне II (коорд. система $HV-1/h$)

Аналогичными методами исследованы усталостные изломы образцов с концентратором напряжений (стали 45, нормализация, $\sigma_B = 680$ МПа, $\sigma_T = 427$ МПа, $HV = 195 \dots 210$, $d = 12$ мм, одностороннее отверстие под установочный винт, $d_0 = 2$ мм, $\omega = 118^\circ$, $\alpha_n = 2,95$), испытанных при

совместном действии кругового изгиба и кручения на уровнях перенапряжений $\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$ и $\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$.

Тонкий поверхностный слой излома при этом представляет наибольший интерес, т.к. несущая способность, прочность и долговечность деталей машины обусловлены сопротивлением усталости, трещино- и износостойкостью этих же слоев, которые, в свою очередь, связаны с НВ. Фрактографический анализ изломов показал, что в тонком поверхностном слое зерна металла получают направленную пластическую деформацию, которая распространяется на глубину 0,2...0,3 мм. Изменяется также соотношение составляющих микроструктуры. На граничной зоне преобладает ферритная фаза, так как от периодического контактного смятия происходит вдавливание более твердых перлитных зерен, и лишь при $h=0,4...0,5 \text{ мм}$ устанавливается исходное соотношение ферритной и перлитной фаз.

Учитывая различный механизм протекания процессов деформирования в зонах вязкого (В) и хрупкого (Х) разрушения, расчетная оценка НВ в этих зонах произведена отдельно. Для установления оптимальной формы связи $HV=f(h)$, которая заранее не известна, необходим выбор альтернативных вариантов линеаризующих функций, который реализован согласно [6].

Таблица 1

Значения $ r_{\max} $ для альтернативных систем координат u-v							
$\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$				$\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$			
Зона В ₁		Зона Х ₁		Зона В ₂		Зона Х ₂	
u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $	u-v	$ r_{\max} $
y-1/x	0,891... 0,999	y-1/x ⁿ n=1, 2	0,961... 0,999	y-1/x	0,801... 0,999	y-1/x	0,863... 0,998
lgy-1/x	0,821... 0,997	lgy-1/x ⁿ n=1, 2	0,924... 0,996	lgy-1/x	0,794... 0,995	lg(y+g)- lgx	0,732... 0,996
1/y-1/x	0,893... 0,988	1/y-1/x	0,847... 0,993	lgy- lg(x+y)	0,722... 0,987	lgy- lg(x+g)	0,892... 0,996
1/y ⁿ -lgx, n=1,...,3	0,710... 0,982	1/y ⁿ -lgx, n=1,...,5	0,769... 0,983	1/y ⁿ -lgx, n=1, 5	0,577... 0,985	1/y ⁿ -x, n=5	0,666... 0,995
lgy- lg(x+g)	0,709... 0,979	lgy- lg(x+g)	0,863... 0,968	1/y-1/x	0,786... 0,978	lgy-1/x	0,811... 0,985
lg(y+g)- lgx	0,851... 0,970	lg(y+g)- lgx	0,797... 0,941	lg(y+g)- lgx	0,618... 0,974	1/y ⁿ -lgx, n=2,...,5	0,896... 0,985
1/y ⁿ -x, n=3, 5	0,655... 0,963	1/y ⁿ -x, n=3, 5	0,468... 0,953	1/y ⁿ -x, n=5	0,502... 0,952	1/y-1/e ^x	0,647... 0,981
1/y-1/e ^x	0,700... 0,915	1/y-1/e ^x	0,530... 0,800	1/y-1/e ^x	0,512... 0,911	1/y-1/x	0,807... 0,961
y-1/e ^x	0,597... 0,823	y-1/e ^x	0,522... 0,697	y-1/e ^x	0,527... 0,837	lgy-x	0,530... 0,947
lgy-x	0,589... 0,791	lgy-x	0,474... 0,631	lgy-x	0,498... 0,832	y-1/e ^x	0,543... 0,918

Значения $r_{\max}$ для первых 10 видов линеаризующих функций, распределенных по мере убывания (табл.1), указывают на наличие большого количества альтернативных систем координат u-v, обеспечивающих условие

$|r| > 0,75$. Наиболее универсальной для всех рассмотренных случаев является система $y - 1/x^n$, $n = 1, 2$, для которой $|r| = 0,800 \dots 0,999$. Следовательно, связь $HV = f(h)$ можно описать гиперболическими функциями типа

$$y = a + b_{u/v} x^{-n}, \quad n = 1, 2 \quad (u = y, v = x^{-n}). \quad (2)$$

Учитывая ранее неизвестный характер распределения HV по глубине h , произведен комплекс проверок статистической значимости параметров медианной линии регрессии с определением 90 %-ых доверительных границ этих параметров и самой линии (табл. 2, рис. 3). Как видно, проверки удовлетворены при достаточно большом "запасе" уровня значимости, который значительно перекрывает критерийные значения α (табл. 2).

Таблица 2

Вид расчетной операции		$\sigma_1 = 350 \text{ МПа}$		$\sigma_2 = 290 \text{ МПа}$	
		Зона В ₁	Зона Х ₁	Зона В ₂	Зона Х ₂
Параметры медианной линии регрес- сии	$\bar{u}$	2,9025	2,5690	2,4020	2,1140
	$\bar{v}$	6,9472	10,2975	19,5815	15,1636
	a	1,8591	1,7947	1,6674	1,7555
	$b_{u/v}$	0,1502	0,0752	0,0375	0,0236
	$S_{u/v}$	0,2827	0,0687	0,1448	0,0821
	$ r $	0,9813	0,9983	0,9927	0,9942
Проверки значимости парамет- ров	u	2,3768	3,5845	2,8567	2,9778
	$z_{0,975} \cdot S_u$	0,3333	0,3780	0,3780	0,3780
	$ r_s $	0,9277	0,9758	0,7842	0,8909
	$r_{S0,975}$	0,5800	0,6360	0,6360	0,6360
	t_u	17,856	66,375	29,954	59,794
	t_v	16,134	48,171	23,206	26,214
	t_b	35,569	118,166	52,460	81,377
	$t_{0,05,k}$	2,228	2,306	2,306	2,306
90%-е	r_1	0,9383	0,9932	0,9516	0,9775
	r_2	0,9953	0,9997	0,9964	0,9988
доверитель- ные	a_1	1,6272	1,7323	1,5390	1,6878
	a_2	2,0911	1,8570	1,7957	1,8232
интервалы	b_{u/v_1}	0,1294	0,0716	0,0338	0,0216
	b_{u/v_2}	0,1709	0,0788	0,0412	0,0257
параметров	$\bar{u}_1$	2,7207	2,5189	2,2964	2,0541
	$\bar{u}_2$	3,0843	2,6191	2,5076	2,1739

Микропластические деформации на вершине кольцевой трещины и последующее контактное смыкание в совокупности приводят к тому, что максимальные значения микротвердостей имеют место на граничных участках зон В и Х, а совместное действие указанных видов деформации в

зоне В - к условию $HV_{\max B} > HV_{\max X}$, которое зависит от уровня перенапряжений σ и долговечностей N . Поэтому накопление статистической информации об изменении HV в различных зонах усталостного излома позволит выявить многопараметрические зависимости

$$\sigma = F_1(HV_{\max B}, HV_{\max X}, h, HB, \dots), \quad (3)$$

$$N = F_2(HV_{\max B}, HV_{\max X}, h, HB, \dots),$$

а на их основе составить номограммы для диагностирования причин усталостного разрушения тяжело нагруженных и ответственных деталей машин.

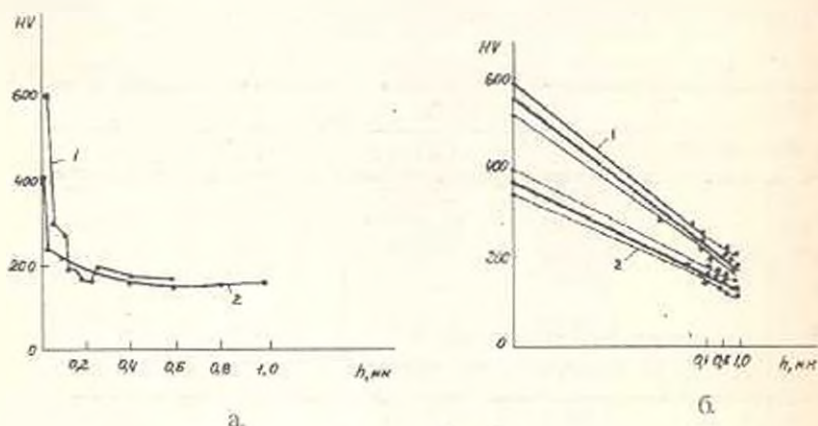


Рис. 3.

а - распределение микротвердости в зонах усталостного излома при $\sigma_s = 350$ МПа:

1 - вязкого разрушения (B_1), 2 - хрупкого разрушения (X_1).

б - медианные линии регрессии и их 90%-ые доверительные границы при $\sigma = 350$ МПа (коорд. система $HV-1/h$) в зонах 1- B_1 , 2- X_1 .

(Работа выполнена в рамках финансируемой госбюджетной научной темы РА № 96-362.)

ЛИТЕРАТУРА

- Шагаев Ю.П., Стакян М.Г., Исаханян Н.С. Измерение микротвердости в процессе усталостного повреждения для оценки работоспособности изделий // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1985. - Т. 38, № 4. - С. 18-24.
- Стакян М.Г., Шагаев Ю.П., Исаханян Н.С. О распределении микротвердости при испытаниях на усталость // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1987. - Т. 40, № 5. - С. 3-9.
- Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Шагаев Ю.П. Об измерениях микротвердости в зоне усталостного излома // Заводская лаборатория. - 1990. - Т. 56, № 11. - С. 91-95.
- Стакян М.Г., Ерицян С.Л. О распределении микротвердости при лазерном термоупрочнении стали 40 X // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1995. - Т. 48, № 3. - С. 5-9.
- Олейник Н.В., Стакян М.Г., Исаханян Н.С. Современные физико-механические методы исследования процесса усталостного разрушения тяжело нагруженных деталей машин // Надежность и долговечность машин и сооружений: Сб. науч. тр. - Киев: Наукова думка, 1989. - Вып. 16. - С. 18-27.
- Стакян М.Г., Оганесян Л.Г. Комплексная программа для корреляционного и регрессионного анализа результатов механических испытаний // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 11. - С. 47-53.

ГИУА

3.11.1995

Р.С. МИНАСЯН, С.А. ДАВЕЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В УГЛАХ ПРОЕМА НЕСУЩЕЙ ДИАФРАГМЫ КРУПНОПАНЕЛЬНОГО ЗДАНИЯ

Դիտարկվում է խոշորապանել շենքերի կողմ դիաֆրագմաների բացվածքների անկյուններում տեղային լարումների որոշման խնդիրը: Օգտագործվել է առաձգականության տեսության մոմենտների հարթախախտման մեթոդը: Անվանադրվել է նաև լարումների վարքը բացվածքի անկյուններում:

Рассматривается решение задачи по определению местных напряжений в углах проемов несущей диафрагмы крупнопанельного здания. Использован метод моментной деформации теории упругости. Изучено также поведение напряжений в углах проемов.

Ил. 1. Библиогр.: 2 назв

A problem solution for specifying local stresses in the opening angles of a large bearing-wall building diaphragm is considered. The method of momentary warping of elasticity theory has been applied. The behaviours of stresses in the opening angles are also studied.

Ил. 1. Ref. 1.

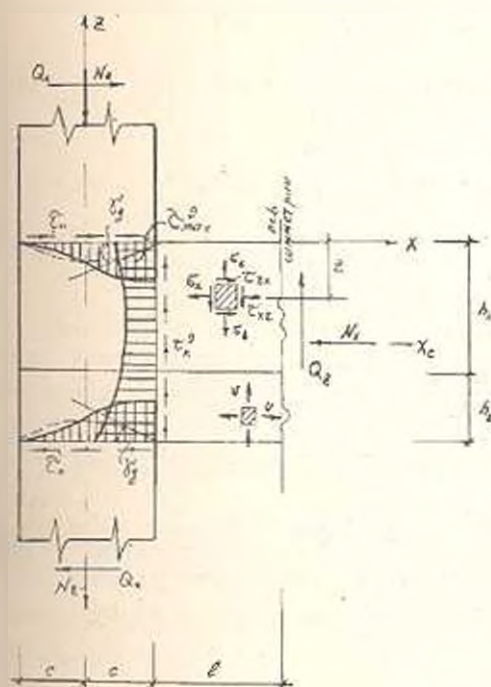


Рис.

Сравнение результатов многочисленных теоретических и экспериментальных исследований в области расчета местных напряжений в угловых точках проемов диафрагмы показало, что они в достаточной степени отличаются друг от друга. Основная причина заключается в том, что в теоретических исследованиях не учтена моментная деформация сечений в зонах концентрации напряжений, отличающаяся высоким градиентом. Трасектория главных напряжений резко изгибается перед этими сечениями, в результате чего на главных осях возникает моментное взаимодействие напряжений и моментный деформационный сдвиг.

В качестве расчетной модели рассматривается фрагмент поперечной несущей

диафрагмы крупнопанельного здания, нагруженный только горизонтальной нагрузкой (рис.). Для определения напряжений с учетом вышеуказанного предлагается метод, основанный на возможных перемещениях уравнений, выражающих условия равновесия элементарного параллелепипеда, выделенного из исследуемой модели.

Если обозначим продольные перемещения по оси $Z - v(x, z)$, поперечные по оси $X - u(x, z)$ и запишем на основании начала возможных перемещений уравнения, выражающие условия равновесия элементарного параллелепипеда в направлении осей X и Z , то получим уравнения, выражающие работу внешних и внутренних сил на соответствующих перемещениях [1]:

$$\int_V \frac{\partial \sigma_z^p}{\partial z} v(x, z) dF - \int_F \tau_{xz}^p \frac{\partial v(x, z)}{\partial x} dF = 0, \quad (1)$$

$$\int_V \frac{\partial \tau_{xz}^p}{\partial z} u(x, z) dF - \int_F \sigma_x^p \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} dF = 0, \quad (2)$$

где σ_x^p , τ_{xz}^p , σ_z^p — компоненты уравнивающих напряжений.

Выражения перемещения удобно представить в виде

$$u(x, z) = \sum_{n=0} u_n(z) \sin \alpha_n x, \quad v(x, z) = \sum_{n=0} v_n(z) \cos \alpha_n x, \quad (3)$$

где $u_n(z)$ и $v_n(z)$ — искомые функции, зависящие только от Z .

С учетом выражений (1) и (2) из (3) можно получить

$$\int_V \frac{\partial \sigma_z^p}{\partial z} v_n(z) \cos \alpha_n x dF + \int_F \tau_{xz}^p \alpha_n v_n(z) \sin \alpha_n x dF = 0, \quad (4)$$

$$\int_V \frac{\partial \tau_{xz}^p}{\partial z} u_n(z) \sin \alpha_n x dF + \int_F \sigma_x^p \alpha_n u_n(z) \cos \alpha_n x dF = 0. \quad (5)$$

Согласно обобщенному закону Гука, имеем

$$\sigma_z^p = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial v(x, z)}{\partial z} + \nu \frac{\partial u(x, z)}{\partial x} \right] + \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial v^p(x, z)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\sigma_x^p = \frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial u(x, z)}{\partial x} + \nu \frac{\partial v(x, z)}{\partial z} \right] = \sigma_{xx},$$

$$\tau_{xz}^p = \frac{E}{2(1+\nu)} \left[\frac{\partial v^p(x, z)}{\partial x} + \nu \frac{\partial u(x, z)}{\partial z} \right], \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\partial v(x, z)}{\partial x}$$

Для упрощения задачи принимается, что депланационный сдвиг возникает только по оси Z . В уравнениях (6) и (7) приближенно принимается $\gamma_{xz} = \partial v(x, z) / \partial x$, где $\gamma_{xz}^p = \gamma_{xz}^e$ — уравнивающий и депланационный сдвиги: $\gamma_{xy}^p = \gamma_{xy} + \gamma_{xy}^e$, $\gamma_{xz} = 0$.

Совместное решение (3) - (7) дает:

$$\int_F \left\{ [v''(z) + \alpha_n v v'_n(z)] \cos \alpha_n x - \frac{1-v}{2} \alpha_n v'_n(z) \sin \alpha_n x \right\} \times \\ \times \cos \alpha_n x dF + \frac{1-v}{2} \alpha_n \int_F [u'_n(z) - \alpha_n v_n(z) - \alpha_n v_n(z)] \sin^2 \alpha_n x dF = 0. \quad (8)$$

$$\int_F \left\{ [u''(z) - \alpha_n v'_n(z) \sin^2 \alpha_n] dF - \alpha_n \int_F [\alpha_n u_n(z) + \right. \\ \left. + v v'_n(z)] \cos^2 \alpha_n x dF + \frac{1-v}{2} \alpha_n \int_F u'_n(z) \sin \alpha_n x \cos \alpha_n x dF = 0. \quad (9)$$

Учитывая, что в перемычках отсутствуют внешние силы, можно принять второе допущение: $u_n(z) = \text{const}$, $u'_n(z) = 0$.

Следовательно, интегрируя (8), находим

$$v''_n(z) + 2\omega_n v'_n(z) - \lambda_n^2 v_n(z) = 0, \quad (10)$$

где

$$2\omega_n = \frac{1 - \cos 2\alpha_n C}{2\alpha_n C + \sin 2\alpha_n C} \left(\frac{1-v}{2} \alpha_n \right), \quad \lambda_n^2 = \frac{2\alpha_n C - \sin 2\alpha_n C}{2\alpha_n C + \sin 2\alpha_n C} \left(\frac{1-v}{2} \alpha_n^2 \right).$$

Так как (10) удовлетворяет любому из корней характеристического уравнения, то, учитывая условия задачи, решение можно записать в виде:

$$v_n(z) = C_{1n} e^{-(\omega_n - \gamma_n)z} + C_{2n} e^{-(\omega_n + \gamma_n)z} \quad (11)$$

где $\gamma_n = (\omega_n^2 + \lambda_n^2)^{1/2}$.

Значения C_{1n} и C_{2n} определяются из граничных условий:

$$v_n(z)|_{z=0} = v_{\max}, \quad v_n(z)|_{z=h} = 0,$$

$$C_{1n} = -v_{\max} \frac{\exp(-\gamma_n h)}{2gh\gamma_n h}; \quad C_{2n} = v_{\max} \left(1 + \frac{\exp(-\gamma_n h)}{2gh\gamma_n h} \right). \quad (12)$$

Совместное решение (3), (11) и (12) даст

$$v(x, z) = v_{\max} \exp[-(\omega_n + \gamma_n)z] \left\{ \frac{gh\gamma_n z}{gh\gamma_n h} \exp[-\gamma_n(h-z)] \right\} \cos \alpha_n x. \quad (13)$$

Контактные депланационные касательные напряжения $\tau_k^E(0, z)$ будут также затухать по оси z по тому же показательному закону, что и продольные деформации $v(x, z)$, т.е.

$$\tau_k^E(0, z) = \tau_{\max}^E \exp[-(\omega_n + \gamma_n)z] \left\{ 1 - \frac{gh\gamma_n z}{sh\gamma_n h} \exp[-\gamma_n(h-z)] \right\}. \quad (14)$$

Таким образом, в зонах депланационного сдвига для касательных напряжений получили показательный затухающий закон, что соответствует результатам экспериментов на стеновых диафрагмах около проемов [2].

В формуле (14) остается определить $\tau_{\max}^E$, значения которого находим из условия равновесия

$$\int_0^h \tau_z^E(0, z) dF = P_0 C = N_z. \quad (15)$$

Совместно решая (14) и (15), получим

$$\tau_{\max}^E = N_z \left\{ \frac{1 - \exp[-(\omega_n + \gamma_n)h]}{\omega_n + \gamma_n} - \frac{\gamma_n \operatorname{ch} \omega_n h - \omega_n \operatorname{sh} \omega_n h - \gamma_n \exp(-\gamma_n h)}{\lambda_n^2 \operatorname{sh} \gamma_n h} \right\}. \quad (16)$$

Чтобы определить коэффициент концентрации напряжений в углах ($x=0$), где максимальные сжимающие деформации переходят в деформации деplanationного сдвига и где напряжение $\sigma_{\max}$ незначительно, справедливо условие $\sigma_{\max} = 2\tau_{\max}^E$.

Таким образом, коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемой модели имеет вид

$$K = 2C \left\{ \frac{1 - \exp[-(\omega_n - \gamma_n)h]}{\omega_n + \gamma_n} - \frac{\gamma_n \operatorname{ch} \omega_n h - \omega_n \operatorname{sh} \omega_n h - \gamma_n \exp(-\gamma_n h)}{\lambda_n^2 \operatorname{sh} \lambda_n h} \right\}. \quad (17)$$

Пример. Пусть $l = 150$ см, $C = 50$ см; $dC = 1.10$, $h = 70$ см, $n = 1$. Тогда $\omega = 0.002$ см⁻¹, $\lambda^2 = 0.66 \cdot 10^{-4}$ см⁻² и $\tau_{\max}^E = 1.425 P_0$, $\sigma_{\max} = 2.85 P_0$, а коэффициент концентрации $K = 2.85$.

Таким образом, предложенный метод позволяет достаточно точно определить коэффициент концентрации напряжений в критических точках (в углах отверстий), где моментный деplanationный сдвиг достигает максимальной величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. - М.: Мир, 1977. - 302 с.
2. Минасян Р.С. Напряженно-деформированное состояние подоконника наружной стены // Исследование прочности и деформативности крупнопанельных и каменных конструкций: Тр. ин-та ЦНИИСК им. Кучеренко. - 1989. - С. 20-37.

Армсельхозакадемия

18.01.1996

Г.А. БУРНАЧЯН, В.З. МАРУХЯН

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ПО АРМЯНСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

Բերված են պլանային-հաշվարկային սակագների ձևավորման հիմնական սկզբունքները, և դրանց հիման վրա տրվում է հետագա տարբերակումը օրվա և տարվա կտրվածքով Գալակական էներգահամակարգի պայմաններին համապատասխան: Առաջարկվող մոտեցումը հնարավորություն է ընձեռում սակագների համակարգը դարձնելու հանրապետության էներգասպառման կառավարման տնտեսական հիմք:

Приведены основные принципы формирования планово-расчетного тарифа. Дана последующая его дифференциация и разрезе суток и года применительно для условий Армянской энергосистемы. Предложенный подход позволит системе тарифов стать экономической основой для управления электропотреблением республики.

Сибланпр.: 2 назв.

The main principles of forming of planned-computational rate are presented along with its following daily and annual differentiation applied to the conditions of Armenian Power System. The proposed approach will make the rate system an economic base for the management of the republican Power System.

Ref. 2.

Как известно, тарифы на электрическую энергию по своей экономической природе являются разновидностью цен. При этом основой для установления тарифов служит уровень полной себестоимости электрической энергии по системе. В условиях перехода на рыночные отношения система тарифов на электрическую энергию должна стать экономической основой управления энергопотреблением, что позволит регулировать товарно-денежные отношения между поставщиками и потребителями с учетом экономии электрической энергии и обеспечения необходимой надежности и качества электроснабжения. Таким образом, система тарифов, кроме того, что отражает стоимость электрической энергии, должна обладать побудительной основой, позволяющей привлечь их для управления электропотреблением.

Тарифы могут быть планово-расчетными и фактическими. Разработка планово-расчетных тарифов основывается на прогнозировании будущих эксплуатационных расходов в отличие от ретроспективной методики расчета фактических затрат, что в принципе может служить основой для разработки тарифов на базе предельных затрат. Однако при этом требуется серьезный анализ экономических затрат и большой объем работ. В настоящее время ввиду нестабильности экономических отношений в экономике республики трудно рассчитать предельные затраты.

Для разработки тарифов предварительно определяется величина полной планово-расчетной себестоимости электрической энергии по зависимости

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^{m+n} U_i + U_{\text{лэп}} + U_c + N_{\text{нэ}}}{\Theta_0 + \Theta_{\text{нэ}} - \Delta\Theta}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^{m+n} U_i$ — ежегодные издержки электростанций, входящих в энергосистему; m, n — количество тепловых и гидравлических станций; $U_{\text{лэп}}, U_c$ — ежегодные издержки по линиям электропередач и общесистемные затраты; $U_{\text{нэ}}$ — ежегодные издержки по покупке энергии, в том числе и энергии, получаемой от АЭС; $\Theta_0, \Theta_{\text{нэ}}$ — отпущенная с шин электростанций и покупная электроэнергия; $\Delta\Theta$ — потери энергии в линиях электропередач.

Имея величину S_e , можно определить величину планово-расчетного тарифа по зависимости

$$T_e = S_e + RU/\Theta_n = S_e(1+R), \quad (2)$$

где U — полные издержки производства энергосистемы за расчетный период; R — величина общей рентабельности; Θ_n — величина электроэнергии, полезно доведенная до потребителя.

Величина T_e , определяемая по зависимости (2), является базисным тарифом [1] и обеспечивает возмещение всех затрат по производству и транспортировке электроэнергии и получению нормативной рентабельности.

Анализ суточных графиков нагрузки Армянской энергосистемы за характерные сутки (1991-1995 гг.) показал, что коэффициенты неравномерности и плотности соответственно характеризуются следующими значениями: $\gamma = 0,55 \dots 0,70$, $\beta = 0,72 \dots 0,88$. При таких значениях коэффициентов γ и β возникает вопрос дифференциация базового тарифа по зонам суточного графика нагрузки. Исходя из характера суточных и недельных графиков нагрузки, с определенной точностью предлагается следующее подразделение графика нагрузки на зоны в зависимости от часов суток:

зона провалов - (1...6) - (14...17) часы;

пиковая зона - (7...13) - (18...24) часы.

В зависимости от такого подразделения суточного графика нагрузки предложен следующий подход к определению дифференцированных тарифов. Известно, что общий размер платы при одноставочном тарифе определяется как произведение тарифа T_e на количество потребленной энергии Θ_e за данный промежуток времени:

$$П = T_e \Theta_e. \quad (3)$$

Исходя из этого, при дифференциации величины T_e по зонам суточного графика нагрузки необходимо, чтобы величина платы за израсходованную энергию при неизменном (одноставочном) и дифференцированном тарифах была бы одинаковой:

$$T_z \mathcal{E}_c = T'_z \mathcal{E}'_c + T''_z \mathcal{E}''_c, \quad \mathcal{E}_c = \mathcal{E}'_c + \mathcal{E}''_c, \quad (4)$$

где T'_z , T''_z — тарифы на электрическую энергию в часы провалов и пиков графика нагрузки; $\mathcal{E}'_c$, $\mathcal{E}''_c$ — величины суточной энергии в часы провалов и пиков графика нагрузки.

Из выражения (4) получаем величину планово-расчетного (базисного) тарифа

$$T_z = T'_z \mathcal{E}'_c / \mathcal{E}_c + T''_z \mathcal{E}''_c / \mathcal{E}_c = a T'_z + b T''_z, \quad (5)$$

где $a = \mathcal{E}'_c / \mathcal{E}_c$, $b = \mathcal{E}''_c / \mathcal{E}_c$ — известные величины, определяемые для каждого суточного графика нагрузки.

При формировании планово-расчетного тарифа по Армянской энергосистеме наиболее существенным и изменяющимся фактором является топливная составляющая (40...55 % системных затрат). Поэтому предлагается отношение тарифов в часы провалов и пиков принять прямо пропорциональным изменению расхода топлива в те же часы, т.е.

$$\frac{T'_z}{T''_z} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m B_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k B_{ij}} = \frac{B_1}{B_2}, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ — количество тепловых станций в энергосистеме;
 $i = 1, 2, \dots, k$ — часы ночного и дневного провалов графика нагрузки;
 $j = 1, 2, \dots, \ell$ — часы дневного и вечернего пиков графика нагрузки;
 B_{ij} — часовой расход условного топлива i -й тепловой станции в i -й час;
 B_1 , B_2 — величины суммарного расхода условного топлива в часы провалов и пиков графика нагрузки.

Величины B_1 и B_2 определяются из условия оптимального распределения графика нагрузки между станциями энергосистемы. В общем случае в энергосистеме работают АЭС, ТЭЦ, нерегулируемые ГЭС, m КЭС и n регулируемых ГЭС.

Ограниченная маневренность оборудования АЭС, исходя из условия безаварийной работы, а также экономические и технические требования предопределяют целесообразность работы АЭС в базисном режиме, т.е. практически при неизменной мощности в течение суток. ТЭЦ в энергосистемах обычно работают по теплофикационному режиму, чем и предопределена ее электрическая нагрузка. В этих условиях вовлечение ТЭЦ в процесс регулирования электрической нагрузки (свободная конденсационная мощность) должно рассматриваться как вынужденное мероприятие, когда возможности других станций системы исчерпаны. Нерегулируемые ГЭС в течение суток также работают в базисном режиме. В силу сказанного суммарная мощность вышеуказанных станций должна быть покрыта из графика нагрузки системы, а оставшаяся часть оптимальным образом покрыта КЭС и регулируемыми ГЭС.

Выбор оптимального суточного режима работы энергосистемы, состоящей из m тепловых станций и n гидроэлектростанций, исходя из критерия минимума расхода условного топлива, сводится к решению обычной вариационной задачи на безусловный экстремум. При этом отыскивается минимум некоторого функционала [1]

$$B = \int_{t_0}^{t_1} F\{\bar{P}_T(t), \bar{V}_T(t), \bar{V}'_T(t)\} dt = \int_{t_0}^{t_1} \left(\sum_{i=1}^m B_i + \lambda_i \varphi_i \right) dt \quad (7)$$

с учетом нижеследующих ограничений:

→ по балансу мощностей

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^m P_{Ti} + \sum_{j=1}^n P_{Tj}(V_{Tj}, V'_{Tj}) - P_c - \Delta P = 0; \quad (8)$$

→ по режимам работы водохранилищ регулируемых ГЭС

$$V'_{Tj} = dV_{Tj} / dt = q_{Tj} - Q_{Tj} \quad (9)$$

с граничными условиями

$$V_{Tj}(t_0) = 0, \quad V_{Tj}(t_k) = V_{Tj}^*, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

В выражениях (7), (8) и (9) B_i — расход условного топлива на i -й тепловой станции за единицу времени; λ_i — переменный по времени множитель; P_{Ti} , P_{Tj} — нагрузки i -й тепловой станции и j -й гидростанции; P_c , ΔP — нагрузка энергосистемы и потери в линиях электропередачи; q_{Tj} , Q_{Tj} — приток в водохранилище и расход через турбины j -й гидростанции; V_{Tj} — используемый в течение цикла регулирования объем воды на j -й ГЭС.

Кривые, реализующие экстремум рассматриваемого функционала, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые применительно к рассматриваемой задаче могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial P_{Ti}} + \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right) &= 0, \\ \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right) \frac{\partial P_{Tj}}{\partial P_{Ti}} - \frac{d}{dt} \left[\lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right) \frac{\partial P_{Tj}}{\partial V'_{Tj}} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Из системы уравнений (10) после несложных преобразований можно получить следующее условие, позволяющее выбрать оптимальные режимы работы станций системы:

$$b_i / (1 - \partial \Delta P / \partial P_{Ti}) = [C_j - \Delta \lambda_j(t)] q_{Tj} / (1 - \partial \Delta P / \partial P_{Tj}), \quad (11)$$

где $b_i = \partial B_i / \partial P_{Ti}$, $q_{Tj} = \partial Q_{Tj} / \partial P_{Tj}$ — относительные приросты расхода условного топлива на i -й теплостанции и воды на j -й гидростанции; $\partial \Delta P / \partial P$ — относительные приросты потерь активной мощности в линиях электропередачи; C_j — постоянный множитель в течение цикла регулирования на j -й гидростанции; $\Delta \lambda_j(t)$ — поправка, учитывающая изменение напора на j -й гидростанции.

Согласно условию (11), производится оптимальное распределение нагрузки между станциями системы и определяются величины расходов условного топлива в часы провалов и пиков нагрузки, т.е. B_1 и B_2 .

Имея эти величины и решая совместно уравнения (5) и (6), получим

$$T_2 = T_1 B_1 / aB_1 + bB_2; \quad T_2'' = T_1'' B_1 / aB_1 + bB_2 \quad (12)$$

Проведенные расчеты для ряда характерных графиков нагрузки за рассматриваемый период показали, что отношение T_2'' к T_2' изменяется как ≈ 2 к единице. Для более обоснованного определения этого отношения необходимо выполнить серию расчетов для различных графиков нагрузки с целью получения достаточно большого объема данных. Только на основе этих данных можно обоснованно установить величины дифференцированных тарифов в течение суток. Кроме этих тарифов, в республике может быть внедрена и система дифференцированных тарифов в годовом разрезе. Такое предположение обусловлено, с одной стороны, изменением графиков нагрузки по сезонам, а с другой - наличием значительного числа гидростанций, выработка которых носит изменчивый характер. Исходя из этого, предлагается произвести дифференциацию тарифов в следующем порядке: для зимне-осеннего (I, IV кварталы) периодов - один тариф, а для весеннего и летнего периодов (II, III кварталы) - другой.

Для определения дифференцированных тарифов по сезонам года, исходя из ранее принятых предпосылок, могут быть использованы следующие зависимости:

$$T_1 = cT_2, \quad T_1 = T_1 \Theta_1 / c\Theta_1 + \Theta_2,$$

где $c = \Theta_1 / \Theta_2$ - известная величина для каждого годового графика нагрузки;

T_1, T_2 - тарифы за (I, IV) и (II, III) кварталы; $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_r$ - величины энергии за (I, IV) и (II, III) кварталы и годовой энергии.

Исследования показали, что тарифы за зимне-осенний периоды превышают тарифы за летне-весенний периоды на 30-40%.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Тарифы должны быть дифференцированы по времени суток и сезонам года.

2. Тарифы должны отражать все виды затрат, связанные с процессом производства, передачи, распределения электрической энергии, и служить побудительной основой, позволяющей привлечь их для управления электропотреблением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В. В. Тарифы и режимы электропотребления. - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 212 с.
2. Внуков А. К. Тарифы на тепло- и энергопотребление // Энергетик - 1995 - № 1 - С. 8-10

ГИУА

10.10.1996



М.Г. ТАМРАЗЯН

ОБ ОДНОМ (Y-Z) - МЕТОДЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ուսումնասիրվում է Նյուտոնի կամ Նյուտոն-Կոնտարովիչի մեթոդի կիրառման հնարավորությունը (Y-Z) տեսքի հավասարումներով կայունացված ռեժիմի գործնական խնդիրները լուծելիս: Հաշվարկները ցույց են տվել, որ Յակոբի մատրիցը առաջին քայլին շրջելուց հետո կարելի է ընդունել անփոփոխ հետագա քայլերի համար: Պայմանավորված ուսումնասիրվող համակարգի հանգույցների քանակից հաշվողական ծավալը կարող է նվազել 20-35 %-ով:

Рассматривается возможность применения метода Ньютона или Ньютона-Контаровича к (Y-Z) - форме уравнений установившихся режимов при решении практических задач. Вычисления показали, что при обращении матрицы Якоби на первой итерации ее можно считать постоянной в последующих итерациях. В зависимости от числа узлов исследуемой электроэнергетической системы объем вычислительных работ может сократиться на 20...35%.

Табл. 3. Библиогр.: 3 назв.

The possibility of application of Newton or Newton-Kontarovich method to (Y-Z) equations of steady-state conditions is considered for practical problem solutions. The calculations showed that in inverting the Yacobi matrix on the first iteration it can be constant in the next iterations. Depending on the number of nodes for the electric power system the volume of computational work can be reduced to 20-35 %

Tables 3. Ref. 3.

Предлагается метод расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, который с вычислительной точки зрения отличается от существующих аналогичных методов [1-3]. Как известно, уравнение состояния установившегося режима электроэнергетической системы при (Y-Z) - форме задания сети можно представить в следующем виде [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{U}_{ko} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & 1 & \dot{A}_{m,f} \\ - & - & - \\ \dot{C}_{k,n} & 1 & Z_{k,f} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{no} \\ - \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

Сущность каждого элемента, входящего в (1), подробно описывается в [2]. Представим матричное уравнение (1) в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{U}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{Bm} \\ \dot{U}_{Bk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{m,n} & 1 & \dot{A}_{m,f} \\ - & - & - \\ \dot{C}_{k,n} & 1 & Z_{k,f} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_n \\ - \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

где

$$\dot{U}_{Bm} = - \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} U_n, \quad \dot{U}_{Bk} = \left(1 - \sum_{n=1}^{\Gamma} C_{k,n} \right) U_0. \quad (3)$$

Переходя к матричным узловым мощностям, матричное уравнение (2) примет вид

$$\begin{bmatrix} P_m \\ \vdots \\ Q_m \\ \vdots \\ P_k \\ \vdots \\ Q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Bm} \\ \vdots \\ Q_{Bm} \\ \vdots \\ P_{Bk} \\ \vdots \\ Q_{Bk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{mn} & | & \\ \vdots & | & 0 \\ Q_{mn} & | & \\ \vdots & | & \\ 0 & | & \begin{bmatrix} P_{k\ell} \\ \vdots \\ Q_{k\ell} \end{bmatrix} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В матричной записи (4) имеем

$$P_{mn} = U_m \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un}) + b_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un})] U_n. \quad (5)$$

$$Q_{mn} = U_m \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - b_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un})] U_n. \quad (6)$$

$$P_{k\ell} = \sum_{\ell=\Gamma+1}^M [R_{k,\ell} (I'_k I'_\ell + I''_k I''_\ell) + X_{k,\ell} (I'_k I'_\ell - I''_k I''_\ell)], \quad (7)$$

$$Q_{k\ell} = - \sum_{\ell=\Gamma+1}^M [R_{k,\ell} (I'_k I'_\ell - I''_k I''_\ell) - X_{k,\ell} (I'_k I'_\ell + I''_k I''_\ell)]. \quad (8)$$

Величины P_{Bm} , Q_{Bm} , P_{Bk} , Q_{Bk} определяются в виде

$$P_{Bm} = P_{Bm}^* + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (H_{m\ell} \cos \psi_{um} + K_{m\ell} \sin \psi_{um}) U_m, \quad (9)$$

$$Q_{Bm} = Q_{Bm}^* + \sum_{\ell=\Gamma+1}^M (H_{m\ell} \sin \psi_{um} + K_{m\ell} \cos \psi_{um}) U_m, \quad (10)$$

где

$$P_{Bm}^* = - \sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} \cos \psi_{um} + b_{m,n} \sin \psi_{um}) U_n U_m, \quad (11)$$

$$Q_{Bm}^* = - \sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} \sin \psi_{um} - b_{m,n} \cos \psi_{um}) U_n U_m. \quad (12)$$

$$P_{Bk} = I'_k U_0 - \sum_{n=1}^{\Gamma} M_{kn} U_0 + \sum_{n=1}^{\Gamma} (M_{kn} \cos \psi_{un} + L_{kn} \sin \psi_{un}) \dot{U}_n, \quad (13)$$

$$Q_{Bk} = -I''_k U_0 + \sum_{n=1}^{\Gamma} L_{kn} U_0 + \sum_{n=1}^{\Gamma} (M_{kn} \sin \psi_{un} - L_{kn} \cos \psi_{un}) \dot{U}_n. \quad (14)$$

Значения $H_{m\ell}$, $K_{m\ell}$ и M_{kn} , L_{kn} —

$$H_{m'} = a'_{m'} I' - a''_{m'} I''; \quad K_{m'} = a'_{m'} I'' + a''_{m'} I'. \quad (15)$$

$$M_{kn} = C'_{k,n} I'_k + C''_{k,n} I''_k; \quad L_{kn} = C'_{k,n} I''_k - C''_{k,n} I'_k. \quad (16)$$

Элементы со знаком "—" являются действительными составляющими, а с "—" — коэффициентами при мнимых составляющих величин.

Рассмотрим случай, когда независимые стационарные узлы являются узлами типа P-U. При этом систему уравнений, с помощью которой можно решить поставленную задачу, представим в следующем виде:

$$\left[\begin{array}{c|c} \Phi_{pm}(u, \psi_{pm}) = 0 & | \\ \hline & | \\ & | \Phi_{pk}(I', I'') = 0 \\ & | \Phi_{qk}(I', I'') = 0 \end{array} \right] \quad (17)$$

Рекуррентное выражение относительно указавшей (17) системы уравнений можно представить в виде

$$[\psi_{um}]^{t+1} = [\psi_{um}]^t - \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \psi_{um}} \right]^{-1} \times [\Phi_{pm}(\psi_{um})]_t. \quad (18)$$

$$\left[\begin{array}{c} I'_k \\ \hline I''_k \end{array} \right]^{t+1} = \left[\begin{array}{c} I'_k \\ \hline I''_k \end{array} \right]^t - \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} & | \\ \hline \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_k} & | \end{array} \right]^{-1} \times \left[\begin{array}{c} \Phi_{pk} \\ \hline \Phi_{qk} \end{array} \right]_t. \quad (19)$$

Частные производные, входящие в (18), определяются:

при $n=m$ —

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \psi_{um}} = -[P_{b(n,n)} - U_m \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^r [g_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - \\ - b_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un}) U_n]], \quad (20)$$

где

$$P_{b(n,k)} = \left[\sum_{n=1}^r (g_{m,n} \sin \psi_{um} - b_{m,n} \cos \psi_{um}) U_n - \right. \\ \left. - \sum_{n=r+1}^M (H_{m,n} \sin \psi_{um} - K_{m,n} \cos \psi_{um}) \right] U_m; \quad (21)$$

при $n \neq m$ —

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \psi_{un}} = -U_n [g_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - b_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un})] U_m. \quad (22)$$

Аналитические выражения частных производных, входящих в (19), приводятся в [2].

Теперь перейдем к вычислительному исследованию матриц Якоби, фигурирующих в (18) и (20). Рассмотрим схему, состоящую из четырех узловых точек, исходная информация которой приводится в [2]. В таблицах

1 и 2 приводятся численные значения элементов обратных матриц, входящих в (18) и (19).

Таблица 1

	Номер итер.	Элементы обратной матрицы			
Согл. (18)	1	-59,6	-43,1	-43,1	-59,1
	2	-59,8	-43,3	-43,3	-59,4
	3	-59,9	-43,5	-43,4	-59,5
	4	-59,9	-43,5	-43,4	-59,5

Таблица 2

Согл. (19)	1	-487,2	-26,9	-64,3	-491,1
	2	-489,3	-26,9	-72,5	-497,5
	3	-489,3	-27,4	-72,5	-498,0
	4	-489,3	-27,4	-72,2	-498,0
	5	-489,3	-27,4	-72,2	-498,0

Далее приводятся численные значения искоемых режимных параметров: $\Psi_{u1} = 0,0208$ рад, $\Psi_{u2} = 0,0171$ рад, $I'_1 = -2,0614$ А, $I''_1 = 1,1503$ А.

Затем рассматривается электрическая схема, состоящая из 10 узлов. Исходная информация относительно которой приводится в [2].

В табл. 3 приводятся численные значения обратных матриц, входящих в (18).

Таблица 3

Значения обратных матриц			
-52,9	-43,3	-38,5	-38,5
-43,4	-68,5	-46,6	-46,3
-38,5	-46,6	-89,4	-69,5
-38,5	-46,6	-89,4	-69,5
-38,5	-46,3	-69,6	-82,7
-54,2	-44,6	-40,9	-40,3
-44,7	-69,6	-49,4	-48,2
-39,7	-47,9	-72,9	-84,7

Обратные элементы матрицы выражения (19) непосредственно стабилизируются со второй итерации, однако не приводятся ввиду ограничения объема статьи.

Приводятся численные значения искоемых режимных параметров при осуществлении всех итераций:

$$\Psi_{u1} = -0,0368 \text{ рад}; \Psi_{u2} = -0,0339 \text{ рад}; \Psi_{u3} = -0,0626 \text{ рад};$$

$$\Psi_{u4} = -0,0480 \text{ рад}; I_5 = -0,5064 + j 0,2666 \text{ А}; I_6 = -0,2726 + j 0,1453 \text{ А};$$

$$I_7 = -0,4649 + j 0,2772 \text{ А}; I_8 = -0,4118 + j 0,2341 \text{ А};$$

Анализ табл. 1-3 показывает, что обратные матрицы Якоби, входящие в (18) и (19), стабилизируются уже со второй итерации, что впервые было обнаружено при решении уравнения установившегося режима при (Y-Z)-форме задания состояния сети. Аналогичное явление было обнаружено при 22 и 46 узловых схемах.

Далее были проведены следующие вычислительные эксперименты: принимались постоянными матрицы Якоби со второй итерации, продолжался итерационный процесс по поиску численных значений режимных параметров. Эксперименты показали, что для получения численных значений искомых переменных при той же точности требуется произвести еще одну лишнюю итерацию, т.е. всего три итерации. При использовании матрицы Якоби третьей итерации необходимо проведение лишней итерации.

Таким образом, выявленные численные особенности матриц Якоби, входящих в (18) и (19), обеспечивают уменьшение объема вычислительных работ на 20...35% в зависимости от числа исследуемой электроэнергетической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Метод расчета установившегося режима электрической системы // Изв. науч. Энергетика - 1989 - № 5. - С. 12-18.
2. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество - 1991 - № 1. - С. 6-13.
3. Эль Санд И.М., Абдурахим Я.С., Тамразян М.Г. Относительные приросты мощностей в электроэнергетических системах // Изв. АН Армении. - Сер. ТН. - 1993. - Т. 46, № 2-3. - С. 77-82.

ГИУА

11.02.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 142-147.

УДК 621.370

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Л. АРЕШЯН

ПРОНИКНОВЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ПРОВОДЯЩЕЕ ВЕЩЕСТВО НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТОДИНАМИКИ

Էլեկտրահաղորդական միջավայրում ստացված են դիֆերենցիալ հավասարումներ էլեկտրամագնիսական դաշտերի համար, որոնց հիման վրա կառուցված են լուծումներ հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքի համար, որը քափանցում է կիսամիջավայր: Ի տարբերություն Մաքսվելի էլեկտրադինամիկայի հավասարումների, դաշտերի լարվածությունների լուծումները պարունակում են բաղադրիչներ, որոնք բաղկացած են երկու տարբեր նվազանքներից և ալիքների երկարություններից:

Получены дифференциальные уравнения для электромагнитных полей в электрической проводящей среде. На их основе построены решения для плоской электромагнитной волны, проникающей в такое полупространство. В отличие от уравнений электродинамики Максвелла решения для напряженностей полей содержат слагаемые с двумя различными декрементами затухания и длинами волн.

Библиогр.: 3 назв

Differential equations for electromagnetic fields are obtained in electric conductive medium. Solutions for plane electromagnetic wave penetrating into such a semispace based on these equations are constructed. Unlike the Maxwell electrodynamics equations, these solutions contain terms with two different damping factors and two different wavelengths.

Ref. 3.

Тензорные уравнения электромагнитодинамики, в которой постулировано, что электромагнитные поля генерируются электрическими и магнитными зарядами и их токами, были получены в [1]. Полная система основных векторных уравнений электромагнитодинамики дана в [2].

Для решения поставленной задачи используем нижеследующие уравнения электромагнитодинамики, выписанные в случае отсутствия в веществе свободных электрических и магнитных зарядов ($\rho_e = 0$, $\rho_m = 0$) и магнитных токов проводимости ($\chi = 0$). Считается, что рассматривается такое электрическое вещество, которое является изолятором для магнитных токов проводимости.

Уравнения для токов проводимости имеют вид

$$\text{rot} \vec{H} - \partial \vec{D} / \partial t + c n \text{rot} \vec{D}' - n \partial \vec{H}' / c \partial t = \vec{\delta}, \quad (1)$$

$$c n \text{rot} \vec{B} - n \partial \vec{E} / c \partial t + \text{rot} \vec{E}' - \partial \vec{B}' / \partial t = 0,$$

а для индукций —

$$\text{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad \text{rot} \vec{H}' = -\partial \vec{D}' / \partial t. \quad (2)$$

Уравнения при отсутствии свободных электрических и магнитных зарядов имеют вид

$$\text{div} \vec{D} = 0, \quad \text{div} \vec{B}' = 0. \quad (3)$$

Принимаем, что вещество изотропное, в котором

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H}, \quad \vec{D}' = \epsilon_s \vec{E}', \quad \vec{B}' = \mu_s \vec{H}'. \quad (4)$$

$$\epsilon = \epsilon' \epsilon_0, \quad \mu = \mu' \mu_0, \quad \epsilon_s = \epsilon'_s \epsilon_0, \quad \mu_s = \mu'_s \mu_0.$$

а плотности электрических токов проводимости равны

$$\vec{\delta} = \sigma \vec{E}. \quad (5)$$

Рассмотрим случай гармонических колебаний. Введем комплексные функции от $\exp(j\omega t)$. Тогда уравнения (1) и (2) с учетом (4) и (5) принимают вид

$$\text{rot} \vec{H} - j\omega \epsilon \vec{E} + c n \epsilon_s \text{rot} \vec{E}' - j\omega n \vec{H}' / c - \sigma \vec{E} = 0, \quad (6)$$

$$c n \mu \text{rot} \vec{H} - j\omega n \vec{E} / c + \text{rot} \vec{E}' - j\omega \mu_s \vec{H}' = 0,$$

$$\text{rot} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}, \quad \text{rot} \vec{H}' = -j\omega \epsilon_s \vec{E}'. \quad (7)$$

Совместно решая (6) и (7), получаем

$$\text{rot} \text{rot} \vec{H} + c n \epsilon_s \text{rot} \text{rot} \vec{E}' - \omega^2 \epsilon \mu \vec{H} - n \omega^2 \epsilon_s \vec{E}' / c + j\omega \sigma \mu \vec{H} = 0, \quad (8)$$

$$c n \mu \text{rot} \text{rot} \vec{H} + \text{rot} \text{rot} \vec{E}' - n \omega^2 \mu \vec{H} / c - \omega^2 \mu_s \epsilon_s \vec{E}' = 0.$$

Аналогично, решая (6) и (7), получаем

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} - \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E} + c n \mu \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} - n \omega^2 \mu \vec{H} / c + j \omega \sigma \mu \vec{E} = 0, \quad (9)$$

$$c n \varepsilon_a \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} - n \omega^2 \varepsilon_a \vec{E} / c + \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} - \omega^2 \mu_a \varepsilon_a \vec{H} = 0.$$

Для любого произвольного вектора имеем

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}, \quad (10)$$

где ∇^2 — оператор Лапласа.

Уравнения (8) и (9) с учетом (10) и (3) принимают вид

$$\nabla^2 \vec{H} + m_1 \nabla^2 \vec{E}^* + m_2 \vec{H} + m_3 \vec{E}^* = 0, \quad (11)$$

$$n_1 \nabla^2 \vec{H} + \nabla^2 \vec{E}^* + n_2 \vec{H} + n_3 \vec{E}^* = 0,$$

$$\nabla^2 \vec{E} + a_1 \nabla^2 \vec{H}^* + a_2 \vec{E} + a_3 \vec{H}^* = 0, \quad (12)$$

$$b_1 \nabla^2 \vec{E} + \nabla^2 \vec{H}^* + b_2 \vec{E} + b_3 \vec{H}^* = 0,$$

где коэффициенты равны

$$\begin{aligned} m_1 &= c n \varepsilon_a, \quad m_2 = \omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \sigma \mu, \quad m_3 = n \omega^2 \varepsilon_a / c, \\ n_1 &= c n \mu, \quad n_2 = n \omega^2 \mu / c, \quad n_3 = \omega^2 \mu_a \varepsilon_a, \\ a_1 &= c n \mu, \quad a_2 = \omega^2 \mu \varepsilon - j \omega \sigma \mu, \quad a_3 = n \omega^2 \mu / c, \\ b_1 &= c n \varepsilon_a, \quad b_2 = n \omega^2 \varepsilon_a / c, \quad b_3 = \omega^2 \mu_a \varepsilon_a. \end{aligned} \quad (13)$$

Из систем (11) и (12) для переменных $\vec{H}$, $\vec{E}^*$ и $\vec{E}$, $\vec{H}^*$ следуют одинаковые дифференциальные уравнения в частных производных четвертого порядка ($\vec{F} = \vec{H}, \vec{E}^*, \vec{E}, \vec{H}^*$):

$$(c_1 \nabla^4 + c_2 \nabla^2 + c_3) \vec{F} = 0, \quad (14)$$

где коэффициенты равны

$$\begin{aligned} c_1 &= 1 - m_1 n_1 = 1 - a_1 b_1 = 1 - c^2 n^2 \mu \varepsilon_a, \\ c_2 &= m_2 + n_2 - m_1 n_2 - m_3 n_1 = a_2 + b_2 - a_1 b_2 - a_3 b_1, \\ c_3 &= -j \omega \sigma \mu + \omega^2 \mu \varepsilon + \omega^2 \mu_a \varepsilon_a - 2 n^2 \omega^2 \mu \varepsilon_a. \end{aligned} \quad (15)$$

$$c_1 = m_1 n_1 - m_3 n_2 = a_2 b_1 - a_1 b_2 = \omega^4 \mu \varepsilon_a (\mu_a \varepsilon - n^2 / c^2) - j \omega \sigma \mu_a \varepsilon_a.$$

Если пренебречь электрическими токами смещения ($\partial D / \partial t = 0$), то получим ($m_2' = -j \omega \sigma \mu$, $n_2 = 0$):

$$\begin{aligned} c_1 &= 1 - c^2 n^2 \mu \varepsilon_a, \quad c_2' = -j \omega \sigma \mu + \omega^2 \mu_a \varepsilon_a - n^2 \omega^2 \mu \varepsilon_a, \\ c_3' &= -j \omega^3 \sigma \mu_a \varepsilon_a. \end{aligned} \quad (16)$$

Если пренебречь магнитными токами смещения ($\partial B / \partial t = 0$), то получим ($m_3 = 0$, $n_3 = 0$):

$$c_1 = 1 - c^2 n^2 \mu \varepsilon_a, \quad c_2'' = -j \omega \sigma \mu + \omega^2 \varepsilon \mu - n^2 \omega^2 \mu \varepsilon_a, \quad c_3'' = 0. \quad (17)$$

В этом случае уравнение (14) принимает вид

$$(c_1 \nabla^2 + c_2'') \vec{F} = 0. \quad (18)$$

Если одновременно пренебречь электрическими и магнитными токами смещения, то имеем ($m_1''' = -j\omega\sigma\mu$, $m_1 = 0$, $n_2 = 0$, $n_3 = 0$):

$$c_1 = 1 - c^2 n^2 \mu \epsilon_d, \quad c_2''' = -j\omega\sigma\mu, \quad c_2''' = 0. \quad (19)$$

Уравнение (14) в этом случае принимает вид

$$((1 - c^2 n^2 \mu \epsilon_d) \nabla^2 - j\omega\sigma\mu) \vec{F} = 0. \quad (20)$$

Таким образом, пренебрежение магнитными токами смещения снижает степень дифференциального уравнения (см. уравнения (18) и (20)).

Если в (18) и (20) устремить постоянную взаимодействия $n \rightarrow 0$, то получим общеизвестные уравнения электродинамики Максвелла для электромагнитных полей в проводящей среде с учетом и без учета электрических токов смещения.

Используем полученное уравнение (14) для рассмотрения процесса проникновения плоской электромагнитной волны в проводящее полупространство $z \geq 0$. Плоскость координат XOY отделяет вакуум от пространства проводника. Направим $\vec{E}_0$ на поверхности $z=0$ по оси X, а вектор $\vec{H}_0$ по оси Y, тогда вектор Пойнтинга $\vec{P} = [\vec{E}\vec{H}]$ будет направлен по оси Z, и энергия из вакуума будет поступать в проводник. В проводнике принимаем $E_x \neq 0$, $E_y = 0$, $E_z = 0$. Кроме того, считаем

$$\partial E_x / \partial x = 0, \quad \partial E_x / \partial y = 0. \quad (21)$$

В проводнике пренебрегаем электрическими токами смещения ввиду их малости по сравнению с токами проводимости. Магнитные токи смещения, несмотря на их малость, будем учитывать для выявления отличия процессов электромагнитодинамики от электродинамики.

Принимаем следующие численные значения (система MKS) параметров проводника:

$$\sigma = 10^7 (\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{м}^{-1}), \quad \mu' = 10^4, \quad \epsilon' = 1, \quad \mu_d' = 1, \quad \epsilon_d' = 1. \quad (22)$$

Частота электромагнитной волны равна 50 Гц.

Уравнение (14) для $\vec{E}_x$ с учетом (21) принимает вид

$$c_1 \partial^4 \vec{E}_x / \partial z^4 + c_2 \partial^2 \vec{E}_x / \partial z^2 + c_3 \vec{E}_x = 0, \quad (23)$$

где коэффициенты c_i получены по уравнению (16), если пренебречь электрическими токами смещения. Решение (23) имеет вид

$$\vec{E}_x = A_1 e^{q_1 z} + A_2 e^{q_2 z} + A_3 e^{q_3 z} + A_4 e^{q_4 z}, \quad (24)$$

где q_i — корни биквадратного характеристического уравнения

$$c_1 q^4 + c_2 q^2 + c_3 = 0. \quad (25)$$

Поскольку при $z \rightarrow \infty$ напряженность $\vec{E}_x$ должна оставаться конечной, то остаются те постоянные интегрирования A_i , у которых вещественная часть корней q_i отрицательна.

Проводя расчеты, имеем два корня:

$$\begin{aligned} q_1 &\approx -\sqrt{j\omega\sigma\mu} = -(1+j)\sqrt{0.5\omega\sigma\mu}, \\ q_2 &\approx -\omega^2(\epsilon_2\mu_2)^{1/2}/2\sigma\mu - j\omega\sqrt{\epsilon_2\mu_2}, \end{aligned} \quad (26)$$

причем $|q_1| \approx 10^4$, $\operatorname{Re} q_2 \approx 10^{-23}$, $\operatorname{Im} q_2 \approx 10^{-4}$ (с размерностью $1/\text{м}$) для принятых численных значений параметров среды и частоты поля.

Тогда

$$\dot{E}_z = A_1 e^{q_1 z} + A_2 e^{q_2 z}. \quad (27)$$

Используя первое выражение уравнения (7), находим

$$H_z = j(1/\omega\mu) \partial \dot{E}_z / \partial z = jq_1 A_1 e^{q_1 z} / \omega\mu + jq_2 A_2 e^{q_2 z} / \omega\mu. \quad (28)$$

Для определения постоянных интегрирования приравниваем тангенциальные составляющие напряженностей на границе раздела двух сред при $z=0$. Тогда имеем

$$A_1 + A_2 = \dot{E}_0, \quad jq_1 A_1 / \omega\mu + jq_2 A_2 / \omega\mu = H_0. \quad (29)$$

Решая (29), получаем

$$A_1 = -\dot{E}_0 \sqrt{j\omega\epsilon_2\mu_2} / j\sigma\mu + H_0 \sqrt{j\omega\mu} / \sigma, \quad A_2 = \dot{E}_0 - H_0 \sqrt{j\omega\mu} / \sigma. \quad (30)$$

Обозначая в уравнении (28)

$$H_1 = jq_1 A_1 / \omega\mu, \quad H_2 = jq_2 A_2 / \omega\mu,$$

получаем для них следующие выражения:

$$H_1 = H_0 - j\dot{E}_0 \sqrt{\epsilon_2\mu_2} / \mu^2, \quad H_2 = \dot{E}_0 \sqrt{\epsilon_2\mu_2} / \mu^2 - H_0 \sqrt{j\omega\epsilon_2\mu_2} / \sigma\mu. \quad (31)$$

Численный порядок величин в уравнениях (30) и (31) имеет вид

$$\sqrt{j\omega\epsilon_2\mu_2} / \sigma\mu \sim 10^{-10}, \quad \sqrt{j\omega\mu} / \sigma \sim 10^{-2} (\text{В} \cdot \text{А}^{-1}), \quad \sqrt{\epsilon_2\mu_2} / \mu^2 \sim 10^{-5} (\text{А} \cdot \text{В}^{-1}).$$

Выражения для $\dot{E}_z$ и H_z (см. (11) и (12)) запишем в виде

$$\dot{E}_z = \dot{E}_1 e^{q_1 z} + \dot{E}_2 e^{q_2 z}, \quad H_z = H_1 e^{q_1 z} + H_2 e^{q_2 z}. \quad (32)$$

Эти постоянные интегрирования можно определить, используя уравнения (11) и (12) с учетом (27), (28), (30) и (31), либо используя второе выражение уравнения (7) и граничные значения в вакууме $\dot{E}_0$ и H_0 при $z=0$.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Получены дифференциальные уравнения электромагнитных гармонических во времени полей с электрическим и магнитным токами смещения в электрической проводящей среде, где учитываются электрические токи проводимости.

2. Построены решения для плоской электромагнитной волны, проникающей в полупространство с такой средой.

3. Наличие характеристического уравнения четвертой степени обуславливает решение для напряженностей полей ($\dot{E}$, H , $\dot{E}$ и $\dot{H}$) двух слагаемых с двумя различными декрементами затухания и двумя различными длинами волн.

4. Только при пренебрежении магнитными токами смещения степень характеристического уравнения становится равной двум, как и в электродинамике Максвелла. Однако отличия сохраняются в выражениях главного коэффициента характеристического уравнения (см. (17) и (18)), равного для электромагнитодинамики

$$c_1 = 1 - c^2 n^2 \mu \epsilon, \quad c_1 = 1 - n^2 \mu' \epsilon'.$$

Для немагнитных электрических сред ($\mu' = 1$, $\epsilon' = 1$) получаем отличия порядка $1 \cdot 10^{-6}$, так как постоянная взаимодействия электромагнитодинамики [3] равна $n = 5.325 \cdot 10^{-3}$ и $n^2 = 2.83 \cdot 10^{-4}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арешян Г.Л. О теории электромагнитодинамики // ЦАИ АрмССР. 1978. - Т. 66, № 4. - С. 222-227.
2. Векторные уравнения электромагнитодинамики и некоторые следствия, основанные на них // ГИУА. НТ отчет по теме № 94-279, 1995.
3. Арешян Г.Л. Связь постоянной взаимодействия электромагнитодинамики с фундаментальными постоянными // Изв. НАН Армении. Физика. - 1995. - Т. 30, № 6. - С. 249-252.

ГИУА

10.07.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 147-151.

УДК 621.3.01.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Д. АКОЦДЖАНЫН, В.С. САФАРЯН

К ТОПОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДАМ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Պահանջների տեսության կիրառմամբ բջջային (կոնտուրային) հոսանքների մեթոդով էլեկտրական շղթաները հաշվարկելու համար "2-ծառ" ենթագրաֆների նմանակությամբ, առաջարկվում են "2-լրացում" ենթագրաֆները, որոնք հեշտությամբ առանձնացվում են էլեկտրական շղթային համապատասխանող գրաֆից (ինչպես և նրա սխեմայից): Ընդ որում, բոլոր համապատասխան "2-լրացումների" ճյուղերի դիմադրությունների արտադրյալների գումարով հաշվարկվում են բջջային հոսանքների հավասարումների համակարգի դիմադրությունների մատրիցի հանրահաշվական լրացումները: Իսկ դա հնարավորություն է տալիս, օգտվելով ուղղակի էլեկտրական շղթայի սխեմայից (կամ գրաֆից), առանց հավասարումներ կազմելու, հաշվարկել նշված հանրահաշվական լրացումները և պարզեցնում է էլեկտրական շղթայի հաշվարկը:

Для расчета электрических цепей по методу токов ячеек (контурных токов) с применением теории графов предложены подграфы, названные по аналогии "2-деревьями" "2-дополнениями", легко выделяемыми непосредственно из графа (также из схемы) исследуемой электрической цепи. По сумме произведений сопротивлений ветвей всех соответствующих "2-дополнений" рассчитываются алгебраические дополнения матрицы сопротивлений систем уравнений токов ячеек. Это даст возможность, пользуясь непосредственно схемой (или графом) электрической цепи, не составляя уравнений, определить упомянутые алгебраические дополнения, что значительно упростит расчет электрической цепи.

Илл. 1. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

To design electric circuits by loop (mesh) current method using the theory of graphs, "2-complements" subgraphs called by analogy with "2-trees" subgraphs are proposed, the former ones are easily separated directly from the graph (as well as from the scheme) of the electric circuit studied. The algebraic complements of the resistance

matrix for simultaneous equations of mesh currents are calculated with the product sum of all the corresponding "2-complements" having branch resistances. This enables to specify the mentioned algebraic complements having directly used the scheme (or graph) of electric circuit without forming equations. Thus the electric current design is considerably simplified.

[1, Table 1, Ref. 3.]

При исследованиях и расчете сложных электрических цепей часто пользуются методами токов ячеек (контурных токов) и узловых напряжений (напряжений сечений). При расчетах, проводимых указанными методами, приходится раскрывать определители и алгебраические дополнения матриц сопротивлений токов ячеек и проводимостей узловых напряжений [1].

Известны топологические методы раскрытия указанных определителей и алгебраических дополнений [2]. Если для раскрытия определителей проводимостей Δ_c и сопротивлений Δ_z следует выделить из графа исследуемой электрической цепи все подграфы "дерева" и "дополнения", а для алгебраических дополнений матрицы проводимостей Δ_c — соответствующие подграфы "2-дерева", то для раскрытия алгебраических дополнений матрицы сопротивлений Δ_z систем уравнений токов ячеек, не имея закономерности построения дуалей, соответствующих "2-деревам", рекомендуется переход от исходного графа к дуальному и раскрытие алгебраических дополнений матрицы проводимостей узловых уравнений дуального графа (схемы) с заменой проводимостей ветвей на их сопротивления [3]. Этот путь раскрытия алгебраических дополнений матрицы сопротивлений сложен и требует перехода от исходного графа, соответствующего исследуемой электрической цепи, к дуальному и выделения из последнего соответствующих "2-х деревьев".

В настоящей статье предложены подграфы, дуальные "2-деревам", называемые "2-дополнениями", довольно просто выделяемые из графа исследуемой электрической схемы и дающие возможность определить алгебраические дополнения матрицы сопротивлений системы уравнений токов ячеек, как сумму произведений сопротивлений ветвей всех возможных для графа (схемы) соответствующих 2-дополнений.

Рассмотрим граф электрической цепи, содержащий n ячеек. Известно, что ячейка — частный случай контура, которая, находясь в составе графа, не содержит внутри себя замкнутых путей. Исключением является ячейка, состоящая из всех внешних ветвей графа (внешняя ячейка). Если принять, что граф представляет собой не плоскую, а пространственную картину, то можно заключить, что внешняя ячейка внутри себя также не содержит замкнутых путей [3].

Известно, что число ветвей дерева равно $q-1$ (q — число узлов графа), число ветвей дополнения — $n-1$ (n — число ячеек графа). Известно также, что число ветвей "2-дерева" равно $q-2$, число ветвей "2-дополнения" — $n-2$.

Примем символ M для "2-дополнения". При раскрытии алгебраических дополнений матрицы сопротивления применяются "2-дополнения", в которых от определенных ячеек графа не должен совершаться переход к базисной ячейке. В этих случаях применяют специальные индексы для обозначения таких "2-дополнений". Например "2-

дополнения", в котором из ячеек a и b не должен совершаться переход к базисной ячейке, обозначается символом $M_{ab, \Gamma}$, где Γ — базисная ячейка.

Подграфы "2-дополнения" типа $M_{ab, \Gamma}$ состоят из ветвей, которые не составляют узел (сечение) графа. Пересечением этих ветвей или части их (также одной из них) не совершается переход из ячеек a и b в базисную ячейку Γ , но обеспечивается переход от одной ячейки к другой.

Алгебраические дополнения $\Delta_{ab, \Gamma}$ матрицы сопротивлений системы уравнений токов ячеек определяются из соотношения:

$$\Delta_{ab, \Gamma} = \sum (\text{произведения сопротивлений ветвей всех } M_{ab, \Gamma} \text{ "2-дополнений" графа электрической цепи}). \quad (1)$$

Сумма берется по всем возможным $M_{ab, \Gamma}$ "2-дополнениям" графа. Отметим также, что при расчете электрических цепей методом токов ячеек в качестве базисной удобно принять внешнюю ячейку. В этом случае переход из заданных ячеек (a и b) пересечением ветвей "2-дополнения" $M_{ab, \Gamma}$ в базисную (Γ) означает выход за граф, что легко наблюдается.

В качестве примера определения алгебраических дополнений матрицы сопротивлений уравнений токов ячеек рассмотрим граф некоторой электрической схемы (рис.). Матрица сопротивлений системы уравнений токов ячеек электрической схемы имеет вид

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & -Z_2 & 0 & 0 \\ -Z_2 & Z_2 + Z_3 + Z_5 & -Z_3 & -Z_5 \\ 0 & -Z_3 & Z_1 + Z_4 + Z_6 & -Z_6 \\ 0 & -Z_5 & -Z_6 & Z_5 + Z_6 + Z_7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

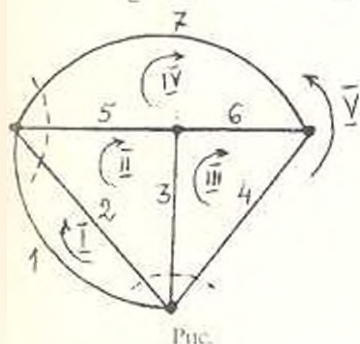


Рис.

При составлении уравнений токов ячеек в качестве базисной принята внешняя 5-я ячейка с ветвями 1, 4, 7. Напомним также, что при расчете электрических цепей методом токов ячеек принято все ячейки, кроме внешней, обходить в одну сторону (например, по часовой стрелке), а внешнюю — в обратную сторону. Число ячеек рассматриваемого графа $n = 5$. Число ветвей "2-дополнений" $n - 2 = 3$. Пользуясь понятием "2-дополнений",

раскроем алгебраические дополнения приведенной матрицы (2).

Начнем с алгебраического дополнения элемента, расположенного на главной диагонали матрицы сопротивлений, например, с Δ_{11} . Для этого следует выделить из графа все возможные "2-дополнения" типа $M_{11, 5}$. Как видно, в составе "2-дополнений" не может участвовать ветвь 1, т.к. пересекая только ее, можно выйти из первой ячейки в базисную (рис.). Не составляет "2-дополнение" $M_{11, 5}$ совокупность ветвей 2, 3, 4, а также 2, 5, 7, т.к. пересекая их, можно из первой ячейки выйти в базисную (см. пунктир на

рис.). Не могут быть "2-дополнениями" совокупности ветвей 3, 5, 6, а также 4, 6, 7, т.к. они составляют узел графа. Составляют "2-дополнения" типа M_{115} совокупности ветвей 2, 3, 5 и 2, 3, 6, (см. таблицу, где знаками отмечены совокупности ветвей, составляющих "2-дополнения"), т.к. они не составляют узел графа, и, пересекая только их, нельзя выйти из первой ячейки в базисную. На основании изложенного составлена колонка M_{115} таблицы. Пользуясь соотношением (1) и данными таблицы, для алгебраического дополнения получим

$$\begin{aligned}\Delta_{11} = & Z_2 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_7 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_6 + Z_2 Z_4 Z_7 + \\ & + Z_2 Z_5 Z_6 + Z_2 Z_5 Z_7 + Z_3 Z_4 Z_5 + Z_3 Z_4 Z_6 + Z_3 Z_4 Z_7 + Z_3 Z_5 Z_6 + \\ & + Z_3 Z_5 Z_7 + Z_3 Z_6 Z_7 + Z_4 Z_5 Z_6 + Z_4 Z_5 Z_7 + Z_4 Z_6 Z_7.\end{aligned}$$

Таблица

Совокупность ветвей	"2-дополнения"									
	M_{115}	M_{225}	M_{335}	M_{445}	M_{125}	M_{135}	M_{145}	M_{215}	M_{245}	M_{345}
123	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
124	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
125	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
126	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+
127	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
134	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
135	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
136	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
137	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-
145	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
146	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
147	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
156	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
157	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
167	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
234	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
235	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
236	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
237	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
245	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-
246	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+
247	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
256	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
257	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
267	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-
345	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
346	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
347	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
356	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
357	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
367	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
456	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-
457	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
467	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
567	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Теперь рассмотрим вопрос определения алгебраических дополнений диагональных элементов матрицы сопротивлений, например Δ_{x12} . Для этого следует выделить все возможные "2-дополнения" типа $M_{12,5}$. Ясно, что в составе $M_{12,5}$ не могут участвовать ветвь 1, сочетания ветвей 3, 4 и 5, 7, а также совокупности ветвей 3, 6, 7 и 4, 5, 6, т.е. пересечением их возможен переход от первой или от второй ячеек в базисную. А совокупности ветвей 2, 3, 5, 2, 3, 6, ... (все отмеченные знаком "+" в колонке $M_{12,5}$ таблицы) являются "2-дополнениями" типа $M_{12,5}$, поскольку пересечение этих трех ветвей не приводит к переходу из первой и второй ячеек к базисной и ветви эти не образуют узел графа. Таким образом, на основании соотношения (1) имеем

$$\Delta_{x12} = Z_2 Z_3 Z_5 + Z_2 Z_3 Z_6 + Z_2 Z_3 Z_7 + Z_2 Z_4 Z_5 + Z_2 Z_4 Z_6 + \\ + Z_2 Z_4 Z_7 + Z_2 Z_5 Z_6 + Z_2 Z_6 Z_7.$$

Аналогично определяются все алгебраические дополнения матрицы сопротивлений (2). Соответствующие им "2-дополнения" приведены в таблице (отмечены знаком "-"). В точности значений, полученных для алгебраических дополнений, а также "2-дополнений", приведенных в таблице, можно убедиться, раскрыв соответствующие алгебраические дополнения матрицы (2).

Таким образом, подграфы "2-дополнения", которые легко выделяются из графа, дают возможность, пользуясь прямо схемой (графом) электрической цепи и не составляя уравнений, записать выражения алгебраических дополнений $\Delta_{x\alpha\beta}$ матрицы сопротивлений уравнений токов ячеек, что значительно облегчает расчет режима работы электрической цепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Շարիֆյան Մ.Ա., Տափրջյան Գ.Դ. էլեկտրատեխնիկայի տեսական հիմունքները. - Երևան, - Լույս, - 1986 թ. - 561 էջ:
2. Сешу С., Рид М.Б. Линейные графы и электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1971, - 447 с.
3. Акопджанян Г.Д. К исследованию дуальных электрических цепей // Межвуз. сб. науч. тр. по электр. / ЕрПИ. - Ереван, 1985, - С. 20-27.

ГИУА

25.06.1995

В.К. БРУТЯН, В.В. САРГСЯН

К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЕ

Դիտարկվում է լրջանաձև ուղեծրով թռչող սարքի հետագծի լավագույն կառավարման օրենքի որոշման խնդիրը, որն ապահովում է որոշակի սահմանափակումների ժամանակ փաստացի և հաշվարկային հետագծերի առավելագույն նույնականության աստիճանը: Հաշվարկվում է լավագույն կառավարման օրենքը, որը նվազեցնում է տեղաշարժման արագության կորստի մեծությունը քննարկվող որակի ֆունկցիոնալը: Հիմնավորվում է, որ կառավարման լավագույն օրենքը ստացվում է դինամիկ գործընթացում միայն արագության նշանի անփոփոխության պայմանի դեպքում:

Рассматривается задача определения оптимального закона управления (ОЗУ) обеспечивающего при определенных ограничениях наибольшую степень совпадения фактической и расчетной траекторий летательного аппарата по круговой орбите. Вычисляется ОЗУ, минимизирующий функционал качества, характеризующий величину потери скорости маневра. Показывается, что ОЗУ получается в динамическом процессе, только исходя из условия неизменности знака ускорения.

Библиогр.: 5 назв.

The problem of the best control law of circular orbit flying objects, which provides a specific degree of identity for real and calculated orbits, is considered. The best control law which tends to minimize the functional of the quality characterizing value for displacement speed of the loss is calculated. It is grounded that the best control law works only in the dynamic process when the speed is unchangeable.

Ref. 5.

Введение. Пусть движение летательного аппарата (ЛА) характеризуется вектором z_i , направленным от начала координат (в центре силы притяжения) к центру тяжести ЛА O_i . Для решения задачи оптимального управления полетом по замкнутой орбите можно рассматривать ЛА в виде сосредоточенной в его центре тяжести массы. Тогда, согласно законам механики, движение ЛА в гравитационном поле определяется уравнением [1]

$$\ddot{z}_i = -\alpha_i z_i r_i^{-3} + v_i, \quad i=1,2,3,$$

где $v = (v_1, v_2, v_3)$ представляет собой вектор, характеризующий ускорения, сообщаемое ЛА приводным двигателям, а $r_i = (z_{i1}^2 + z_{i2}^2 + z_{i3}^2)^{0.5}$.

Пусть желаемое положение центра массы ЛА O_i на расчетной орбите определяется вектором z_{i0} . Тогда траектория движения точки O_i описывается зависимостью $\ddot{z}_{i0} = -\alpha_i z_{i0} r_{i0}^{-3}$, $i=1,2,3$. В этих формулах $\alpha_i = r_i(\omega_i)^2$, $r_i = (z_{i1}^2 + z_{i2}^2 + z_{i3}^2)^{0.5} = \text{const}$, ω_i — угловая скорость точки

О, $j=1,2$. Далее удобно вводить нормированные координаты, характеризующие отклонения действительного положения ЛА от идеального $z_j, (z_{1j} - z_{2j})r_j^{-1}$.

Исходя из предположения о малости расстояния между точками O_1 и O_2 , систему в координатах z_j можно рассматривать как линейную. Вводя новую безразмерную независимую переменную t , уравнение движения в новых координатах записывается следующим образом:

$$\ddot{z}_1 = z_1(3\cos^2 t - 1) + 3z_2 \sin t \cos t + v_1 r_1^{-1} \omega_1^2,$$

$$\ddot{z}_2 = 3z_1 \sin t \cos t + z_2(3\sin^2 t - 1) + v_2 r_2^{-1} \omega_2^2,$$

$$\ddot{z}_3 = -z_1 + v_1 r_1^{-1} \omega_1^2.$$

В этих уравнениях чертой $\ddot{z}_j$ обозначены производные по t . Система координат выбрана с таким условием, чтобы удовлетворялись соотношения: $z_{11} = r_1 \cos \omega_1 t$, $z_{21} = r_2 \sin \omega_1 t$, $z_{31} = 0$. Вводя для прямолинейных составляющих движения по траектории новые переменные, получим

$$x_1 = -z_1 \cos t - z_2 \sin t + z_3 \sin t - z_4 \cos t,$$

$$x_2 = (z_1/2)(1 - 2\cos^2 t) - z_2 \sin t \cos t + (z_3/2) \sin t \cos t - (z_4/2)(2 - \sin^2 t),$$

$$x_3 = -z_1 \sin t \cos t - (z_2/2)(1 - 2\cos^2 t) + (z_3/2)(2 - \cos^2 t) - (z_4/2) \sin t \cos t,$$

$$x_4 = (z_1/3) \sin t - (z_2/3) \cos t - (2z_3/3) \cos t - (2z_4/3) \sin t.$$

Дифференциальные уравнения для этих переменных запишутся в виде

$$\dot{x}_1 = -u_1, \quad \dot{x}_2 = -(u_1/2) \sin t - u_2 \cos t,$$

$$\dot{x}_3 = (u_1/2) \cos t - u_2 \sin t, \quad \dot{x}_4 = x_1 - (2u_1/3).$$

(1)

В уравнениях (1) величины u_1 и u_2 представляют собой значения нормированных ускорений ЛА в направлении радиуса вектора и перпендикулярно к нему.

Задача состоит в выборе такого ОЗУ, которое обеспечивало бы наибольшую степень совпадения фактической и расчетной траекторий. В этой связи переменная x_4 является мерой фазового отклонения ЛА от идеальной точки O_2 , а величины x_1, x_2, x_3 характеризуют соответствующие мгновенные отклонения параметров действительной траектории от идеальной. Поэтому задача сводится к необходимости обеспечения нулевых значений переменных x_1, x_2 и x_4 .

Постановка задачи. При заданном исходном состоянии x_1, x_2, x_3 и длительности маневра T необходимо найти управляющие функции $u_1 = u_1(t)$ и $u_2 = u_2(t)$, значения которых удовлетворяют ограничениям

$u \leq b$, $u = (u_1^2 + u_2^2)^{1/2}$, вытекающим из уравнений (1) граничным условиям

$$x_1 = \int_0^{2\pi} u_2 dt, \quad 2\pi = \omega_1 T, \quad x_2 = (1/2) \int_0^{2\pi} (u_1 \sin t + 2u_2 \cos t) dt, \quad (2)$$

$$x_1 = (1/2) \int_0^{2\pi} (-u_1 \cos t + 2u_2 \sin t) dt,$$

и, кроме того, обеспечивают минимум функционала качества

$$J = \int_0^{2\pi} u dt, \quad (3)$$

который характеризует величину, называемую потерей скорости маневра.

Из выражений (2) и (3) вытекает следующая оценка величины:

$$J = \int_0^{2\pi} u dt \geq \int_0^{2\pi} |u_2(t)| dt \geq \left| \int_0^{2\pi} u_2 dt \right| = |x_1|. \quad (4)$$

Другая оценка функционала (3) может быть получена в результате следующего интегрального преобразования $a = (x_2^2 + x_3^2)^{0.5}$:

$$a = \int_0^{2\pi} (da/dt) dt \leq \int_0^{2\pi} a^{-1} |x_2 \dot{x}_2 + x_3 \dot{x}_3| dt. \quad (5)$$

На основании неравенства Коши-Шварца числитель подынтегрального выражения в формуле (5) можно представить в виде [2]

$$|x_2 \dot{x}_2 + x_3 \dot{x}_3| \leq a(x_2^2 + x_3^2)^{0.5} = a(0.25u_1^2 + u_2^2)^{0.5} = a(a_1^2 + u_2^2)^{0.5} = au. \quad (6)$$

Наконец, комбинируя неравенства (3) и (5), можно получить искомую оценку в виде

$$J \geq a \quad (7)$$

Объединяя оценки (4) и (7), можно определить еще одно ограничение

$$J \geq \max\{|x_1|, a\}, \quad (8)$$

которое определяет нижний предел потери скорости.

Согласно условиям (2), значение x_1 достигается в том случае, когда маневр осуществляется в направлении, перпендикулярном радиусу-вектору с помощью составляющей ускорения u_2 без перемены знака последней. Перемена знака составляющей u_2 или использование ускорения u_1 в направлении радиуса-вектора приводит к увеличению потери скорости сверх величины x_1 согласно (8). Поэтому для решения поставленной задачи целесообразно применять только ускорение u_2 . Несложный анализ показывает, что, несмотря на связанное с этим ограничением понижение числа управляемых координат, ЛА остается полностью управляемым [3]. В то же время отмеченное ограничение позволяет значительно упростить синтез оптимальной системы.

Решение задачи. Исключая из (1) переменную u_1 , можно получить дифференциальные уравнения системы в виде

$$\dot{x}_1 = -u_2, \quad \dot{x}_2 = -u_2 \cos t, \quad \dot{x}_3 = -u_2 \sin t. \quad (9)$$

Выражение для функционала потери скорости в этом случае определяется

соотношением $J = \int_0^{2\pi} |u_2| dt$. Для определения ОЗУ используется принцип

максимума [4]. Тогда с учетом уравнений (9) функцию переключения можно представить выражением $\lambda(t) = k_1 + k_2 \cos t + k_3 \sin t$, изменение которого

происходит в пределах +1 и -1. Для осуществления ОЗУ с помощью этого выражения используется следующая функция:

$$u_2(t) = \begin{cases} b, & \text{если } \lambda(t) \geq 1, \\ 0, & \text{если } |\lambda(t)| < 1, \\ -b, & \text{если } |\lambda(t)| \leq -1. \end{cases}$$

Анализ оптимального закона управления. В общем случае ОЗУ состоит из n интервалов длительностью Δ_1 с положительным знаком ускорения и n интервалов длительностью Δ_2 с отрицательным знаком ускорения. Максимум функции переключения характеризуется углом α_0 . Тогда с учетом уравнений (9) можно определить следующие выражения для нормированных координат:

$$m_1 = \Delta_1 - \Delta_2, \quad m_2 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \cos t dt - \int_{\alpha_1 + \pi}^{\alpha_2 + \pi} \cos t dt, \quad m_3 = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin t dt - \int_{\alpha_1 + \pi}^{\alpha_2 + \pi} \sin t dt,$$

где $m_i = x_i / nb$, $i = 1, 2, 3$, $\alpha_1 = \alpha_0 - \Delta_1 / 2$, $\alpha_2 = \alpha_0 + \Delta_1 / 2$.

В результате преобразований этих выражений можно получить формулы для определения параметров ОЗУ в зависимости от начального состояния ЛА

$$\sigma = m_1 / 4, \quad \sin \sigma = a / 4nb \cos(m_1 / 4), \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = x_3 x_2^{-1}, \quad (10)$$

где $\sigma = (\Delta_1 - \Delta_2) / 4$, $\sigma = (\Delta_1 + \Delta_2) / 4$.

Соответствующее значение потери скорости представляется выражениями $J = 4nb\sigma = a\sigma / \sin \sigma \cos(m_1 / 4)$, из которых следует, что $J > a$ и $\lim_{n \rightarrow \infty} J = a$.

Анализ выражений (10) показывает, что условие существования ОЗУ (одинаковые знаки величин Δ_1 и Δ_2) сводится к удовлетворению неравенства

$$a \geq 2nb \sin(m_1 / 2). \quad (11)$$

В случаях, когда справедливо неравенство

$$a < 2nb \sin(m_1 / 2). \quad (12)$$

ОЗУ может быть получен только из условия неизменности знака ускорения в динамическом процессе. Следует заметить, что в качестве общего метода для вычисления ОЗУ в стохастических системах управления служит двухступенчатая процедура, разработанная в [5]. Однако в рассматриваемом случае ОЗУ может быть сконструирован по аналогии с вышеприведенным. Соответствующие уравнения параметров ОЗУ имеют вид

$$\sigma = m_1 / 4, \quad \sin \sigma = a / 4nb \sin(m_1 / 4), \quad \operatorname{tg} \alpha_0 = x_3 x_2^{-1}.$$

С учетом неравенств (11) и (12) ОЗУ распадается на два случая, в зависимости от того, какое из двух нижеприведенных условий выполняется

$$a < |x_1|, \quad (13)$$

$$a \geq |x_1|. \quad (14)$$

В случае, когда имеет место условие (13), область мгновенных значений состояния ЛА полностью располагается внутри или вне траектории цели, в

то время как условию (14) соответствует область, пересекающая эту траекторию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А.В. Солодова. - М.: Воен. изд-во МО СССР, 1977. - 430 с.
2. Беллман Р. Введение в теорию матриц. - М.: Наука, 1969. - 366 с.
3. Брутян В.К. Основные аспекты теории непрерывных марковских управляемых систем и ее приложение. - Ереван: Айастан, 1984. - 296 с.
4. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. - М.: Наука, 1988. - 408 с.
5. Брутян В.К. Об одной задаче управления с неполной обратной связью линейными марковскими системами со случайными параметрами // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1984. - № 2. - С. 21-26.

ВВМКУ МО РА

6.11.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 156-161.

УДК 621.3.078

АВТОМАТИКА
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Э.В. БАРСЕГЯН, О.Г. НАЛБАНДЯН

САМОНАСТРАИВАЮЩАЯСЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Ակարագրված են տեխնոլոգիական վառարանների ջերմաստիճանների հարմարվող կարգավորման ծրագրվող ՊԻՂ - կարգավորիչների հայեցակարգը և դրանց գործնական իրացման հարցերը միկրոպրոցեսորների կիրառման դեպքում:

Описаны концепция адаптивного регулирования программируемого ПИД-регулятора температуры технологических печей и практическая реализация регулятора с использованием микропроцессорной техники.

Библиогр.: 2 назв.

A conception of an adaptive regulation for programmable PID-regulator of the temperature in technological furnaces and the practical realization of the regulator using microprocessor technique are described.

Ref. 2.

Целью работы является создание программируемого ПИД-регулятора температуры технологических печей [1].

В основе оптимального закона регулирования лежит передаточная функция объекта, представляющая собой отклик δv регулируемого параметра на регулирующее воздействие δu : $\delta v = F(\delta u)$.

Аналоговая форма алгоритма регулирования имеет вид [2]

$$V(t) = kx(t) + \frac{k}{T_i} \int_0^t x(t) dt + kT_d \frac{dx(t)}{dt}.$$

где $V(t)$ — управляющее воздействие, подаваемое с регулятора на объект управления; $u_p(t)$, $u(t)$ — требуемый и действительный выходные сигналы объекта; T_i , T_d — постоянные времени интегрального и дифференциального регулирования.

При сложном виде передаточных функций F , неаддитивности результатов воздействия различных управляющих параметров, наличии у объекта собственных резонансных частот и зон гистерезиса поиск оптимального закона управления представляет собой сложную математическую проблему. Однако в различных областях науки и техники стоит проблема автоматического регулирования инерционных систем типа печи, передаточная функция которых имеет довольно простой вид

$$\delta v(t) = \int_0^t f(t-\tau) \delta u(\tau) d\tau,$$

где $f(t) = A \exp(-t/\tau_i)$; A — чувствительность регулируемого параметра к изменениям регулирующего параметра; τ_i — характерное время инерционности печи.

Задача управления состоит в следующем. Пусть по какой-либо причине температура в печи T отклонилась или начала отклоняться от программного значения T_p . Соответственно система контроля регистрирует некоторое отклонение $\Delta U(t)$ величины сигнала с термопары $U(t)$ от программного значения $U_p(t)$. При адекватном управлении задача сводится к регистрации величины $\Delta U(t)$ — определению изменения мощности, которое могло бы привести к такому изменению температуры и, наконец, компенсации этого предполагаемого изменения мощности. Для печей закрытого типа передаточная функция "мощность нагревателя — температура" имеет экспоненциальный вид

$$\delta T(t) = A \int_0^t \exp(-\tau_i/\tau) \delta W(\tau) d\tau,$$

где $A = dT/dW$ — чувствительность стационарного значения температуры к изменениям мощности нагревателя; τ_i — характерное время инерционности печи. При ступенчатом изменении мощности нагревателя ΔW изменение температуры в печи происходит по следующему закону:

$$\delta T(t) = A \Delta W [1 - \exp(-t/\tau_i)],$$

то есть эффективное изменение температуры происходит через характерное время инерционности печи τ_i , в то время как изменение производной температуры по времени происходит практически безынерционно:

$$\delta T'(t) = \frac{A \Delta W}{\tau_i} [\exp(-t/\tau_i)].$$

Рассмотрим автоматическое регулирование печи. Технологический процесс в который предусматривает программный подъем температуры от некоторой

начальной температуры T_1 до температуры T_2 в рабочем диапазоне и прецизионное управление температурой по заданной программе в рабочем диапазоне. Температура в рабочей зоне печи контролируется термопарой, характеристическая кривая которой табулируется во всем диапазоне температур и заносится в систему обработки данных. Соответственно программа изменения температуры пересчитывается с помощью характеристической кривой термопары и задается в виде функции $U_p(t)$, с которой сравнивается разность потенциалов $U(t)$ на концах термопары. Для формирования управляющего воздействия определяется разностный сигнал:

$$V(t) = U(t) - U_p(t).$$

В разработанной системе мощность нагревателя регулируется углом отсечки φ , представляющем собой долю полупериода переменного тока, при котором питающее напряжение поступает на нагреватель. Мощность нагревателя оказывается пропорциональной некой линеаризованной фазе ψ :

$$\psi = 2\varphi - \sin(2\varphi), \text{ причем } d\psi = 4\sin^2\varphi d\varphi.$$

При малых изменениях мощности нагревателя передаточная функция управления имеет вид

$$\delta V(t) = B \int_0^t \exp(-t/\tau_i) \delta\psi(\tau) d\tau = 4B\sin^2\varphi \int_0^t \exp(-t/\tau_i) \delta\varphi(\tau) d\tau,$$

где $B = dV/d\psi$ — чувствительность стационарного значения разностного сигнала к изменениям линеаризованной фазы. При ступенчатом изменении фазы $\Delta\varphi$ изменение разностного сигнала происходит по следующему закону:

$$\delta V(t) = B\Delta\psi[1 - \exp(-t/\tau_i)] = 4B\sin^2\varphi\Delta\varphi[1 - \exp(-t/\tau_i)],$$

то есть эффективное изменение разностного сигнала происходит через характерное время инерционности печи τ_i , в то время как изменение производной разностного сигнала по времени происходит практически безинерционно:

$$\delta V'(t) = \frac{B\Delta\psi}{\tau_i} \exp(-t/\tau_i) = \frac{B\Delta\varphi \sin^2\varphi}{\tau_i} \exp(-t/\tau_i). \quad (1)$$

При адекватном пропорциональном управлении результирующее изменение фазы пропорционально зарегистрированному значению разностного сигнала V :

$$\Delta\varphi = V/4B\sin^2\varphi.$$

Пропорциональное управление реализуется в нашей системе в режиме непрерывного слежения:

$$\Delta\varphi' = V'/4B\sin^2\varphi.$$

Пропорциональное управление инерционно, его воздействие сказывается на разностном сигнале лишь через время инерционности системы, поэтому оно может эффективно устранять лишь флуктуации, период которых превышает величину τ_i . Для устранения более быстрых флуктуаций берется дифференциальная составляющая уравнения (1):

$$\Delta\varphi = V\tau_i/4B\sin^2\varphi; \quad \Delta\varphi' = V'\tau_i/4B\sin^2\varphi.$$

В режиме непрерывного слежения в законы пропорционального и дифференциального управления явным образом не входит абсолютное значение разностного сигнала, поэтому с течением времени эффекты систематически накапливающейся ошибки могут привести к значительным отклонениям температуры от программного значения. С целью устранения медленных смещений и систематически накапливающихся ошибок определяется интегральная составляющая уравнения:

$$\Delta\varphi = \int_0^t V(\tau) d\tau / 4B\tau_i \sin^2 \varphi, \text{ которое в режиме непрерывного слежения}$$

имеет вид $\Delta\varphi' = V / 4B\tau_i \sin^2 \varphi$.

Таким образом, закон адекватного управления имеет вид

$$\Delta\varphi' = \frac{V'}{4B\sin^2 \varphi} + \frac{V''\tau_i}{4B\sin^2 \varphi} + \frac{V}{4B\tau_i \sin^2 \varphi},$$

$$\Delta\varphi' = \frac{1}{4B\sin^2 \varphi} \left[V''\tau_i + V' + \frac{V}{\tau_i} \right] \quad (2)$$

Коэффициенты оптимального управления определяются значениями параметров B и τ_i . Время инерционности печи τ_i определяется параметрами печи. Поэтому величина τ_i подлежит определению для каждого процесса. Величина B зависит не только от геометрии и степени загрузки печи, но и от температуры в ней, и с приближением к максимально достижимой для данного нагревателя температуре стремится к нулю. Следовательно, величина B подлежит не только определению перед каждым технологическим процессом, но и непрерывному уточнению в течение процесса $B = B(t)$. Нами применена система дискретной обработки информации. Разностный сигнал строится со временем опроса τ_n , и с момента включения системы каждому значению сигнала присваивается порядковый номер n , то есть V_n представляет собой значение разностного сигнала $V(t)$ в момент времени $t = n\tau_n$. С целью сглаживания случайных шумов дискретные значения разностного сигнала V_n подвергаются скользящему усреднению по N предыдущим значениям $\bar{V}_n = (V_n + V_{n-1} + V_{n-2} + \dots + V_{n-N} + 1) / N$, причем время усреднения $N\tau_n$ должно быть много меньше времени инерционности печи и периода флуктуаций, которые призвана устранять система регулирования. При дискретной системе опроса первая $\bar{V}'$ и вторая $\bar{V}''$ производные разностного сигнала определяются следующим образом:

$$\bar{V}'_n = \bar{V}_n - \bar{V}_{n-1} = V_n - V_{n-N} / N; \quad \bar{V}''_n = \bar{V}'_n - \bar{V}'_{n-1}.$$

При дискретном анализе закон оптимального управления имеет вид

$$\Delta\varphi' = \frac{1}{4B_n \sin^2 \varphi} \left[V''n + V'n + \frac{V_n}{n_i} \right],$$

где $n_i = \tau_i / \tau_n$ — выраженное в единицах времени опроса время инерционности печи; B_n — текущее значение чувствительности разностного сигнала к изменениям линеаризованной фазы.

Выбор параметров оптимального управления и самоуправление осуществляются следующим образом. В начальный момент времени устанавливается минимальное значение линеаризованной фазы, которое с каждым опросом, то есть через время T_0 , увеличивается на постоянную величину h : $\Psi_k = \Psi_{k-1} + h$. При достижении некоторой контрольной температуры T_k , значение которой меньше начальной температуры процесса T_1 , производится процедура определения параметров B и τ_1 . В момент времени $n = k$, $t = kT_0$ определяется значение разностного сигнала V_k и его производной V'_k . К значению линеаризованной фазы производится некоторая добавка H : $\Psi_{k+1} = \Psi_k + H$. После этого величина Ψ остается неизменной. Величина H не принципиальна, однако она должна быть достаточно велика, чтобы с учетом существующего разрешения системы можно было проанализировать отклик разностного сигнала на это ступенчатое изменение линеаризованной фазы. Через N опросов, то есть через время NT_0 , достаточное для устранения переходного участка, вновь определяется значение производной разностного сигнала V'_{k+N} . Величина $H/(V'_{k+N} - V'_k)$ представляет собой коэффициент дифференциальной части закона:

$$(V'_{k+N} - V'_k)/H = dV'/d\Psi = B_k/n_1. \quad (3)$$

Поскольку после момента времени $n = k$ не происходит изменений мощности, то значение производной разностного сигнала с характерным временем τ_1 стремится к нулю, а значение разностного сигнала стремится к некоторому стационарному значению V_{st} . Фиксируя по спаду производной достижение стационарного состояния, определяется следующий параметр системы:

$$(V_{st} - V_k)/V'_{k+N} = n_1. \quad (4)$$

Таким образом, из (3) и (4) определяем характерные параметры системы. После этого вновь осуществляется линейное повышение мощности нагревателя, вплоть до достижения начальной температуры процесса T_1 . Заметим, что до достижения этого момента программное значение U_p принималось равным нулю. При достижении температуры T_1 принимается реальное значение $U_p(t)$ и осуществляется регулирование по закону (2). Поскольку в течение процесса может измениться чувствительность температуры к изменениям мощности нагревателя, то периодически (через фиксированное число опросов M) уточняется значение параметра B :

$$B_n = (B_{n-M}\Psi_{n-M} + V_n - V_{n-M})/\Psi_n.$$

Таким образом, разработанная система позволяет перед началом каждого технологического процесса определять оптимальные параметры управления и уточнять их в течение процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Opie R. The prod. and cons of self tuning controllers. // Contr. and Instrum. - 1987. -19, N 7. -Р.49-51.
2. Алексеев А.Г., Галицын А.А., Иванников А.Д. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах. - М.: Радио и связь, 1984 - 321 с

ИФИ НАН РА

31.02.1994

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 161-164

УДК 629.7.054.5

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Р.О. ВЕКИЛЯН, А.Р. МАТАСЯН, Р.М. ХАЧАТРИАН

ТОЧНОСТНОЙ КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АСТРОДАТЧИКА С МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

Ղիտարկվում է արտամթնոլորտային աստղաղիտարանների ղիտակների ուղղման, կայունացման և երկնային ոլորտի ուսումնասիրվող շրջանների նույնականացման համար օգտագործվող մատրիցային լուսաընդունիչների հիման վրա գործող աստղային տվիչների և աստղակոորդինատորների օպտիկական համակարգերի լավարկված պարամետրերի ընտրության հարցը: Բացահայտված է ընտրված միջարկման ալգորիթմի ճշգրտության հնարավորությունների, միաժամանակ սեռակվող աստղերի քանակի, տեսադաշտի և աստղային տվիչի օբյեկտիվի արդյունավետ տրամագծի միջև եղած կապը մատրիցային լուսաընդունիչի երկրաչափական և էներգետիկական պարամետրերի հետ համատեղ: Բերված է այդ առնչության կորը:

Рассматривается вопрос выбора оптимальных параметров оптических систем астродатчиков и астрокоординаторов на базе матричных фотоприемников, используемых для наведения и стабилизации телескопов внеатмосферных обсерватории и идентификации изучаемых областей небесной сферы. Выявлена взаимосвязь между точностными возможностями выбранного алгоритма интерполяции, числом одновременно фиксируемых звезд, фокусным расстоянием, полем зрения и эффективным диаметром объектива астродатчика в сочетании с геометрическими и энергетическими параметрами матричного фотоприемника. Приведена кривая этой зависимости.

Ил 1. Библиогр.: 6 назв.

A problem of optimal parameter selection for optical system of star sensors and astrocoordinates is viewed on the basis of matrix photo receivers used for guidance and stabilization of celestial sphere region studied. The interconnection between fidelity possibilities of the interpolation algorithm selected, the number of simultaneously fixed stars, focus distance, field of vision and effective diameter of the star sensor in combination with geometric and energetic parameters of the matrix photo receiver is revealed. The curve of this dependence is given.

Ил 1. Ref. 6.

Оптико-электронные устройства (ОЭУ) - астродатчики и астрокоординаторы с матричными фотоприемниками типа

фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) - получили широкое распространение в системах наведения и стабилизации научных приборов, а также идентификации изучаемых областей небесной сферы.

К настоящему времени проведен ряд исследований [1-3], посвященных изучению различных алгоритмов интерполяции, определяющих координаты изображения точечных объектов применительно к разным оптическим системам и ФПЗС. При этом за счет усложнения математических вычислений и учета многочисленных факторов достигается точность определения координат до 0.01 элемента разложения матрицы. В то же время представляется возможным, изменяя некоторые геометрические параметры питающей оптической системы, такие как поле зрения и входной диаметр, повысить точность измерения положения оптической оси астродатчика за счет расширения энергетических возможностей его объектива и увеличения числа одновременно гидируемых звезд.

Целью настоящей статьи является выявление точностного критерия выбора геометрических параметров оптической системы астродатчика на базе матричного ФПЗС. Для этого необходимо обосновать взаимосвязь между точностью интерполяции выбранного центрального алгоритма, числом одновременно фиксируемых звезд, геометрическими и энергетическими параметрами питающей оптической системы и матричного ФПЗС.

Известно, что, усредняя результаты вычислений координат всех звезд, попавших в мгновенное поле зрения астродатчика, можно повысить числовое значение угловой точности (δ) определения пространственного положения его оптической оси пропорционально квадратному корню количества этих звезд (n) [4]: $\delta = \sigma / \sqrt{n}$, где σ - угловая точность определения координат одной звезды.

Точность вычисления координат одной отдельно взятой звезды определяется точностными возможностями применяемого центрального алгоритма и выражается в долях элемента разложения матрицы. В линейном представлении точность вычисления координат звезды (Δ) определится как $\Delta = \alpha l$, где α - линейный размер элемента разложения матрицы, l - точность интерполяции, выраженная в долях элемента разложения матрицы. При этом определяются оптический масштаб (M) объектива астродатчика: $M = \Delta / \sigma$ и его эффективное фокусное расстояние (если σ выражено в угл.): $f = 206265 M$.

Такое эффективное фокусное расстояние и линейные размеры фоточувствительного поля ФПЗС однозначно определяют поле зрения ($2W$). Однако число фиксируемых звезд зависит не только от поля зрения астродатчика, но и от его энергетических возможностей - диаметра входного зрачка, коэффициента пропускания оптической системы, световой чувствительности матричного фотоприемника, времени накопления зарядов. Перечисленные факторы должны обеспечить пороговую чувствительность к излучению звезды предельной звездной величины (m), которую определим из таблицы [5] на основании N_m - числа на квадратный градус звезд ярче величины m в среднем по всем широтам Галактики:

$$N_m = n / S_{2W},$$

где S_{2W} - площадь поля зрения астродатчика в кв. град.

Как правило, максимум спектральной чувствительности существующих ФПЗС располагается в области длин волн от 650 до 900 Å. Поэтому наименее подходящим является спектральный состав излучения звезд классов О-А. Дальнейший расчет проведем для звезд спектрального класса АО. Эффективный диаметр входного зрачка определим из условия равенства светового потока (F) от звезды спектрального класса АО предельной звездной величины, поступающего на вход оптической системы астродатчика, световому потоку (F'), образующему изображение этой звезды с предельной для данного фотоприемника освещенностью на его фоточувствительном поле, с учетом коэффициента пропускания (τ) оптической системы:

$$F' = F\tau.$$

С учетом того, что

$$F = E_0 \times 10^{-0,4m} \cdot 0,25\pi D^2,$$

где E_0 — освещенность, создаваемая звездой Вега (звезда 0^m спектрального класса АО) на внешней границе земной атмосферы ($E_0 = 3 \times 10^{-8}$ Вт/к) [6];

D — световой диаметр объектива астродатчика, и

$$F' = 0,25\pi d^2 U / \gamma t,$$

где U — минимальный детектируемый вольтовый сигнал на выходе матричного фотоприемника, в несколько раз превосходящий шумовой сигнал; γ — световая вольтовая чувствительность ФПЗС к излучению звезды Вега; t — время накопления зарядов; d — диаметр изображения звезды на фоточувствительном поле матричного фотоприемника можно получить выражение, определяющее необходимый диаметр входного зрачка питающей оптической системы астродатчика:

$$D = d \left(\frac{U}{\gamma \tau E_0 \times 10^{-0,4m}} \right)^{1/2}.$$

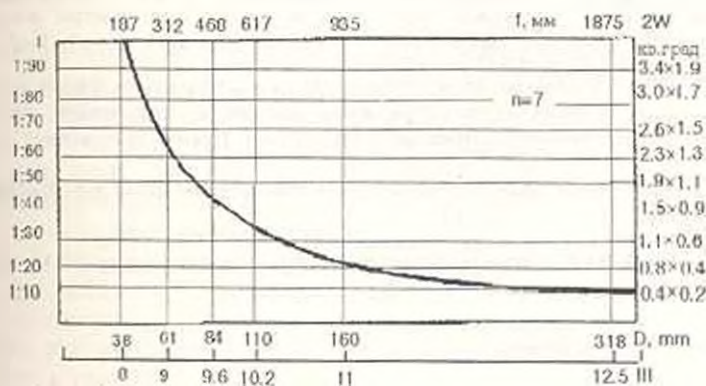


Рис. Зависимость основных параметров оптической системы астродатчика от точности алгоритма интерполяции

Таким образом, в неявном виде получена взаимосвязь между точностными характеристиками выбранного алгоритма интерполяции (1),

числом одновременно фиксируемых звезд (n), фокусным расстоянием (f), полем зрения ($2W$) и эффективным диаметром объектива астродатчика (D) в сочетании с геометрическими и энергетическими параметрами матричного фотоприемника типа ФПЗС. Эта взаимосвязь позволяет выбрать оптимальные параметры оптической системы астродатчика с использованием приемлемого для данного конкретного случая алгоритма интерполяции с присущей ему точностью. Принимая различные значения точностей алгоритмов интерполяции, получен ряд оптимизированных параметров объектива астродатчика, позволяющего фиксировать положение своей оптической оси с точностью $\delta = 0,1$ угл.с (рисунок). При этом использовались следующие числовые значения: число одновременно фиксируемых звезд в среднем по всем широтам Галактики - $n = 7$, линейные размеры элемента разложения матрицы вдоль строки - 18 мкм, вдоль столбца - 24 мкм, формат матричного фотоприемника - 512×288 , его световая вольтовая чувствительность к излучению звезды - $\gamma = 1,3$ В/(Лк·с), коэффициент пропускания оптической системы - $\tau = 0,8$, диаметр изображения звезды Вега - $d = 40$ мкм, минимальный детектируемый вольтовый сигнал - $U = 2$ мВ и время накопления зарядов $t = 1$ с. Очевидно, что изменение числа одновременно фиксируемых звезд при прочих равных условиях повлечет за собой изменение поля зрения и фокусного расстояния объектива с сохранением значения предельной звездной величины и, следовательно, эффективного диаметра входного зрачка. Это обстоятельство предоставляет большую гибкость в подборе относительного отверстия выбранной оптической системы.

Полученные результаты могут послужить основанием при разработке оптических систем астродатчиков на базе матричных фотоприемников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Н.В. Измерение координат точечного объекта телевизионной камерой на ПЗС // Техника средств связи. Сер. техника телевидения. - 1978. - Вып. 6. - С. 25.
2. Иванкин И.Р., Пашков В.С., Фисенко Т.Ю., Эвентавс Ю.М. Интерполяционные алгоритмы определения положения центра изображения точечного объекта с помощью ПЗС // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. - 1986. - Вып. 4. - С.
3. Пашков В.С., Тидеман Н.А. Исследование алгоритмов оценки координат изображения точечных излучателей в оптико-электронных приборах с многоэлементными фотоприемниками // Изв. вузов. Приборостроение. - Т. XXXI. - № 4. - С. 63-68.
4. Salomon P.M., Goss M.S. A microprocessor-controlled CCD star tracker // AIAA paper. - 1976. - N 8 76. 116. - P. 1-11.
5. Аллен К.У. Астрофизические величины. - М.: Мир, 1977. - 448 с.
6. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Советское радио, 1978. - 400 с.

И.Л. МЕЛИКЯН

О МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ДЕБИТА ОДИНОЧНЫХ ФОНТАНИРУЮЩИХ СКВАЖИН, ЗАЛОЖЕННЫХ В АРТЕЗИАНСКОМ ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Տրված են ցանցային մոդելի վրա շատրվանող հորի աշխատանքի մաթեմատիկական մոդելավորման եղանակը և այդ եղանակով նշված հորի համար ընդհանրացված խնդրի լուծման արդյունքում ստացված բանաձև, որը հնարավորություն է տալիս որոշել ելքը հորի աշխատանքի սկզբում և կանխագուշակել նրա հետագա անկումը: Ղաշտային չափումներով բանաձևի ստուգումը քույլ է տալիս այն առաջարկել շատրվանող հորերի նախագծման և շահագործման քննադատներում օգտագործելու համար:

Дана методика математического моделирования работы фонтанирующих скважин на сеточных моделях. Предложена формула, полученная в результате решения обобщенной задачи предлагаемым методом для этих скважин, что дает возможности определить дебит в начале работы скважины, а также прогнозировать его дальнейшее уменьшение. Проверка формулы натурными измерениями позволяет предложить ее для использования в процессе проектирования и эксплуатации фонтанирующих скважин.

Ил. 1. Библиогр.: 8 назв.

A mathematical simulation procedure for operating spouting wells on network models is given. The formula obtained as a result of generalized problem solution by this method is proposed for these wells. This enables to determine the flow rate at the start of well operation as well as to forecast its further decrease. Checking the formula by actual measurements permits to propose it for using in designing and operation process of spouting wells.

Ил. 1. Ref. 8.

Задача точного проектирования и рациональной эксплуатации фонтанирующих скважин состоит главным образом в определении их начальных дебитов и прогнозировании их дальнейшего уменьшения во времени, что невозможно осуществить ныне имеющимися расчетными формулами, полученными для работающих вертикальных скважин с постоянным дебитом или с постоянным понижением напора [1-4].

Вопросы формирования фильтрационного потока при работе фонтанирующих скважин еще изучены недостаточно, им посвящены работы нескольких авторов, из которых, по существу, можно отличить только теоретические разработки [5]. Исходя из условия фонтана, в [6, 7] приводится в приближенной форме решение задачи. В данной статье дается ее развитие и уточнение.

Неустановившееся плановое движение фильтрационных вод в пределах изолированного упругого водоносного пласта описывается уравнением [3, 4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(km \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(km \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где k — коэффициент фильтрации водоносного пласта; m — ее мощность; H — пьезометрический напор в точке с координатами (x, y) в момент времени t ; μ — коэффициент упругой водоотдачи пласта.

При притоке воды в фонтанирующих скважинах краевые условия для уравнения (1) имеют вид

$$\text{при } t=0 \quad H(x, y, 0) = H_c, \quad (2)$$

$$\text{при } t > 0 \quad \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} H(x, y, t) = H_c = \text{const}. \quad (3)$$

На контуре скважины имеем

$$2\pi k m r_0 \frac{\partial H}{\partial r} \bigg|_{r=r_0} = -Q(t). \quad (4)$$

где $Q(t)$ — дебит скважины, являющийся неизвестной функцией, подлежащей определению. При решении задачи для фонтанирующих скважин, исходя из ее внутренней гидравлики, дебит выражается по формулам

$$Q = \varphi \pi r_0^2 \sqrt{2g[H(r_0, t) - H_0]}, \quad (5)$$

$$Q = \pi r_0^2 \sqrt{2gh_\phi}, \quad (6)$$

где H_c — напор подземных вод в естественных условиях (при $t=0$); H_0 — отметка устья скважины; $H(r_0, t)$ — напор в фильтровой части скважины; r_0 — радиус скважины; h_ϕ — высота фонтана над устьем скважины; φ — коэффициент скорости движения воды в ее стволе:

$$\varphi = 1 / \sqrt{1 + \lambda \ell_{\text{тр}} / 2r_0}. \quad (7)$$

λ — коэффициент Дарси; $\ell_{\text{тр}}$ — длина водоподъемной трубы.

Аналитическое решение уравнения (1) при таких краевых условиях отсутствует, а возникающие трудности при этом связаны с нелинейным условием (4) на контуре скважины.

Для потери напора из уравнения (5) можно написать

$$\Delta H_{\text{тр}} = H(r_0, t) - H_0 = \eta Q^2, \quad (8)$$

где η — общее гидравлическое сопротивление скважины:

$$\eta = 1 / 2g\varphi^2 \pi^2 r_0^4. \quad (9)$$

Написав уравнение (8) для натурн (N) и модели (M), после элементарных преобразований для масштабного коэффициента моделирования (МКМ) нелинейных гидравлических сопротивлений скважины в конечном виде получим

$$d_\eta = \eta_N / \eta_M = \alpha^2 / \alpha_h, \quad (10)$$

где α_p , α_h — МКМ линейных фильтрационных сопротивлений и напоров.

Исходя из условия фонтана, ранее для МКМ радиуса скважины получено [4]

$$\alpha_{r_0} = \sqrt[3]{\alpha_h / \alpha_p}. \quad (11)$$

Чтобы воспроизвести турбулентное движение воды и нелинейную зависимость между дебитом и потерей напора в обсадной трубе скважины согласно уравнению (8), изготовлены и в специальных установках испытаны нелинейные гидравлические сопротивления в виде коротких труб с малыми диаметрами (капилляры), которые соединены с общеизвестным гидроинтегратором как добавочное устройство, моделирующее скважины. Радиусы этих труб выбираются согласно уравнению (11), а сопротивление - согласно (10).

Характеристики гидроинтегратора (гидравлическое сопротивление и водоемкость) устанавливаются из условий ламинарного режима движения в полном согласии с законом Дарси (математическая модель водоносного пласта).

Таким образом, удалось создать математическую модель единой гидравлической системы: водоносный пласт - скважина, с обеспечением в ней соответствующего режима движения воды.

При этом для α_h получено ограничение в виде

$$\alpha_h < 3.25 \cdot 10^{-4} \sqrt{R_{сн} \alpha_p}, \quad (12)$$

где $R_{сн}$ - число Рейнольдса в натуре.

Наряду с этим общеизвестным методом моделирования вертикальных скважин на сеточных моделях [3, 7] исследована работа одиночной фонтанирующей скважины, заложенной в однородном упругом водоносном пласте, в различных вариантах исходных параметров (в общей сложности рассмотрен 31 случай).

Анализируя результаты этих решений для дебита скважины, можно написать:

$$Q = f(k, m, \mu', H_n, r_0, \xi_{ис}, \eta, t), \quad (13)$$

где $H_n = H_c - H_0$ - начальный положительный напор над устьем скважины.

Для получения вида функции f используем теорию подобия и размерностей и введем расчетного радиуса фиктивной совершенной скважины уменьшив число безразмерных комплексов. По общепринятой форме его можно написать в виде

$$r_{оп} = r_0 \exp(-\xi_0), \quad (14)$$

где ξ_0 - общий коэффициент несовершенства скважины:

$$\xi_0 = \xi_{ис} + \xi_r, \quad (15)$$

$\xi_{ис}$ - суммарный коэффициент несовершенства скважины, обусловленный степенью и характером вскрытия водоносного пласта [1, 3];

ξ_r - приведенный коэффициент несовершенства, обусловленный гидравлическим сопротивлением водоподъемной части скважины, который, следуя [3], можно написать в виде

$$\xi_r = 2\pi k m \Delta H_{1p} / Q, \quad (16)$$

Имея в виду (8), из (16) получим

$$\xi_r = 2\pi k m \eta Q, \quad (17)$$

Используя известное в подземной гидравлике понятие проводимости ($T = km$) и пьезопроводимости ($a = km/\mu$) пласта, вместе с (13) имеем

$$Q = f_1(T, a, H_n, r_{np}, t). \quad (18)$$

Критериальное уравнение, описывающее процесс фонтанирования и составленное по методу [8] при помощи матриц и анализа размерностей, после некоторых преобразований имеет вид:

$$\Gamma_2 = \{\pi_1; \pi_2\} = 0, \quad (19)$$

где

$$\pi_1 = \bar{Q} = kmH_n / Q, \quad \pi_2 = \tau_0 = at / r_{np}^2. \quad (20)$$

Чтобы найти вид функции Γ_2 , построим график зависимости между этими комплексами. Для этого определим значения $\bar{Q}$ и $\ln 2.25\tau_0$, которые нанесены на координатную систему (рис.). Полученные точки хорошо укладываются на прямой линии, уравнение которой пишется в виде

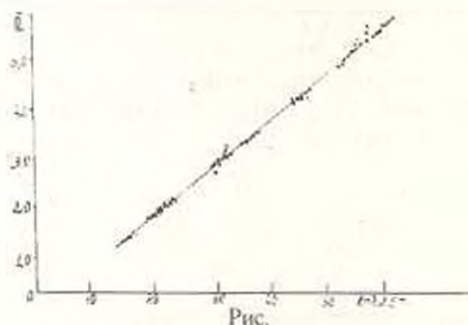
$$y = c + bx. \quad (21)$$

где c и b — постоянные коэффициенты, значения которых определяем методом наименьших квадратов:

$$\delta = \sum_{j=1}^n [(c + bx_j) - y_j]^2 = \min. \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n [(c + bx_j) - y_j] = 0, \\ \sum_{j=1}^n [(c + bx_j) - y_j] x_j = 0, \end{cases} \quad (23)$$

n — число точек, нанесенных на график.



Подставляя значения координат этих точек в систему уравнений (23), окончательно получим

$$c = 0.00994 \approx 0, \quad b = 7.9657 \cdot 10^{-2} = 1/4\pi. \quad (24)$$

Совместно решая (20), (21) и (24), для дебита фонтанирующей скважины получим следующую зависимость:

$$Q = 4\pi kmH_n / (\ln 2.25at / r_{np}^2) + 2\xi_{np} + 4\pi km\eta Q. \quad (25)$$

Полученная зависимость отличается от формулы Тейса лишь членом $4\pi km\eta Q$, характеризующим одновременно водоносной пласт и скважину.

Видно, что при малых дебитах и небольших сопротивлениях скважин зависимость (25) может привести к формуле Тейса, что дополнительно подтверждает его достоверность.

Решая (25) для дебита в конечном виде, получим следующую расчетную зависимость:

$$Q = (-F_0 + \sqrt{F_0^2 + 64\pi^2 T^2 \eta H_n}) / 8\pi T \eta; \quad F_0 = \ln(2.25at/r^2) + 2\xi_{\text{ис}}. \quad (26)$$

Согласно (26) произведен расчет дебитов нескольких фонтанирующих скважин Араратской равнины. Результаты сопоставлены с данными натурных опытов, выполненных ПНИИС: максимальное отклонение составляет около $\pm 20\%$. При определении гидравлических параметров водного пласта обычно допускаемая ошибка намного больше, поэтому полученная формула пригодна для инженерных расчетов при проектировании и эксплуатации фонтанирующих скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гриксявич Э.А. Гидравлика водозаборных скважин. - М.: Недра, 1986. - 232 с.
2. Гусейнов Г.Л., Нарсулаев И.Л. Приток упругой жидкости к прямоугольной бесконечной батарее скважин с заданными давлениями // Исследование нефтяных газоконденсатных месторождений Azerbaijan. - 1967. - Вып. 18. - С. 273-279.
3. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. - М.: Изд-во МГУ, 1973. - 326 с.
4. Щелкачев В.М., Ялук Б.В. Подземная гидравлика. - Л.: Гостонтехиздат, 1949. - 523 с.
5. Казарян С.М. Водный обмен на фоне вертикального дренажа. - Ереван: Апастан, 1988. - 270 с.
6. Меликян Н.Л. Исследование работы фонтанирующих скважин методом математического моделирования // Изв. сельскохозяйственных наук. - Ереван, 1977. - Вып. VI. - С. 82-87.
7. Меликян Н.Л. К вопросу расчета фонтанирующих скважин // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - Т. XXXI, № 1, 1978. - С. 20-26.
8. Zanghar A.L. Analyse dimensionnell et la theorie de maguettes. - Paris, 1956. - 230 p.

АрмНИИВПпГ

5.01.1996

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 169-173.

УДК 621.181.62-5

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

М.М. ПОГОСЯН, Н.С. АКОПЯН, В.А. МАРТИРОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ОКИСЛОВ ПРИ СЖИГАНИИ ОТХОДОВ В ТОПКАХ КОТЛОВ

Կատարված է SO_3 և NO_x -ի առաջացման վերլուծական ուսումնասիրություն, որի համար իրականացված է թերմոդինամիկական հավասարակշռության և զոյացման կինետիկայի հաշվարկային հետազոտություն երեք ենթադրյալ ռեակցիաների դեպքում: Պարզված է չորայական ռեակցիաների միջանկյալ արգասիք ատոմական օքսիդների գերադասելի դերը նշված նյութերի զոյացման ընթացքում: Առաջարկված են ռեժիմային պայմաններ նրանց զոյացումը կանխարգելակելու համար:

Проведено аналитическое исследование термодинамики и кинетики образования SO_3 и NO_x в факелах при сжигании отходов в топках котлов с учетом реального времени пребывания продуктов сгорания в толке. Найден интервал температуры факела, при котором SO_3 имеет максимальную концентрацию. Расчеты, проведенные с помощью ЭВМ, позволили выявить влияние конструктивных факторов на образование SO_3 и NO_x при совместном сжигании отходов и низкосортных топлив. Установлена возможность эффективного обезвреживания фенолов при сохранении надежности работы котлов и обеспечении низких концентраций SO_3 и NO_x в продуктах сгорания.

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

An analytical investigation has been conducted in thermodynamics and kinetics of formation of SO_3 and NO_x in the flames during waste burning in steam generator furnaces taking into account the real time of combustion product dwelling in a furnace. The flame temperature interval is found, and SO_3 has the maximum concentration. Computer-aided calculations permitted to find the effect of constructive and mode factors on formation of SO_3 and NO_x with simultaneous waste and low grade burning. The possibility of effective phenol harmlessness by preserving the reliability of steam generator work and providing low concentration of SO_3 and NO_x in burning products leaving the steam generators was established.

Ил. 2. Ref. 4.

К числу наиболее мощных источников загрязнения воздушного и водного бассейнов по количеству вредных выбросов и уровню их токсичности относится химическая промышленность. Разнообразие токсических веществ в выбросах привело к необходимости применения различных методов обезвреживания. Одним из них является метод огневого обезвреживания отходов дифенилолпропана. Процесс горения рекомендуется осуществлять в топках котлов, имеющих в большинстве химических заводов. Однако при обезвреживании серо- и азотосодержащих отходов, иногда в сочетании с серосодержащим топливом, возникают проблемы обеспечения надежности котельных агрегатов, связанные с образованием трехоксида серы и защиты атмосферы от вторичных загрязнителей - окислов азота. В связи с этим ставилась задача об изучении условий и закономерностей образования окислов серы и азота и отыскании способов их подавления при совместном сжигании высоковлажного низкосортного топлива и серосодержащих отходов производства.

С этой целью проведены комплексные расчетные исследования термодинамики и кинетики образования SO_3 и NO_x по различным схемам в широком диапазоне изменения температуры и избытков воздуха.

Существуют различные, а подчас и противоречивые точки зрения на механизм образования SO_3 , NO_x и характер влияния различных факторов на эти процессы. В большинстве работ решающая роль в их образовании отводится атомарному кислороду, однако механизм образования последнего трактуется по-разному [1, 2].

Теоретические исследования в основном базируются на изучении условий термодинамического равновесия или кинетики предполагаемых химических реакций. Отсутствие единых взглядов на механизм образования этих окислов и диктует необходимость проведения комплексных расчетных исследований образования вредных окислов непосредственно в факеле с учетом времени их реального пребывания в толке. При совместном

сжигании топлива и отходов необходимо знать характеристики отходов. Основными их особенностями являются:

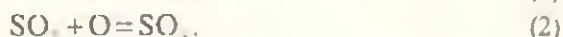
а) содержание в их составе соединений серы, азота и весьма токсичных компонентов, в частности этилмеркаптана, ацетона, фенола;

б) непостоянство состава по времени;

в) низкая теплота сгорания.

Для уничтожения фенола необходимо поддерживать довольно высокие температуры (1400...1500 K), что не может быть достигнуто без сжигания дополнительного топлива. Хотя выделяемое тепло идет на выработку пара, повышается опасность низкотемпературной коррозии хвостовых частей котла, что также ставит задачу подавления образования указанных окислов.

Расчет и анализ термодинамического равновесия и кинетики образования SO_2 проводится по предполагаемым реакциям:



Константы равновесия реакций определялись из известных соотношений:

$$E = -\Delta J_m, \quad \Delta J_m = \Delta J_0 + \int_0^T C_p dt, \quad d \ln K_p = E dT / RT.$$

Анализ условий термодинамического равновесия для реакции (1) показал, что в интервале температур 900...2100 K равновесная концентрация снижается с ростом температуры и уменьшением избытка воздуха в топке. В области температур 1200...1500 K и $\alpha = 1,02...1,05$ равновесная концентрация принимает значения, получаемые на действующих котлах, что указывает на возможность образования SO_3 по реакции (1) согласно условиям термодинамического равновесия.

Расчет кинетики реакции показал, что она протекает крайне медленно. Например, при $T = 2000$ K термодинамическое равновесие может наступить только через 1450 с, что почти на три порядка выше фактического пребывания топлива в топке. При снижении температуры продолжительность реакции резко увеличивается. Таким образом, по условиям кинетики образование в топке SO_3 согласно (1) практически невозможно.

Расчет термодинамики и кинетики образования SO_3 по реакции (2) проведен при предположении, что атомарный кислород образуется при термической диссоциации избыточного кислорода и углекислого газа.

Анализ расчетов показал, что образование SO_3 не лимитируется ни термодинамическими, ни кинетическими условиями. При $T = 1700$ K начинается термический распад SO_3 , но при этой температуре для SO_3 получается концентрация, на порядок превышающая опытные значения в топках.

При расчете SO_3 по (3) учитывалось, что в факеле образуется окись азота, часть которой затем окисляется до NO_2 . Поэтому предварительно рассчитывались термодинамическое равновесие и кинетика образования

NO_2 путем окисления NO . По условиям термодинамического равновесия NO_2 может образоваться в низкотемпературных зонах, причем за время пребывания газов в топке эта возможность резко сокращается. Взаимодействие NO_2 с SO_2 не лимитируется обоими условиями, так что образование SO_3 по реакции (3) не имеет существенного значения. Проведенный анализ показал, что наиболее вероятным является образование SO_3 реагированием SO_2 с атомарным кислородом, образующимся в ходе реакции. Результаты расчетов сопоставлялись с данными, полученными для котла ДКВР 10/13.

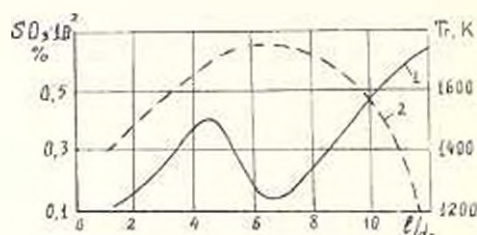


Рис. 1. Зависимость концентрации SO_2 (1) и температуры газов (2) от l/d_n при номинальной нагрузке и концентрации O_2 , равной 1,5 %

При номинальной нагрузке и умеренных избытках воздуха концентрация SO_2 , увеличиваясь, достигает максимума в зоне активного горения, затем резко убывает и, проходя через минимум в хвосте факела ($l/d_n = 8 \dots 10$), снова растет (рис. 1). Спад концентрации SO_2 , вероятно, объясняется его термическим распадом, а рост в концевой зоне - повышенным выделением атомарного кислорода при догорании и пониженным температурным уровнем, при котором образование SO_3 превалирует над его распадом.

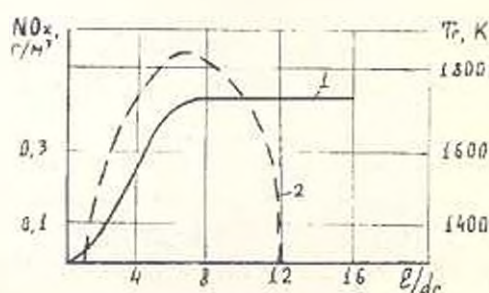


Рис. 2. Зависимость концентрации NO_x (1) и температуры газов (2) от l/d_n при номинальной нагрузке и концентрации O_2 , равной 4 %

Изменение концентрации NO_x по длине факела остается качественно одинаковым при всех режимах работы котла, отличны лишь числовые значения. Резкий рост концентрации NO_x наблюдается в участке роста

температуры факела, а ее зависимость от нагрузки котла имеет линейный характер (рис. 2). Образование NO_x значительно зависит как от типа топлива, так и от избытка воздуха, поэтому как один из способов подавления NO_x предлагается ступенчатый ввод окислителя [3]. Подавлению образования SO_2 и NO_x способствует также подача рециркулирующих газов и горелки топлива (15...20 %) [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал И.Я. и др. Исследование выхода окислов азота при сжигании топлива в факеле и в псевдооживленном слое // Теплоэнергетика. - 1974. - № 12. - С. 14-20.
2. Хамалая Д.М., Каган А.Я. Теория горения и топочные устройства. - М.: Энергия, 1976. - 486 с.
3. Погосян М.М. и др. Горение в топке при постепенном вводе окислителя // Науч. тр. / МЭИ. 1975. - С. 32-39.
4. Виленский Т.В., Погосян М.М. Горение угольной пыли при наличии вторичных реакций // Сб. Всес. конф. по теории горения. - М., 1973. - С. 121-123.

ГИУА

15.10.1995

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLIX, № 3, 1996, с. 173-176.

УДК 687.023.054.677.027.13

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

С.М. ОГАНЕСЯН, В.В. ШАХБАЗЯН

О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРОЦЕССА РАЗУТЮЖИВАНИЯ СТАЧНЫХ ШВОВ ДЕТАЛЕЙ ВЕРХНЕЙ ОДЕЖДЫ

Разработаны математические модели процесса разутюживания стачных швов деталей верхней одежды на основе многофакторных экспериментов, которые адекватно характеризуют исследуемый процесс.

Разработаны математические модели процесса разутюживания швов деталей верхней одежды на основе многофакторных экспериментов, которые адекватно характеризуют исследуемый процесс.

Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

Mathematical models of the ironing process for seams of the outerwear details were developed on the multifactor experiments which adequately characterize the process studied.

Table 1. Ref. 4.

В количественном отношении характер зависимостей степени и коэффициента ласообразования от деформирующих усилий определяется единицами параметров колебаний обрабатываемого материала - амплитудой колебаний перемещающегося материала и его частотой.

В связи с этим возникла задача исследования зависимости коэффициента разутюживания K от технологических факторов: температуры T , влажности W , амплитуды A , частоты колебаний f :

$$K = F(T, W, A, f).$$

Для решения поставленной задачи удобно воспользоваться методикой планирования и анализа эксперимента [1]. При этом величины температуры воздействия на разутюживаемый участок, а также влажности, амплитуды и частоты колебаний являются управляющими факторами с кодированными обозначениями X_1, X_2, X_3, X_4 . Диапазоны их изменения выбраны согласно техническим данным экспериментальной установки швейно-гладильного агрегата (ШГА) [2] и представлены в таблице для всех артикулов костюмных и пальтовых тканей.

Таблица

Уровни варьирования	Управляющие факторы			
	$T, ^\circ C$	$W, \%$	$A, \text{мм}$	$f, \text{Гц}$
+2	140	40	1	20
+1	110	30	0,75	15
0	80	20	0,5	10
-1	50	10	0,15	5
-2	20	0	0	0
Интервал варьирования	30	10	0,25	5

Параметром оптимизации явилась величина коэффициента разутюживания, определяемая по методике [3].

На первом этапе исследований проводился полнофакторный эксперимент (ПФЭ). Однако результаты расчетов показали, что линейные модели неадекватно описывают исследуемый технологический процесс (при доверительной вероятности 95 %), поэтому на следующем этапе были проведены исследования для получения уравнений регрессии второго порядка ЦРКП, адекватно описывающих исследуемый процесс:

$$K = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2. \quad (1)$$

Для проведения серии экспериментов, дополняющих полнофакторный план до центрального ротатабельного композиционного плана второго порядка, составлены матрицы планирования.

Эксперименты проводились с образцами ткани верха размерами 5×15 см: в каждом эксперименте матрицы планирования (всего 31 опыт) выполнялись три параллельных измерения показателя K . Принималось во внимание, что кодированным значениям факторов соответствуют натуральные значения, приведенные в таблице.

Проверка гипотез об однородности дисперсий в опытах матрицы планирования по критерию Кохрена [1] подтвердила воспроизводимость эксперимента, так как расчетные его значения не превысили табличное $\sigma_p < \sigma_1$ при уровне значимости $\nu = 0,05$. Проверка гипотез об

однородности дисперсий проведена для четырех артикулов костюмной и пальтовой тканей. Расчет коэффициентов уравнений регрессии выполнен по известным формулам [1]. Значимость коэффициентов проверяли по критерию Стьюдента. После статистической обработки экспериментальных данных математические модели приняли следующий вид:

$$K = 0,75 + 0,18X_1 - 0,06X_2 - 0,06X_3 + 0,03X_4 + \\ + 0,13X_1X_2 - 0,4X_1X_4 - 0,05X_1^2 - 0,09X_2^2 - 0,09X_3^2; \quad (2)$$

для костюмной ткани (арт. 27566/2С):

$$K = 0,68 + 0,15X_1 - 0,08X_2 - 0,08X_3 + 0,05X_4 + 0,16X_1X_2 - \\ - 0,03X_1X_4 - 0,06X_1^2 - 0,08X_2^2 - 0,08X_3^2; \quad (3)$$

для пальтовой ткани (арт. 36309):

$$K = 0,45 + 0,14X_1 - 0,05X_2 - 0,06X_3 + 0,02X_4 + 0,15X_1X_2 - \\ - 0,03X_1X_4 - 0,09X_1^2 - 0,09X_2^2 - 0,09X_3^2; \quad (4)$$

для пальтовой ткани (арт. 46104):

$$K = 0,39 + 0,13X_1 - 0,06X_2 - 0,04X_3 + 0,03X_4 + 0,16X_1X_2 - \\ - 0,05X_1X_4 - 0,07X_1^2 - 0,1X_2^2 - 0,1X_3^2. \quad (5)$$

Проверка адекватности полученных математических моделей осуществлялась по критерию Фишера [1]. Его расчетное значение не превысило табличное $F_p < F_T$. Во всех случаях гипотезы об адекватности не были отвергнуты. Это дало возможность перехода с учетом кодирования обозначений управляемых факторов

$$X_1 = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad X_2 = \frac{W - W_0}{\Delta W}, \quad X_3 = \frac{A - A_0}{\Delta A}, \quad X_4 = \frac{f - f_0}{\Delta f}$$

(T_0, W_0, A_0, f_0 — нулевые уровни; $\Delta T, \Delta W, \Delta A, \Delta f$ — интервалы варьирования) к натуральному виду уравнений регрессии:

для ткани арт. 25658 С —

$$K = 0,82 + 0,12T - 0,11W - 0,095A + 0,012f + 0,12 \cdot 10^{-3}TW - \\ - 0,054 \cdot 10^{-1}A \cdot f - 0,111 \cdot 10^{-2}T^2 - 0,14 \cdot 10^{-2}W^2 - 0,012 \cdot 10^{-2}A^2; \quad (6)$$

для ткани арт. 27566/2С —

$$K = 0,84 + 0,14T - 0,10W - 0,08A + 0,01f + 0,15 \cdot 10^{-3}TW - \\ - 0,032 \cdot 10^{-1}Af - 0,141 \cdot 10^{-2}T^2 - 0,112 \cdot 10^{-2}W^2 - 0,01 \cdot 10^{-2}A^2; \quad (7)$$

для ткани арт. 36309 —

$$K = 0,79 + 0,162T - 0,121W - 0,074A + 0,009f + 0,14 \cdot 10^{-3}TW - \\ - 0,044 \cdot 10^{-1}Af - 0,162 \cdot 10^{-2}T^2 - 0,114 \cdot 10^{-2}W^2 - 0,025 \cdot 10^{-2}A^2; \quad (8)$$

для ткани арт. 46104 —

$$K = 0,74 + 0,22T - 0,152W - 0,06A + 0,004f + 0,18 \cdot 10^{-3}TW - \\ - 0,028 \cdot 10^{-1}Af - 0,225 \cdot 10^{-2}T^2 - 0,122 \cdot 10^{-2}W^2 - 0,009 \cdot 10^{-2}A^2. \quad (9)$$

На основе анализа полученных уравнений регрессии определена степень влияния каждого из входных факторов на показатель K , дана оценка изменения выходной функции K по однофакторным зависимостям

$K = F(X_i)$ при фиксированных значениях остальных факторов на уровнях +1, 0, -1. [4]. В результате сравнения значений установлено, что существенное влияние на показатель коэффициента разутюживания оказали факторы X_1 и X_4 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. - М.: Легкая индустрия. 1974. - С. 61-93.
2. Оганесян С.М. Создание совмещенного технологического процесса стачивания и разутюживания швов с применением швейно-гладильного агрегата: Дисс. ... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Киев: ГАЛПУ, 1994. - 133 с.
3. А.с. 1390276, МКИ Д06Г 61/00, Способ оценки качества глажения. / Луцык Р.В., Орловский Б.В. - 2 с.
4. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих деталей. - Л.: Изд-во Ленинградской Краснознаменной военно-воздушной инженерной академии. 1947. - 220 с.

Гюмрийский фил. ГИУА

01.02.1996

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Ստակյան Մ.Գ., Իսախանյան Ն.Ս., Ղալեչյան Ն.Ա. Միկրոկարծրության մեթոդի օգտագործումը հաքագության գործընթացների և մեքենամասերի ժամանակակից տմրացնող տեխնոլոգիաների անժամանակ գնահատման համար	123
Մինասյան Ռ.Ս., Դավենյան Ս.Ա. Խոշորատանել ջնեքերի կողմ ղիսֆրագմաների բազմաձևերի անկյուններում տեղային լարումների դրսշումը	129
Քոտնաչյան Հ.Ա., Մարուխյան Ռ.Զ. Հայկական էներգետիկական գոտի էլեկտրական էներգիայի տակագների ձևավորման հիմնական սկզբունքները	133
Թամրազյան Մ.Գ. Էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի (Y-Z) մեթոդի մասին	138
Արեշյան Գ.Լ. Հարթ էլեկտրամագնիսական ալիքի ներթափանցումը հաղորդող նյութի մեջ էլեկտրամագնիսադինամիկայի հավասարումների հիմքով	142
Հակոբջանյան Գ.Դ., Սաֆարյան Վ.Ս. Էլեկտրական շղթաների հաշվարկման տեղաբանական մեթոդների վերաբերյալ	147
Բրուտյան Վ.Կ., Սարգսյան Վ.Վ. Փսիկ ուղեծրով բռնող սարքի շարժման կառավարման խնդրի վերաբերյալ	152
Բարսեղյան Է.Վ., Նալբանդյան Օ.Գ. Տեխնոլոգիական վառարան- ների ավտոմատ կառավարման ինքնակարգավորվող համակարգ	156
Վեքիլյան Ռ.Հ., Մաթասյան Ա.Ռ., Խաչատրյան Ռ.Մ. Մատրիցային լուսայնությունից աստղային տվյալի օպտիկական համակարգի պարամետրերի լուսություն հզորության չափանիշ	161
Մելիքյան Ն.Լ. Արտեզյան ջրաբեր շերտում սեղանավորված շատրվանող առանձին հորերի ելքի հաշվարկային մեթոդիկայի սառնի	165
Պողոսյան Մ.Մ., Հակոբյան Ն.Ս., Մարտիրոսյան Վ.Ա. ԿԱ հնդգներում թափոնների ալրման գործընթացում վնասակար օբյեկտների գոյացման օբյեկտայնությունների հետազոտությունը	169
Հովհաննիսյան Ս.Մ., Շահբազյան Վ.Վ. Վերամիսագուստի տարրերի կարերի ալրումման գործընթացի մաթեմատիկական մոդելների սառնի	173

СОДЕРЖАНИЕ

Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Галечян Н.А. Использование метода микротвердости для оценки режимов современных упрочняющих технологий деталей машин и процессов трещинообразования	123
Минасян Р.С., Давсян С.А. Определение местных напряжений в углах проемов несущей диафрагмы крупнопанельного здания	129
Бурпачян Г.А., Марухян В.Э. Основные принципы формирования тарифов на электрическую энергию по Армянской энергосистеме	133
Тамразян М.Г. Об одном (Y-Z) - методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы	138
Арешян Г.Л. Проникновение плоской электромагнитной волны в проводящее вещество на основе уравнений электромагнитодинамики	142
Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. К топологическим методам расчета электрических цепей	147
Брутян В.К., Саргсян В.В. К задаче управления движением летательного аппарата по замкнутой орбите	152
Барсегян Э.В., Налбавдян О.Г. Самонастраивающаяся система автоматического регулирования технологических печей	156
Векилян Р.О., Матасян А.Р., Хачатрян Р.М. Точностной критерий выбора параметров оптической системы астродатчика с матричным фотоприемником	161
Меликян Н.Л. О методике расчета дебита одиночных фонтанирующих скважин, заложенных в артезианском водоносном горизонте	165
Погосян М.М., Акопян Н.С., Мартиросян В.А. Исследование закономерностей образования вредных окислов при сжигании отходов в топках котлов	169
Оганесян С.М., Шахбазян В.В. О математических моделях процесса разутюживания стачных пивов деталей верхней одежды	173

CONTENTS

Stakyan M.G., Issakhanyan N.S., Galechyan N.A. The use of the microhardness method for estimating the conditions of the modern technologies in machine parts and cracking processes	123
Minassyan R.S., Daveyan S.A. Specification of local stresses in the opening angles of a large bearing-ball building diaphragm	129
Bournachyan H.A., Maroukhyan V.Z. Main principles of rate calculation for electric power in the Armenian Power System.	133
Tamrazyan M.G. On (Y-Z) method of calculation for a steady-state conditions in the electric power system	138
Areshyan G.L. Penetration of a plane electromagnetic wave into a conductive substance based on electromagnetic dynamics equations . .	142
Hakobjanyan G.D., Safaryan V.V. On topological methods of electric circuit design	147
Brutian V.K., Sargsian V.V. About closed orbit flying objects control problem	152
Barseghyan E.V., Nalbandyan O.G. A self-regulating system of autocontrol for technological furnaces	156
Vekilyan R.H., Matassyan A.R., Khachatryan R.M. Fidelity criterion of optical system parameter selection of a star sensor with a photoreceiver	161
Melikyan N.L. On design procedure of single spouting well flow rate lying in an artesian water-bearing horizon	165
Poghossyan M.M., Hakopyan N.S., Martirosyan V.A. Investigation on formation laws of harmful oxides in burning the waste in steam generator furnaces.	169
Hovhanessyan S.M., Shahbazyan V.V. On mathematical models of the ironing process for ordinary seams of the outerwear details	173