

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Նախագիտվում է 1947 թ.

ԽՐԱԿՆԵՐԱԿԱՆ ԿԱՆՈՒՅԻՆ

Սարգսյան Բ. Վ. (պատ. խմբագիր), Արմենյան Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ), Արևիկյան Գ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Սարգսյան Տ. Ա., Չուբարյան Բ. Ա., Նազարյան Ա. Կ., Տեր-Ազարյան Բ. Ա.,
Փրեզյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ)

Պատասխանատու քարտուղար Ստեփանյան Չ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Կոսյան Մ. Բ. (ответ. редактор), Адамц Г. Т. (зам. ответ. редактора), Алексеевский В. В.,
Ананян А. К., Горюхи Т. А., Задоян М. А., Назаров А. Г., Пинаджян В. В. (зам.
ответ. редактор), Тер-Азарьев Н. А.

Ответственный секретарь Степанян З. К.

Խմբագրությունը գտնվում էրևան-19, Բարեկամության փող. 24-դ
Адрес редакции Ереван-19, ул. Барикамутян, 24-г.

ЭНЕРГЕТИКА

Г. Т. АДОНИС, С. Г. АРУТЮНЯН

К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПРОДОЛЬНЫЕ
ВЕТВИ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ РЕАКТИВНЫМИ
СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Учет устройств продольной емкостной компенсации (МПК) в расчетах установившихся режимов электрических систем приводит к ухудшению сходимости итерации вплоть до ее потери в ряде случаев [1-3]. Особенно сильно влияние МПК на сходимость итерации по методу Гаусса-Зейделя, преимущество которого по простоте и необходимому объему памяти для программной реализации общеизвестно. Для улучшения сходимости по этому методу в [2] предлагается эквивалентирование участков расчетной схемы, включающей МПК, производить таким образом, чтобы отрицательное сопротивление МПК в чистом виде не участвовало. Однако, при сильной степени компенсации параметров ВЛ (до 40-50%) и малой протяженности прилегающих к МПК участков линия сходимость расчетов плохо обеспечивается. В [4] для улучшения сходимости по рассматриваемому методу предлагается выделить из схемы ВЛ, оснащенную современными средствами компенсации. Расчет режима такой передачи производится путем непосредственного решения ее уравнений или по схеме итерации, характеризующейся быстрой сходимостью [5]. Протяженная ВЛ по мере увеличения числа промежуточных отборов мощности и присоединения к ней энергосистем, расположенных по трассе линии, из транзитной превращается в разветвленную сеть сверхвысокого напряжения, и такой подход осуществить не всегда представляется возможным.

С целью анализа установившихся режимов больших электроэнергетических систем, содержащих продольные ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями, предлагается методика расчета, обладающая улучшенной сходимостью итерации по методу Гаусса-Зейделя.

Постановка задачи. Система представляется разбитой на подсистемы таким образом, чтобы выделить ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями (рис. 1). Крупные подсистемы, в свою очередь, могут быть разбиты на ряд подсистем. Подсистемы, представляющие электрические сети, замещаются эквивалентными пассивными многополюсниками с n независимыми узлами, в число которых входят генераторные, нагрузочные и выделенные узлы (узлы разреза).

Расчет режима выделенной ветви (одной или нескольких) с отрицательным реактивным сопротивлением производится непосредственным решением уравнений (2)÷(5):

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1 - \delta; \quad (2)$$

$$U_2 = \sqrt{u} + \sqrt{u^2 - \frac{P_2^2 + Q_2^2}{\omega^2 C^2}}; \quad (3)$$

$$Q_1 = U_1 U_2 \omega C \cos \delta - U_1^2 \omega C; \quad (4)$$

$$P_1 = -P_2, \quad (5)$$

$$\text{где } u = 0,5 U_1^2 - \frac{Q_2}{\omega C};$$

$$\delta = \arctg \frac{P_2}{\omega C U_2^2 + Q_2},$$

здесь 1 и 2 — индексы начала и конца выделенной ветви.

В узлах разреза должны выполняться уравнения связи:

$$\dot{\varphi}_{v,s} = \dot{\varphi}_{w,s'};$$

$$U_{v,s} = U_{w,s'};$$

$$P_{v,s} = P_{w,s'} - P_{w,s'}; \quad (6)$$

$$Q_{v,s} = Q_{w,s'} - Q_{w,s'};$$

где s, s' — узлы разреза, обеспечивающие связь (одну или несколько) между соседними подсистемами v и w , $v \neq w$;

$P_{w,s'}$, $Q_{w,s'}$ — мощности нагрузок, подключаемых в узлах разреза.

На рис. 1 указаны параметры режима узлов s, s' , используемые для согласования режимов отдельно рассматриваемых подсистем v .

Алгоритм расчета. Для расчета задаются начальными приближениями по напряжению узлов разреза, которые желательно принимать равными: $U_{s,s} = U_{\text{ном}}$, $\dot{\varphi}_{s,s} = 0$. Используемые в расчете режима очередной подсистемы v параметры $P_{v,s}$ и $Q_{v,s}$ получаются из расчета предыдущей подсистемы w с учетом уравнений (6), что схематически и показано на том же рис. 1.

Критерием сходимости внутренней итерации по расчету установившегося режима отдельных подсистем принимаются разности $\varepsilon_P = P^0 - P^1$ и $\varepsilon_Q = Q^0 - Q^1$. Внешняя итерация, связанная с согласованием установившегося режима отдельных подсистем, считается завершенной, если после достижения сходимости по U и $\dot{\varphi}$ небаланс мощностей во всех независимых узлах многополюсников не превышает допустимого. Последнее осуществляется путем фиксации во всех независимых узлах многополюсников исходных и найденных в процессе расчета параметров U и $\dot{\varphi}$. После этого по искомым параметрам $[U_k]$ независимых k узлов многополюсников могут быть без итерации определены параметры режима внутренних q узлов каждой из подсистем

$$|\dot{U}_{n+r}| = -|Y_{n+p, n-c}|^{-1} |Y_{n+p, k}| |\dot{U}_k|;$$

$$k = 1 \div n;$$

$$p, c = 1, 2, \dots, q.$$
(7)

Для ускорения расчета со второго цикла итерации вводится коэффициент ускорения 0,5 для вычисления улучшенных параметров узлов связи, используемых во внешнем цикле итерации, а также блок автоматического выбора фазы независимого балансирующего узла. Ориентация последнего должна соответствовать середине сектора комплексной плоскости, занимаемого векторами напряжений всех независимых узлов многополюсников.

Программа, реализующая предлагаемый алгоритм на ЭВМ «Пан-ри», была использована для проверки основных предпосылок и принятых решений, апробации различных схем итерации и коэффициентов ускорения. По указанной программе выполнена серия расчетов для ряда конкретных энергосистем. Выполненные расчеты показывают, что коэффициент ускорения $K=0,5$ обеспечивает сходимость к искомому решению за 12–16 циклов итерации с небалансом в независимых узлах 0,1 МВА.

Примеры расчетов. В [6] приводятся схема и результаты расчета установившегося режима энергосистемы, полученные по методу экви-

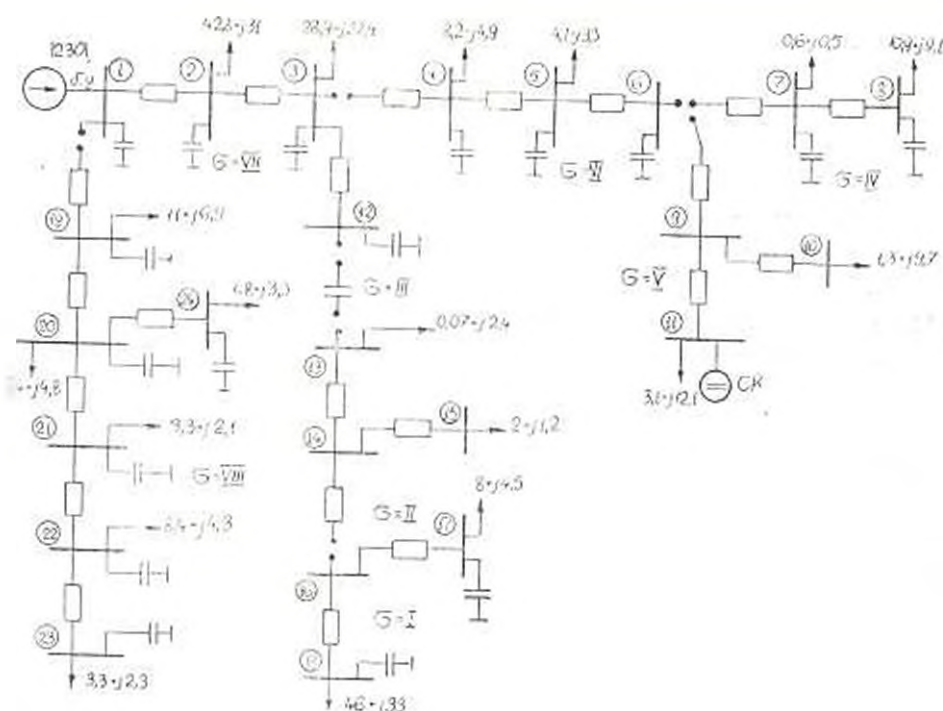


Рис. 2. Схема Амурской энергосистемы

валентного балансирующего узла с использованием матрицы $|Z|$ параметров сети. Выполненные указанными авторами исследования показывают, что расчет этой системы делением ее на подсистемы возможен лишь при применении этого метода, ибо остальные известные методы расчета дают расхождимость итерации. Намин был выполнен расчет установившегося режима по предлагаемому алгоритму, т. е. с использованием $[Y]$ параметров сети. Сходимость была достигнута за 11 циклов итераций (0,4 млн. операций).

11. Ниже приводятся результаты расчета установившегося режима сети 110 и 220 кВ Амурской энергосистемы, выполненного по предлагаемой методике. Схема указанной системы (рис. 2) разделена здесь на восемь подсистем. Единственный узел генерации 1 выбран в качестве независимого балансирующего узла. В силу этого подсистема VIII становится независимой, расчет ее режима не требует уточнения по внешнему циклу итерации. Активные и реактивные сопротивления схемы даны в табл. 1, причем, пассивные параметры подсистемы VIII приведе-

Таблица 1

№№ узлов	R, Ом	X, Ом	№№ узлов	R, Ом	X, Ом
1-0	0	-3864	13-14	10,7	53,5
1-2	17	66	14-15	0,113	2,24
2-0	0	-3401	14-16	1,33	1,6
2-3	6,9	26,8	16-0	0	-85110
3-0	0	-3120	16-17	4,4	16,4
3-4	5,3	20,4	16-18	2,2	5,2
3-12	13,8	53,8	17-0	0	-285700
4-0	0	-8511	18-0	0	-121200
4-5	4,28	16,6	1-19	19,5	29,4
5-0	0	-5276	19-0	0	-5348
5-6	11,2	43,6	19-20	16,7	25,2
6-0	0	-4073	20-0	0	-5787
6-7	8,8	34,2	20-21	12,1	15,8
6-9	5	171	20-21	7,3	11
7-0	0	-3900	21-0	0	-7994
7-8	12,1	47	21-22	6,14	9,3
8-0	0	-6711	22-0	0	-12890
9-10	0,9	350	22-23	8,9	13,4
9-11	5,6	12,3	23-0	0	-21790
12-0	0	-5865			
12-13	0	-130,8			

ны к напряжению 110 кВ, а параметры остальных подсистем — к 220 кВ. Расчет указанной системы, выполненный на ЭВМ «Навиг 2» с точностью небаланса в узлах 0,1 МВА, сходится к искомому за 15 циклов итераций. Данные табл. 2 иллюстрируют процесс сходимости на каждом цикле итерации. Расчет режима указанной системы без выделения ветви с УПК расхождется.

Выводы

1. Предлагаемая методика может быть эффективно использована для анализа на ЭВМ установившихся режимов электрических систем, содержащих продольные ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями.

Таблица 2

№№ узлов	Параметры	Пикеты интерации					
		0	1	2	3	4	5
16''	U	205	202	204.9	207	207.3	205.2
	x	0	-0.0322	-0.0202	-0.0191	-0.0502	-0.0945
	P	-	-55.4	-55.5	-54.1	-53.6	-54.4
16'	Q	-	-36.9	-37	37	36.9	37
13''	U	210	221.1	221.5	218.1	213.5	209.4
	x	0	0.0674	0.038	-0.0743	-0.0787	-0.116
	P	-	50.2	-58	-53.2	-50.7	-49.8
13'	Q	-	42.8	49.6	-50.6	47	44.1
12''	U	210	195.6	186.8	182.2	180.1	180.3
	x	0	-0.1664	-0.2582	-0.3037	-0.3247	-0.3321
	P	-	20.3	54.1	53.7	52.2	51
12'	Q	-	32.2	33.2	31.1	33.6	32
9''	U	200	209.2	209.8	204	205.9	204.3
	x	0	-0.0222	-0.1016	-0.1785	-0.2357	-0.2732
	P	-	14.5	14	13.7	13.7	13.8
6'	Q	-	13.6	14.2	16.8	18.1	18.6
3''	U	210	201.7	196.1	191.7	192.4	192.6
	x	0	0.1346	-0.207	-0.2433	-0.2607	-0.2675
	P	-	54.2	53.8	53.7	53.4	52.3
3'	Q	-	5.9	7	7.8	8.5	8.8
1	P	-	159.5	164.4	164.7	164.4	162.6
	Q	-	67.9	73.6	74.3	74.8	71.2
Время расчета на каждом цикле, сек		100	162	122	172	160	
№№ узлов	Параметры	Пикеты интерации					
		8	9	10	11	12	15
16''	U	197.1	195.7	194.9	194.5	194.4	194.6
	x	-0.1934	-0.2693	-0.2189	-0.2243	-0.228	-0.234
	P	-55.4	-55.3	-55.1	-53.5	-53.2	-53
16'	Q	37	37	37	37.1	37.1	37
13''	U	205.4	205.4	205.9	206.6	207.6	209
	x	0.1575	-0.1615	-0.1641	-0.1666	-0.1685	-0.1565
	P	-50.5	50.6	-50.7	-50.3	-50.1	-51.8
13'	Q	-41.7	42.1	34	44.4	46.5	51
12''	U	181.7	182	182.2	182.1	181.7	181.3
	x	-0.3379	-0.3382	-0.3383	-0.338	-0.3375	-0.338
	P	-50.4	-50.5	-50.6	-50.5	-50.3	-50.3
12'	Q	-28.9	-28.9	-29.2	-30.1	-31.4	-31.6
6''	U	203.2	203.1	203	203	203.1	203.1
	x	0.2081	0.315	-0.319	-0.3212	-0.3224	-0.3236
	P	-13.7	-13.3	-13.9	14	14	14.1
6'	Q	18.5	18.3	18.1	16	17.8	17.8
3''	U	193.1	193.3	193.4	193.5	193.4	192.6
	x	-0.273	-0.2735	-0.2735	-0.2735	-0.2734	-0.2736
	P	53.7	54.1	54.4	54.8	55.2	55.2
3'	Q	7.3	6.8	6.8	5.2	5.4	7
1	P	162.1	162.1	162	162	161.9	162
	Q	70.1	69.6	69	68.2	68.5	70
Время расчета на каждом цикле, сек		75	55	40	20	20	18

2. Применение метода разбиения системы на подсистемы с записью их эквивалентных пассивных параметров в форме $[Y]$ позволяет решать задачи расчета установившегося режима больших электроэнергетических систем.

АрмНИИ энергетики ЕРНИ им. К. Маркса

Получено 3 XI 1975

2. ՑԱՌԱՅԱԿԱՆ ՎԵՐԱԳՈՐԾՈՒՄ

ԲԱՑԱՍԱԴԱՆ, ԻՆՎԱՐՏԻՎ ԳԵՄԻՆԵՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԽԵՐԱՏՆԱԼԱԿԱՆ ՀԱՅՈՒՆՆԵՐ ՊԼՐՈՒՆՈՒՄՈՎ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԿԱՆ ՀԱՐԱԿԱՐԳԻ ԶԱՄԱՏՏՎԱԾ ԻՍԽԱԽԻ ԶԱՇՎԱԼՐԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱՆ ԾՈՒԲՋԸ

ԱՐՄՈՒՄ

Առաջարկվում է աշխարհի էլեկտրական համակարգի հաստատված սեփական հաշվարկի մեթոդիկա, որի երկայնական հյուսիսը կարող են ունենալ բացասական սեականիվ գիմադրությունները

Ինքնուրույն ժամկետ է համակարգը և նախահամակարգերի մասնատրված առանձնացներով բացասական սեականիվ գիմադրությամբ հյուսիսը և նախահամակարգերը ներկայացվում են որպես համարժեք բաղադրանքներ՝ զրկով պատասիվ պարամետրները և նախահամակարգերի տեսքով և ներքին խտրացիոն լուծումը կատարվում է Գաուս-Ջեյդելի մեթոդով, բայց մշակված ալգորիթմի կազմված է հաշվարկների ծրագիր - նախիվ էձի համար, որի միջոցով կատարված են հաշվարկներ մի շարք կոնկրետ էներգահամակարգերի համար:

ЛИТЕРАТУРА

1. Podmore R., Endrill J. M. Modified nodal iterative load flow algorithm to handle series capacitive branches. „Power Apparatus and Systems“, July-August, 1973.
2. Качанова Н. А., Юрковская Л. М. «Проблемы технической электродинамики», вып. 36, 1972, с. 36—43.
3. Адоныч Г. Т. «Электричество», № 2, 1970, с. 10—14.
4. Адоныч Г. Т., Артемьев С. Г. «Известия ВУЗов СССР—Энергетика», № 3, 1973, с. 9—15.
5. Адоныч Г. Т., Артемьев С. Г. «Электричество», № 5, 1974, с. 8—12.
6. Фазылов А. Ф., Ершова И. Г., Насирова Т. А. «Электричество», № 9, 1972.

ЭНЕРГЕТИКА

Լ. Լ. ԱՏԱՐՅԱՆ, Դ. Դ. ԱՄԲԱՐՇՄՅԱՆ

СИНУСНО-КОСИНУСНЫЙ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Одним из способов построения синусно-косинусного преобразователя является интегрирование участков синусоиды [1, 2]:

$$\cos x = - \int_0^x \sin x \, dx;$$

$$\sin x = \int_0^x \sin \left(\frac{\pi}{2} + x \right) dx.$$

Для реализации указанного функционального преобразователя необходимо от источника синусоидального напряжения с помощью стробирующего ключа получить участки синусоиды и через сглаживающий фильтр интегрировать их. Точность такого функционального преобразователя, в основном, зависит от функционирования стробирующего ключа. Здесь имеют значения как точность самого стробирующего ключа, которая определяется фронтами стробированного импульса, так и число переключений за определенное число периодов.

Так, если началом интегрирования взять точки $\frac{\pi}{2} (4k+1)$

($k=0, 1, 2, \dots$), а концом — точки $\frac{\pi}{2} (4k+1)+x$, где $0 \leq x \leq 2\pi$ [1],

то за один период синусоиды несущей частоты получаются два переключения. Если же пределы интегрирования взять симметрично относительно точек $\frac{\pi}{2} (4k+1)$, т. е. осуществлять интегрирование в

пределах $\frac{\pi}{2} (4k+1)-x$ и $\frac{\pi}{2} (4k+1)+x$, где $0 \leq x \leq \pi$ [2], то влияние

погрешности стробирующего ключа на точность преобразователя уменьшится в два раза, потому что хотя и в этом случае за один период синусоиды тоже имеют место два переключения, но значения $\sin x$ получаются вдвое больше, из-за чего, при применении одинаковых ключей, относительная погрешность в этом случае уменьшается в два раза.

Однако при таком выборе пределов интегрирования сужается диапазон изменения x , а именно: x изменяется в пределах $0 \div 180^\circ$, и то время, как в рассмотренном в [1] случае этот диапазон $0 \div 360^\circ$.

Для расширения пределов изменения аргумента от 0° до 360° в [2] предлагается использовать дополнительный электронный переключатель, который изменяет полярность либо входного синусоидального сигнала, либо сигнала смещения на входе или выходе стробирующего ключа. Однако при этом вследствие применения электронного переключателя ухудшаются динамические характеристики функционального преобразователя. Кроме того, при таком решении вопроса вблизи точек $x=0^\circ$; 180° ; 360° имеют место зоны нечувствительности из-за неидеальных характеристик стробирующих схем, а именно: вблизи точки $x=0^\circ$ стробирующие импульсы получаются маломощными и они не в состоянии производить стробирование, а вблизи точек $x=180^\circ$; 360° соседние стробирующие импульсы перекрывают друг друга, вызывая собой стробирующего ключа. Отметим, что по тем же причинам вблизи точек $x=0^\circ$; 360° получают зоны нечувствительности и при выборе начала интегрирования в точках $\frac{\pi}{2} (4k+1)$.

Исключать зоны нечувствительности, одновременно обеспечивая диапазон изменения аргумента $0 \div 360^\circ$, возможно при выборе пределов интегрирования симметрично относительно точек $\frac{\pi}{2} (16k+1)$, т. е. при осуществлении интегрирования раз за четыре периода, причем $-\pi \leq x \leq 3\pi$. В этом случае и $\sin 0^\circ$, и $\sin 360^\circ$ получаются четко, т. к. аргументу $x=0$ соответствует длительность импульса, равной периоду синусоиды несущей частоты, а при аргументе $x=360^\circ$ между соседними стробирующими импульсами остается промежуток интервал, равный тому же периоду. Что касается точки $x=180^\circ$, то через нее аргумент проходит плавно, не вызывая никаких сбоек. При выборе пределов интегрирования $-\frac{\pi}{2} \leq x \leq \frac{5\pi}{2}$ в таком преобразователе получают значения $\cos x$. При практической реализации описанного синусно-косинусного функционального преобразователя с помощью дублирования некоторых узлов схемы можно значения $\sin x$ и $\cos x$ получить одновременно.

При осуществлении интегрирования последним способом статическая точность несколько падает. Это окупается тем, что исключаются все зоны нечувствительности, имеющие место в устройствах, описанных в [1, 2].

Таким образом, имеет место некоторое противоречие между статической и динамической точностями. Поэтому при практической реализации указанного синусно-косинусного функционального преобразователя для конкретных целей приходится идти на определенный компромисс между статической точностью и динамическими характеристиками. При

применении такого преобразователя в генераторных элементах автоматической модели энергосистем для расчетов несинхронных режимов, где имеют место явления ухода частоты в пределах нескольких герц, необходимо обеспечивать тригонометрические преобразования при изменении аргумента в пределах, намного превышающих 2π . Причем, во всем диапазоне изменения аргумента устройство должно обеспечивать высокие динамические характеристики, т. е. наличие зон нечувствительности является крайне нежелательным фактором.

Описанный синусно-косинусный функциональный преобразователь в сочетании со схемой периодизации, осуществляющей переключение аргумента (входного напряжения) от значения 360° к 0° , обеспечивает предъявляемые к статической и динамической точностям требования в практически неограниченных пределах. В АрмНИИЭ разработана схема и проведены экспериментальные исследования указанного функционального преобразователя.

Схема преобразователя представлена на рис. 1, а временные диаграммы — на рис. 2. Пунктиром обозначены те связи, которые необходимы для получения одновременно также и $\cos x$.

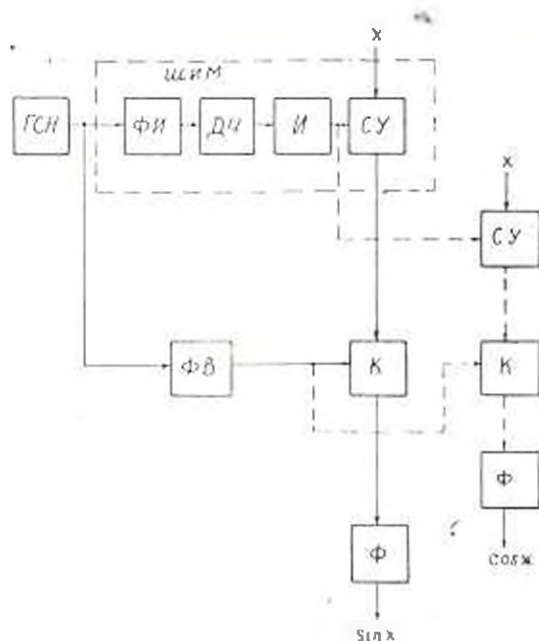


Рис. 1

В данном устройстве генератор синусоидального напряжения несущей частоты (ГНС) соединен с широтно-импульсным модулятором (ШИМ), состоящим из формирователя импульсов (ФН), на выходе которого получают прямоугольные импульсы с частотой входного синусоидального сигнала (диаграмма б1, делителя частоты на четыре

(ДЧ), который представляет собой два последовательно соединенных триггера, интегратор (И), который преобразует выходные прямоугольные импульсы делителя частоты в импульсы треугольной формы (диаграмма z) и сравнивающее устройство (СУ), который на выходе выдает прямоугольные импульсы длительностью, пропорциональной управляющему напряжению x (диаграмма d). Этими импульсами управляется ключ (К), на выходе которого через фазовращатель на 90° (ФВ) посту-

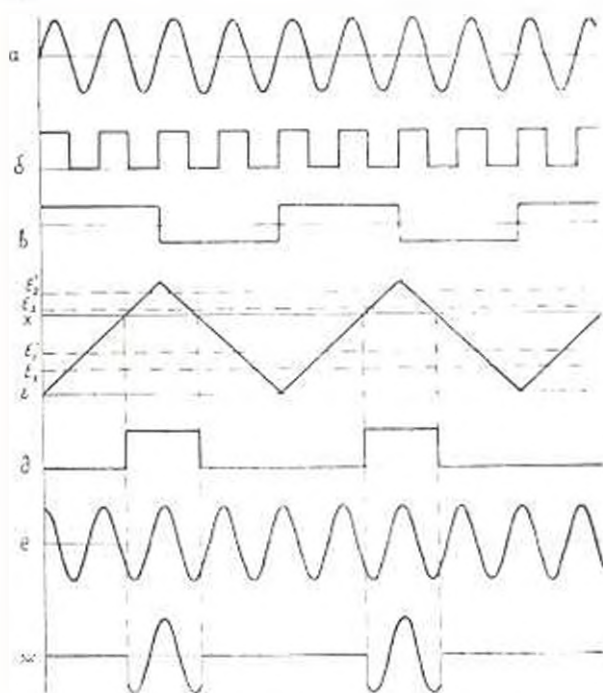


Рис. 2

пает синусоидальное напряжение генератора несущей частоты (диаграмма e). Полученные на выходе ключа отрезки синусоиды (диаграмма $ж$) фильтруются сглаживающим фильтром (Ф), на выходе которого получается напряжение, пропорциональное $\sin x$, если диапазон изменения управляющего напряжения выбран $E_1 \div E_2$ (диаграмма z). Если же управляющее напряжение изменяется в пределах $E_1 \div E_2$, то на выходе устройства получается напряжение, пропорциональное $\cos x$.

Общая погрешность устройства определяется погрешностями интегратора, стробирующего ключа и сглаживающего фильтра. Погрешности формирователя импульсов, делителя частоты и сравнивающего устройства носят фазовый характер и могут быть устранены с помощью настройки фазовращателя.

Погрешность интегратора обуславливается проводимостями входной и выходной цепей и конечностью значения коэффициента усиления усилителя [3].

Эти погрешности соответственно определяются выражениями:

$$\delta_1 = \frac{Y_c}{Y_{\text{вх}}} \cdot \frac{e_{\text{вх}}}{e_{\text{вых. макс}}} \cdot 100\%;$$

$$\delta_2 = \frac{Y_c t}{2C} \cdot 100\%;$$

$$\delta_3 = \frac{1}{0,67 K_v} \cdot \frac{t}{2R_{\text{м}} C} \cdot 100\%.$$

где $Y_{\text{вх}}$ — проводимость входной цепи интегратора; Y_c — проводимость выходной цепи интегратора; $e_{\text{вх}}$ — значение входного сигнала интегратора; $e_{\text{вых. макс}}$ — максимальное значение выходного сигнала интегратора; t — время интегрирования; K_v — коэффициент усиления усилителя.

Для значений параметров разработанной схемы: $Y_{\text{вх}} = 9,1 \cdot 10^{-5}$ Сим; $Y_c = 0,2 \cdot 10^{-9}$ Сим; $C = 10^{-9}$ Ф; $e_{\text{вх}}/e_{\text{вых. макс}} = 0,25$; $t = 10^{-4}$ сек; $K_v = 10^3$, — погрешности соответственно равны: $\delta_1 = 0,00006\%$, $\delta_2 = 0,01\%$, $\delta_3 = 0,055\%$.

Общая погрешность интегратора:

$$\delta_{\text{инт}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0,075\%.$$

В процессе стробирования синусоиды ключ вносит погрешность, которая обусловлена временами отпирания и запираания самого ключа. При управлении ключа идеальными прямоугольными импульсами и при определенных условиях время отпирания и время запираания получаются почти одинаковыми и определяются выражением [4]:

$$t_{\text{об}} \approx \frac{2,3(1-\beta)}{2\pi f_t},$$

где f_t — граничная частота транзистора.

Разумеется, что максимальная погрешность от стробирования получится тогда, когда фронты стробирующих импульсов совпадут с амплитудным значением синусоиды. Эта погрешность определяется выражением:

$$\delta_{\text{ст}} = \frac{S_1}{S_2} 100\%.$$

где $S_1 = At_{\text{ф}}$ — двойная площадь прямоугольного треугольника, имеющего основание $t_{\text{ф}}$ и высоту A ;

$S_2 = \int_0^{\pi} A \sin \omega t dt$ — площадь, ограниченная полупериодом синусоиды;

A — амплитуда синусоиды.

Для значений параметров (транзистор 1Т 315): $f_t = 25 \cdot 10^5$ Гц; $\beta = 30$; $\omega = 4\pi \cdot 10^4$, — погрешность стробирования составляет $\delta_{\text{ст}} = 0,276\%$.

При применении фильтра с погрешностью $\delta_{\phi} = 0,1\%$ общая погрешность преобразователя составит

$$\delta = \delta_{\text{инт}} + \delta_{\text{ст}} + \delta_{\phi} = 0,45\%.$$

В табл. 1 приведены результаты экспериментального исследования описанного функционального преобразователя. Как видно из таблицы, максимальная погрешность по отношению к полной шкале выходного напряжения не превышает $0,5\%$ при несущей частоте 20 кГц .

Таблица 1

Вход, В	Выход, В	Вход	Точные значения синуса и косинуса, приведенные к амплитудному значению $5,94 \text{ В}$	Погрешность, приведенная к амплитудному значению $5,94 \text{ В}$, %
0	0	0	0	0
-0,2	-0,16	-1°33'	-0,161	0,02
+0,2	+0,17	-1°33'	+0,161	0,16
-1,3	-1,06	-10°10'	-1,038	0,37
+1,3	+1,06	+10°10'	+1,038	0,37
-3,3	-2,59	-25°52'	-2,590	0,004
+3,3	+2,60	-25°52'	+2,590	0,18
-6,2	-4,45	-48°31'	-4,445	0,09
+6,2	+4,46	-48°31'	+4,445	0,25
-9,6	-5,76	-75°08'	-5,738	0,36
+9,6	+5,76	-75°08'	+5,738	0,36
-11,5	-5,93	-90°00'	-5,940	0,17
+11,5	+5,95	-90°00'	+5,940	0,17
-18,5	-3,45	-144°47'	-3,425	0,42
+18,5	+3,43	-144°47'	+3,425	0,08
-22,1	-0,75	-172°59'	-0,732	0,30
+22,1	+0,74	-172°59'	+0,732	0,15
-23,0	-0,01	-180°00'	0	0,17
+23,0	-0,01	-180°00'	0	0,17
-26,8	-2,93	-209°44'	-2,927	0,05
+26,8	-2,94	-209°44'	+2,927	0,22
-29,8	+4,73	-233°13'	-4,760	0,50
+29,8	+4,74	-233°13'	+4,760	0,34
-34,5	+5,93	-270°00'	-5,940	0,17
+34,5	-5,94	-270°00'	+5,940	0

Выводы

1. Рассмотренный функциональный преобразователь имеет лучшие динамические характеристики, чем аналогичные преобразователи, приведенные в [1, 2]. Улучшение динамической характеристики достигается путем исключения зон нечувствительности вблизи точек $\alpha = 0^\circ$; 180° ; 360° .

2. Экспериментальные исследования показали, что рассмотренный функциональный преобразователь обладает достаточно высокой статической точностью, несмотря на повышение несущей частоты.

Բ. 4. ԱՄԱՏՐԱՆ, Գ. Գ. ՀԱՄԱՐԱՐՈՒԹՅԱՆ

ՍԻՆՈՒՍ-ԿՈՍԻՆՈՒՍԱՆՅՈՒՆ, ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ, ԿԵՐՊԱՓՈԽԻՉ

ԱՆՓՈՓՈՒՄ

Մշակված է սինտետիկ կառուցների ինտեգրման վրա հիմնված սինտոկոսինուսային ֆունկցիոնալ կերպագրության ինտեգրման սահմանների ընդարձակման միջոցով վերացված են անդադնաժամանակային գոտիները, որոնք ստացվում էին արգումենտի որոշ արժեքների դեպքում: Սերվիսը են աչգային սարքի փորձարարական հետադրոստության արդյունքները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Патент Японии № 41-1145, кл. 114A522, «Генератор функций»
2. Корн Г., Корн Т. Аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины, т. I 1967
3. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования, 1963
4. Агаханов Т. М. Электрические явучи и нелинейные амплитудные свистелли, 1966.

ЭНЕРГЕТИКА

М. С. МКРТЧЯՆ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
МЕТОДОМ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Решение таких технических задач, как распределение нагрузок между электрическими станциями, экономическое планирование производства электроэнергии, надежное электроснабжение потребителям, поддержание нужного резерва и т. п., невозможно без прогнозирования нагрузок в энергосистемах. Такие задачи возникают и требуют решения ежедневно, ежечасно. Следовательно, для оперативного управления энергосистемой необходимо прогнозировать нагрузку в ближайшие несколько часов.

Существуют два основных подхода прогнозирования: к первому подходу относятся методы, использующие предсказание погоды и метеорологическую информацию, ко второму — методы, использующие только данные по предыдущим нагрузкам, основой которых являются суточные графики электрических нагрузок энергосистемы [4]. В данной статье описывается один из методов прогнозирования по данным предыдущим нагрузок — метод весовых коэффициентов.

Основные положения. Суточные графики нагрузок энергосистемы имеют тенденцию повторяться каждые 24 ч. и ряд значений активных мощностей (нагрузок) по времени, непрерывных или дискретных, каждого дня является одним из членов множества рядов по времени. Как указано в [1], этот ряд представляет нестационарный случайный процесс во времени. Однако, рассмотрение нескольких членов множества нестационарных процессов в сечении каждого одного часа выявляет их достаточную стационарность, для подтверждения чего ниже приведены данные исследования характеристик случайного процесса для Армянской энергосистемы за 19 часов I квартала 1972 г. и за 9 часов IV квартала 1972 г.

При исследовании в качестве одного ряда или одного случайного процесса приняты данные одного часа в течение одной декады, и тогда число рядов для данного квартала будет равно девяти, т. е. случайный процесс $P(t)$ рассмотрен в совокупности 9 реализаций. Значения характеристик m_p , $D_p(t)$, $K_p(t, t')$ и нормированного корреляционного процесса $\rho_p(t)$ каждого часа приведены в соответствующих таблицах.



Для 19 часов I квартала 1972 года

Таблица 1

Приближенная зависимость математического ожидания центрируемых значений активных мощностей от времени

Дни декады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_p(t)$	18.1	2.5	5.3	-3.9	12.1	0	8	-1.9	-6	-9.6

Таблица 2

Значения корреляционной функции $K_p(t, t')$

t t'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4716	3635	1487	2992	3200	2905	-4663	4453	2629	4905
2		1092	1759	3949	3411	2128	4642	3613	3768	5399
3			-1135	3828	1754	1711	3534	2043	2968	5184
4				7271	3526	2407	4676	3128	2647	4360
5					4956	3206	4341	2748	3636	5748
6						3233	4107	2583	1575	4148
7							7645	3377	3845	8250
8								4802	3479	5150
9									6290	6770
10										12218

По главной диагонали табл. 2 стоят оценки дисперсии $D_p(t)$ по времени.

Таблица 3

Среднее квадратичное отклонение по времени

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_p(t)$	68.8	64.0	64.3	85.3	70.5	56.9	87.4	69.3	79.3	110.5

Таблица 4

Значения нормированной корреляционной функции

$t-t'$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tilde{K}_p(t)$	1	0.68	0.566	0.588	0.619	0.63	0.66	0.80	0.62	0.65

Для 9 часов IV квартала 1972 года

Таблица 5

Приближенная зависимость математического ожидания центрируемых значений активных мощностей от времени

Дни декады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_p(t)$	-10.7	8.4	13.7	28.5	0	14.9	-14.4	-12.7	9.7	-3.1

Таблица 6

Значения корреляционной функции $K_P(t, t')$

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10865	8149	6168	6432	5950	6498	8367	9851	8446	6401
2		10037	4918	7735	6716	7316	8219	8371	10077	9600
3			8714	5896	5065	6700	7857	11021	8800	9488
4				8613	8119	7866	7759	8774	4965	8712
5					10708	7022	5126	3959	5361	8113
6						9688	7644	7317	7531	8700
7							10994	10661	9786	8698
8								12354	11226	8220
9									13191	7109
10										11850

По главной диагонали табл. 6 размещены дисперсии $D_P(t)$ по времени.

Таблица 7

Среднее квадратичное отклонение по времени

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_P(t)$	104.2	100.2	93.3	92.5	103.5	96.4	104.8	111.2	114.9	108.8

Таблица 8

Значения нормированной корреляционной функции по времени

t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{\rho}_P(t)$	1	0.74	0.68	0.66	0.67	0.61	0.63	0.89	0.64	0.56

Анализируя полученные данные, относительно предлагаемой стационарности случайного процесса $P(t)$ можно отметить следующее.

Случайный процесс $P(t)$ не является строго стационарным, т. к. математические ожидания не вполне постоянны, со временем несколько меняются дисперсии, и значения нормированных корреляционных функций также не вполне постоянны. Однако, если принимать во внимание весьма ограниченное число обработанных реализаций — 9, а в связи с этим и наличие большого элемента случайности в полученных оценках, то принятые отступления от стационарности можно считать незначительными. Следовательно, будет приемлемо случайный процесс $P(t)$ рассматривать как стационарный.

Отметим также, что из графика корреляционной функции (рис. 1) видно, что при увеличении t функция не убывает до нуля, а, начиная с некоторого значения, остается приблизительно постоянной. Это указывает, что в составе случайной функции имеется слагаемое в виде случайной величины. Поэтому, рассмотренный стационарный случайный процесс не является эргодическим.

Решение задачи. Учитывая стационарность случайного процесса (в сечении суточных графиков одного часа), можно применить метод весовых коэффициентов для прогнозирования величины активной нагрузки энергосистемы h -го часа $(t+m)$ -го дня по следующей формуле:

$$P_{t+m}(t_h) = \sum_{k=1}^s a_k P_{t-k+1}(t_h), \quad (1)$$

где m — прогнозируемое время ($m=1$);

$k=1, 2, \dots, s$ — количество данных, ближайших к прогнозируемому дню из динамического статистического ряда, используемых в прогнозе h -го часа $(t+m)$ -го дня;

n — число членов динамического статистического ряда ($n=10$);

a_k — весовые коэффициенты, вычисления которых производится по всем данным динамического статистического ряда величин активных нагрузок энергосистемы h -го часа с применением метода минимума среднеквадратичного отклонения прогнозируемых величин активных нагрузок от действительных.

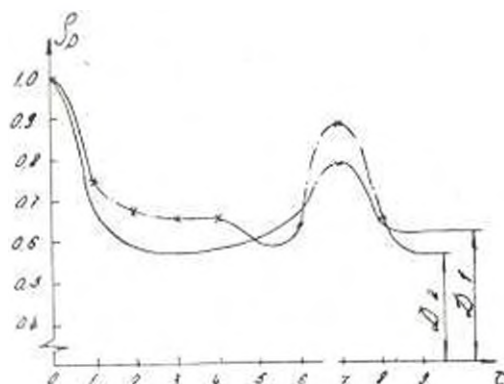


Рис. 1. Нормированные корреляционные функции нагрузки энергосистемы:

— 19 часов I квартала 1972 г.;

— 9 часов IV квартала 1972 г.

Сущность динамичности статистического ряда заключается в том, что самые ранние данные в ряде стираются путем сдвига на один суточный период. Фактически, только что прошедшие вчерашние величины активных нагрузок каждого h -го часа становятся последними членами статистических рядов.

Значения коэффициентов a_k обусловлены тем, что критерием наилучшего приближения прогнозируемых и действительных значений принимается минимум среднеквадратичной ошибки по следующей формуле:

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{n-s} \sum_{j=1}^{n-s} (P_{j+s} - a_1 P_{j+s-1} - a_2 P_{j+s-2} - \dots - a_s P_j)^2,$$

где $j = 1, 2, \dots, n-s$.

В общем случае

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{n-s} \sum_{j=1}^{n-s} \left(P_{j+s} - \sum_{k=1}^s a_k P_{j+s-k} \right)^2.$$

Для определения коэффициентов a_k найдем производную $\frac{\partial \sigma_h^2}{\partial a_i}$ (где $i = 1, 2, \dots, s$) и приравняем ее к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_h^2}{\partial a_i} &= \frac{2}{n-s} \sum_{j=1}^{n-s} \left(P_{j+s} - \sum_{k=1}^s a_k P_{j+s-k} \right) P_{j+s-i}; \\ \sum_{j=1}^{n-s} \left(P_{j+s} - \sum_{k=1}^s a_k P_{j+s-k} \right) P_{j+s-i} &= 0. \end{aligned}$$

Имеем систему s линейных уравнений с s неизвестными коэффициентами $a_1, a_2, \dots, a_s$.

Далее:

$$\sum_{j=1}^{n-s} P_{j+s} P_{j+s-i} - \sum_{k=1}^s a_k \sum_{j=1}^{n-s} P_{j+s-k} P_{j+s-i} = 0.$$

Принимая обозначения:

$$A_i = \sum_{j=1}^{n-s} P_{j+s} P_{j+s-i}; \quad i = 1, 2, \dots, s$$

$$A_{k,i} = \sum_{j=1}^{n-s} P_{j+s-k} P_{j+s-i}, \quad i, k = 1, 2, \dots, s$$

система уравнений принимает вид:

$$\sum_{k=1}^{n-s} A_{k,i} a_k = A_i.$$

Таким образом, для прогнозирования суточного графика нагрузки по предыдущим нагрузкам составляется динамический статистический ряд для каждого часа прогнозируемых суток n , используя всю длину ряда, определяются весовые коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_s$, после чего по формуле (1) прогнозируется значение активной нагрузки по величинам предыдущих нагрузок дней, стоящих в ряду ближе к прогнозируемому дню.

Пример расчета. В приложении приведена программа прогнозирования нагрузок на языке «Фортран 4». Она составлена для машины «Урал-14Д» и позволяет произвести вычисления для каждого часа прогнозируемого дня отдельно в трех вариантах. В первом варианте прогнозируемая нагрузка определена по двум ближайшим дням $s=2$, во втором варианте $s=3$ и в третьем — $s=4$. Проведенные расчеты

показывают, что наилучшее прогнозирование получается, когда число предисторий в прогнозе равно двум дням. Это значит, что ближайшие два дня больше содержат в себе информации, чем остальные дни. На рис. 2 представлены действительный и прогнозируемый графики нагрузок 1 декабря 1972 г. Среднеквадратичная ошибка составляет 2,43%.

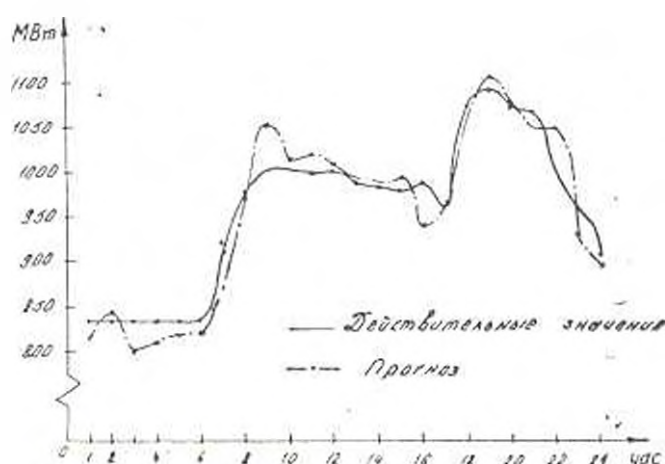


Рис. 2 Сравнение прогноза с действительными данными нагрузок энергосистемы

Однако необходимо отметить, что хорошие результаты прогнозирования со среднеквадратичной ошибкой $\pm 2,4 : 2,7\%$ обеспечиваются не в каждом дне недели. На понедельник и вторник среднеквадратичная ошибка заметно увеличивается. Для таких дней число предисторий, используемых в прогнозе, рекомендуется брать три дня (в качестве примера в табл. 9 приведены расчеты на вторник 128 ноября 1972 г.).

Таблица 9

Нагрузка	Ч а с ы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Действительная	791	791	791	791	791	791	841	950	1050	1067	1018	957
Прогнозируемая, $x=2$	766	747	737	737	739	751	815	893	928	950	926	891
Прогнозируемая, $x=3$	773	748	742	746	739	742	825	910	958	968	944	917

Продолжение табл. 9

Ч а с ы												Средне- квадрати- чная ошиб- ка, %
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
966	970	960	960	960	1046	1086	1016	1036	1010	916	835	
917	890	910	920	939	1003	1061	1031	987	913	871	793	6,6
974	930	947	966	957	982	1067	1030	966	907	964	795	5,5

В ы в о д ы

1. Суточные графики нагрузок энергосистемы или отдельного ее узла, являющиеся нестационарными процессами, в сечении каждого одного часа суток проявляют достаточную стационарность, однако этот стационарный процесс не является эргодическим.

2. Стационарность случайного процесса в сечении одного часа представляет возможность для оперативного прогнозирования нагрузок, принимая метод весовых коэффициентов. При таком методе средне-квадратичная ошибка составляет $2,4 \pm 2,7\%$, однако на понедельник и вторник она увеличивается до $5,5\%$.

3. Простота программы прогнозирования суточного графика энергосистемы или ее узла, малое машинное время расчета и приемлемая точность предсказания дают основание рекомендовать вышеуказанный метод на прогнозирование нагрузок для оперативного управления режимами энергосистем.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Программа прогнозирования нагрузок энергосистемы на языке „Фортран—4“ для машины „Урал — 14.1“

ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПО ВЕСОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТАМ
ИСПОЛНИТЬ ФОРТРАН

```

DIMENSION A(40, 41), X(40), P(240)
18 FORMAT (12 F 6, 1)
19 FORMAT (6 E 15, 7)
20 FORMAT (' A (' , 1 2, ' , 1 2, ') = ', E 16, 7)
21 FORMAT (' X (' , 1 2, ') = ', E 15, 7)
17 FORMAT (' PTN= ', 6 E 15, 7)
24 FORMAT (' ИСХ. ИНФ. НЕВЕР. ')
  READ 8, P
  WRITE 9, P
  KF 0
25 N=10
  IS=1

```

```

10 IS=IS+1
   DO 2 I=1, IS
   A(I, IS+1)=0
   J1=N-IS
   DO 1 J=1, J1
   I1=J+IS
   I2=J+IS-1
1  A(I, IS+1)=A(I, IS+1)+P(I1)*P(I2)
   DO 2 K=1, IS
   A(I, K)=0.
   DO 2 J2=1, J1
   J3=J2+IS-K
   I3=J2+IS-1
2  A(I, K)=A(I, K)+P(J3)*P(I3)
   N1=IS+1
   DO 4 K1=1, IS
   S2=A(K1, K1)
   DO 3 JA=K1, N1
   IF(A(K1, K1)) 3, 25, 3
3  A(K1, JA)=A(K1, JA)/S2
   IF(K1-IS) 22, 23, 23
22 K11=K1+1
   DO 4 JA=K11, IS
   S3=A(JA, K1)
   DO 4 JB=K1, N1
4  A(JA, JB)=A(JA, JB)-S3*A(K1, JB)
23 X(IS)=A(IS, N1)
   DO 6 L=2, IS
   M=IS+1-L.
   S1=0, M1=M+1
   DO 11 K2=M1, IS
11 S1=S1+A(M, K2)-X(K2)
   X(M)=A(M, IS+1)-S1
6  WRITE 21, M, X(M)
   WRITE 21, IS, X(IS)
   PTM=0.
   DO 7 L1=1, IS
   L2=N-L1-1
7  PTM=PTM+X(L1)*P(L2)
   WRITE 17, PTM
   IF (IS-4) 10, 10, 12
12 KF=KF+1
   DO 13 IP=1, N
   IT=IP+10*KF
13 P(IP)=P(IT)
   IF(KF-23) 14, 14, 15
25 WRITE 24
15 STOP
END

```


Մ. Պ. ՄԿՐՅՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԲՆԹՆՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԴՐԱՅԻՆՆԵՐԻ ԿԱՆԽՈՐՈՇՈՒՄԸ
ԿՇՌԱՅԻՆ ԴՈՐՄԱԿԵՑՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ

ԱՐՎԵՐԻՈՒՄ

Էներգահամակարգի օպերատիվ ղեկավարման համար անհրաժեշտ է կանխորոշել առաջիկա օրվա բեռնվածության դրաֆիկը, որն իրենից ներկայացնում է ոչ առաջիտևար պատահական պրոցես: Այդպիսի պրոցեսի կանխորոշումը կապված է դժվարությունների հետ:

Հոգվածում ցույց է տված, որ մի քանի օրվա բեռնվածությունների դրաֆիկները բոտ ժամային կտրվածքի ի հայտ են բերում բավարար ստատիստիկականություն: Դա հնարավորություն է տալիս, օգտագործելով կշռային գործակիցների մեթոդը, անցած օրերի տվյալ ժամվա արդյունքների հիման վրա կանխորոշել առաջիկա օրվա բեռնվածությունը տվյալ ժամվա համար: Հաշվարկային ալգորիթմի հիման վրա «Յուրադան-1» լեզվով կապված է համապատասխան ծրագիր «Արալ-11» թվային հաշվիչ մեքենայի համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мельников А. Г., Липа В. Г. Предсказание случайных процессов. Киев, 1971.
2. Бенгелъ Е. С. Теория вероятностей. Изд. «Наука», М., 1964.
3. Мамедзоя О. С., Исмаилов Ф. С. Оперативный прогноз графика нагрузки энергосистемы. Сб. «Разработка математического обеспечения ОАСУ «Энергия».
4. Мельников П., Николайков Г. Методика прогнозирования нагрузок в системах электро-снабжения. IEE „Proceeding- the Institution of Electrical Engineers“, 1968, v. 115, № 10.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. ОЛЕНИК, В. В. БЕЗЕР, М. Г. СТАКЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА УПРОЧНЕНИЯ
ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЕЙ

В связи с интенсивным развитием машиностроения всю большую актуальность приобретают вопросы уменьшения металлоемкости машин за счет совершенствования методов расчета, проектирования и технологии изготовления деталей машин, а также применения термического и механического упрочнения. Отыскание дополнительных резервов прочности и долговечности деталей машин базируется на точном учете их эксплуатационных нагрузок, статистической оценке характеристик выносливости и применении в практике конструирования термообработанных до высокой твердости среднеуглеродистых и низколегированных сталей. Поэтому представляет определенный интерес изучение эффекта упрочнения, достигаемого при использовании того или иного вида термической обработки.

Влияние методов упрочнения на выносливость сталей обычно учитывается коэффициентом

$$\beta_s = \frac{\sigma_r}{\sigma_s}, \quad (1)$$

где σ_r , σ_s — пределы длительной или ограниченной выносливости упрочненных и неупрочненных деталей машин.

Если вероятностные значения пределов выносливости представить в виде

$$\sigma_{rs} = \bar{\sigma}_r + uS_s = (1 + uV_s) \bar{\sigma}_r, \quad (2)$$

то получим, что

$$\beta_s = \frac{(1 + uV_s) \bar{\sigma}_r}{(1 + uV_s') \bar{\sigma}_r} = A_s \beta_r, \quad (3)$$

где u — квантиль нормального распределения;

$\bar{\sigma}_r$, $\bar{\sigma}_r'$, $\bar{\sigma}_s$ — средневероятностные значения $\bar{\sigma}_r$, σ_{rm} , σ_{sm} ;

V_r , V_r' — коэффициенты вариации σ_{rm} , σ_{sm} ;

A_s — вероятностный коэффициент.

Значения $\bar{\sigma}_r$, $\bar{\sigma}_s$ и их дисперсии S_s^2 зависят от требуемой долго-

вечности (наработки) N , равно как и размеры полей рассеяния долговечностей N зависят от уровня напряжения σ_r . У металлов с различными структурными состояниями, а значит и деталей из них, поля рассеяния этих величин неодинаковы, поэтому в общем случае $V_2 \neq V_1$ и A_2 отличны от единицы. Следовательно, величина β_2 будет зависеть от числа циклов N и вероятности неразрушения $I(N)$. Можно считать, что значения β_2 , приводимые в справочной литературе, фактически соответствуют уровню $I(N) \approx 50\%$ в области длительной выносливости.

Для оценки коэффициента β_2 во всем реальном интервале A применим ранее предложенную методику [1, 2], основанную на использовании уравнений кривой выносливости в параметрическом виде:

$$\lg N_i = -(\bar{m} + uS_m)(\lg z_i - \lg \bar{z}) + (\lg N + uS_N) \quad (4)$$

$$\text{или} \quad \lg N_i = C - m_0 \lg z_i, \quad (4a)$$

$$\text{где} \quad C = (\bar{m} + uS_m)\lg \bar{z} + (\lg N + uS_N); \quad m_0 = (\bar{m} + uS_m). \quad (4б)$$

В статье рассматриваются результаты циклических испытаний (чистый изгиб с вращением) образцов из стали 45 и 40 (гладкие (Г.) и с концентраторами напряжений (К) $d = 10; 25$ мм, $r_1 = 2, 51$ и $1, 85$), подвергнутых отжигу (О), нормализации (Н), улучшению (У) и закалке (З). Режимы нагружения — стационарный и программный с варьированием амплитуды изгибных напряжений между двумя уровнями [3, 4].

В расчетах приняты следующие допущения:

а) среднеевероятные кривые выносливости при закалке доведены до $N_0 = 10^6$ для гладких и $N_0 = 0,5 \cdot 10^6$ для надрезанных образцов (в литературе доказывается возможность такой экстраполяции; в связи с незначительным наклоном кривых выносливости значения z_r, z_m отличаются от таковых при $N_0 = 5 \cdot 10^5$, примерно на 10%);

б) кривые выносливости, удовлетворяющие определенной $I(N)$, переходят к горизонтальному участку при разных N_0 согласно схеме рис. 1,а. Для определения координат точек перегибов кривых выносливости, соответствующих разным $I(N)$, найдем уравнение дополнительной прямой

$$\lg z_i = \bar{m} \lg N_i - \lg \Delta z, \quad \text{где} \quad \lg \Delta z = \bar{m} \lg N_0 - \lg \bar{z}. \quad (5)$$

Решая совместно (4a) и (5), получим:

$$\lg N_{0m} = \frac{C_n + \lg \Delta z}{\bar{m} + \frac{1}{m_0}}, \quad \lg z_{rn} = \frac{C_n - \frac{\lg \Delta z}{\bar{m}}}{m_0 - \frac{1}{m}}. \quad (6)$$

В связи с разным расположением составляемых кривых выносливости наметим зоны долговечностей, в пределах которых вид

зависимости $\beta_2 = f[N; l(N)]$ остается неизменным (см. рис. 1, б, на котором параметры кривой для отоженных образцов снабжены штрихами).

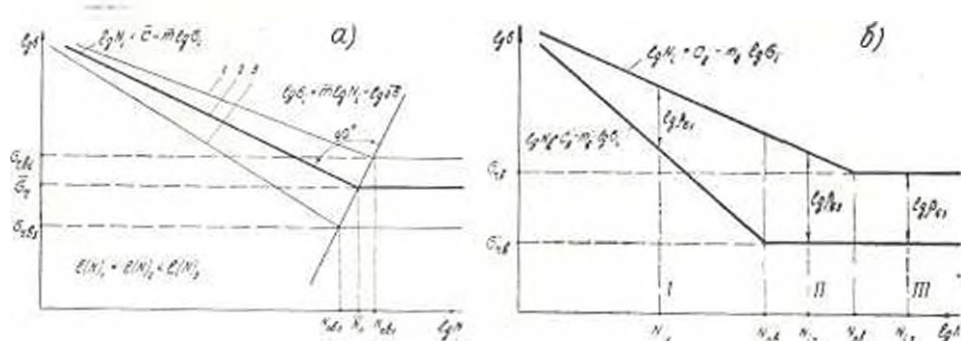


Рис. 1. а) к определению области рассеяния $\beta_{\text{н}}$ б) к определению зависимостей (7)–(10).

I зона — $N_1 < N_{0n}$. При $N_{11} = \text{const}$ $\lg \beta_{11} = \lg \beta_1 = \lg \beta'_1$.

$$\text{где } \lg \beta_1 = \frac{C_n - m_n \lg N_{11}}{m_n}; \quad \lg \beta'_1 = \frac{C_n - m'_n \lg N_{11}}{m'_n}.$$

Для данного интервала

$$\lg \beta_1 = \left| \frac{C_n}{m_n} - \frac{C'_n}{m'_n} \right| + \left| \frac{1}{m_n} - \frac{1}{m'_n} \right| \lg N_1 \quad (7)$$

$$\text{или } \lg \beta_1 = S_1 + M_1 \lg N_1 \quad (7a)$$

II зона — $N_{0n} < N_1$. При $N_{12} = \text{const}$ $\lg \beta_{12} = \text{const} = \frac{C_n}{m_n} - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n}$.

$$\text{поэтому } \lg \beta_2 = \left| \left(\frac{C_n}{m_n} - \frac{C'_n}{m'_n} \right) + \frac{1}{m_n} \lg N_{0n} \right| - \frac{1}{m'_n} \lg N_{12} \quad (8)$$

$$\text{Если } N_{0n} > N_{0n}, \text{ то } \lg \beta_2 = \left| \left(\frac{C_n}{m_n} - \frac{C'_n}{m'_n} \right) - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n} \right| + \frac{1}{m'_n} \lg N_{12} \quad (9)$$

$$\text{Для II зоны } \lg \beta_2 = S_2 + M_2 \lg N_1 \quad (9a)$$

III зона — $N_1 > N_{0n}$. При $N_{13} = \text{const}$ $\lg \beta'_{13} = \text{const}$, $\lg \beta_{13} = \text{const} =$

$$= \frac{C_n}{m_n} - \frac{1}{m_n} \lg N_{0n}.$$

тогда

$$\lg \beta_3 = \left| \frac{C_n}{m_n} - \frac{C'_n}{m'_n} \right| + \left| \frac{\lg N_{0n}}{m_n} - \frac{\lg N_{0n}}{m'_n} \right| \quad (10)$$

или

$$\lg \beta_3 = S_3 + M_3 - \text{const} \quad (10a)$$

На рис. 2 представлены зависимости (7)–(10) при разных видах термической обработки. При низких и умеренных твердостях в связи с незначительным упрочнением во всем интервале долговечностей $\beta_2 \approx \text{const}$, а для нормализации — $\beta_2 \approx 1$. С переходом к неравновесным структурным состояниям значения, дисперсия и интенсивность изменения коэффициента β_2 возрастают. Заметное влияние на величину β_2 оказывают также размеры и конструктивные формы образцов. Вид функции $\beta_2 = f(N)$ при этом определяется соотношениями параметров и абсцисс точек перегибов кривых выносливости отожженных

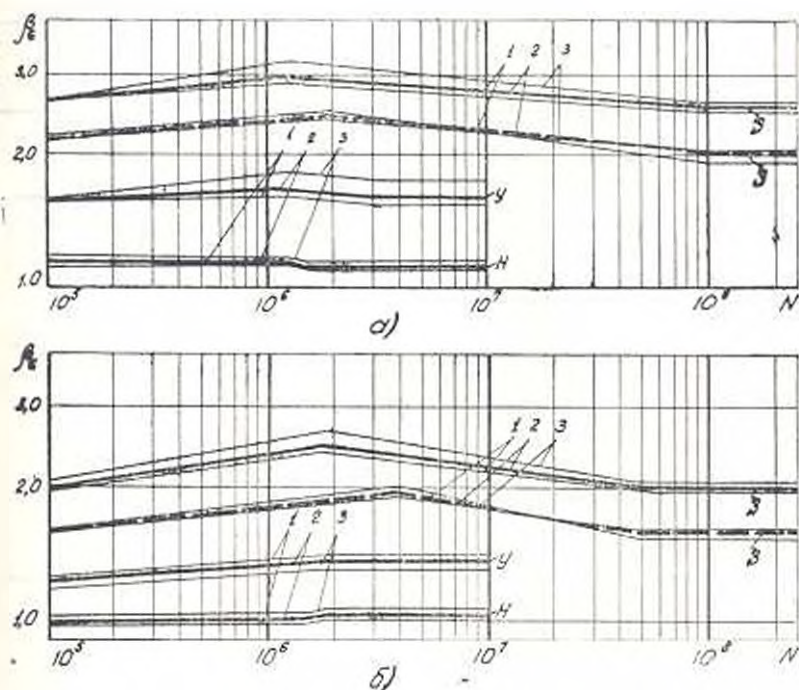


Рис. 2. Изменение коэффициента β_2 в зависимости от N и $H(N)$:

а) стационарное нагружение—образцы из стали 45, * 10Гл и из стали 40X, ○ 25Гл;

б) программное нагружение—образцы из стали 45, ○ 25К и из стали 40X, ○ 25К.

Пунктирные линии относятся к образцам из стали 40X. Линии 1, 2, 3 соответствуют $K(N)$ 10, 50 и 99,9 %.

и термообработанных образцов. В табл. 1 представлены возможные варианты кривых $\beta_2 = f(N)$ в зависимости от указанных величин, а в табл. 2 — их относительные изменения. В табл. 1 и 2 приняты обозначения:

$$\delta N_0 = \frac{\lg N_{0a}}{\lg N_{0b}}, \quad \delta m_n = \frac{m_a}{m_b}, \quad \beta_a = \frac{C_a}{m_a}; \quad \frac{C_b}{m_b}, \quad \text{откуда получим,}$$

$$\text{что } \beta_a = \frac{\beta_b C_a}{\beta_b m_a}, \quad \text{где } \beta_b = \frac{C_b}{m_b}.$$

Значения δN_n предопределяют размеры зон изменения коэффициента β . В широком интервале $l(N)$ с увеличением твердости образцов значения δN_n возрастают, и вид функции $\beta = f(N)$ сохраняется во всех трех зонах. Программное нагружение не оказывает существенного влияния на δN_n и только при наличии надрезов и для крупных образцов рост δN_n несколько замедляется. При умеренной твердости возможны некоторые отклонения от этой закономерности, а при нормализации зачастую $\delta N_n \leq 1$.

Таблица 1

№	δN_s	δm_s	$\delta \sigma$	Вид зависимости $\beta = f(N)$
1	$\delta N_s > 1$	$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma > 1$	
2		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
3	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	
4		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma < 1$	
5		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
6	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	
7		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma < 1$	
8		$\delta m_s > 1$	$\delta \sigma < 1$	
9	$\delta N_s < 1$	$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma > 1$	
10		$\delta m_s < 1$	$\delta \sigma < 1$	

Протяженность зоны I зависит от N_{cn} и она для всех образцов меняется в незначительной степени, тогда как размеры зоны II обусловлены видом термообработки—они значительны при закалке, минимальны при нормализации, а при $\delta N_n \approx 1$ зона II отсутствует. Начало зоны III зависит от вида термообработки и конструктивных форм образцов. При отсутствии физического предела выносливости ее отчет берется от принятого базового числа циклов. В пределах зоны I формируются значения β , а в конце этой зоны в большинстве $\beta \approx \beta_{\max}$. Зона II оказывает существенное влияние на β только при

высоких твердостях, а зона III характеризует окончательный эффект упрочнения в области длительной выносливости.

Таблица 2

№ по пер.	Конструкция образцов	Режимы нагружения	Отношение параметров	H(N) 10 %				H(N) 50 %				H(N) 99,9 %			
				Сталь 45			40X	Сталь 45			40X	Сталь 45			40X
				II	У	З	З	II	У	З	З	II	У	З	З
1	Ø 10 Гз	стационарный	δN_b	1,014	1,070	1,312		1,014	1,070	1,312		1,014	1,071	1,313	
2			δm_b	0,854	1,445	2,058	—	0,927	1,559	2,136	—	1,282	2,121	2,516	—
3			δ_b	1,045	1,033	1,094		1,032	1,018	1,078		0,965	0,947	1,000	
4		программный	δN_b	1,008	1,088	1,311		1,008	1,088	1,312		1,008	1,089	1,313	
5			δm_b	0,876	1,522	2,201	—	0,972	1,726	2,453	—	1,327	2,478	3,381	—
6			δ_b	1,040	1,030	1,085		1,026	1,011	1,065		0,970	0,944	0,994	
7	Ø 25 Гз	стационарный	δN_b	0,983	1,013	1,261	1,276	0,983	1,013	1,261	1,276	0,983	1,011	1,262	1,277
8			δm_b	1,105	1,600	2,190	2,085	1,099	1,573	2,108	1,989	1,086	1,510	1,921	1,769
9			δ_b	0,992	0,989	1,040	1,036	0,991	0,987	1,037	1,035	0,989	0,985	1,033	1,036
10		программный	δN_b	1,025	1,040	1,285	1,236	1,025	1,040	1,286	1,230	1,025	1,040	1,286	1,236
11			δm_b	1,343	1,766	2,438	2,178	1,342	1,739	2,386	2,120	1,311	1,680	2,271	1,991
12			δ_b	0,966	0,978	1,021	1,032	0,964	0,976	1,018	1,029	0,961	0,973	1,011	1,024
13	Ø 10 К	стационарный	δN_b	0,982	0,962	1,177		0,981	0,962	1,178		0,980	0,963	1,179	
14			δm_b	0,953	1,428	2,047	—	0,910	1,400	1,962	—	0,767	1,309	1,678	—
15			δ_b	1,020	0,939	0,967		1,036	0,937	0,964		1,110	0,935	0,965	
16		программный	δN_b	0,990	0,985	1,180		0,993	0,988	1,184		1,001	0,999	1,198	
17			δm_b	0,961	1,445	2,095	—	0,947	1,452	2,057	—	0,897	1,444	1,920	—
18			δ_b	0,985	0,912	0,936		1,023	0,938	0,960		1,178	1,033	1,059	
19	Ø 25 К	стационарный	δN_b	1,006	1,004	1,221	1,183	1,005	1,004	1,221	1,184	1,005	1,004	1,222	1,185
20			δm_b	0,995	1,341	2,130	1,793	0,973	1,325	2,055	1,742	0,900	1,277	1,829	1,580
21			δ_b	1,005	0,983	0,987	0,972	1,009	0,982	0,986	0,971	1,023	0,978	0,987	0,971
22		программный	δN_b	0,989	0,997	1,226	1,100	0,989	0,997	1,226	1,170	0,989	0,998	1,228	1,171
23			δm_b	1,066	1,368	2,220	1,752	1,067	1,358	2,197	1,716	1,071	1,327	2,125	1,601
24			δ_b	0,985	0,975	0,983	0,977	0,984	0,971	0,977	0,974	0,978	0,955	0,960	0,967

В связи с особенностями изменения δN_s возможны три группы вариантов зависимости $\beta_s = f(N)$ (табл. 1).

Если отношение δN_s формирует вид кривой $\beta_s = f(N)$ в целом, то от изменения δm_s , δC_s и $\delta \sigma_s$ зависят значения параметров S и M или изменение β_s внутри каждой зоны. Значения параметра M_1 , обуславливающего интенсивность изменения β_s , с увеличением твердости HRC растут и они максимальны при закалке (рис. 3, а). Знак M_1 , следовательно и наклон кривой $\beta_s = f(N)$, зависит от δm_s : $M_1 > 0$, когда $\delta m_s > 1$ и $M_1 < 0$ при $\delta m_s < 1$. Заметное влияние на величину M_1 оказывают концентрация напряжений и размеры образцов. Представим его в виде $M_1 = \frac{\delta m_s - 1}{m_s}$; согласно табл. 2 $\delta m_{sc} \gg \delta m_{mc}$, а неравенство $m_{sc} > m_{mc}$ наблюдается во всех случаях, поэтому с увеличением диаметров и усилением концентрации напряжений значения M_1 растут. Можно выделить следующие усредненные интервальные значения M_1 при $l(N) = 50\%$: для нормализации $\bar{M}_1 = -0,013 \div -0,016$,

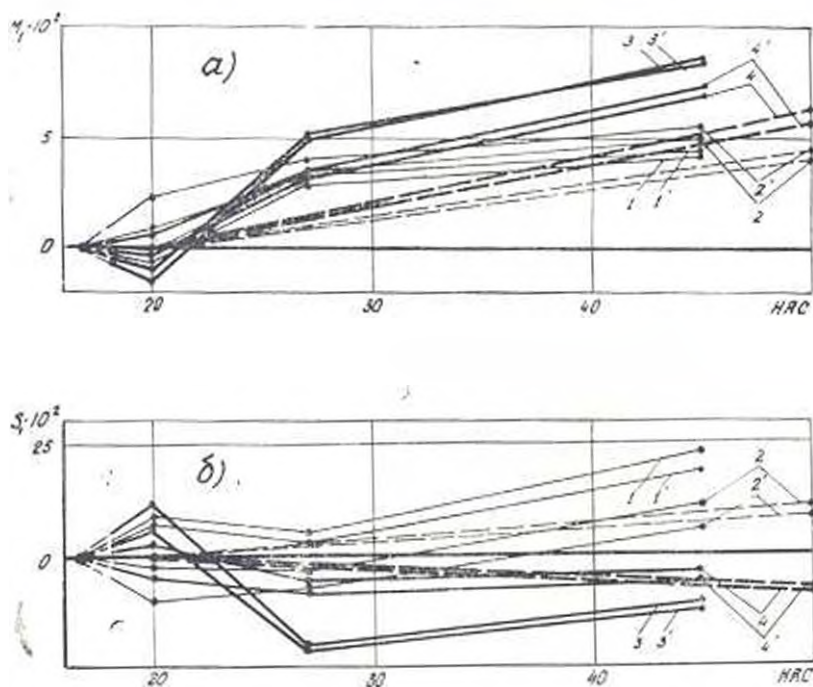


Рис. 3. Изменение параметров M_1 и S_1 в зависимости от HRC при $l(N) = 50\%$: а) $M_1 = f_1(HRC)$, б) $S_1 = f_2(HRC)$.

1 — 10 Гц; 2 — 25 Гц; 3 — 10 К; 1' — 25 К.

(Пунктирные линии относятся к образцам из стали 40Х, а цифры со штрихом — программному нагружению.)

для улучшения $\bar{M}_1 = 0,029 \div 0,051$ и для закалки $\bar{M}_1 = 0,043 \div 0,085$. Влияние режима на величину M_1 существенно при высоких твердостях и уровне $l(N)$. Под действием программного нагружения обыч-

но происходит значительный рост с. к. о. показателей наклона S_m для гладких образцов и $S_{m\tau} > S_{mk}$. Это приводит к сокращению разрыва между m_{τ} и $m_{\text{ок}}$ при $I(N) = 99,9\%$, тогда как $\dot{m}_{\tau}$ и $\dot{m}_{\text{ок}}$ при этом почти не меняются. В связи с этим значения M_1 растут, и это заметно при действии программного нагружения.

Аналогично M_1 значения параметра S_1 , обуславливающего начальный уровень изменения β_1 , с увеличением HRC и тенденции растут (рис. 3, б). Как видно из выражений (4а), (4б) и (7), S_1 зависит от большого количества характеристик выносливости и, в конечном счете, от C_n и M_n . Особенности изменения этих характеристик таковы, что в большинстве $\dot{C}_n > 1$ и $\dot{m}_n > 1$, и с увеличением HRC эти значения растут. Для гладких образцов наблюдается условие $\dot{C}_{\text{нн}} > \dot{m}_{\text{нн}}$, следовательно $\dot{b}_1 > 1$ и $S_1 > 0$. С увеличением диаметров и при наличии надрезов $\dot{C}_{\text{нн}} < \dot{m}_{\text{нн}}$, т. е. $\dot{b}_1 < 1$ и $S_1 < 0$. Усредненные интервальные значения S_1 : при нормализации $\bar{S}_1 = -0,036 \pm 0,443$, при улучшении $\bar{S}_1 = -0,207 \pm 0,043$ и при закалке $\bar{S}_1 = -0,120 \pm 0,207$. Следует отметить, что высокой интенсивности изменения β_1 всегда соответствует его низкий начальный уровень и наоборот. При $I(N) = 99,9\%$ влияние режима нагружения усиливается, под действием которого значения S_1 падают.

В пределах II зоны кривая $\beta_1 = f(N)$ является ниспадающей, так как в большинстве $N_{\text{нн}} > N'_{\text{нн}}$. Для нормализованных и улучшенных образцов, благодаря меньшим размерам зоны II ($\dot{C}_n \approx 1$) и низкому наклону кривой, значения β_1 не претерпевают существенного изменения и в этом случае $\beta_1 \approx \beta_{\text{нн}}$. Для закаленных образцов, характеристики выносливости которых значительно выше таковых при отжиге ($\dot{C}_n$, $\dot{m}_n$, $\dot{C}_n > 1$), в зоне II изменение β_1 существенно, и, в связи с ее большой протяженностью, значения β_1 при длительной выносливости сжимаются до своих первоначальных величин при $N = 10^9$. Поэтому в табл. 3 представлены лишь значения параметра S_2 , M_2 при закалке.

Из рассмотрения данных табл. 3 видно, что за исключением знака M_2 , закономерности изменения параметров S_2 , M_2 в связи с размерами и формой образца, а также действием программного нагружения при разных уровнях $I(N)$ аналогичны S_1 и M_1 .

Учитывая действие рассмотренных факторов на эффект упрочнения в целом, можно сделать вывод, что разнообразие значений S , M и, следовательно, видов функции $\beta_1 = f(N)$ свойственно режиму нормализации. Чаще всего для гладких нормализованных образцов встречаются 4 и 10-й варианты функции (табл. 1), а для надрезанных образцов — 6 и 7-й. Для гладких улучшенных образцов свойственен 2-й вариант функции, а для надрезанных — 5-й. Для закаленных образцов вид функции единственный — 1-й.

Предложенная методика позволяет дифференцированно определить степень упрочнения деталей в зависимости от их термообработки, конст-

Таблица 3

№ по пор.	Режимы	Конструктивные обозначения	Материал	$I(N) = 10\%$		$I(N) = 50\%$		$I(N) = 99,9\%$	
				S_1	M_1	S_1	M_1	S_1	M_1
1	Стандартный	10ГЛ	Сталь 45	0,6574	-0,0321	0,6986	-0,0363	0,8388	-0,0534
2		25ГЛ	Сталь 45	0,6654	-0,0395	0,7007	-0,0442	0,8220	-0,0620
3		25ГЛ	Сталь 40Х	0,6368	-0,0407	0,6752	-0,0458	0,8094	-0,0662
4		10К	Сталь 45	0,9174	-0,0787	1,0266	-0,0892	1,3178	-0,1316
5		25К	Сталь 45	0,7664	-0,0599	0,8110	-0,0658	0,9534	-0,0836
6		25К	Сталь 40Х	0,7913	-0,0752	0,8514	-0,0832	1,0530	-0,1119
7	Повышенный	10ГЛ	Сталь 45	0,6114	-0,0275	0,6381	-0,0301	0,7820	-0,0388
8		25ГЛ	Сталь 45	0,6145	-0,0364	0,6447	-0,0399	0,7427	-0,0520
9		25ГЛ	Сталь 40Х	0,5935	-0,0355	0,6222	-0,0390	0,7163	-0,0517
10		10К	Сталь 45	0,7507	-0,0706	0,9314	-0,0793	1,5802	-0,1134
11		25К	Сталь 45	0,7307	-0,0561	0,7713	-0,0610	0,9025	-0,0772
12		25К	Сталь 40Х	0,7448	-0,0706	0,7965	-0,0777	0,9692	-0,1024

руктивных и эксплуатационных факторов. Благодаря более строгому учету этих факторов, в расчетах представляется полнее использовать прочностные резервы деталей машин и добиться снижения их массы для заданной вероятности безотказной работы.

Կ. Վ. ՕԼԵՅՆԻԿ, Վ. Վ. ԲԵԶԵՐ, Մ. Կ. ՈՍԿԵՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՄԵԾԱԿԱՆ ՊՈԳՊԱՏՆԵՐԻ ԱՄՐԱՅՄԱՆ ԷՖԵԿՏԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա. Մ. Ս. Ս. Ս. Ս.

Յույց է տրվում, որ ջերմամշակված պողպատների ամրացման β_2 գործակիցը փոփոխությունն սկսած ժամանակ է և կախված է ցիկլերի N թվից ու բաղադրված է $I(N)$ համաձայնականությանից: Կախված կլման և ջերմամշակված փորձանմուշների դիֆուզիոնության կորերի փոխադարձ դառափորությունից, նշված են β_1 գործակիցի փոփոխման ղոնանները և ստացված են $\beta_2 = f[N; I(N)]$ կախումները ալգ ղոնաններից յարաբանչորի համար:

Դիտված է $\beta_2 = f[N; I(N)]$ կորի պարամետրների վրա ջերմամշակման տեսակի, բեռնվածության սկսած, փորձանմուշների կոնստրուկտիվ ձևերի ու չափերի ազդեցությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Потеряев Д. М., Олейник Н. В. «Вестник машиностроения», № 10, 1961.
2. Славин М. Г., Гусаров С. А., Мак С. Л. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVI, № 4, 1973.
3. Олейник Н. В., Бездер В. В. Выносливость термически обработанных сталей Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 9, Киев, 1969.
4. Олейник Н. В., Бездер В. В. Сопротивление термически обработанных сталей перегрузкам. Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 9.

ГИДРАВЛИКА

С. М. КАЗАРЯН

К ВОПРОСУ ПРИТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ВОДОЗАБОРНЫМ
СКВАЖИНАМ, ЗАЛОЖЕННЫМ В ДВУХСЛОЙНЫХ
ВОДОНОСНЫХ ТОЛЩАХ

Нестационарный процесс движения подземных вод в двухслойной гидравлически связанной среде (рис. 1) с учетом упругости жидкости и пласта для осесимметричной задачи можно выразить следующей системой дифференциальных уравнений:

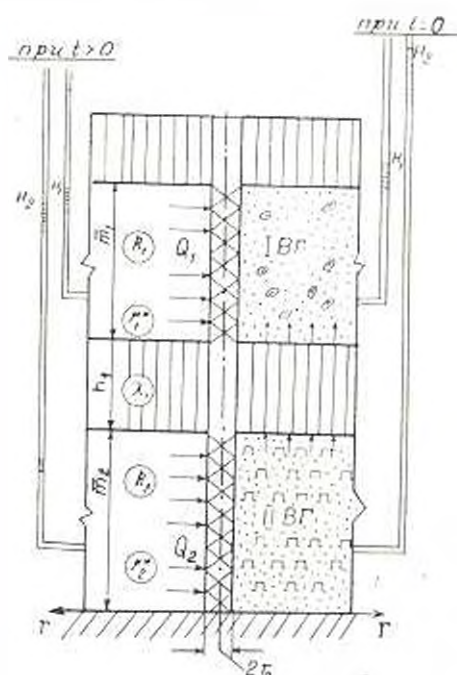


Рис. 1

$$\begin{aligned} a_1^2 \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} \right) - b_1^2 (S_1 - S_2) &= \frac{\partial S_1}{\partial t}; \\ a_2^2 \left(\frac{\partial^2 S_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_2}{\partial r} \right) - b_2^2 (S_2 - S_1) &= \frac{\partial S_2}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_i^2 — коэффициент пьезопроводности ($i=1, 2$) первого и второго водоносных пластов; b_i^2 — коэффициент перетекания; S_i — понижение

уровня подземных вод в любых точках пласта, соответствующих I и II водоносным горизонтам, в любой момент времени.

$$\begin{aligned} a_1^2 &= \frac{(\overline{mk})_1}{\mu_1^2}; & b_1^2 &= \frac{\overline{\lambda}_1}{h_1 \mu_1^2}; \\ a_2^2 &= \frac{(\overline{mk})_2}{\mu_2^2}; & b_2^2 &= \frac{\overline{\lambda}_2}{h_2 \mu_2^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_1(r, t) = H_{10} - H(r, t); \quad S_2(r, t) = H_{20} - H_2(r, t).$$

Здесь $\overline{m}_1$ и $\overline{m}_2$ — мощности соответственно I и II водоносных слоев;

k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации этих же слоев;

μ_1^2 и μ_2^2 — коэффициенты упругой водоотдачи этих же слоев;

$\overline{\lambda}_1$ — коэффициент фильтрации плохонепроницаемого слоя;

h_1 — мощность того же слоя;

r — радиус-вектор;

H_{10} и H_{20} — пьезометрические напоры, соответствующие I и II водоносным горизонтам в естественных условиях;

$H_1(r, t)$ и $H_2(r, t)$ — пьезометрические напоры в любых точках слоев в любой момент времени (в течение отбора воды).

Для решения уравнений (1) можно установить следующие краевые условия:

начальные условия:

$$\begin{aligned} S_1(r, t)|_{t=0} &= 0; \\ S_2(r, t)|_{t=0} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

граничные условия:

$$\begin{aligned} S_1(r, t)|_{r \rightarrow \infty} &= 0; \quad S_2(r, t)|_{r \rightarrow \infty} = 0; \\ S_1(r_0, t) + H_{20} - H_{10} &= S_2(r_0, t); \\ Q_1 &= -2\pi(\overline{km})_1 \frac{\partial S_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \text{const}; \\ Q_2 &= -2\pi(\overline{km})_2 \frac{\partial S_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \text{const}. \end{aligned} \quad (4)$$

Применяя для уравнений (1) преобразование Лапласа относительно переменной t и учитывая начальные условия, получим:

$$\begin{aligned} a_1^2 \left(\overline{S}_1 + \frac{1}{r} \overline{S}_1 \right) - (b_1^2 + p) \overline{S}_1 + b_1^2 \overline{S}_2 &= 0; \\ a_2^2 \left(\overline{S}_2 + \frac{1}{r} \overline{S}_2 \right) - (b_2^2 + p) \overline{S}_2 + b_2^2 \overline{S}_1 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Система однородных уравнений (5) по своему виду напоминает функцию Бесселя минимого аргумента, решение которой будем искать в виде [5, 6]:

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= A_1 K_0(\omega r) + B_1 I_0(\omega r); \\ \bar{S}_2 &= A_2 K_0(\omega r) + B_2 I_0(\omega r),\end{aligned}\quad (6)$$

где $I_0(\omega r)$ и $K_0(\omega r)$ — цилиндрические функции мнимого аргумента, соответственно первого и второго рода нулевого порядка.

Используя условия (4) и свойства функций I_0 и K_0 , получим:

$$\bar{S}_1 = A_1 K_0(\omega r); \quad \bar{S}_2 = A_2 K_0(\omega r). \quad (7)$$

Подставляя значения $\bar{S}_1$ и $\bar{S}_2$ в (5) и используя рекуррентные формулы Бесселя [5, 6], имеем:

$$\begin{aligned}[\alpha_1^2 \omega^2 - (b_1^2 + p)] A_1 + b_1^2 A_2 &= 0; \\ b_2^2 A_1 + [\alpha_2^2 \omega^2 - (b_2^2 + p)] A_2 &= 0.\end{aligned}\quad (8)$$

Откуда для нетривиального решения получим:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{\alpha^0 p - h \pm \sqrt{\alpha_1^0 p^2 + 2ph_1 + h^2}}{2\alpha_1^2}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}\alpha^0 &= 1 + A^0; \quad \alpha_1^0 = (1 - A^0)^2; \quad h = b_1^2(A^0 + B^0); \\ h_1 &= b_1^2[B^0 - A^0(B^0 + 1) + (A^0)^2]; \quad h_2 = h^2 = b_1^4(B^0 + A^0)^2; \\ A^0 &= \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2}; \quad B^0 = \frac{b_1^2}{b_2^2}.\end{aligned}\quad (10)$$

Подставляя ω_1^2 и ω_2^2 в (8), находим значения A_1 и A_2 с точностью до постоянного множителя:

$$\begin{aligned}A_{11} &= C_1; \quad A_{12} = C_2; \\ A_{21} &= C_1 i_1; \quad A_{22} = C_2 i_2.\end{aligned}\quad (11)$$

Здесь

$$\begin{aligned}i_1 &= \frac{b_1^2(A^0 - B^0) - p(A^0 - 1) - \sqrt{\alpha_1^0 p^2 + 2ph_1 + h^2}}{2A^0 b_1^2}; \\ i_2 &= \frac{b_1^2(A^0 - B^0) + p(A^0 - 1) + \sqrt{\alpha_1^0 p^2 + 2ph_1 + h^2}}{2A^0 b_1^2}.\end{aligned}\quad (12)$$

Учитывая вышесказанное, общее решение системы (5) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= C_1 K_0(\omega_1 r) + C_2 K_0(\omega_2 r); \\ \bar{S}_2 &= C_1 i_1 K_0(\omega_1 r) + C_2 i_2 K_0(\omega_2 r),\end{aligned}\quad (13)$$

где C_1 и C_2 — постоянные, определяемые из условия (4).

$$C_1 = \frac{\frac{Q_2}{k_2 m_2} - \frac{Q_1 \lambda_2}{k_2 m_1}}{2\pi r_0 \rho \omega_1 (\lambda_1 - \lambda_2) K_1(\omega_1 r_0)},$$

$$C_2 = \frac{\frac{\lambda_1 Q_1}{k_1 m_1} - \frac{Q_2}{k_2 m_2}}{2\pi r_0 \rho \omega_2 (\lambda_1 - \lambda_2) K_1(\omega_2 r_0)}. \quad (14)$$

В дальнейшем, принимая в (10) лишь $(1-A^0)h=h_1$, имеющее место при идентичных гидрогеологических параметрах, получим:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\rho + h}{a_2^2}}; \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{A^0 \rho}{a_2^2}}. \quad (15)$$

С учетом этого, подставляя все значения в систему (13) и переходя от отображающей функции к ее оригиналу, применяя теорему обращения для преобразования Лапласа, получим:

$$S_1 = \frac{(Q_1 A_2 - Q_2 A_1) \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda + \frac{Q_1 A_1 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \lambda \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda +$$

$$+ \frac{Q_2 A_1 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} [(1-A^0)\lambda + h] \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda + \frac{(Q_2 A_1 - Q_1 A_2) \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \times$$

$$\times \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda - \frac{Q_1 A_2 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \lambda \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda + \frac{Q_1 A_1 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \times$$

$$\times \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} [(1-A^0)\lambda + h] \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda;$$

$$S_2 = - \frac{(Q_1 B_1 + Q_2 B_2) \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda - \frac{Q_2 B_2 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \lambda \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda +$$

$$+ \frac{Q_1 B_1 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} [(1-A^0)\lambda + h] \Phi_1(\lambda) \gamma_1 d\lambda + \frac{(Q_1 B_1 + Q_2 B_2) \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda +$$

$$+ \frac{Q_2 B_2 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \lambda \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda - \frac{Q_1 B_2 \sqrt{a_2^2}}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} [(1-A^0)\lambda + h] \Phi_2(\lambda) \gamma_2 d\lambda. \quad (16)$$

В (16) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\Phi_1(z) &= \frac{e^{iz}}{i|(1-A^0)z+h|}; & \Phi_2(z) &= \frac{e^{iz}}{i|(1-A^0)z+h|\sqrt{A^0z}}; \\ \tau_1 &= \frac{K_0 \left(r \sqrt{\frac{i+h}{a_2^2}} \right)}{K_1 \left(r_0 \sqrt{\frac{i+h}{a_2^2}} \right)}; & \tau_2 &= \frac{K_0 \left(r \sqrt{\frac{A^0 i}{a_2^2}} \right)}{K_1 \left(r_0 \sqrt{\frac{A^0 i}{a_2^2}} \right)}; \\ A_1 &= \frac{A^0 b_1^2}{2\pi r_0 k_2 m_2}; & A_2 &= \frac{b_1^2 (A^0 - B^0)}{4\pi r_0 k_1 m_1}; & A_3 &= \frac{A^0 - 1}{4\pi r_0 k_1 m_1}; \\ A_4 &= \frac{1}{4\pi r_0 k_1 m_1}; & B_1 &= \frac{b_1^2 B^0}{2\pi r_0 k_1 m_1}; & B_2 &= \frac{b_1^2 (A^0 - B^0)}{4\pi r_0 k_2 m_2}; \\ B_3 &= \frac{A^0 - 1}{4\pi r_0 k_2 m_2}; & B_4 &= \frac{1}{4\pi r_0 k_2 m_2}.\end{aligned}\quad (17)$$

Линейные интегралы для $S_i(r, t)$, полученные с помощью теоремы обращения, обычно вычисляются посредством перехода к замкнутому контуру и применением теоремы вычетов [6]. При вычислении линейных интегралов (16) встречались следующие случаи:

1) $\bar{S}(z)$ есть однозначная функция от z со счетным множеством полюсов. В этом случае, используя лемму Жордана и теорему Коши, интеграл можно представить в следующем виде

$$j = 2\pi i \sum \text{Res}. \quad (18)$$

2) $\bar{S}(z)$ имеет точку разветвления в точках $z_1 = -h$ и $z_2 = 0$ и только конечное число полюсов. В этих случаях, используя контуры интегрирования по рисункам 2 и 3 и применяя к ним леммы Жордана и теорему Коши, интегралы (16) можно представить в виде:

$$j = \int_{\gamma} + \int_{\gamma'} + \sum \text{Res}. \quad (19)$$

Все подынтегральные функции системы уравнений (16) многозначные. Вычисление их производится по формуле (19).

Вычисляя эти интегралы и подставляя в систему уравнений (16), получим расчетные формулы для S_1 и S_2 :

$$\begin{aligned}S_1 &= N_1 Q_2 + G_1 Q_1; \\ S_2 &= N_2 Q_2 + G_2 Q_1,\end{aligned}\quad (20)$$

где

$$N_1 = A_{11} F_1(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - A_{12} F_3(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - A_{2k} \frac{\varphi(K_0)}{(\varphi K_1)}; \quad (21)$$

$$G_1 = -[A_{10} F_1(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) + A_{11} F_3(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) + A_{12} F_4(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r})] + A_{1k} \frac{\varphi(K_0)}{(\varphi K_1)}; \quad (22)$$

$$N_2 = B_{21}F_1(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - B_{22}F_2(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - B_{21}F_3(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) + \\ + B_{22}F_4(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - B_{2k} \frac{\varphi(K_0)}{\varphi(K_1)}; \quad (23)$$

$$i_2 = B_{23}F_1(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - B_{22}F_2(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) - B_{20}F_3(z^0, A^0, \bar{r}, \bar{r}) - \\ - B_{23}F_4(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) + B_{1k} \frac{\varphi(K_0)}{\varphi(K_1)}. \quad (24)$$

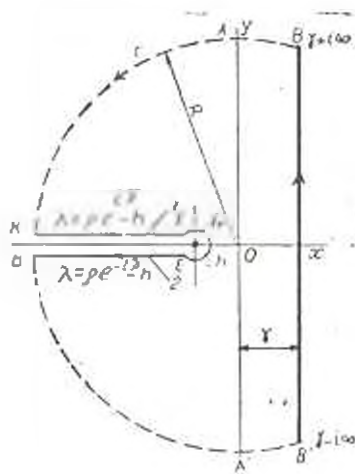


Рис. 2

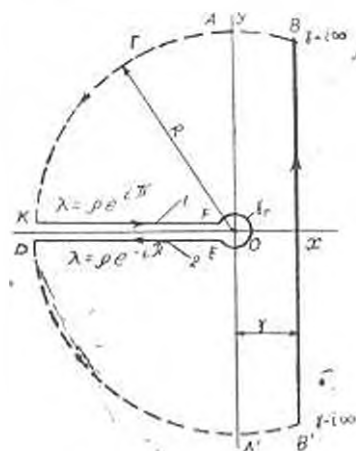


Рис. 3

Здесь

$$F_1(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-zu} M_1 du}{\sqrt{u-1} |(A^0-1)u^2+u|}; \quad (25)$$

$$F_2(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-zu} \sqrt{u-1} M_1 du}{(A^0-1)u^2+u}; \quad (26)$$

$$F_3(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-zu} M_2 du}{\sqrt{A^0 u} |(A^0-1)u^2+u|}; \quad (27)$$

$$F_4(z^0, A^0, \bar{r}_0, \bar{r}) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-zu} M_2 du}{\sqrt{A^0 u} |(A^0-1)u+1|}; \quad (28)$$

$$\varphi(K_0) = K_0(\bar{r}_1); \quad \varphi(K_1) = K_1(\bar{r}_{01}); \quad (29)$$

$$A_{10} = \frac{A^0}{\pi^2 r_0 k_1 m_1 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}; \quad A_{11} = \frac{A^0}{\pi^2 r_0 k_1 m_1 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}};$$

$$A_{12} = \frac{B^0}{\pi^2 r_0 k_1 m_1 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}; \quad A_{13} = \frac{A^0-1}{\pi^2 r_0 k_1 m_1} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}};$$

$$\begin{aligned}
A_{1k} &= \frac{A^0}{2\pi r_0 k_1 m_1 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_1^2}{h}}, & A_{2k} &= \frac{A^0}{2\pi r_0 k_2 m_2 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}, \\
B_{23} &= \frac{1}{\pi^2 r_0 (A^0 + B^0)} \left| \frac{B^0}{k_1 m_1} - \frac{A^0 (A^0 + B^0)}{2k_2 m_2} \right| \sqrt{\frac{a_1^2}{h}}, \\
B_{21} &= \frac{A^0}{2\pi^2 r_0 k_2 m_2 (A^0 + B^0)} \left| 2 - (A^0 + B^0) \right| \sqrt{\frac{a_1^2}{h}}, & B_{22} &= \frac{A^0 - 1}{2\pi^2 r_0 k_2 m_2} \sqrt{\frac{a_1^2}{h}}, \\
B_{23} &= \frac{1}{\pi^2 r_0 (A^0 + B^0)} \left| \frac{B^0}{k_1 m_1} + \frac{A^0 + B^0}{2k_2 m_2} \right| \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}, & \tau^0 &= ht, \\
B_{21} &= \frac{A^0 - B^0}{2\pi^2 r_0 k_2 m_2 (A^0 + B^0)} \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}, & R_{2k} &= \frac{1}{2\pi r_0 (A^0 + B^0)} \left| \frac{A^0 - B^0}{2k_2 m_2} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{B^0}{k_1 m_1} \right| \sqrt{\frac{a_2^2}{h}}, \\
M_1 &= \frac{J_0(\bar{r}_1 \sqrt{u-1}) Y_1(\bar{r}_{01} \sqrt{u-1}) - Y_0(\bar{r}_1 \sqrt{u-1}) J_1(\bar{r}_{01} \sqrt{u-1})}{J_1^2(\bar{r}_{01} \sqrt{u-1}) + Y_1^2(\bar{r}_{01} \sqrt{u-1})}, \\
M_2 &= \frac{J_0(\bar{r}_2 \sqrt{u}) Y_1(\bar{r}_{02} \sqrt{u}) - Y_0(\bar{r}_2 \sqrt{u}) J_1(\bar{r}_{02} \sqrt{u})}{J_1^2(\bar{r}_{02} \sqrt{u}) + Y_1^2(\bar{r}_{02} \sqrt{u})}, \\
r_1 &= \left| \sqrt{\frac{h}{a_1^2}} \cdot r \right|; & \bar{r}_{01} &= \left| \sqrt{\frac{h}{a_2^2}} \cdot r_0 \right|; & \bar{r}_2 &= \left| \sqrt{\frac{A^0 h}{a_2^2}} \cdot r \right|, \\
& & \bar{r}_{02} &= \left| \sqrt{\frac{A^0 h}{a_2^2}} \cdot r_0 \right|.
\end{aligned} \tag{30}$$

В (30) J_0 , J_1 , Y_0 и Y_1 — функции Бесселя истинного аргумента, соответственно первого и второго рода, нулевого и первого порядка.

Интегральные функции $F_i(\tau^0, A^0, r_0, \bar{r})$ ($i = 1, 2, 3, 4$) могут быть табулированы для различных значений безразмерных комплексов, которые выражаются через гидрогеологические параметры пластов.

Расчетными формулами (29) можно определять понижения уровня подземных вод в любых точках первого и второго водоносных слоев в любой момент времени при заданных гидрогеологических параметрах пластов и суммарном дебите из скважины.

Задача решается в следующем порядке:

1) по заданному суммарному дебиту Q_0 необходимо определять расхола Q_1 и Q_2 , которые втекают в скважины соответственно из первого и второго водоносных слоев. Имеем:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2. \tag{31}$$

С другой стороны, из граничного условия можно установить, что

$$S_2(r_0, t) = S_1(r_0, t) + H_{2e} - H_{1e}. \tag{32}$$

Имея значения N_1 , N_2 , G_1 и G_2 при $r = r_0$, из (20) и (31) получим:

$$\begin{aligned} S_1(r_0, t) &= Q_2[N_1(r_0, t) - G_1(r_0, t)] + Q_0 G_1(r_0, t); \\ S_1(r_0, t) + H_{2c} - H_{1c} &= Q_2[N_2(r_0, t) - G_2(r_0, t)] + Q_0 G_2(r_0, t). \end{aligned} \quad (33)$$

Решая систему (33) относительно Q_2 получим:

$$Q_2 = \frac{H_{2c} - H_{1c} + Q_0[G_1(r_0, t) - G_2(r_0, t)]}{[N_2(r_0, t) - G_2(r_0, t)] - [N_1(r_0, t) - G_1(r_0, t)]}. \quad (34)$$

Затем определяется значение Q_1 по формуле (31) при данных Q_0 и Q_2 .

2) имея значения Q_1 и Q_2 по формуле (20) определяются $S_1(r, t)$ и $S_2(r, t)$ при постоянной откачке.

АрмСХН

Поступило 16.IV.1975.

Ա. Մ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ՆԵՐՇԵՐՏ ԶՐԱՏԱՆԻ ՀՈՂԱՇԵՐՏՈՒՄ ՏԵԳԱՎՈՐՈՎԱՆ ԶՐԸՈՐԻ ՄԵՋ ՍՏՈՐԵՐԻՐՅԱ ԶՐԵՐԻ ՆԵՐՇՈՒՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՐԻՋԸ

Ա մ փ ո փ ո ս լ լ

Հոդվածում արվում է հիդրավիկական կադրի մեջ պահվող երկու ջրատար հոդաշերտերում ձնշումների հաշվարկման մեթոդ՝ ջրհորից գումարային հաստատուն էլքի ջրամանի գեղարում, որը համապատասխանում է այդ հոդաշերտերից ներհոսող Q_1 և Q_2 էլքերին:

Ընդունված է, որ ստորերկրյա ջրերի ներհոսումը ջրհորի մեջ կարելի է դիտել որպես առանցքով համաչափ խնդիր՝ անասճանախյան ձգտող եղրային պայմաններով:

Խնդիրը լուծված է (1) հալուսարումների սիստեմի սղնությամբ սկզբնական և եզրային (3), (4) պայմանների դեպքում, շղնկով ոչ մի աանճանափակում հիդրոերկրաբանական պարամետրների վրա: Ցպերացիոն հաշվի մեթոդով (1) հալուսարումների սիստեմի լուծումից ստացվել է (20) հաշվարկային բանաձևը, որի մեջ մտնող $F_1(z^0, A^0, r_0, r)$ ֆունկցիաները պետք է աղյուսակավորվեն խնդրի լուծումը տարբեր հիդրոերկրաբանական պայմանների համար հեշտացնելու նպատակով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Подушвинский-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., ГИИ, 1952.
2. Мясин А. Н. Действие колодца и напорном бассейне полемных вод. Изв. Туркменского филиала АН СССР, № 3—4, 1946.
3. Боченев Ф. М. К методике гидрогеологических расчетов водооборных срежужений слоистых водоносных толщ. Болгарская АН, серия гидрология и гидрогеология, кн. V, 1966.
4. Казарян С. М. К вопросу неустановившегося притока подземных вод в многослойной фонтанной среде. Доклады АН АрмССР (серия техн. науки), т. XX, № 4, 1967.
5. Вейсш Г. Н. Теория Бисселевых функций. М., ИИ, 1919.
6. Андре Анго. Математика для электро- и радиотехников (перевод с французского). М., 1964.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. С. ВАРՈՒԵՅԱՆ

К ИССЛЕДОВАНИЮ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ УСТАНОВОК, ПИТАЮЩИХСЯ
ОТ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

В настоящее время электроподвижные установки (ЭПУ), питающиеся от химических аккумуляторных батарей (АБ), такие как электро-мобили, аккумуляторные электровозы и электрогрузчики, находят достаточно широкое применение.

Проектирование электрооборудования для таких установок должно выполняться комплексно с целью обеспечения требуемых статических и динамических характеристик ЭПУ при определенных ограничениях.

Наличие АБ ограниченной емкости, мощность которой сопоставима с мощностью нагрузки, придает системе ряд особенностей, обусловленных тем, что источник энергии и остальное электрооборудование данной установки (тяговый электродвигатель, системы управления и электронередации и т. д.) находятся в сильной взаимопределяющей связи. Поэтому выбор электрооборудования ЭПУ должен производиться с учетом взаимного влияния ее отдельных элементов.

В этой связи в данной работе рассматриваются следующие вопросы:
1 Влияние аккумуляторной батареи на механические и скоростные характеристики тяговых электродвигателей (ТД) постоянного тока с последовательным и параллельным возбуждением;
2 Влияние способа возбуждения ТД и системы регулирования скорости

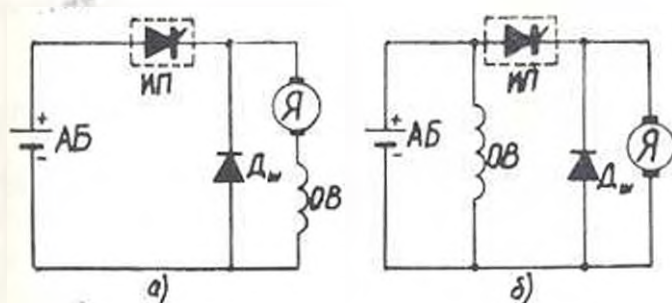


Рис. 1. Принципиальная схема питания ТД: а—при серийном возбуждении; б—при шунтовом возбуждении. ИП—импульсный преобразователь; Дв—шунтирующий диод.

на работу аккумуляторной батареи, в смысле лучшего использования последней.

Принципиальные схемы питания ТД приведены на рис. 1, где в качестве регулятора напряжения использованы импульсные преобразователи, условно обозначенные эквивалентными регулируемым ключами. Исследование выполнено на примере электрооборудования электромотоцикла, разработанного и изготовленного в проблемной лаборатории Ереванского политехнического института.

Основные данные электрооборудования электромотоцикла:

АБ — состоит из 18 последовательно соединенных аккумуляторов типа 6СТ—68;

ТД — две машины постоянного тока серии П-42 напряжением 220 В с суммарной номинальной мощностью 16 кВт и скоростью вращения 3000 об./мин. Тяговые двигатели питаются от АБ через индивидуальные тиристорно-импульсные преобразователи, работающие синхронно. При этом интересующие нас величины определяются в относительных единицах, что дает возможность основные результаты исследований распространить и на электрооборудование других ЭИХ.

При исследовании характеристик ТД приняты следующие допущения:

а) не учитывается влияние коммутационных процессов импульсных преобразователей (ПП);

б) принимается, что период импульсного цикла работы ПП намного меньше электромагнитной постоянной цепи нагрузки [1], т. е. не учитывается пульсация тока нагрузки.

Скорость характеристики ТД [1]

$$\omega = \frac{U_{cp} - I_{cp}R}{k_1\Phi}, \quad (1)$$

где ω — скорость вращения ТД; U_{cp} , I_{cp} — средние за период импульсного цикла значения соответственно напряжения и тока ТД; R , k_1 , Φ — соответственно омическое сопротивление силовой цепи, конструктивная постоянная и магнитный поток ТД.

Среднее значение напряжения U_{cp} определяется из [1] как

$$U_{cp} = \gamma U_a, \quad (2)$$

где γ — скважность работы импульсных преобразователей;

U_a — амплитуда напряжения аккумуляторной батареи при проходящем состоянии ПП.

Для описания разрядных характеристик АБ используется уравнение из [2] в следующем виде:

$$U_a = U_0 - NI - c_0 I - k \frac{1}{1 - q}, \quad (3)$$

где U_0 — постоянный потенциал; N — коэффициент, учитывающий внутреннее сопротивление аккумулятора; c_0 — коэффициент, учиты-

вающим падением потенциала в процессе разряда из-за уменьшения плотности электролита: k — коэффициент, учитывающий поляризацию; $q = it/Q_0$ — отданная аккумулятором емкость в относительных величинах; i и t — соответственно ток и время разряда; Q_0 — максимальная разрядная емкость, обусловленная активными массами аккумулятора.

Коэффициенты уравнения (3) определяются по экспериментально снятым разрядным кривым по методике, подробно описанной в [2].

Амплитуда тока батареи при проводящем состоянии двух ИП будет

$$I_a = 2I_{cp}.$$

С учетом последнего и уравнений (2), (3) выражение (1) будет иметь следующий вид.

$$\alpha = \frac{\gamma \left[n \left(U_0 - NI_a - c_0 q - k \frac{1}{1-q} I_a \right) \right] - I_{cp} R}{k_1 \Phi}, \quad (4)$$

где n — количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарее.

Влияние аккумуляторной батареи на характеристики ТД в данный момент времени определяется величиной емкости, отданной батареей до этого времени, что в уравнении (4) учитывается величиной q , которая и определяет зарядовое состояние АБ.

При серийном возбуждении ТД, в определенном зарядовом состоянии аккумулятора (q), при заданной скважности γ импульсных преобразователей варьируется I_a , по которому определяются магнитный поток Φ по кривой намагничивания двигателя и напряжение батареи при токе I_a .

При шунтовом возбуждении ТД его ток возбуждения (см. рис. 1, б) не остается постоянным в связи с изменением напряжения АБ при токе I_a и отдаче емкости q . В этом случае величина Φ определяется из кривой намагничивания по значению тока возбуждения

$$i_w = \frac{U_{a-cp}}{R_s},$$

где R_s — сопротивление шунтовой обмотки возбуждения;

U_{a-cp} — среднее значение напряжения АБ за период импульсного цикла работы ИП.

Обычно в рабочих режимах $I_a \ll I_{cp}$, поэтому влиянием I_a на напряжение АБ можно пренебречь. При этом из принятого допущения (б) следует, что пульсацией тока шунтовой обмотки возбуждения можно полностью пренебречь, поскольку электромагнитная постоянная времени шунтовой обмотки намного больше якорной.

Напряжение батареи при токе I_a равняется U_a , а при непроводящем состоянии ИП $I_a = 0$ и напряжение АБ из (3) равняется

$(U_0 - c_0 q)$. Следовательно, среднее значение напряжения батареи определяется как

$$U_{a, \text{ср}} = U_a \gamma + (U_0 - c_0 q)(1 - \gamma) = \gamma \left(U_0 - N I_a - c_0 q - k \frac{1}{1 - q} I_a \right) + (U_0 - c_0 q)(1 - \gamma) = U_0 - c_0 q - \gamma I_a \left(N + \frac{k}{1 - q} \right). \quad (5)$$

Момент тяговых двигателей определяется как $M = k_1 \Phi I_{\text{ср}}$.

На основе вышесказанного, с учетом (4) и (5), на рисунках 2, 3 и 4 приведены расчетные скоростные $v(i_{\text{ср}})$ и механические $\gamma(\omega)$ характеристики импульсно-регулируемого двигателя П-42 с разными типами возбуждения при различных зарядовых состояниях батареи. В качестве базисных величин были приняты номинальные данные двигателя. Характеристики рассчитаны в диапазоне допустимой перегрузки двигателя по току $i_{\text{ср}} \leq i_{\text{ном}} = 2,5$. При этом каждому значению γ соответствуют четыре характеристики для зарядового состояния батареи $q = 0; 0,25; 0,5; 0,75$ (при увеличении q характеристики перемещаются вниз по оси γ).

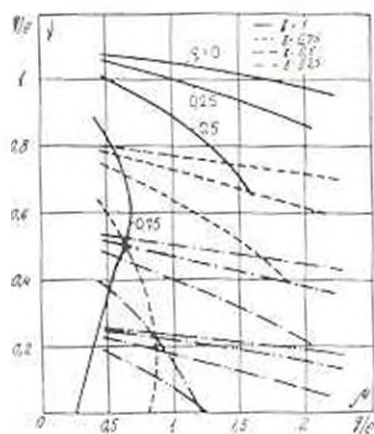


Рис. 2. Механические характеристики ТД при шунтовом возбуждении.

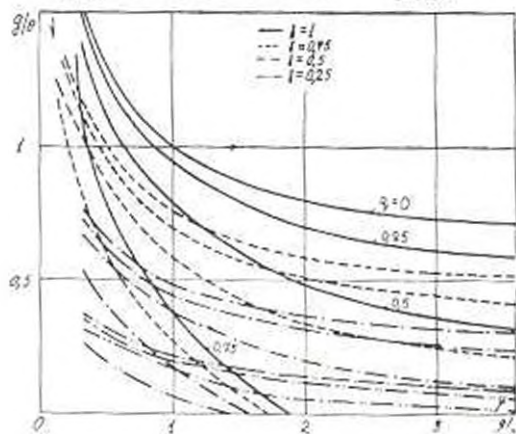


Рис. 3. Механические характеристики ТД при серийном возбуждении.

Характеристики ТД при шунтовом возбуждении получаются нелинейными за счет изменения потока (Φ) машины при изменении напряжения АБ. Кроме того, при определенных зарядовых состояниях АБ момент тягового двигателя при шунтовом возбуждении опрокидывается. Это объясняется тем, что при снижении скорости на величину момента сильнее влияет уменьшение потока возбуждения ТД, чем увеличение тока якоря. Опрокидывание момента ТД при шунтовом возбуждении крайне нежелательно, поскольку при этом сильно ухудшаются динамические характеристики ЭПУ.

Анализ зависимости среднего значения тока АБ $i_{a, \text{ср}}$ от момента τ ТД при шунтовом и серийном возбуждении, которую можно построить с учетом характеристик, приведенных на рисунках 2, 3 и 4, показывает, что при пуске и преодолении перегрузок, т. е. в области $\eta > 1$, при том же значении момента потребляемый от батареи ток $i_{a, \text{ср}}$ при серийном возбуждении всегда меньше, чем при шунтовом. При этом среднее значение тока АБ следует определить как

$$i_{a, \text{ср}} = \tau(2i_{\text{ср}}). \quad (6)$$

Кроме того, из рис. 4 с учетом (6) следует, что при импульсно-регулируемом пуске ТД с шунтовым возбуждением и поддержанием постоянства тока двигателя ($i_{\text{ср}}$) с увеличением скорости ТД его момент уменьшается в зависимости от зарядового состояния АБ. Например, при пуске ТД током $i_{\text{ср}} = 2$ до скорости $\eta = 0,6$ в случае $q = 0,5$ момент уменьшается от 2,25 до 1,7. Это объясняется тем, что при условии $i_{\text{ср}} = \text{const}$ пуск осуществляется плавным увеличением скважности γ , что приводит к увеличению тока и снижению напряжения батареи, из-за чего по мере разгона ТД уменьшается ток в шунтовой обмотке возбуждения. Уменьшение момента из-за шунтового возбуждения ТД, в свою очередь, ухудшает динамику ЭПУ.

Анализ зависимости максимальной мощности, определяемой из рис. 2, 3 как $P = \omega M$, и максимального момента ТД от зарядового состояния батареи показывает, что максимальный момент и мощность ТД при серийном возбуждении больше, чем при шунтовом для всех практических значений q .

Из вышесказанного следует, что при серийном возбуждении ТД по сравнению с шунтовым не только улучшается приемистость ЭПУ, но и, согласно [3], улучшается использование АБ при уменьшении $i_{a, \text{ср}}$.

При серийном возбуждении влияние системы регулирования ТД на степень использования АБ при одинаковых условиях движения ЭПУ можно оценить сравнением импульсного и реостатного способов регулирования, которые применяются в электроприводах постоянного тока ЭПУ.

С этой целью определим разрядную емкость Q_0 батареи для одного тягового двигателя при его импульсном пуске с постоянным значением тока $i_{\text{ср}}$ до выхода на данную характеристику (при этом изменением зарядового состояния АБ пренебрегаем и рассматриваем пуск ЭПУ с постоянным ускорением). Допустим, что при зарядовом состоянии батареи $q = 0,25$ тяговый двигатель запускается током $i_{\text{ср}} = 2$ до $\eta = 1$ (участок ab на характеристике abc рис. 4), после чего запуск продолжается по характеристике bc до точки c , соответствующей статической нагрузке двигателя $i_{\text{ср}} = 0,8$ (по данным [4] ток каждого двигателя при равномерном движении электромотоцикла составляет примерно 80% от номинального). На участке bc импульсный преобразователь полностью открыт ($\gamma = 1$) и согласно

(6) $i_{a,cr} = 2i_{cr}$. На участке ab , где $\gamma < 1$, согласно выражениям (4) и (6) при условии $i_{cr} = \text{const}$ зависимость $i_{a,cr}(\gamma)$ представлена прямой bd . Для построения прямой bd ее вторая точка f находится следующим образом: из точки e пересечения прямой ab с промежуточной характеристикой $\gamma < 1$ (на рис. 4 выбрана характеристика при $\gamma = 0,5$) при данном $q = 0,25$ проводится горизонталь, на которой от начала оси откладывается отрезок gf , равный току $i_{a,cr} = 2i_{cr} = 1$. Соединив точки b и f прямой, получаем зависимость $i_{a,cr}(\gamma)$. В этом случае величина разрядной емкости Q_R батареи будет пропорциональна площади, ограниченной линией dbc и осью γ .

При формировании той же пусковой характеристики abc изменением сопротивления реостата в цепи двигателя ток батареи везде будет равняться $i_{a,cr} = 2i_{cr}$, т. е. при реостатном управлении величина разрядной емкости батареи Q_R будет пропорциональна площади, ограниченной самой пусковой характеристикой abc и осью γ . Отношение разрядных емкостей при импульсном и реостатном пуске, рассчитываемых графическим интегрированием соответствующих кривых dbc и abc по переменной γ , в рассматриваемом случае равняется $\alpha = Q_R'(Q_R = 0,6)$.

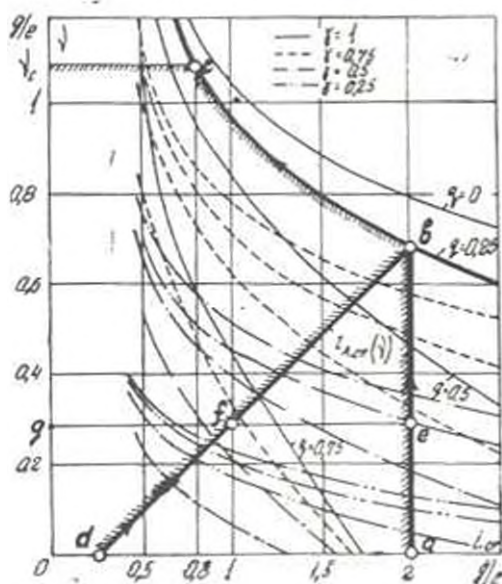


Рис. 4. Скоростные характеристики ДД при реостатном возбуждении

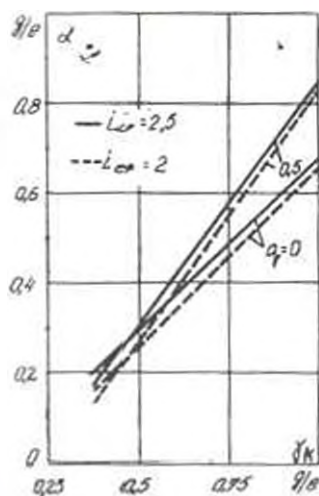


Рис. 5. Сравнение разрядной емкости аккумуляторной батареи при импульсном и реостатном пусках ДД. γ_0 — конечное значение скважности, до которого регулируется среднее напряжение на ДД поддержанием постоянного тока $i_{cr} = \text{const}$

Из рис. 4 следует, что при заданной статической нагрузке величина α зависит от положения формируемой пусковой характеристики на плоскости (i_{cr} ; γ). Последнее определяется требуемыми условиями пуска ЭПУ. Для двух зарядовых состояний батарей указанным графическим способом можно построить зависимость α от условий пуска ЭПУ с той же статической нагрузкой $i_{cr} = 0,8$ (рис. 5). Величиной γ_k определяется положение конечной характеристики $\gamma(i_{cr})$ при пуске ТД.

Если учесть, что при движении ЭПУ в городских условиях значение γ_k в среднем составляет $0,5 \div 0,7$, то из рис. 5 следует, что по сравнению с реостатным при импульсном пуске ТД разрядная емкость, отбираемая от АБ, уменьшается примерно на 60%. Это улучшает использование АБ и увеличивает запас ее емкости при дальнейшем движении ЭПУ после пуска.

На основе вышесказанного можно сделать следующие основные выводы:

1. Способ шунтового возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока, питающихся от аккумуляторных батарей, с точки зрения обеспечения требуемых динамических характеристик электроподвижной установки существенно уступает способу серийного возбуждения.

2. Серийное возбуждение электродвигателей, по сравнению с шунтовым, приводит к улучшению использования аккумуляторной батареи при пусках и допустимых перегрузках двигателей.

3. При питании тяговых электродвигателей от аккумуляторной батареи применение импульсного управления приводит к ощутимому улучшению использования и экономии расхода емкости аккумуляторной батареи при пуске и движении электроподвижной установки в режимах $\gamma < 1$.

Результаты выполненного исследования могут быть использованы при проектировании электроподвижных установок, питающихся от аккумуляторной батареи.

ЕрПН им. К. Маркса

Получено 24.IV.1975

Վ. Ս. ՎԱՐՊԵՏՅԱՆ

ԱՎՈՒՄՈՒԼՅԱՏՈՒԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑՆԵՐԻՑ ՈՆՎՈՂ ԷԼԵԿՏՐԱՇԱՐԺԱԿԱՆ ՏԵՂԱԿԱՅՈՒՄՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. Վ Վ Ա Ր Վ Ս Յ Ա Ն

Ցույց է տրված, որ ակումուլյատորային մարտկոցներից սնվող էլեկտրաշարժական տեղակայումների էլեկտրասարքավորումների հաշվման և ընտրման ժամանակ անհրաժեշտ է հաշվի առնել աճետոնում սնման աղբյուրի և մնացած էլեկտրասարքավորումների փոխորոշիչ ազդեցությունները, ինչ

որում, կախված մարտկոցի լիցքային վիճակից, էլեկտրաշարժիչի բարձրացնելու փափագը կարող են խիստ փոփոխվել: Այսպես, ցված է, որ էլեկտրաշարժիչի հաջորդաբար զրգուման էզանակը գույաճնոի համեմատ ապահովում է տեղակայման ալիլի բարձր գննամիկական ցուցիչները և բերում է մարտկոցի ալիլի էֆեկտիվ օգտագործմանը: Ատացված է, որ քարշային շարժիչների իմպուլսային կոտալարումը համեմատած ռոստատայինի հետ բերում է ալիլալիլալալային մարտկոցի գուլի լավ օգտագործմանը և նրա ունակության ծախսի խնայմանը՝ միևնույն օգտակար ալիլալալալ կոտալարի լավ գեպրում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гипзено Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприборах постоянного тока. Изд. «Энергия», 1973.
2. Shepherd C. M, Irl. Electrochem. Soc. vol. 112 (1965), p. 657.
3. Ласкин М. А. Химические источники тока. Изд. «Энергия», 1969.
4. Расчет и выбор отдельных элементов силовой системы электромобилей. Научно-технический отчет № 421 ОИИР ЕрПИЛ. Ереван, 1971.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Л. О. ОГАНЯН, К. А. ХОРЬКОВ, Г. А. СИПАПЛОВ

К РАСЧЕТУ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ
ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОДНОФАЗНОГО
УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В ударных генераторах ширина меди в лобовой части обмотки статора, толщина изоляции между медью и экранами (составляющая 20 мк при напряжении на зажимах генератора 15—20 кВ) и толщина экранов соизмеримы. В опубликованных работах по решению задач экранирования, как правило, не учитываются реальные геометрические размеры экранов (они заменяются либо бесконечным полупространством, либо считаются тонкостенными, либо проводимость экранов принимается равной бесконечности), а также реальные стержни с током заменяются токовыми нитями. По этой причине для расчета полей и параметров экранированных лобовых частей обмотки статора требуется значительная корректировка полученных по этим методикам результатов.

В большинстве работ, посвященных демпфированию потоков в лобовой зоне, рассматривается эффективность применения экранов в целях уменьшения потерь в конструктивных элементах: нажимной плите, крайних пакетах активной стали статора, в ярме статора и т. д. Влияние экранов на величину индуктивности лобовых частей за исключением ряда экспериментальных работ рассмотрено недостаточно полно. Анализ экранирующего и демпфирующего действий экранов в первом приближении дан в работах [1, 2].

Электромагнитное поле в лобовой зоне обмотки статора создается сложной системой токов лобовых частей. Существенное влияние на распределение поля оказывают токопроводящие и ферромагнитные материалы, окружающие лобовую зону. Точный учет всех одновременно влияющих факторов на распределение поля представляет собой сложную задачу. Поэтому при ее решении приняты некоторые допущения. Лобовое пространство представляется развернутым в тангенциальном направлении в виде прямоугольного бесконечного параллелепипеда; это допущение позволяет рассматривать двумерное плоскостное магнитное поле, методы исследования которого достаточно просты. При расчете полей рассеяния в зоне лобовых частей обмотки статора считаем ток, протекающий по стержням, сторонним по отношению к иссле-

дусмому полю. Указанное допущение упрощает расчет поля, так как определение векторного потенциала магнитного поля производится по предварительно заданному распределению тока в пространстве.

Электромагнитное поле в торной зоне электрической машины, возбуждаемое токами лобовых частей обмотки статора, описывается известными уравнениями Максвелла [3].

Расчетная схема задачи представлена на рис. 1. В зависимости от среды, в которой исследуется поле, и принятых упрощений система уравнений Максвелла может быть сведена к одному из следующих упрощений.

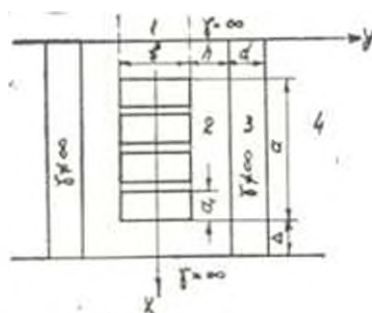


Рис. 1. Расчетная схема области лобовых соединений.

В области 1, охватывающей стержни лобовых частей, при пренебрежении влиянием вихревых токов на распределение стороннего тока по сечению стержней, поле описывается уравнением Пуассона

$$\nabla^2 \bar{A} = -j\bar{J}_{\text{ст}} \quad (1)$$

В областях 2 и 4, лишенных токопроводящих материалов, поле описывается уравнением Лапласа

$$\nabla^2 \bar{A} = 0. \quad (2)$$

В области 3, в которой отсутствуют сторонние токи, поле описывается уравнением Гельмгольца

$$\nabla^2 \bar{A} = -\gamma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3)

$\bar{A}$ — векторный потенциал магнитного поля;

μ — абсолютная магнитная проницаемость среды;

γ — удельная проводимость материала среды;

$\bar{J}_{\text{ст}}$ — вектор плотности стороннего тока.

С целью упрощения решения задачи принимаем, что две противолежащие стороны экрана являются сверхпроводящими, а две другие

имеют конечное значение γ , затем — наоборот. При допущении сверхпроводящих экранов, параллельных оси y , сторонний ток раскладываем в ряд Фурье с полупериодом T по оси x . В декартовой системе координат

$$\dot{z}_{c1} = \dot{z}_0 \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \cos k \Delta \sin kx, \quad (4)$$

где $\dot{z}_0$ — расчетная плотность тока в стержне;

n — порядок пространственной гармоники плотности тока;

k — пространственная частота плотности тока;

$$k = \frac{(2n-1)\pi}{T}; \quad (5)$$

Δ — толщина изоляции стержней от экранов;

T — полупериод разложения, равный расстоянию между противоположными экранами, имеющими $\gamma = \infty$.

Решение уравнений Пуассона и Лапласа ищется в виде ряда, имеющего вид, аналогичный выражению для плотности стороннего тока, т. е.

$$A_I(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_1 e^{ky} + C_2 e^{-ky} + \dot{z}_0 \frac{4}{\pi} \frac{\cos k \Delta}{k^2 (2n-1)} \right] \sin kx; \quad (6)$$

$$A_{II}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (F_1 e^{ky} + F_2 e^{-ky}) \sin kx. \quad (7)$$

Решение уравнения Гельмгольца имеет вид, аналогичный выражениям (6), (7):

$$A_{III}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (D_1 e^{iy} + D_2 e^{-iy}) \sin kx, \quad (8)$$

где $i = \sqrt{k^2 + p^2}$ — пространственная частота поля в теле экрана;

$$p^2 = j\omega\gamma\mu.$$

И, наконец, для четвертой области — за экраном, решение уравнения Лапласа при условии, что $A_{IV}(x, y) = 0$ при $y \rightarrow \infty$, принимает вид

$$A_{IV}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} F_3 e^{-ky} \sin kx. \quad (9)$$

Определение постоянных интегрирования производим из условия равенства нормальных составляющих индукций

$$\dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y}; \quad \dot{B}_y = - \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x} \quad (10)$$

и тангенциальных составляющих напряженностей на границах раздела сред

$$H_{x,y} = \frac{1}{\mu} B_{x,y}. \quad (11)$$

Индуктивность рассматриваемой системы определяем через энергию магнитного поля, исходя из равенств:

$$L = \frac{2 W_{\text{н}}}{I^2}; \quad W_{\text{н}} = \frac{1}{2\mu} \int B^2 dV. \quad (12)$$

В соответствии с расчетной схемой задачи получаем на единицу длины лобовой части

$$L = \frac{2}{\mu I^2} \sum_{n=1}^N \int_0^a \int_0^b B_n^2 dx dy, \quad (13)$$

где $B_n = \sqrt{B_{nx}^2 + B_{ny}^2}$ — индукция в области интегрирования.

Опуская промежуточные преобразования, запишем выражение для расчета индуктивности рассеяния лобовой части:

$$\begin{aligned} L = \sum_{n=1}^N \frac{1}{(2n-1)} &= \frac{8\epsilon_0}{\pi(ab)^2} k^{-4} \left\{ M_1 \left(M_1 \operatorname{ch} k \frac{b}{2} + 2 \right) \operatorname{sh} k \frac{b}{2} + k \frac{b}{2} \right\} + \\ &+ \left[\frac{1}{M} \right] \left(2m_1^2 \operatorname{sh} kh + \frac{1}{2} (1+m_1^4) \operatorname{ch} kh \right) \operatorname{sh} kh \operatorname{sh}^2 d + \\ &- 2m_1 (e^{2kh} - 1) (m_1 \operatorname{ch} d + 2(1+m_1^2) \operatorname{sh} d) \operatorname{ch} d \Big\} + \\ &+ \frac{1}{m_1} \left[\frac{1}{2} (1-m_1^4) (2d - \operatorname{sh} 2d) - m_1^2 (2d + \operatorname{sh} 2d) - \right. \\ &\left. - m_1 (1-m_1^2)(1-\operatorname{ch} 2d) \right] + \frac{m_1^2}{M} \left[\frac{1}{M} \operatorname{sh}^2 k \frac{b}{2} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } M = m_1 e^{kH} \operatorname{ch} d + \left(\operatorname{sh} k \frac{H}{2} + m_1^2 \operatorname{ch} k \frac{H}{2} \right) \operatorname{sh} d;$$

$$M_1 = \frac{e^{-kH}}{M} (1-m_1^4) \operatorname{sh} k \frac{b}{2} \operatorname{sh} d - e^{-k\frac{b}{2}};$$

$$m_1 = \sqrt{1 - \frac{\epsilon^2}{k^2}} = \sqrt{1 - \frac{2}{(kc)^2}};$$

a, b, H и d — размеры, определяющие геометрию экранируемой системы (см. рис. 1);

ϵ — эквивалентная глубина проникновения поля в экран.

Полученное выражение позволяет учесть влияние геометрических размеров экранируемой системы и частоты источника поля на индук-

тивность рассеяния лобовых частей, которая определяется путем вычисления модуля ее комплексной амплитуды, рассчитанной по (14), или подстановкой в подынтегральные выражения (13) значений модулей комплексных амплитуд индукции.

Анализ индуктивности рассеяния лобовых частей обмотки статора ударного генератора, заключенных в электромагнитные экраны, проведен с помощью ЭЦВМ «Мир». При расчете индуктивности рассеяния за исходные данные приняты:

a_1, b — поперечные размеры лобовых стержней;

q — число лобовых перемычек;

Δ, h — расстояния между поверхностями экранов и токовой зоной стержней;

d — толщина экранов.

С целью упрощения программы расчета и анализа полученных результатов все геометрические размеры экранируемой системы выражены в безразмерных единицах через коэффициент пространственной частоты плотности тока k , например,

$$kb = \frac{(2n-1)\pi}{T} b; \quad kh = \frac{(2n-1)\pi}{T} h \text{ и т. д.}$$

Зависимость $L = f(kh; \frac{d}{c})$, приведенная на рис. 2, позволяет проанализировать изменение индуктивности рассеяния лобовой части с увеличением расстояния между экраном и поверхностью токовой зоны стержней при различной толщине экранов (или различной частоте источника тока).

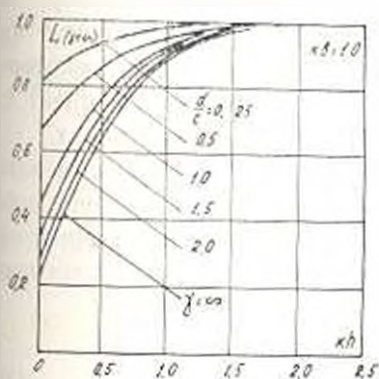


Рис. 2. Зависимость индуктивности рассеяния от kh и d/c при $kb = 1$.

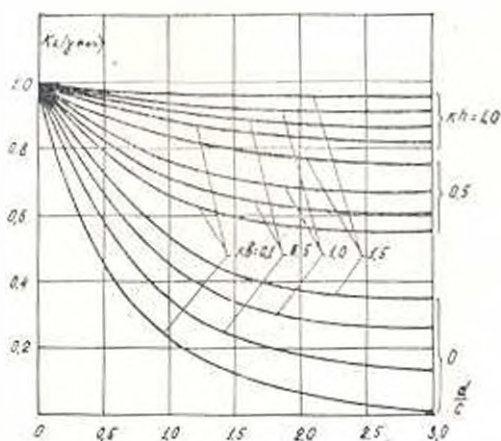


Рис. 3. Зависимость kL от d/c и геометрических параметров лобовых частей.

Анализ кривых показывает, что при толщине экранов $d > 2c$ значение индуктивности рассеяния приближается к его величине при экранах из сверхпроводящего материала. При $\frac{d}{c} < 1.5$ расхождение между результатами расчета достигает существенной величины. На величину индуктивности рассеяния значительное влияние оказывает расстояние h . За единицу принята величина индуктивности в случае, когда экраны с $\gamma = \infty$ прилегают непосредственно к токовой зоне лобовых частей. На рис. 2 представлены варианты расчета при $kb = 1$. В этом случае $kh = hb$. При удалении экранов от поверхности меди индуктивность рассеяния возрастает в несколько раз. Экраны, удаленные от меди на расстояние более $2b$, практически не влияют на индуктивность рассеяния лобовой части.

Для расчета индуктивности рассеяния лобовой части удобно ввести коэффициент k_L , равный отношению индуктивности рассеяния экранированных лобовых частей к индуктивности рассеяния лобовых частей при экранах, удаленных в бесконечность. Зависимости $k_L = f(kh; \frac{d}{c})$ представлены на рис. 3.

Совершенно аналогично рассчитываются индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей и коэффициент демпфирования при разложении тока в ряд по оси y и сверхпроводящих экранах, параллельных оси x .

Расчет проводится по формулам, аналогичным приведенным выше, с заменой геометрических параметров по осям, согласно рис. 1.

Результирующий коэффициент k , можно определить как

$$k = k_L \frac{k_{Lx}}{k_{Lx} - \infty}. \quad (15)$$

Дополнительный множитель равен отношению коэффициента демпфирования экранами, установленными параллельно оси y , выполненным из материала с $\gamma = \infty$, к этому же коэффициенту при сверхпроводящих экранах. Этот множитель учитывает некоторое уменьшение k_L при расчетах по методу Роговского. Коэффициент k_{Lx} учитывает реальные экраны, установленные параллельно оси x .

В [1, 2] дан метод и приведены зависимости, учитывающие влияние ферромагнитных поверхностей на индуктивность рассеяния лобовых частей. Индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей при их включении в электромагнитные экраны предложено рассчитывать как

$$x_{11} = \frac{k_1}{k_{1r}} x_1, \quad (16)$$

где x_1 — индуктивность рассеяния лобовых частей без учета экра-

нов: k_{fc} — коэффициент, учитывающий снижение влияния ферромагнитных поверхностей на x_L ; k_d — коэффициент демпфирования.

В [2] коэффициент демпфирования определен для идеального случая, когда экраны выполнены сверхпроводящими. Изложенный выше метод расчета k_d позволяет существенно повысить точность расчета демпфирующего действия k_{ann} , выполненных из реального материала ($\gamma \neq \infty$) с учетом их толщины и частоты источника поля.

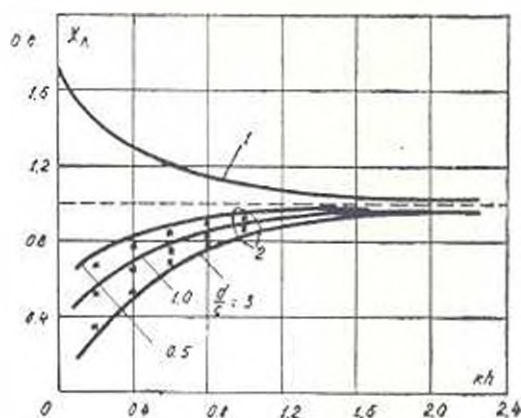


Рис. 4. Влияние на x_L окружения ферромагнитных (1) и токопроводящих (2) поверхностей. — расчетные данные.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости $x_L = f(kh)$ при различных значениях толщины экранов, там же представлена зависимость x_L неэкранированных лобовых частей от расстояния до ферромагнитной поверхности торца статора.

Проведенные эксперименты хорошо подтверждают теоретические исследования.

Технический институт

Поступила 26.11.1975

Լ. Շ. ՕՆԵՅԱՆ, Կ. Ա. ԽՈՐԿՈՎ, Գ. Ա. ՄԻՓԻՅԱՆՈՎ

ՄԻԱՅԱՋ ՀԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՀԱՆՈՏԱՅԻՆ ՄԱՍԻ ՑԻՄԱՆ
ԻՆՊՈԿՏԻՒՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. Վ. Փ Ո Փ Ո Վ

Հոդվածում քննարկված է էլեկտրամեխանիկայի բնագավառում տեսական և գործնական նշանակություն ունեցող մի հարցը՝ Դաշտի տեսության զգնությունը ստացվել էն որոշակի արտահայտություններ, որոնք հնարա-

վորութիւնն են ընձեռնում հաշվարկել միաֆազ հարվածային դիներատորի ստատորի փաթույթի էկրանավորված ճակատային մասերի սրման ինդուկտիվութիւնը: Ֆունկցիոնալ առումով որոշված է դիներատորի ճակատային մասերի ինդուկտիվ դիմադրութեան վրա էլեկտրամագնիսային էկրանների ներդրութեան առտինանն արտաճայող պորժակցի կախումը էկրանավորված սխաւմի երկրաչափութիւնից:

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивашов Г. А., Хорьков А. А. Индуктивность рассеяния ленточных частей однослойной концентраторной обмотки. «Электротехника», № 1, 1966.
2. Огонцов М. О., Сивашов Г. А., Хорьков В. Э. Анализ индуктивности сопротивлений рассеяния ленточных частей обмотки статора ударного генератора. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXV, № 2, 1972.
3. Купава С. Д. Теоретические основы электротехники, ч. III. Электромеханическое поле. Изд. «Энергия», М., 1970.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

ԼԵՆԳՈՔ ԴԱՆ

О ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПОТОКА НА
ПОВОРОТЕ ВОДОВОДА

Вопросами движения наносов в циркуляционном потоке занимались многие исследователи [1÷6]. В настоящей заметке рассматривается движение наносов малой гидравлической крупности, при которой применима диффузионная концепция взвешенного потока [6, 7].

В работе [8] нами сформулированы теоретические основы взвешенного потока на повороте водовода, там же изложена методика расчета и численным методом на ЭВМ решена одна задача.

В развитии работы [8] и настоящей заметке исследуется вопрос изменения транспортирующей способности потока на повороте водовода при различных значениях интенсивности поперечной циркуляции. Оценка этой характеристики определяется в сравнительных показателях, т. е. сравнивается количество наносов, которое может транспортировать поток на прямом участке и на повороте водовода при размываемом русла, при прочих равных условиях.

Вопросами транспортирующей способности потока на прямолинейных участках водовода мы не занимались. Главная наша задача — количественно характеризовать перераспределение мутности в потоке под воздействием поперечных скоростей. Для этой цели по изложенной в [8] методике аналитическим путем определены поперечные скорости потока на одном и том же повороте русла при трех значениях продольных скоростей (0,5; 2; 3 м/сек) до поворота водовода. Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 1.

По известным формулам [7], при заданных значениях поля продольных скоростей до поворота водовода, нами определено поле поперечных скоростей на повороте водовода. По известным значениям продольных и поперечных скоростей численным методом на ЭВМ рассчитано распределение мутности на прямолинейном и криволинейном участках водовода. Результаты этих расчетов приведены на рисунках 1 и 2.

На рис. 1 на горизонтальной оси отложены абсолютные значения мутности, а на вертикальной оси — относительные глубины. На эпюрах цифрами 1; 3; 5 обозначены распределения мутности в различных вертикалях поперечного сечения водовода до его поворота, цифрами же 2; 4; 6 — те же самые величины только на повороте водовода.

На рис. 2 приведены результаты этих же расчетов, только в относительных системах координат.

Таблица 1

Распределение поперечных скоростей u_y и u_z (в м/сек) на повороте водовода при исходных данных: $R=1$ м; $h=0,12$ м; $b=0,2$ м; $C=40$

$\frac{y}{b}$	$\frac{z}{h}$	при $u_0=0,5$ м/сек		при $u_0=2$ м/сек		при $u_0=3$ м/сек	
		u_y	u_z	u_y	u_z	u_y	u_z
-1,000	0	0	0	0	0	0	0
	0,25	0	0,009	0	0,140	0	0,315
	0,50	0	0,013	0	0,128	0	0,298
	0,75	0	0,009	0	0,145	0	0,327
	1,00	0	0	0	0	0	0
-0,666	0	-0,009	0	-0,138	0	-0,310	0
	0,25	0,006	0,002	0,096	0,004	-0,216	0,009
	0,50	0,001	0,001	0,152	0,005	0,340	0,011
	0,75	0,008	0,002	0,125	0,004	0,282	0,009
	1,00	0,009	0	0,142	0	0,318	0
-0,333	0	-0,012	0	-0,180	0	-0,405	0
	0,25	-0,007	-0,0003	-0,175	-0,004	-0,392	-0,009
	0,50	0,001	0,0004	0,020	0,006	0,045	0,013
	0,75	0,010	-0,0003	0,164	-0,004	0,370	0,009
	1,00	0,012	0	0,182	0	0,410	0
0	0	-0,012	0	-0,196	0	-0,442	0
	0,25	-0,008	0	-0,134	0	-0,302	0
	0,50	0,001	0	0,021	0	0,047	0
	0,75	0,011	0	0,170	0	0,384	0
	1,00	0,013	0	0,200	0	0,450	0
0,333	0	-0,140	0	-0,222	0	-0,500	0
	0,25	0,009	0,0003	-0,152	0,005	-0,340	0,011
	0,50	0,002	0,0004	0,024	0,007	0,054	0,016
	0,75	0,012	0,0003	0,198	0,005	0,446	0,011
	1,00	0,014	0	0,208	0	0,470	0
0,666	0	-0,044	0	-0,212	0	-0,478	0
	0,25	-0,009	-0,004	-0,006	-0,330	-0,330	0,010
	0,50	0,002	-0,005	0,024	-0,008	0,054	-0,018
	0,75	0,012	-0,004	0,192	-0,006	0,442	-0,013
	1,00	0,014	0	0,163	0	0,367	0
1,000	0	0	0	0	0	0	0
	0,25	0	-0,017	0	-0,282	0	-0,635
	0,50	0	-0,015	0	-0,250	0	-0,562
	0,75	0	-0,018	0	-0,289	0	-0,640
	1,00	0	0	0	0	0	0

Из данных графиков рисунков 1 и 2 видно: какое большое влияние оказывают поперечные скорости на перераспределение мутности на повороте водовода. По данным этих же рисунков составлена табл. 2, где приведены результирующие показатели о транспортирующей способности потока на прямом и криволинейном участках водовода для трех рассмотренных значений продольных скоростей. Из табл. 2 видно, что при увеличении средних значений продольных скоростей до поворота и

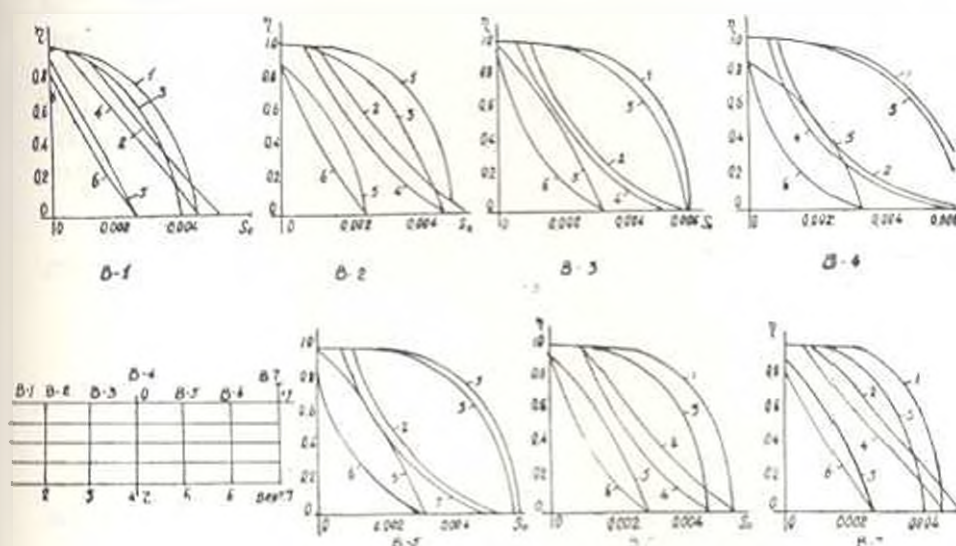


Рис. 1

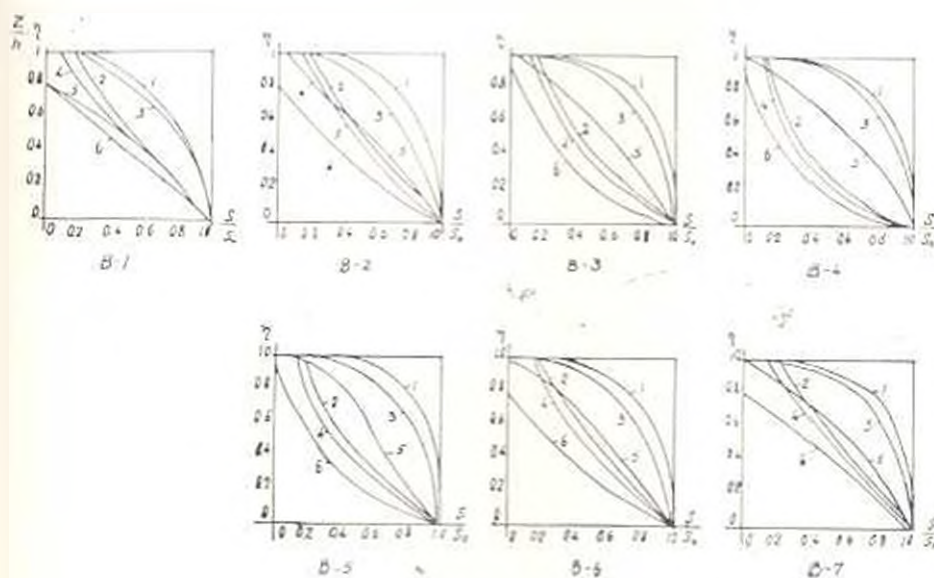


Рис. 2

Таблица 2

Продольные скорости u_0 , м/сек	Количество наносов, проходящих через живое сечение водотока за единицу времени		
	до поворота водотока $\lambda_{\text{до}}$, м ³	на повороте водотока $\lambda_{\text{по}}$, м ³	$\frac{\lambda_{\text{по}}}{\lambda_{\text{до}}}$
0.5	$0.124 \cdot 10^{-3}$	$0.166 \cdot 10^{-3}$	1.31
2.0	$0.250 \cdot 10^{-3}$	$0.395 \cdot 10^{-3}$	1.58
3.0	$0.260 \cdot 10^{-3}$	$0.440 \cdot 10^{-3}$	1.69

шесть раз транспортирующая способность потока увеличивается от 34 до 69% по сравнению с транспортирующей способностью потока на прямом участке водовода. Эти показатели, конечно, являются частными случаями и имеют, главным образом, иллюстративный характер. При этом мы поставили задачу показать: каким путем можно реализовать предложенный нами метод расчета поля мутности на повороте водовода.

ЕрПН им. К. Маркса

Поступило 1.VI.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. *Потапов М. В.* Сочинения, т. 2, ГИСЛ, М., 1951.
2. *Великинов М. А.* Динамика русловых потоков. Гидрометеориздат, Л., 1949.
3. *Маккиасев В. М.* Поперечные течения в призматическом русле и их возбуждение. ТГГН, вып. 2(56), Л., 1947.
4. *Розовский Н. Л.* Определение поперечных скоростей на повороте русла. АН УкрССР, институт ГИГ, Киев, 1960.
5. *Гончаров В. Н.* Основы динамики русловых потоков. Гидрометеориздат, Л., 1954.
6. *Баренблатт Г. И.* О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке. «Прикладная математика и механика», т. XVII, вып. 3, 1953.
7. *Ананян А. К.* Движение жидкости на повороте водовода. Изд. АН АрмССР, Ереван, 1957.
8. *Ге Нгол Тун.* О движении наносов на повороте водовода. «Известия АН АрмССР, (серия Т. III)», т. XXVIII, № 4, 1975.

К методике расчета установившегося режима электрической системы, содержащей продольные ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями Адоцк Г. Т., Арутюнян С. Г. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 2, 1976, 3—9.

Предлагается методика расчета установившегося режима электрической системы, продольные ветви которой могут иметь отрицательные реактивные сопротивления. Методика основана на разбиении системы на подсистемы с выделением продольных ветвей с отрицательными реактивными сопротивлениями. Подсистемы представляются эквивалентными многополюсниками с записью пассивных параметров в форме проводимостей Y и b .

Итерационное решение задачи производится методом Гаусса-Зейделя. По разработанному алгоритму составлена программа расчетов для ЭВМ семейства «Наирис», по которой выполнена серия расчетов для ряда конкретных энергосистем.

Табл. 2. Илл. 2. Библ. 6 назв.

УДК 621.314:517.3

Синусно-косинусный функциональный преобразователь Асигян Т. И., Амбарцумян Г. Г. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 2, 1976, 10—16.

Разработан синусно-косинусный функциональный преобразователь, основанный на принципе интегрирования кусков синусоиды. Посредством расширения пределов интегрирования достигнуто исключение зон нечувствительности, имеющих место при некоторых значениях аргумента. Приведены результаты экспериментального исследования такого устройства.

Илл. 2. Табл. 1. Библ. 4 назв.

УДК 621.311.153

Прогнозирование графика нагрузки энергосистемы методом весовых коэффициентов Мкртчян М. С. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 2, 1976, 17—25.

Для оперативного управления энергосистемой необходимо прогнозировать суточный график нагрузки предстоящего дня, который является нестационарным процессом по времени. Прогнозирование такого процесса связано с большими трудностями.

В статье показано, что суточные графики нагрузок нескольких дней в течении одного часа сохраняют достаточную стационарность. Это дает возможность, принимая метод весовых коэффициентов и используя данные предыдущих дней, прогнозировать суточный график нагрузки предстоящего дня. Составлена программа на языке «Фортран-4», реализованная на цифровой вычислительной машине «Урал-14Д».

Илл. 2. Табл. 9. Библ. 4 назв.

УДК 621.78:669.14

Исследование эффекта упрочнения термообработанных сталей Олейник Н. В., Бозер В. В., Стахан М. Г. «Известия АН АрмССР (серия Т. II)», т. XXIX, № 2, 1976, 26—34.

Показано, что коэффициенты упрочнения термообработанных сталей β_2 статистическая величина и зависит от числа циклов N и вероятности нарушения $K(N)$. В зависимости от взаимного расположения кривых упрочнения из исходных и термообработанных образцов намечены зоны изменения коэффициента β_2 и получены зависимости $\beta_2 = f[N; K(N)]$ для каждой из этих зон.

Рассмотрено влияние на параметров кривой $\xi = J(A)/I(A)$ вида термообработки, режима нагружения, размеров и конструктивных форм образцов.

Илл. 3. Табл. 3. Библ. 4 назв.

УДК 556.3:517.9

К вопросу притока подземных вод к подолборным скважинам, заложеным в двухслойных водоносных толщах. Казарин С. М. Известия АН АрмССР (серия Т. II), т. XXIX, № 2, 1976, 35—42.

Приводится решение системы дифференциальных уравнений, описывающих упругие фильтрации в двухслойной гидравлически связанной водоносной толще, разделенной слабопроницаемыми слоями.

Система уравнений решается операционными методами при граничных условиях постоянной откачки разных расходов из первого и второго водоносных слоев, не ставя никаких ограничений на гидрогеологические параметры пластов.

Получены расчетные формулы, при помощи которых можно определить в этих слоях понижения уровня подземных вод в любой точке в любой момент времени при заданных суммарных расходах на скважины.

Илл. 3. Библ. 6 назв.

УДК 621.33:621.355

К исследованию электрооборудования электродвигательных установок, питающихся от аккумуляторной батареи. Варпетян В. С. Известия АН АрмССР (серия Т. II), т. XXIX, № 2, 1976, 43—50.

Показано, что при расчете и выборе электрооборудования электродвигательных установок, питающихся от аккумуляторной батареи, необходимо учитывать взаимоопределяющие влияния автономного источника питания и остального электрооборудования. Причем тяговые качества установок могут существенно ухудшаться в зависимости от зарядного состояния батареи. Доказано, что способ последовательного возбуждения двигателей по сравнению с параллельным обеспечивает относительно высокие динамические качества установки и приводит к улучшению использования батареи. Показано, что импульсное управление тяговыми двигателями по сравнению с остаточным приводит к существенному улучшению использования и экономии расхода емкости аккумуляторной батареи.

Илл. 5. Библ. 4 назв.

УДК 621.373.001.2

К расчету индуктивности рассеяния лобовых частей однофазного ударного генератора. Овчиня Л. О., Хорьков К. А., Синайлов Г. А. Известия АН АрмССР (серия Т. II), т. XXIX, № 2, 1976, 51—58.

С помощью метода теории поля получены выражения для расчета индуктивности рассеяния экранированных лобовых частей обмотки статора однофазного ударного генератора. Определена зависимость коэффициента, определяющего степень влияния электромагнитных экранов на индуктивное сопротивление лобовых частей, и функции от геометрии экранируемой системы.

Илл. 4. Библ. 3 назв.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Ո Ւ Ն

Է Ն Ի Ը Գ Ի Կ Ի Կ Ա

Հ. Տ. Աղսոց, Ա. Գ. Հարությունյան, Բացասական ունակտիվ դիմագրություններով
երկարատև ճյուղեր պարունակող էլեկտրական համակարգի հաստատված ուժի մի հաշ-
վարկի մեթոդիկայի շուրջը

Խ. Պ. Ասատրյան, Գ. Ի. Համբարձումյան, Սինուս-կոսինուսային ֆունկցիոնալ
կերպարներով

Ո. Ո. Սկրտչյան, Հենդգահամակարգի բեռնվածությունը դրա ֆիզիկական հանդուրժումը
կշռային զործանկեղծների մեթոդով

Մ Ե Ք Ե Ն Ա Շ Ի Ն Ո Ւ Թ Ց Ո Ւ Ն

Ն. Վ. Սրնգիկ, Վ. Վ. Փեղեր, Մ. Գ. Սաակյան, Ջերմամիակցված պոլիպատերի ամ-
րացման էֆեկտի հետադրուստումը

Հ Ի Դ Ի Ա Վ Լ Ի Կ Ա

Ո. Մ. Ղազարյան, Երկշերտ ջրատար հողաշերտում տեղափոխված ջրհորի մեջ ստոր-
երկրյա ջրերի ներհոսման հարցի շուրջը

Է Լ Կ Կ Տ Ի Ա Տ Ե Խ Ի Կ Ա

Վ. Ո. Վաթայտյան, Ակումսային մարտկոցներից անվտանգ էլեկտրաշարժական
տեղակայումների էլեկտրասարքավորումների հետադրուստիան շուրջը

Լ. Հ. Ոհանյան, Կ. Ս. Խուրկով, Գ. Ա. Սիպալով, Միաֆազ հարվածային զենեքատորի
նախաաշխին մասի ջրման ինդուկտիվության հաշվարկման շուրջը

Գ Ի Տ Ա Կ Ա Ն Ն Ո Ւ Թ Ի

Լ. Լ. Լոբկ, Տաթ. Շրջապատյա հասանքի փոխադրունակությունը ջրատարի ոլո-
րանում



СОДЕРЖАНИЕ

Энергетика

Г. Т. Адобец, С. Г. Арутюнян. К методике расчета установившегося режима электрической системы, содержащей продольные ветви с отрицательными реактивными сопротивлениями	3
Т. П. Асатрян, Г. Г. Амбарцумян. Синусо-косинусный функциональный преобразователь	10
М. С. Мкртчян. Прогнозирование графиков нагрузки энергосистем методом годовых коэффициентов	17

Машиностроение

Н. В. Олейник, В. В. Безер, М. Г. Станян. Исследование эффекта упрочнения термообработанных сталей	26
--	----

Гидравлика

С. М. Казарян. К вопросу притока подземных вод к водонаборным скважинам, расположенным в двухслойных изотропных толщах	35
--	----

Электротехника

И. С. Варпетян. К исследованию электрификации в цепи подвижных установок, питающихся от аккумуляторной батареи	43
Д. О. Оганян, К. А. Хорьков, Г. А. Сивойлов. К расчету индуктивности рассеяния лобовых частей однофазного ударного генератора	51

Научные записки

Ле Нган Тун. О транспортирующей способности циркуляционного потока на повороте водовода	59
---	----



Автор: Д. А. АСАТРЯН

ВФ 05613. Подписано к печати 31.VIII.1976 г. Тираж 500. Изд. №78. Заказ 325
Формат бумаги 70х108¹/₁₆. Печ. л. 4,25. Бум. л. 2,11.
Усл. печ. л. 5,9. Уч. изд. листов 1,57

Типография Издательства АН Армянской ССР, Ереван, Баранян, тираж 21
Типография АН Армянской ССР, г. Эчмиадзин