ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ ÉREVAN

Издается с 1947 г.

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԿՏԻՎ

Կասյան Ի. Վ. (պատ. խմբագիր), Ազոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ), Ալիխանեանի Ա. Ի., Անանյան Հ. Կ., Գևորգյան Տ. Ա., Զաքոյան Մ. Ա., Նազարով Ա. Գ., Տեր-Ազարև Ն. Ա., Փիլոյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ), Պատասխանատու քարտուղար Սահինյան Ջ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), *Агонц Г. Т.* (зам. ответ. редактора), *Алексеевский В. В.*, *Ананян А. К.*, *Горовян Т. А.*, *Заворян М. А.*, *Назиров А. Г.*, *Панаджян В. В.* (зам. ответ. редактора), *Тер-Азарьев Н. А.*
Ответственный секретарь *Степанян Э. К.*

Հրատարակչության հասցեն՝ Երևան-19, Բարեկամության փող. 24։
Адрес редакции: Ереван-19, ул. Барекамутян, 24.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. ОЛЕЙНИК, М. Г. СТАКЯН

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСЕЙ ПРИ ЗНАКОПОСТОЯННОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Неподвижные оси (например, транспортных машин), как правило, подвергаются действию напряжений, изменяющихся по знакопостоянному асимметричному циклу. Наибольший интерес представляет рассмотрение знакопостоянных положительных циклов, поскольку очаг разрушения всегда находится на растянутой стороне оси.

Для снижения материалоемкости осей необходимо при их проектировании пользоваться современными расчетами и методиками, отражающими режим эксплуатационной нагруженности, рассеяние свойств материала и конструктивных размеров, т. е. применять вероятностные методы расчета. Выносливость осей, рассчитываемых на неограниченный срок службы, лучше всего оценивать по уравнению подобия усталостного разрушения, предложенному С. В. Серенсеном и В. П. Когаевым [1, 2], и хорошо согласующемуся с данными опытов и производственных наблюдений. Однако непосредственное его применение к случаям асимметричных циклов и особенно циклов, при реализации которых согласно диаграмме усталости возможны пластические деформации без появления усталостной трещины, затруднительно, так как в основу его вывода положено симметричное распределение напряжений в опасных сечениях, к тому же изменяющихся по симметричному циклу. Для неподвижных осей как круглых, так и некруглых характерно симметричное распределение напряжений по сечениям, поэтому вопрос о применимости к ним уравнения подобия обуславливается только характером изменения нагрузки во времени. Чтобы его решить, необходимо иметь уравнение диаграммы усталости для области циклов с коэффициентами асимметрии R, изменяющимися от 0 до 1, и на основании его получить функцию $\sigma(R)$ предела выносливости гладких эталонных образцов от R.

На рис. 1 показаны действительная (кривая ABC) и схематизированная (ломаная ABC) диаграммы усталости в координатах «среднее напряжение σ_m, амплитудное напряжение σ_a». В расчетах используется схематизированная диаграмма [1]. Предположим, что она построена по данным испытаний гладких круглых образцов при плоском изгибе (предел прочности σ_b может быть отнесен к растяжению-сжатию для пластичных материалов). Заштрихованная область диаграммы соответствует циклам, при осуществлении которых появляются пластические дефор-

мации, но разрушение не происходит. Эта область наименее исследована. Естественно, поведение материалов при упруго-пластическом деформировании представляет собой сложный процесс, который не может быть отражен схематизированной диаграммой. Но так как пластические деформации для многих деталей, в том числе и осей, недопустимы в принципе (искажится форма детали), то для целей расчета диаграмму усталости в области циклов с коэффициентами $R=0...1$ можно аппроксимировать прямой BD, соединяющей точки, отвечающие предельным пульсирующему ($R=0$) и постоянному ($R=1$) циклам. Такая аппроксимация исключит появление пластических деформаций при переменных напряжениях, а если и приведет к ошибке, то небольшой, повышающей надежность расчета.

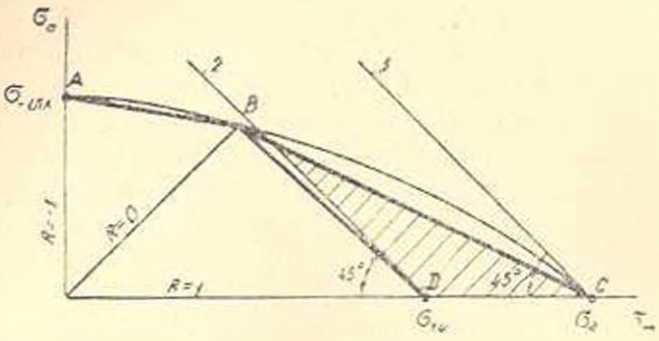


Рис. 1. Диаграмма усталости для области положительных циклов. *1* и *2* — геометрические места точек, соответствующих циклам с максимальными напряжениями, равными пределу прочности и текучести.

Уравнение прямой BD имеет вид

$$\sigma_a = (\sigma_{т\pi} - \sigma_m)\,|\sigma_0/(2\sigma_{т\pi} - \sigma_0)| = (\sigma_{т\pi} - \sigma_m)/\omega, \qquad (1)$$

где $\sigma_{т\pi}$ и σ_0 — пределы текучести и выносливости при пульсирующем цикле; $\omega = (2\sigma_{т\pi} - \sigma_0)/\sigma_0$ — коэффициент чувствительности материала к нагружению переменными напряжениями одного знака, аналогичный по смыслу коэффициенту $\psi_\sigma = (2\sigma_{-1} - \sigma_0)/\sigma_0$ (σ_{-1} — предел выносливости при симметричном цикле) чувствительности материала к асимметрии цикла. Между коэффициентами ω и ψ_σ существует зависимость

$$\omega = (\sigma_{т\pi}/\sigma_{-1т\pi})\,(1 + \psi_\sigma) - 1. \qquad (2)$$

Соотношение пределов $\sigma_{т\pi}$ и σ_{-1} можно вычислить по формулам, приведенным в работе [3].

Предельные амплитудное и среднее напряжения согласно уравнению (1) будут

$$\sigma_a = \sigma_{т\pi}/|(1 - R)(1 - R) + \omega|; \qquad (3)$$

$$\sigma_m = \sigma_{т\pi}\,|1 + (1 - R)\,\omega/(1 + R)|. \qquad (4)$$

Тогда предел выносливости σ_R образца при цикле с коэффициентом R равен

$$\sigma_R = \sigma_a + \sigma_m \quad (5)$$

и искомая функция $\sigma_R/\sigma_m = \varphi(R)$

$$\varphi(R) = 2/[1 + R + (1 - R)\psi]. \quad (6)$$

Характер функции $\varphi(R)$ показан на рис. 2.

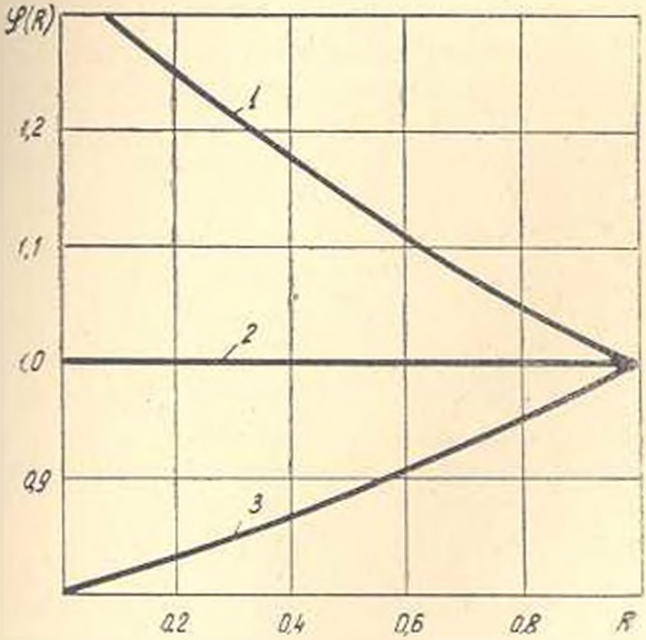


Рис. 2. Функция $\varphi(R)$ при различных коэффициентах ψ.
1, 2 и 3 — ψ = 0,5, 1,0 и 1,5.

Рассмотрим, как можно использовать полученную функцию в расчетах, для чего запишем вначале уравнение подобия для осей, подверженных действию напряжений симметричного цикла при вращении [1, 2]

$$\lg(\sigma_{-1д}\alpha_\sigma - \sigma_{н.г.}) = \lg(\sigma_{max} - \sigma_{н.г.}) = A - B\lg(L/G) + u \cdot S, \quad (7)$$

где $\sigma_{-1д}$ — предел выносливости рассчитываемой детали при симметричном изгибе, выраженный в номинальных напряжениях; α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений при изгибе от конструктивного концентратора в опасном сечении; $\sigma_{max} = \sigma_{-1д} \cdot \alpha_\sigma$ — максимальное напряжение у поверхности дна концентратора в предположении упругого распределения напряжений по сечению; $\sigma_{н.г.}$ — нижняя граница (минимальное значение) напряжения σ_{max} (вероятность разрушения детали при $\sigma_{max} \leqslant \sigma_{н.г.}$ равна нулю); L/G — обобщенный критерий подобия усталостного разрушения; L — периметр или часть периметра опасного сечения, прилегающая к зоне максимальной напряженности;

$G = G_0/\sigma_{max}$ — относительный градиент первого главного напряжения; G — градиент этого напряжения; A и B — постоянные для данного материала величины, определяющие начальную ординату и угловой коэффициент линии подобия в координатах $\lg(\sigma_{max} - \sigma_{n.r.})$, $\lg(L/G)$ и отражающие уровень прочности материала и его чувствительность к концентрации напряжений и масштабному эффекту; u — квантиль нормального распределения; S — среднеквадратичное отклонение случайной величины $\lg(\sigma_{max} - \sigma_{n.r.})$, подчиняющейся нормальному распределению.

Величину нижней границы представилось возможным определять в зависимости от средневероятного предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ при симметричном изгибе с вращением гладкого эталонного образца диаметром $d_0 = 7{,}5$ *мм* [1, 2]. Отношение $\varepsilon_\infty = \sigma_{n.r}/\bar{\sigma}_{-1}$, выражающее масштабный фактор детали и образца неограниченных размеров, оказалось достаточно устойчивым для обширного круга материалов, изменяющимся от 0,4 до 0,6 и, в среднем, равным 0,5. Принимая $\sigma_{n.r.} = \varepsilon_\infty \cdot \bar{\sigma}_{-1}$ и $\xi = \sigma_{max}/\sigma_{n.r}$ (для эталонного образца $\bar{\xi}_0 = 1/\varepsilon_\infty$), уравнение (7) можно привести к виду

$$\lg(\bar{\xi}_0 - 1) = -B\lg(LG_0/L_0G) + \lg(1/\varepsilon_\infty - 1) + u \cdot S. \qquad (8)$$

где индексом «0» в относительном безразмерном критерии LG_0/L_0G отмечены величины, относящиеся к эталонному образцу.

Для невращающейся круглой оси, подверженной плоскому ассиметричному изгибу, уравнение подобия запишется так:

$$\lg(\bar{\xi}_R - 1) = A - B\lg(KL/G) - \lg\sigma_{n.r.} + u \cdot S, \qquad (9)$$

где $\bar{\xi}_R = \sigma_{max,R}/\sigma_{n.r.}$; $\sigma_{max,R} = \sigma_{R_3} + \sigma_a$ — предел выносливости оси при цикле с коэффициентом R, выраженный в номинальных напряжениях и равный сумме номинальных предельных амплитудного и среднего напряжений цикла; K — коэффициент приведения, показывающий, какую часть периметра $L = \pi d$ круглой оси диаметром d в опасном сечении следует учесть в расчете, чтобы получить ее предел выносливости при плоском изгибе [1].

Медианный предел выносливости эталонного образца при плоском изгибе и том же коэффициенте R, что и для оси, найдем из уравнения

$$\lg(\bar{\xi}_R - 1) = A - B\lg(KL_0/G_0) - \lg\sigma_{n.r.}, \qquad (10)$$

где $\bar{\xi}_R = \bar{\sigma}_0/\sigma_{n.r.}$; $\bar{\sigma}_0$ — искомый медианный предел выносливости эталонного образца; K — коэффициент приведения, который принимается одинаковым для детали и образца.

Вычитая из (9) уравнение (10), получаем

$$\lg(\bar{\xi}_{R_3} - 1) - \lg(\bar{\xi}_R - 1) = -B\lg(LG_0\,L_0G) + u \cdot S. \qquad (11)$$

Отношение $\bar{\xi}_R$ предела выносливости $\bar{\sigma}_R$ к нижней границе $\sigma_{n.r}$ при $0 \leqslant R < 1$ можно выразить через предельные напряжения, по

которым построена схематизированная диаграмма усталости (рис. 1), и функцию $\varphi(R)$

$$\bar{\xi}_R = \bar{\sigma}_R/\bar{\sigma}_{a.r.} = \bar{\sigma}_R/\varepsilon_\sigma \bar{\sigma}_{-1} = \bar{\sigma}_R \cdot \bar{\sigma}_{-1n} \cdot \gamma/\varepsilon_\sigma \cdot \bar{\sigma}_{-1} \cdot \bar{\sigma}_{-1n} \cdot \gamma =$$

$$= \gamma \cdot (\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}) \cdot (\bar{\sigma}_R/\bar{\sigma}_{-1n}) \cdot \varphi(R)/\varepsilon_\sigma, \qquad (12)$$

где γ — соотношение между пределами выносливости эталонного образца при симметричных плоском и круговом изгибах [1].

С учетом выражения (2) последнее условие можно переписать

$$\bar{\xi}_R = \gamma [(1 \div \omega)(1 + \psi_\sigma)] \cdot \varphi(R)/\varepsilon_\sigma, \qquad (13)$$

где коэффициенты ω и ψ_σ предполагаются известными. Надежнее всего определять эти коэффициенты по фактическим значениям предельных напряжений σ_{-1}, σ_0 и σ_{-1n} материала оси. При отсутствии усталостных характеристик материала, их можно приближенно вычислить по известным статическим его характеристикам [3].

Подставляя найденное значение $\bar{\xi}_R$ в уравнение (11), после очевидных преобразований будем иметь

$$\lg(\xi_{R2} - 1) = B \lg(LG_0/L_0G) + \lg[\gamma \cdot (\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}) \cdot \varphi(R)/\varepsilon_\sigma - 1] + u \cdot S. \qquad (14)$$

Из последнего уравнения находим отношение ξ_{R2} и предел выносливости ξ_{R2} оси при знакопостоянном асимметричном цикле

$$\xi_{R2} = 1 + (LG_0/L_0G)^{-B} [\gamma \cdot (\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}) \cdot \varphi(R)/\varepsilon_\sigma - 1] \cdot 10^{u \cdot S}, \qquad (15)$$

$$\sigma_{R2} = \bar{\sigma}_{-1}/\varepsilon_\sigma + \varepsilon_\sigma \cdot (LG_0/L_0G)^{-B} [\gamma \cdot (\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}) \cdot \varphi(R)/\varepsilon_\sigma - 1] \cdot 10^{u \cdot S}]/\varepsilon_\sigma. \qquad (16)$$

Уравнение (16) не может быть применено для расчетов деталей, работающих при знакопеременных асимметричных циклах нагружения, так как функция $\varphi(R)$ справедлива только в пределах участка BD диаграммы усталости (рис. 1).

При построении функции распределения предела выносливости оси можно воспользоваться усредненными значениями среднеквадратичного отклонения S [1, 2]. Для стальных осей следует принимать $S = 0{,}045 \div 0{,}050$, а масштабный фактор $\varepsilon_\sigma = 0{,}5$. Параметр B уравнений подобия можно найти по рекомендациям, приведенным в работе [4]. Уравнение (16) можно применить также и для расчетов осей с поверхностным упрочнением, если под пределом выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ и отношением $\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}$ понимать соответствующие значения для материала эквивалентной детали, равнопрочной действительной упрочненной детали [4].

Медианный предел выносливости оси при $\varepsilon_\sigma = 0{,}5$ будет

$$\bar{\sigma}_{R2} = \bar{\sigma}_{-1}[0{,}5 + 0{,}5(LG_0/L_0G)^{-B}[2(\bar{\sigma}_{-1n}/\bar{\sigma}_{-1n2}) \cdot \varphi(R) - 1]]/\varepsilon_\sigma. \qquad (17)$$

Анализируя полученные уравнения подобия (14)—(17), можно видеть, что исключив из них факторы, определяющие нагружение знакопостоянными напряжениями, т. е. положив $\bar{\sigma}_{m}/\bar{\sigma}_{-1m}=1$ и $\psi(R)=1$, придем к случаю нагружения симметричными напряжениями, т. е. к уравнению (8) и вытекающим из него. Однако из (14)—(17) непосредственно нельзя получить уравнения для расчетов осей при знакопеременном асимметричном нагружении, соответствующем участку AB диаграммы усталости (рис. 1). Такие уравнения можно получить на основе зависимости

$$\bar{\sigma}_{R}/\bar{\sigma}_{-1m}=2/[1-R-(1+R)\psi_{\sigma}], \tag{18}$$

аналогичной (6), где $\bar{\sigma}_{R}$ —предел выносливости эталонного образца при плоском изгибе и циклах $-1\leqslant R\leqslant 0$.

Уравнения (16), (17) применимы и к некруглым осям, расчетный периметр L для которых подсчитывается как для бруса [1]. Расчетная оценка пределов выносливости в этом случае может оказаться несколько неточной вследствие различия формы сечения детали и эталонного образца и затруднительности перехода от предела выносливости при плоском изгибе эталонного образца, подобного по форме сечения рассчитываемой детали, к пределу выносливости при изгибе с вращением круглого эталонного образца.

Уточненная оценка несущей способности осей при знакопостоянном циклическом нагружении на основании уравнений подобия (16) и (17) выгодно отличается от традиционной и приводит к уменьшению сечений и материалоемкости этих деталей.

ЕрПИ им. К. Маркса Поступило 27.IX.1978

Ն. Վ. ՕԼԵՅՆԻԿ, Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ

ԱՌԱՆՑՔԵՐԻ ԿՐՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԴՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՆՇԱՆԻ ՅԻՆՎԱՅԻՆ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հաստատուն նշանի անհամաչափ ցիկլով փոխվող լարումների տակ աշխատող առանցքների հաշվարկի համար առաջարկված է օգտագործել հոդնածության սխեմատիզացված դիագրամը, որը կառուցված է հարթ ձոման դեպքում ոլորուն էտալոնային փորձանմուշների հոսունության և դիմացկունության սահմանների արժեքներով։ Այդ դիագրամի հիման վրա ստացված են հոգնածային բալքայման նմանության հավասարումներ առանցքների դիմացկունության սահմանը և նրա ցրումը հշգրիտ գնահատելու համար։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., «Машиностроение», 1975, 488 с. с ил.
2. *Когаев В. П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М., «Машиностроение», 1977, 232 с. с ил.
3. *Гребеник В. М.* Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. М., «Машиностроение», 1969, 256 с. с ил.
4. *Олейник Н. В., Кравчук В. С.* Расчет поверхностно упрочненных деталей по критерию подобия усталостного разрушения. Респ. Межвед. научн-техн. сб. «Детали машин», вып. 25. Киев, «Техника», 1977, с. 91—98.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Р. Л. АПРИКЯН, К. А. МНДЖОЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ АБРАЗИВНОЙ ЛЕНТЫ В РАБОЧЕМ СОСТОЯНИИ

В настоящее время влияние режимов и условий ленточного шлифования на шероховатость устанавливают путем длительных и дорогостоящих экспериментов. Поэтому актуальной является задача создания аналитической модели прогнозирования шероховатости, применение которой сократит затраты на их проведение. Кроме того, модель позволит выявить пути уменьшения шероховатости и возможности управления ею. Отправным пунктом при разработке модели является определение статистических характеристик режущего абразивного профиля. Попытка решения такой задачи предпринималась в [1]. Авторами были построены гистограммы распределения высот точек профилей лент различной зернистости и выявлено, что оно близко к нормальному. Кроме того, с учетом кинематики резания определены активные режущие кромки. Однако профиль ленты исследовался без учета упругого отжатия зерен, которое, как мы покажем ниже, существенно изменяет его параметры.

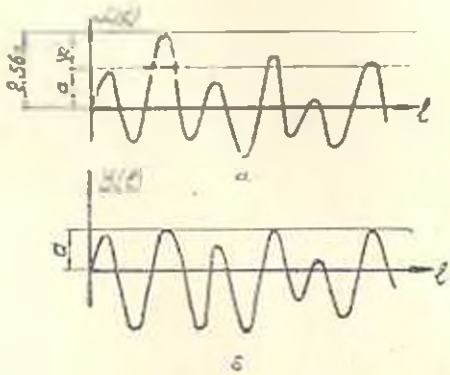


Рис. 1. Изменение профиля ленты вследствие отжатия зерен (*а* — профиль в свободном состоянии, *б* — профиль в рабочем состоянии).

Профиль абразивной ленты в любом нормальном к плоскости ее основания сечения представляет собой реализацию стационарного случайного процесса. Вследствие упругих свойств основания зерен, под действием сил шлифования оно изменяется (рис. 1б) и отличается от профиля в свободном состоянии (рис. 1а). При этом переход от профиля $X(l)$ к профилю $Y(l)$ нелинейный, который заключается в том, что часть

абразивных зерен, находящаяся выше уровня a, отжимается, т. е. изменяет свои координаты, а остальные остаются в своем прежнем положении. Уровень a определяет момент начала резания зернами после их упругого отжатия. Считая, что отжатие равно W, а касание металла и зерен происходит на уровне $2{,}5\sigma_x$ (σ_x — среднеквадратическое отклонение высот), определим уровень a как

$$a = 2{,}5\sigma_x - W. \tag{1}$$

Такая схема несколько упрощает истинную физическую картину, так как большинство зерен имеет возможность в процессе шлифования перемещаться, причем, на разную величину под действием силовых и тепловых факторов, однако эта схема наиболее приемлема для аналитических выводов. Определим статистические характеристики процесса $Y(t)$, считая его выходом, а $X(t)$ — входом некоторой нелинейной системы. Выделим в нашей нелинейной системе линейную и нелинейную части, и при этом структурная схема будет иметь вид, представленный на рис. 2. Системы такого вида в теории случайных функций называют при-

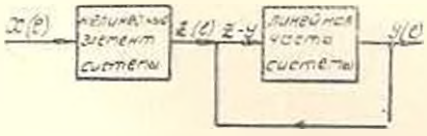


Рис. 2. Структурная схема.

водимыми нелинейными системами [2]. Формально анализ исходной нелинейной системы можно свести к решению двух задач: определению вероятностных характеристик функции $Z(t)$, связанной с заданной функцией $X(t)$ нелинейным соотношением

$$Z(t) = F[X(t),\ \dot{X}(t) \cdots X^{(n)}(t),\ t], \tag{2}$$

и анализу линейной системы

$$LY(t) = Z(t), \tag{3}$$

где L — оператор линейной части системы; F — нелинейная функция (функционал) своих аргументов. По нашей схеме расчета зерна высотой $X(t) \leqslant a$ не претерпевают отжатий, зерна же высотой $X(t) > a$ отжимаются на величину W. Допустим, что все зерна с $X(t) > a$ после отжатия имеют высоту $Y(t) = a$, а остальные — $Y(t) = X(t)$. Считаем также, что процесс нормальный и стационарный, с математическим ожиданием $\overline{X}$ и корреляционной функцией $K_x(\tau)$ [3]. Исходя из приведенных допущений, уравнение нелинейного звена $Z(t)$, которое аналитически описывает отжатие зерен, может быть представлено в виде

$$Z(t) = \frac{1}{2}[a + X(t)] + \frac{1}{2}[a - X(t)]\,\mathrm{sign}\,[X(t) - a], \tag{4}$$

здесь

$$\operatorname{sign}[\lambda(t)-a]=\begin{cases}1, & X(t)-a>0;\\ 0, & X(t)-a=0;\\ -1, & X(t)-a<0.\end{cases}$$

Дельта-функцию $\operatorname{sign}[X(t)-a]$ можно представить в виде интеграла Дирихле [2], в связи с чем уравнение примет вид

$$Z(t)=\frac{1}{2}|a+X(t)|+\frac{1}{2\pi i}\int_{-\infty}^{\infty}e^{iu[X(t)-a]}|a-X(t)|\frac{du}{u}. \qquad (5)$$

где $E(u)$ — характеристическая функция. Выберем центр закона распределения $X(t)$ за начало координат (тогда $\overline{X}=0$) и найдем математическое ожидание выражения (5). Пропуская математические выкладки и приемы, изложенные в [2], запишем, что математическое ожидание $\overline{Z}(t)$ равно

$$\overline{Z}(t)=\frac{a}{2}\left|1-\Phi\left(\frac{a}{\sigma_x}\right)\right|+\frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_x}e^{\frac{-a^2}{2\sigma_x^2}}, \qquad (6)$$

где $\Phi\left(\frac{a}{\sigma_x}\right)$ — интегральная функция Лапласа.

Математическое ожидание $\overline{Z}(t)$ случайного процесса, реализацией которого является профиль абразивной ленты в рабочем состоянии, как видно из (6), постоянная величина и отличается от математического ожидания входного процесса (т. е. от математического ожидания профиля в свободном состоянии). Для определения корреляционной функции $K_z(\tau_1\tau_2)$ можно применить обычный прием, т. е. перемножить ординаты $Z(\tau_1)$ и $Z(\tau_2)$, определяемые равенством (5), и найти математическое ожидание полученного произведения. Однако формула для $K_z(\tau_1, \tau_2)$ получается весьма громоздкой, поэтому приводить ее не будем. Воспользуемся табличными данными из работы [4]. Если обозначить

$$\lambda=\frac{a}{\sigma_x}, \qquad \rho_\tau=\frac{K_x(\tau)}{\sigma_x^2}, \qquad (7)$$

где ρ_τ — коэффициент корреляции, а $K_x(\tau)$ — корреляционная функция профиля ленты в рабочем состоянии, то по таблице из [4] можно определить значения $\frac{K_z(\tau)}{\sigma_x^2}$ в зависимости от λ и ρ_τ. Данные в [4] даны для двухстороннего ограничителя, т. е. для случая, когда

$$Y(t)=\begin{cases}-a, & \text{при } X(t)<-a;\\ X(t), & \text{при } |X|(t)<a;\\ +a, & \text{при } |X|(t)>a.\end{cases}$$

Наша же задача удовлетворяет условиям одностороннего ограничителя, поэтому таблица пересчитана следующим образом. Если, например, для $\rho = 0{,}95$ и $x = 2{,}0$, значение $\frac{K_\rho(\tau)}{\sigma_x^2} = 0{,}873$, то при пересчете:

$$\frac{K_\rho(\tau)}{\sigma_x^2} = 0{,}873 + \frac{0{,}950 - 0{,}873}{2} = 0{,}911.$$

Рассмотрим конкретный пример. Обработка профилограммы режущего профиля абразивной ленты зернистостью ЭБ25 позволила аппроксимировать его корреляционную функцию выражением

$$K_x(\tau) = 1675\ мкм^2\ e^{[illegible]}.$$

Величина отжатия, рассчитанная по методике [5], составила $W = 80$ *мкм*. По формуле (1) определяем, что $a = 23$ *мкм* (учитывая $\sigma_x = \sqrt{1675} = 41$ *мкм*), а из (7) находим $x = 0{,}6$. По таблице [4] с учетом пересчета определяем $\rho_p(\tau) = 0{,}6245$, тогда среднеквадратическое отклонение высот профиля ленты в рабочем состоянии будет $K_p(0) = 0{,}6245 \cdot 1675 = 1046$ *мкм*^{2}. На графике рис. 3 показаны корреляционные функции профиля ленты ЭБ25 в нерабочем состоянии и при отжатии на $W = 80$ *мкм* (соответственно, кривые 1 и 2). Уменьшение

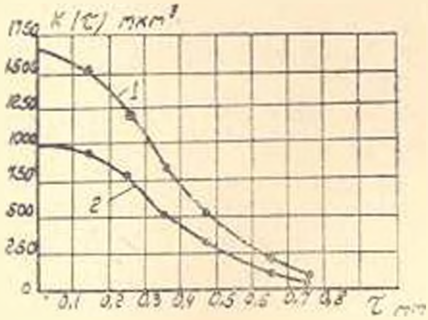


Рис. 3. Корреляционная функция профиля ленты зернистостью ЭБ25 в нерабочем состоянии (кривая 1) и с учетом упругих отжатий зерен (кривая 2).

среднеквадратического отклонения режущего профиля объясняет известный факт получения меньшей шероховатости при ленточном шлифовании, чем при шлифовании кругами при одинаковой зернистости. Чем больше отжатие, тем этот эффект больше: так, при $x = 0{,}4$, $K_p(0) = 0{,}5630 \cdot \sigma_x^2$, а при увеличении жесткости контактного ролика и основания ленты это уменьшение шероховатости становится незначительным, например, уже при $x = 1{,}6$ — $K_p(0) = 0{,}906\sigma_x^2$.

Закавказский филиал ЭНИМС Поступило 15. III. 1978

Ф. Լ. ՀԱՅՐԻԿՅԱՆ, Կ. Ա. ՄՆՋՈՅԱՆ

ՀՂԿԱԺԱՊԱՎԱՆԻ ՊՐՈՖԻԼԻ ՎԻՃԱԿԱԳՐԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՎԻՃԱԿՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Դիտարկվում է հղկաժապավենի կտրող պրոֆիլի վիճակագրական բնութագրերի որոշման խնդիրը։ Պրոֆիլը ներկայացված է որպես ստացիոնար պատահական պրոցեսի իրականացում և հաշվի առնելով հղկահատիկների առաձգական ներսեղմումը, որոշված են նրա մաթեմատիկական սպասումն ու կոռելյացիայի ֆունկցիան։

Ստացված արդյունքները օգտագործվում են ժապավենահղկման գնդրում անհարթությունների մոդել ստեղծելու համար։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Friedman M. Y. Wu S. M. Suruthar P. T.* Determination of geometric properties of coated abrasive cutting edges. Trans ASME, 1974, № 4.
2. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории случайных функций. М., «Наука», 1968.
3. *Шмутер С. Л., Кочарян Р. А., Айрикян Р. Л.* Корреляционная функция шероховатости, как характеристика свойств обработанной поверхности. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVII, № 4, 1974.
4. *Лэнинг Дж. Х., Бэттин Р. Г.* Случайные процессы в задачах автоматического управления. М., изд. ИЛ, 1958.
5. *Айрикян Р. Л.* Аналитическое определение количества активно режущих зерен при ленточном шлифовании. Сб. тр. Зак. фил. ЭНИМС. Ереван, «Айастан», 1977.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. Р. САГАТЕЛЯН

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИТИРОЧНОГО ДИСКА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Механическая доводка плоских поверхностей свободным абразивом в настоящее время производится на одно- и двухдисковых доводочных станках, осуществляющих, соответственно, одностороннюю и двухстороннюю доводку. При этом наиболее прогрессивной и перспективной является двухсторонняя доводка, вследствие обеспечения более высокой производительности (припуск удаляется одновременно с обеих сторон) и точности геометрической формы (отсутствует перебазировка заготовки).

Однако не все детали требуют доводки с обеих сторон, а двухсторонняя доводка некоторых из них (например, торцовых поверхностей стержней с отношением $l/d > 10$) затруднена. В связи с этим перспективным представляется наложение ультразвуковых колебаний на одностороннюю доводку с целью повышения производительности процесса и качества обработанных поверхностей.

Наложение ультразвуковых колебаний на притир может быть осуществлено, например, на станке серии ШП для шлифовки и полировки оптических поверхностей путем замены коробки скоростей специальным устройством (рис. 1), включающим магнитострикционный преобразователь со стержневым трансформатором продольных колебаний с потребляемой мощностью порядка 1,6÷2,5 *кВт* (1), волновод (2) с закрепленным на нем притиром (3). Вращение притира осуществляется посредством клиноременной передачи от двигателя постоянного тока небольшой мощности (порядка 0,5 *кВт*).

В связи с тем, что целесообразным является использование всей рабочей поверхности притира, последний, в связи с наложением на него ультразвуковых колебаний, должен быть специально рассчитан.

С наложением ультразвуковых колебаний на притир по выше приведенной схеме, он колеблется как свободная круглая пластина, и на его рабочей поверхности может возникнуть, в общем случае, n узловых диаметров и S узловых окружностей (геометрические места точек, амплитуда колебаний которых равна нулю). Для примера на рис. 2 приведена форма колебаний при $n=0$, $S=2$.

Необходимо учитывать, что с повышением количества узлов и пучностей, пересекаемых траекторией движения детали по поверхности притира за один цикл, повышается динамичность его воздействия через аб-

разивную прослойку на поверхности детали, что способствует «охрупчиванию» поверхностного слоя детали, выражающемуся в интенсификации процессов зарождения и распространения микротрещин, которые вызывают диспергирование материала [1, 2]. С целью повышения производительности рекомендуется предварительную обработку производить с максимально возможным числом узловых окружностей, а окончательную, с целью повышения качества доведенных поверхностей,—с минимально возможным.

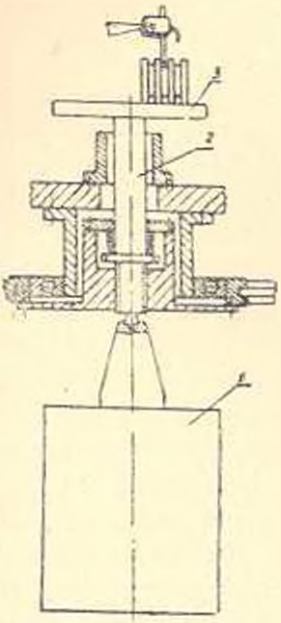


Рис. 1.

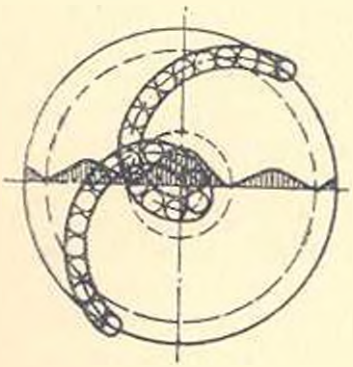


Рис. 2.

Расчет притира сводится к определению его диаметра и толщины при заданной частоте ультразвуковых колебаний ($f = 18$ *кГц*, 22 *кГц*, 44 *кГц*) и материала притира (чугун, медь, стекло).

Собственная частота колебаний притира определяется по формуле [3]:

$$f = \frac{k^2}{2\pi} \cdot \frac{h}{R^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}}, \qquad (1)$$

где f — собственная частота колебаний притира, которая должна быть равна частоте накладываемых ультразвуковых колебаний, *Гц*; k—собственное число, зависящее от числа узловых диаметров и окружностей, можно выбирать по табл. [3]; h, R — толщина и радиус притира, *см*; ν, E — коэффициент Пуассона и модуль упругости материала притира, *кгс/см²*; ρ — плотность материала притира, $\frac{кгс \cdot с^2}{см^4}$.

Из выражения (1) определяем радиус притира

$$R = \sqrt{\sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{h \cdot k^2}{2\pi f}}. \qquad (1')$$

Таблица

S	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
0	—	—	2,348	3,571
1	2,982	4,518	5,940	7,291
2	6,192	7,729	9,186	10,600
3	9,362	10,903	12,381	13,821
4	12,519	14,024	15,556	17,015
5	15,669	17,218	18,721	20,203
6	18,817	20,368	21,880	23,363

Исходя из статического прогиба притира, под действием приложенной к деталям нагрузки выбираем минимальную толщину притира $h=h_0$. На вес притира необходимо наложить ограничение, связанное с максимальной выходной мощностью магнитострикционного преобразователя $G \leqslant G_0$, где $G_0 \approx 2$ *кгс*.

Тогда:

$$R \leqslant \sqrt{\frac{G_0}{\pi h_0 \rho g}}. \tag{2}$$

Исходя из (1) и (2), имеем:

$$\sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{h \cdot k^2}{2\pi f} \leqslant \frac{G_0}{\pi h_0 \rho g},$$

откуда

$$k^2 \leqslant \frac{2G_0 f}{g h_0^2} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{E\rho}} \tag{3}$$

или

$$k^2 \leqslant \frac{2G_0 f}{g h_0^2} \cdot M, \tag{3'}$$

где $M = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{E\rho}}$ — коэффициент, зависящий только от материала притира.

Введем собственное число $k_0 = 2{,}348$, соответствующее форме колебаний с двумя узловыми диаметрами без узловых окружностей. Тогда:

$$\frac{f}{f_0} = \frac{k^2}{k_0^2}, \tag{4}$$

где f_0 — собственная частота колебаний формы $S=0$, $n=2$.

Обозначим:

$$\frac{k^2}{k_0^2} = x. \tag{4'}$$

Тогда получаем возможность использовать номограмму, показанную на рис. 3 [4].

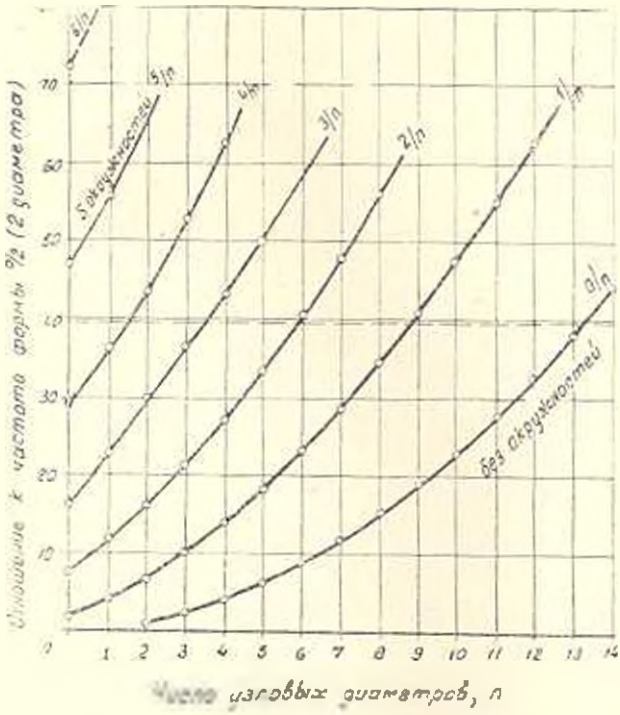


Рис. 3.

Проводим на расстоянии α горизонтальную прямую и ниже нее выбираем точку, соответствующую желаемой форме колебаний притира. Ординату этой точки обозначим через z_0. Согласно (4') $k^2 = z_0 k_0^2$, а радиус притира определим из выражения

$$R = \sqrt{\frac{h_0 z_0 k_0^2}{M \rho 2\pi f}}. \qquad (1'')$$

Пример. Необходимо спроектировать чугунный притир для работы на частоте $f = 22$ *кГц*.

Для чугуна имеем: $E = 1{,}2 \cdot 10^6$ *кгс/см*^{2}; $\rho = \frac{\gamma}{g} = 7{,}35 \cdot 10^{-4} \frac{кгс \cdot с^2}{см^4}$; $\nu = 0{,}25$.

Тогда

$$M = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{E\rho}} = 1{,}13 \frac{см^3}{кгс \cdot с}.$$

По формуле (3'), полагая $G_0 = 2$ *кгс*, $h_0 = 0{,}5$ *см*, имеем:

$$k^2 \leqslant \frac{2G_0 f}{g h_0^2} M = 221$$

и учитывая, что $k_0 = 2{,}348$, по формуле (4') получим:

$$\alpha = \frac{k^2}{k_0^2} = 40.$$

Проводим на номограмме (рис. 3) прямую $\alpha = 40$ (на рис. 3 показана пунктиром). Предположим, что необходимо получить форму колебаний, имеющую 4 узловые окружности без узловых диаметров. От точки пересечения прямой $\alpha = 40$ с кривой $4/n$ по той же кривой перемещаемся до пересечения с осью ординат. Получаем $\alpha_0 = 29$. Тогда $k^2 = \alpha_0 k_0^2 = 160$.

По формуле (1) находим диаметр притира

$$R = \sqrt{\frac{k_0 \alpha_0 k_0^2}{M\rho \cdot 2\pi f}} = 8{,}35 \text{ см}, \qquad D = 2R = 167 \text{ мм}.$$

Данная методика расчета притира предложена для использования при проектировании нового плоскодоводочного станка на Арзнинском производственном объединении «Кристалл».

ЕрПИ им. К. Маркса Поступило 6.X.1978

Հ. Ռ. ՍԱՂԱԹԵԼՅԱՆ

ՈՒԼՏՐԱՁԱՅՆԱՅԻՆ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԱՇԽԱՏՈՂ ԿԻՊԱՀՂԿԻՉ ՍԿԱՎԱՌԱԿԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա մ փ ո փ ու մ

Զափարերման պրոցեսում արտադրողականության և մշակվող մակերեսների որակի բարձրացման համար առաջարկված է ուլտրաձայնային տատանումների վերադրում։

Տրված է 22 կՀց հաճախականության տատանումների տակ աշխատող թուջե կիպահղկիչի հաշվարկի մեթոդիկան։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Орлов П. Н., Савелова А. А., Ермакова И. Н.* Анализ и выбор траекторий относительного движения деталей при обработке на плоскодоводочных станках. «Известия вузов. Машиностроение», 1972, № 1, с. 159—166.
2. *Орлов П. Н., Нестеров Ю. И., Полихин В. А.* Процессы доводки прецизионных деталей пастами и суспензиями. М., «Машиностроение», 1975. 54 с.
3. *Гонткевич В. С.* Собственные колебания пластинок и оболочек. Киев, «Наукова Думка», 1964, с. 46.
4. *Grinsted B.* Nodal Pattern Analysis. Instn. Mech. Engrs. Pros., v. 166, n. 3, 1952, p. 312.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Б. С. ЗЕЧИХИН, А. А. ТЕРЗЯН

ПОЛЕ РАССЕЯНИЯ ПОЛУЗАКРЫТОГО ПАЗА С МАССИВНЫМ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПРОВОДНИКОМ

Расчету электромагнитных полей рассеяния проводников, расположенных в пазах электрических машин, посвящен ряд работ. При аналитическом исследовании поля рассеяния паза сложной формы область, которую следовало бы рассматривать, разбивается на области простой конфигурации и для каждой из них определяется проводимость рассеяния. Общая проводимость рассеяния получается как сумма составляющих проводимостей: области проводника с током; областей паза, не занятых проводником; по головкам зубцов. При раздельном определении проводимостей на границах с соседними областями принимаются приближенные, а иногда и предположительные граничные условия [1—3].

Использование метода Фурье в совокупности с методом Бубнова-Галеркина [4] позволяет эффективно решить задачу поля рассеяния паза более строго.

Решается задача электромагнитного поля прямоугольного проводника в полузакрытом пазу (ротора) при следующих допущениях (рис. 1):

1. Пренебрегается изменением поля по длине проводника, т. е. рассматривается плоская задача поля.

2. Поле симметрично относительно оси паза (оси y).

3. Магнитная проницаемость стали $\mu_{ст} \to \infty$, а ее удельная электропроводность $\gamma_{ст} \to 0$.

4. Ширина проводника равна ширине паза $b_п$.

5. Поверхность расточки статора гладкая; наличие пазов в статоре учтено в приведенной величине рабочего зазора δ'.

6. Поверхности статора и ротора, образующие рабочий зазор, развернуты и являются координатными наряду с остальными поверхностями, ограничивающими рассматриваемую область.

Кусочно-однородная область исследуемого поля разбивается на пять частичных однородных прямоугольных областей I—V. Уравнения электромагнитного поля, создаваемого током проводника, изменяющимся во времени по гармоническому закону $\exp(j\omega t)$, могут быть записаны в комплексной форме:

$$\operatorname{rot} H = \gamma E, \tag{1}$$

$$\operatorname{rot} E = -j\omega\mu_0\gamma H, \tag{2}$$

где $\dot{E}$, H — комплексные действующие значения напряженностей электрического и магнитного полей, соответственно; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота тока проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м* — магнитная постоянная; γ — удельная электропроводность материала проводника.

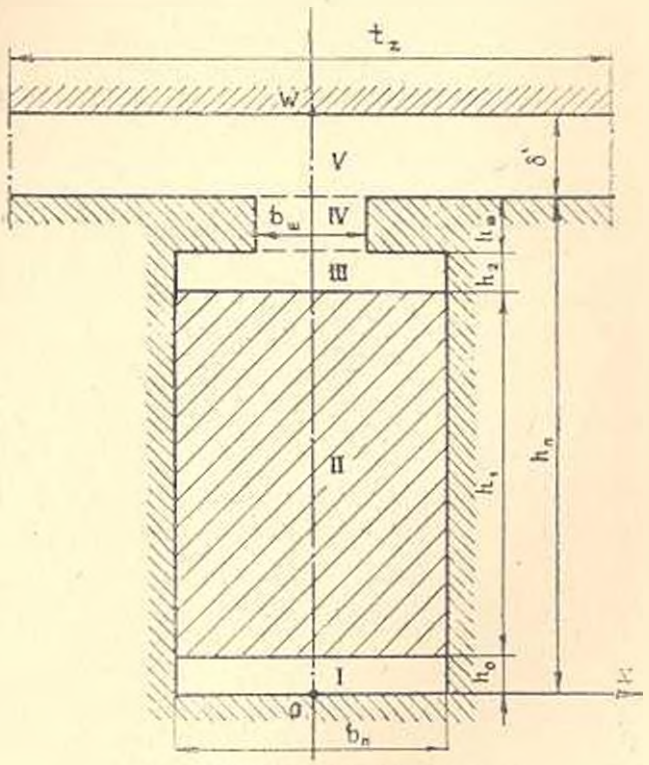


Рис. 1. Исследуемая область поля.

Для плоскопараллельного поля в правой системе координат (x, y, z) (рис. 1) существует только аксиальная составляющая $\dot{E}_z = \dot{E}$ и $\partial E/\partial z = 0$. Тогда из (1) и (2) с учетом $\operatorname{div}\dot{E} = 0$ имеем относительно $\dot{E}$: в области проводника II однородное уравнение Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial y^2} - j\omega\mu_0\gamma\dot{E} = 0. \qquad (3)$$

а в остальных частичных областях уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{E}}{\partial y^2} = 0. \qquad (4)$$

Уравнения (3) и (4) решаются методом Фурье. Общие решения их с учетом условия симметрии представляются соответствующими выражениями:

$$\dot{E} = \dot{A}_0 e^{\dot{k}y} + \dot{A}_0 e^{-\dot{k}y} + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{A}_{2n} e^{\dot{k}_{2n} y} + \dot{A}_{2n} e^{-\dot{k}_{2n} y}) \cos(\dot{k}_{2n} x); \qquad (5)$$

$$\dot{E} = \dot{C}_0 + \dot{C}_1 y + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{C}_{2n} e^{\beta_n y} + \dot{C}_{3n} e^{-\beta_n y}) \cos(\beta_n x), \qquad (6)$$

где $\dot{\varepsilon} = 1\sqrt{j\omega\mu_0\gamma_1} = \frac{1+j}{\Delta}$; $\dot{\varkappa}_n = \sqrt{\beta_n^2 + \dot{\varepsilon}^2}$; $\Delta = 1\sqrt{2/\omega\mu_0\gamma_1}$ — глубина проникновения электромагнитного поля в проводник.

Составляющие напряженности магнитного поля из (2):

$$\dot{H}_x = -\frac{1}{j\omega\mu_0}\frac{\partial \dot{E}}{\partial y}, \qquad \dot{H}_y = \frac{1}{j\omega\mu_0}\frac{\partial \dot{E}}{\partial x}.$$

Постоянные $\dot{A}$, $\dot{C}$, β для каждой из частичных областей определяются из следующих граничных условий:

на границах с ферромагнитными поверхностями отсутствует касательная к границе составляющая $\dot{H}$;

на границах раздела частичных областей выполняются условия непрерывности искомой функции и ее производной к границе, т. е. в данной задаче $\dot{E}$ и $\dot{H}_x$;

в области рабочего зазора (V) на осях зубцов ($|x| = t_2/2$) отсутствует составляющая напряженности магнитного поля $\dot{H}_x$.

В частности, на границе частичных областей III и IV при $y = h_0 + h_1 + h_2$

$$\dot{H}_x = \begin{cases} \dot{\varphi}(x) & \text{при } |x| \leqslant b_{\text{ш}}/2, \\ 0 & \text{при } b_{\text{ш}}/2 < |x| \leqslant b_{\text{ш}}/2, \end{cases}$$

а на границе частичных областей IV и V при $y = h_0$

$$\dot{H}_x = \begin{cases} \dot{\psi}(x) & \text{при } |x| \leqslant b_{\text{ш}}/2, \\ 0 & \text{при } b_{\text{ш}}/2 < |x| \leqslant t_2/2, \end{cases}$$

где $\dot{\varphi}(x)$ и $\dot{\psi}(x)$ — граничные функции, определяемые в дальнейшем.

Удовлетворяем все граничные условия, за исключением условий непрерывности искомых функций $\dot{E}$ на границах областей III, IV и IV, V. Разлагая при этом граничные функции $\dot{\varphi}(x)$ и $\dot{\psi}(x)$ в ряды Фурье на $[-b_n/2, b_n/2]$ в области III, $[-b_{\text{ш}}/2, b_{\text{ш}}/2]$ в области IV, и с периодом $2t_2$ в области V, определяем постоянные в (5) и (6), в том числе:

— в областях I—III $\beta_n = 2n\pi/b_{\text{ш}}$, $n = 1, 2, 3, \ldots$;

— в области IV $\beta_l = 2l\pi/b_{\text{ш}}$, $l = 1, 2, 3, \ldots$;

— в области V $\beta_m = m\pi/t_2$, $m = 1, 3, 5, \ldots$.

Неизвестные граничные функции могут быть представлены в следующем виде:

$$\dot{\varphi}(x) = \dot{p}_0 + \sum_{i} \dot{p}_i \cos(\beta_i x); \qquad (7)$$

$$\dot{\psi}(x) = q_0 + \sum_i \dot{q}_i \cos(\beta_i x), \tag{8}$$

где $\beta_i = 2i\pi/b_ш$; $i = 1, 2, 3, \ldots$; p, q — коэффициенты, подлежащие определению

По закону полного тока, принимая положительное направление тока в проводнике, совпадающим с направлением оси z, имеем:

$$\int_{-b_ш/2}^{b_ш/2} \dot{\psi}(x)\, dx = -I,$$

где I — комплексное действующее значение тока проводника, откуда $\dot{p}_0 = -I/b_ш$.

Аналогично предыдущему получаем $\dot{q}_0 = p_0$. Подставив значения $\dot{p}_0$, $\dot{q}_0$ в (7) и (8), записываем граничные функции в виде:

$$\dot{\varphi}(x) = -\frac{\dot{I}}{b_ш}\left[1 + \sum_i P_i \cos(\beta_i x)\right]; \tag{9}$$

$$\dot{\psi}(x) = -\frac{\dot{I}}{b_ш}\left[1 + \sum_i Q_i \cos(\beta_i x)\right], \tag{10}$$

где $P_i = -\dot{p}_i b_ш/\dot{I}$ и $Q_i = -\dot{q}_i b_ш/\dot{I}$ являются действительными величинами, так как начальные фазы комплексов тока проводника $\dot{I}$ и коэффициентов $\dot{p}_i$, $\dot{q}_i$ одинаковы.

Подставив полученные постоянные и граничные функции в (5) и (6), можно записать напряженность электрического поля и производные величины в каждой частичной области. В частности, в области III

$$E_{III} = \frac{\dot{I}}{\gamma}\left[\frac{\operatorname{cth}(\xi h_1)}{\xi b_ш} + \frac{y - h_0 - h_1}{b_ш} + \right.$$

$$+ \frac{1}{\pi}\sum_n \frac{1}{n}\,\frac{\operatorname{ch}[\beta_n(y - h_0 - h_1)]\,[1 + (\beta_n/\alpha_n)\operatorname{th}(\beta_n h_0)\operatorname{th}(\alpha_n h_1)]}{\operatorname{sh}(\beta_n h_0)\,[1 + (\beta_n/\alpha_n)\operatorname{th}(\beta_n h_0)\operatorname{th}(\alpha_n h_1)]} +$$

$$+ \frac{(\alpha_n/\beta_n)\operatorname{sh}[\beta_n(y - h_0 - h_1)]\,[\operatorname{th}(\alpha_n h_1) + (\beta_n/\alpha_n)\operatorname{th}(\beta_n h_0)]}{+ (\alpha_n/\beta_n)\operatorname{ch}(\beta_n h_0)\,[\operatorname{th}(\alpha_n h_1) + (\beta_n/\alpha_n)\operatorname{th}(\beta_n h_0)]} \times$$

$$\left. \times \frac{\sin(\beta_n b_ш/2)}{\beta_n b_ш/2}\left[1 + \sum_i P_i \frac{(-1)^n}{1 - (\beta_i/\beta_n)^2}\right]\cos(\beta_i x)\right]. \tag{11}$$

В (11) с достаточной точностью можно принять под знаком суммы $\operatorname{th}(\alpha_n h_1) = 1$, что равносильно допущению $\exp(-2\alpha_n h_1) = 0$. Действительно, уже при $\xi = 0$, $h_1/b_ш = 1$ и $n = 1$ эта величина равна, при-

мерно, $3 \cdot 10^{-8}$. Тогда, после незначительных преобразований, введя новую переменную $y' = y - h_0$, убеждаемся, что величина $\dot{E}_{III}$, определяющая электромагнитные процессы в области $0 \leqslant y \leqslant h_0 + h_1 + h_2$, не зависит от величины h_0. Исходя из сказанного, в дальнейшем всюду принято $h_0 = 0$.

В остальных частичных областях:

$$\dot{E}_{II} = -\frac{\xi^2 I}{\gamma}\left\{\frac{\operatorname{ch}(\xi y)}{\xi b_ш \operatorname{sh}(\xi h_1)} + \right.$$

$$+\frac{1}{\pi}\sum_n \frac{1}{n}\,\frac{\operatorname{ch}(\alpha_n y)}{\operatorname{ch}(\alpha_n h_1)\left[\operatorname{sh}(\beta_n h_2) + (\alpha_n/\beta_n)\operatorname{ch}(\beta_n h_2)\right]} \times$$

$$\left.\times \frac{\sin(\beta_n b_ш/2)}{\beta_n b_ш/2}\left[1 + \sum_i P_i \frac{(-1)^i}{1-(\beta_i/\beta_n)^2}\right]\cos(\beta_n x)\right\}; \qquad (12)$$

$$\dot{E}_{IV} = C_\phi^{IV} + \frac{\xi^2 I}{\gamma}\left\{\frac{y}{b_ш} + \frac{1}{2\pi}\sum_l \frac{1}{l} \times \right.$$

$$\left.\times \frac{Q_l \operatorname{ch}\left[\beta_l (y - h_1 - h_2)\right] - P_l \operatorname{ch}\left[\beta_l (y - h_2)\right]}{\operatorname{sh}(\beta_l h_ш)} \cos(\beta_l x)\right\}; \qquad (13)$$

$$\dot{E}_V = C_\phi^V - \frac{\xi^2 I}{\gamma}\,\frac{2}{\pi}\sum_m \frac{1}{m}\,\frac{\operatorname{ch}\left[\beta_m (y - h_2 - z')\right]}{\operatorname{sh}(\beta_m z')}$$

$$\times \frac{\sin(\beta_m b_ш/2)}{\beta_m b_ш/2}\left[1 + \sum_i Q_i \frac{(-1)^i}{1-(\beta_i/\beta_m)^2}\right]\cos(\beta_m x). \qquad (14)$$

Легко проверить, что (11) — (14) удовлетворяют (3), (4) и условиям на границах.

Неизвестные пока коэффициенты граничных функций в (11) — (14) определяем методом Бубнова-Галеркина. С этой целью левые и правые части неиспользованных ранее условий непрерывности искомых функций $\dot{E}$ на границах областей III и IV (при $y = h_1 + h_2$) и IV, V (при $y = h_2$) умножаем на $\cos(2k\pi/b_ш)\,dx$ $(k = 1, 2, 3, \ldots, K)$, и интегрируем на $[-b_ш/2, b_ш/2]$. В результате получаем систему $2K$ линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов P_i, Q_i:

$$\frac{1}{k}\left[\frac{Q_k}{\operatorname{sh}(\beta_k h_ш)} - \frac{P_k}{\operatorname{th}(\beta_k h_ш)}\right] = \frac{1}{\pi}\sum_n \frac{1}{n}\,\frac{1 + (\alpha_n/\beta_n)\operatorname{th}(\beta_n h_2)}{\alpha_n/\beta_n + \operatorname{th}(\beta_n h_2)} \times$$

$$\times\left[\frac{\sin(\beta_n b_ш/2)}{\beta_n b_ш/2}\right]^2 \frac{(-1)^k}{1-(\beta_k/\beta_n)^2}\left[1 + \sum_i P_i \frac{(-1)^i}{1-(\beta_i/\beta_n)^2}\right]; \qquad (15)$$

$$\frac{1}{k}\left[\frac{Q_k}{\mathrm{th}\,(\beta_k h_{\text{ш}})}-\frac{P_k}{\mathrm{sh}\,(\beta_k h_{\text{ш}})}\right]=-8\sum_m\frac{1}{m}\,\mathrm{cth}\,(\beta_m s')\times$$

$$\times\left[\frac{\sin(\beta_m b_{\text{ш}}/2)}{\beta_m b_{\text{ш}}/2}\right]^2\frac{(-1)^k}{1-(\beta_k/\beta_m)^2}\left[1+\sum_l Q_l\,\frac{(-1)^l}{1-(\beta_l/\beta_m)^2}\right]. \qquad (16)$$

где $\beta_k=2k\pi/b_{\text{ш}}$; $k=1, 2, 3, \ldots, K$.

Полученные выражения дают возможность рассчитывать параметры паза: активное и индуктивное сопротивления проводника, удельные проводимости рассеяния и джоулевы потери. В частности, принимая, что потоки рассеяния и взаимоиндукции разделяет магнитная линия, касательная поверхности расточки статора в точке W на рис. 1 [5], полный поток рассеяния (включая поток рассеяния по головкам зубцов) можно характеризовать величиной $\dot{E}$ в этой точке.

Полное сопротивление проводника на единицу длины:

$$Z=R+j\omega L=\frac{1}{I}\dot{E}_{\text{V}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_{\text{п}}+s'}}.$$

где R и L — соответственно, активное сопротивление проводника и индуктивность от полного потока рассеяния на единицу длины.
Тогда полная удельная проводимость рассеяния (с точностью до постоянного слагаемого $\dot{C}_0^{\text{V}}$):

$$\Lambda_\Sigma=\frac{L}{\mu_0}=\frac{\gamma}{|\xi|^2}\,\mathrm{Im}\left\{\frac{1}{I}\dot{E}_{\text{V}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_{\text{п}}+s'}}\right\}. \qquad (17)$$

Найти значения постоянных слагаемых в решениях уравнения Лапласа для областей IV (13) и V (14) не представляется возможным. Однако постоянные C_0^{IV} и C_0^{V} могут быть исключены из рассмотрения, если в этих областях оперировать разностями значений $\dot{E}$ в пределах каждой частичной области в точках на границах областей. Тогда полная проводимость рассеяния паза

$$\Lambda_\Sigma=\frac{\gamma}{|\xi|^2}\,\mathrm{Im}\left\{\frac{1}{I}\left[\dot{E}_{\text{III}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_1+h_2}}+\left(\dot{E}_{\text{IV}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_{\text{п}}}}-\dot{E}_{\text{IV}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_1+h_2}}\right)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\left(\dot{E}_{\text{V}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_{\text{п}}+s'}}-\dot{E}_{\text{V}}\Big|_{\substack{x=0\\ y=h_{\text{п}}}}\right)\right]\right\}. \qquad (18)$$

Слагаемые в (18) не должны отождествляться с частичными проводимостями в том смысле, в каком это обычно понимается. Получаемая в результате подобного суммирования величина полной проводимости рассеяния точна в такой же степени, как если бы она определялась одной величиной в какой-либо характерной точке (например, в точке W

на рис. 1), так как на границах раздела частичных областей не принимались упрощающие допущения.

В таблице сопоставляются величины полной удельной проводимости рассеяния паза Λ_Σ, рассчитанные предлагаемым способом при $K=20$, и определенные в результате суммирования частичных проводимостей:

$$\Lambda_\Sigma = \Lambda_1 + \Lambda_\text{ш} + \Lambda_\text{г}, \qquad (19)$$

где Λ_1 — проводимость рассеяния области проводника (в числителе $\Lambda_1 = h_1/3b_0$, в знаменателе — значения Λ_1 аналогично [3] при $P_i = 0$); $\Lambda_\text{ш} = h_\text{ш}/b_\text{ш}$ — проводимость рассеяния по шлицу; $\Lambda_\text{г}$ — проводимость рассеяния по головкам зубцов по [1]; при $h_2 = 0$, $h_\text{ш}/h_\text{ш} = 2$, $b_\text{ш}/t_z = 0{,}05$.

Таблица

$\Lambda_\text{ш}$	$\frac{h_1}{b_\text{ш}}$	$\frac{b_\text{ш}}{b_\text{ш}}$	$\frac{h_1}{\Delta}$	Λ_1	$\frac{b_\text{ш}}{\Delta}$	$\Lambda_\text{г}$	Λ_Σ по (19)	Λ_Σ по (18)
2	1	0,1	0	$\frac{0{,}333}{0{,}959}$	1	0,331	$\frac{2{,}664}{3{,}29}$	3,276
					5	−0,045	$\frac{2{,}288}{2{,}914}$	2,9
			10	$\frac{0{,}333}{0{,}423}$	1	0,331	$\frac{2{,}664}{2{,}754}$	2,742
	10	1	0	$\frac{3{,}333}{3{,}333}$	1	0,331	$\frac{5{,}664}{5{,}664}$	5,664
					5	−0,045	$\frac{5{,}288}{5{,}288}$	5,288
			10	$\frac{3{,}333}{0{,}5}$	1	0,331	$\frac{5{,}664}{2{,}831}$	2,831

На рис. 2 приведены кривые распределения относительной величины составляющей напряженности магнитного поля $\overline{H}_x = H_x/(-I/b_\text{ш})$ вдоль линии $y = h_1 + h_2$. В случае полузакрытых пазов из (9) и (13)

$$\overline{H}_x = -\frac{\psi(x)}{I/b_\text{ш}} = 1 - \sum_i P_i \cos(\beta_i x). \qquad (20)$$

При $|x| = b_\text{ш}/2$ ряд в правой части (20) расходится, поэтому при ограничении числа его членов (например, 20, на рис. 2) значения $\overline{H}_x$ на стенке шлица должны толковаться как грубая оценка поведения функции вблизи границы.

Из зависимостей рис. 2 следует, что составляющая напряженности магнитного поля H_x в шлице заметно отличается от постоянной, даже в случае открытого паза. Это необходимо учитывать, в частности, при наличии в пазовом раскрытии магнитодиэлектрического клина.

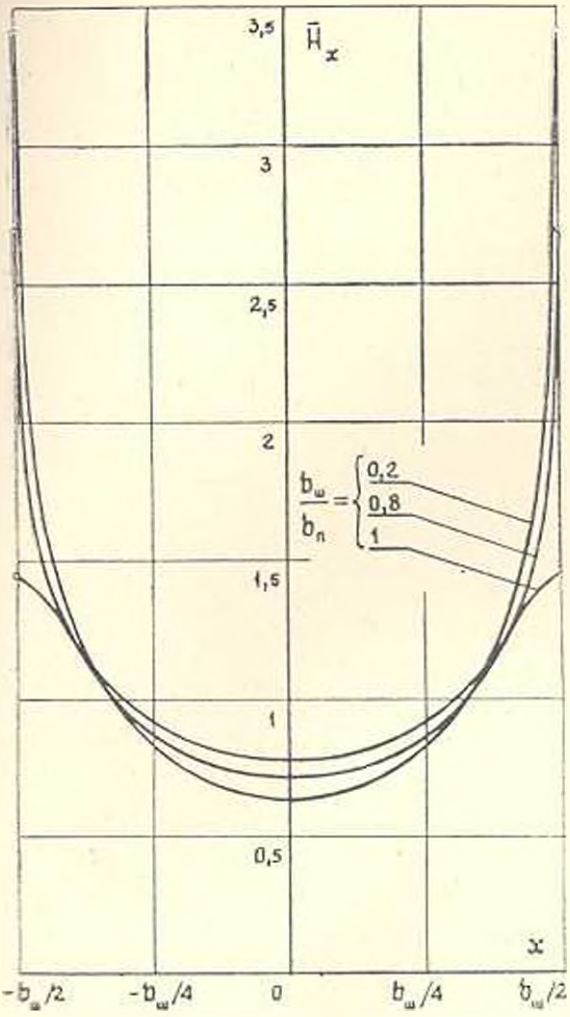


Рис 2. Зависимости $\bar{H}_x = f(x)$ при $h_ш/h_1=0{,}1$; $h_2=0$; $h_ш/b_ш=0{,}1$; $b_ш/t_z=0{,}05$; $b_ш/\delta'=3$; $h_1/\Delta=0$.

Вывод. Решение задачи собственного поля проводника в сложной кусочно-однородной области полузакрытого паза без каких-либо упрощающих допущений на границах раздела частичных областей, полученное в работе, может служить основой для алгоритма расчета электромагнитных параметров паза.

МАИ, ВНИИКЭ

Поступило 13.III 1978

Բ. Ս. ԶԵՉԻԽԻՆ, Հ. Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ

ՀՈՍ ՈՒՂՂԱՆԿՅՈՒՆ ՀԱՂՈՐԴԻՉՈՎ ԿԻՍԱՓԱԿ ՓՈՐԱՏԻ ՑՐՄԱՆ ԴԱՇՏԸ

Ամփոփում

Տրված է կիսափակ ուղղանկյուն փորատի էլեկտրամագնիսական դաշտի հետազոտության խնդրի լուծումը հաղորդիչի հոսանքի դուրսմղման հաշվառումով, որը թույլ է տալիս միանական ամբողջությամբ ստանալ փորատի ցրման դաշտը։ Խնդիրը լուծված է Ֆուրյեի մեթոդով, Բուբնով-Գալյորկինի մեթոդի օգտագործմամբ։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Данилевич Я. Б., Кулик Ю. А.* Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин. М.—Л., Изд. АН СССР, 1962.
2. *Swann S. A., Salmon J. W.* Effective resistance and reactance of a rectangular conductor placed in a semi-closed slot. Proc. Instn Electr. Engrs, 1963, v. 110, № 9, p. 1656—1662.
3. *Bahr K.* Zur Theorie der Stromverdrängung in einer Maschinennut von rechteckigem Querschnitt. Elektrotechnische Zeitschrift, 1965, Bd. A-86, H. 21, S. 689—695.
4. *Зечихин Б. С.* Электромагнитные поля в электрических машинах. МАИ, 1976.
5. *Бинс К., Лауренсон П.* Анализ и расчет электрических и магнитных полей. М., «Энергия», 1970.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտություններ, հատոր XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

С. А. САЛКЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Относительно вопросов оптимального частотного управления асинхронными позиционными электроприводами, по минимуму потерь в обмотках, существует ряд работ [1, 2], в которых задачи рассмотрены без учета электромагнитных явлений. В работе [3] установлено, что при частотном управлении асинхронными двигателями электромагнитные процессы оказывают существенное влияние на динамику электропривода. Следовательно, исследование оптимальных процессов при частотном управлении позиционными асинхронными двигателями с учетом электромагнитных процессов представляет интерес как с практической, так и с теоретической точки зрения.

Результаты этих исследований особенно важны для электропривода малых перемещений с большой частотой включения. Скорость вращения $АД$ у таких систем не достигает номинального значения, т. е. двигатель в основном работает в переходных режимах пуска и торможения. В таком режиме работы потери в обмотках достигают больших значений, поэтому частота включения, от которой зависит производительность установки, ограничивается. Минимизируя потери в обмотках двигателя, при позиционировании можно увеличить допустимую частоту включения $АД$, повышая тем самым производительность установки.

Динамика асинхронной короткозамкнутой машины при общеизвестных допущениях описывается нелинейными дифференциальными уравнениями [4], которая через вектор потокосцеплений имеет вид:

$$\begin{cases} \overline{U}_s = \alpha_s \overline{\Psi}_s - K_r \alpha_s \overline{\Psi}_r + D\overline{\Psi}_s + j\omega_k \overline{\Psi}_s; \\ 0 = \alpha_r \overline{\Psi}_r - K_s \alpha_r \overline{\Psi}_s + D\overline{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega)\overline{\Psi}_r; \\ D\omega = z_p m K_r [\overline{\Psi}_r \times \overline{\Psi}_s]/2JL_s - M_c/J; \\ D\vartheta = \omega, \end{cases} \tag{1}$$

где $K_r = L_m/L_r$, $K_s = L_m/L_s$, $\sigma = (L_s L_r - L_m^2)/L_s L_r$, $\alpha_s = R_s/L_s\sigma$, $\alpha_r = R_r/L_r\sigma$ — параметры асинхронного двигателя; z_p — число пар полюсов; m — число фаз; J — суммарный момент инерции двигателя и механизма, приведенный к валу двигателя; M_c — момент сопротивления;

φ и ω — угол поворота и скорость вращения двигателя; ω_k — скорость вращения координатной системы; $\overline{\Psi}_s$, $\overline{\Psi}_r$ — векторы потокосцепления обмотки статора и ротора, которые связаны с током обмотки выражением:

$$\begin{aligned} \overline{\Psi}_s &= L_s \overline{I}_s + L_m \overline{I}_r; \\ \overline{\Psi}_r &= L_m \overline{I}_s + L_r \overline{I}_r; \end{aligned} \tag{2}$$

$\overline{U}_s = U_m e^{j\gamma}$ — напряжение обмотки статора, где γ — угол поворота вектора $\overline{U}_s$ относительно координатной оси d

$$\gamma = \int_0^t (\omega_s / z_p - \omega_k)\, dt. \tag{3}$$

Функционал, который необходимо минимизировать, то есть суммарные электрические потери, определяется выражением

$$W_M = m \int_0^t |R_s (\overline{I}_s \cdot \overline{I}) + R_r (\overline{I}_r \cdot \overline{I}_r)|\, dt. \tag{4}$$

где $\overline{I}_s$, $\overline{I}_r$ — сопряженные векторы токов обмотки статора и ротора.

Учитывая, что $\overline{\Psi}_r = \Psi_r \cdot e^{j\gamma_{\Psi_r}}$, где Ψ_r — модуль вектора потокосцепления обмотки ротора, γ_{Ψ_r} — угол поворота вектора $\overline{\Psi}_r$ относительно координатной оси d, из (1) имеем:

$$\begin{aligned} \overline{\Psi}_s = \Psi_r e^{j\gamma_{\Psi_r}} / K_s + \Psi_r e^{j(\gamma_{\Psi_r} + \pi/2)} / K_s x_r + j \Psi_r \beta_{\Psi_r} e^{j\gamma_{\Psi_r}} / K_s x_r + \\ + j \Psi_r (\omega_k - \omega) e^{j\gamma_{\Psi_r}} / K_s x_r. \end{aligned} \tag{5}$$

С учетом (5) уравнение моментов в (1) примет вид:

$$D\omega = z_p m K_r (\Psi_r^2 \beta_{\Psi_r} / K_s x_r + (\omega_k - \omega) \Psi_r^2 / K_s x_r) / J \omega K_s - M_c / J. \tag{6}$$

Если координатную систему выбирать так, чтобы она вращалась со скоростью вращения вектора $\overline{\Psi}_r$, а направление оси d совпало с этим вектором, то с учетом (2) и (5) уравнение движения и функционал (4) примут вид:

$$\begin{aligned} D\omega &= c \Psi_r^2 \beta_{\Psi_r} - \dots; \\ D\gamma &= \omega; \\ W_M &= \int_0^t |a \Psi_r^2 + 2p \Psi_s \Psi_r + b \Psi_r^2 + b \Psi_r^2 \beta_{\Psi_r}|\, dt. \end{aligned} \tag{7}$$

где β_{Ψ_r} — скорость вращения вектора $\overline{\Psi}_r$ относительно ротора;

$$\mu_c = M_c/J; \qquad c = z_p m/2JR_r; \qquad a = mR_r/2L_m^2;$$

$$p = mR_sL_r/2R_rL_m^2; \qquad b = m(R_sL_r/L_m^2R_r^2 + 1/R_r)/2.$$

Имея оптимальные законы изменения $\Psi_r(t)$, $\beta_{\Psi_r}(t)$ и $\omega(t)$ с учетом (1), (3) и (5), можно определить любые легко контролируемые независимые переменные.

Таким образом, задача оптимального частотного управления с граничными условиями $\omega(0)=0$, $\varphi(0)=0$, $\omega(T)=0$, $\varphi(T)=\varphi_k$ (T—время позиционирования) сводится к задаче оптимального управления с управляющими параметрами Ψ_r и β_{Ψ_r}. Неизвестные параметры в (7) определяются из функций Лагранжа

$$F = a\Psi_r^2 + 2p\Psi_r\dot{\Psi} + b\dot{\Psi}_r^2 + b\Psi_r^2\beta_{\Psi_r} + \lambda_1(\dot{\varphi} - \omega) +$$

$$+ \lambda_2(\dot{\omega} - c\Psi_r^2\beta_{\Psi_r} + \mu_c) \tag{8}$$

(λ_1 и λ_2 — множители Лагранжа) уравнениями Эйлера:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial F}{\partial\dot{\varphi}} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial\omega} - \frac{d}{dt}\frac{\partial F}{\partial\dot{\omega}} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial\beta_{\Psi_r}} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial\Psi_r} - \frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial F}{\partial\dot{\Psi}} = 0. \tag{9}$$

Из (9) после соответствующих преобразований для параметра β_{Ψ_r} имеем:

$$\beta_{\Psi_r} = \lambda_2 c/2b. \tag{10}$$

Обычно приведенный момент сопротивления (M_c) является функцией скорости вращения двигателя, поэтому в общем случае для множителя Лагранжа λ_2 имеем дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами

$$\frac{d\lambda_2}{dt} - \lambda_2\frac{d\mu_c}{d\omega} + \lambda_1 = 0, \tag{11}$$

где λ_1 определяется из условия $\frac{d}{dt}\frac{\partial F}{\partial\dot{\varphi}} = 0$, откуда $\lambda_1 = \text{const}$.

Решение уравнения (11) имеет вид [5]:

$$\lambda_2 = e^{\int_0^t \frac{d\mu_c}{d\omega}dt}\cdot\left[\lambda_2(0) - \int_0^t \lambda_1 e^{-\int_0^t \frac{d\mu_c}{d\omega}dt}\,dt\right], \tag{12}$$

где $\lambda_2(0)$ — постоянная величина.

Относительно параметра Ψ_r из (9) получается линейное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами

$$\Psi_r'' + (i_{2c}^2/4b^2 - a/b)\,\Psi_r = 0, \qquad (13)$$

которое аналитически не решается [5].

Для решения уравнения (13) необходимо иметь два граничных условия. Так как двигатель запускается с неподвижного состояния, то $\Psi_r(0) = 0$. В качестве второго можно использовать условие трансверсальности в конце траектории, которое с учетом (8) примет вид:

$$p\Psi_r(T) + b\Psi_r'(T) = 0. \qquad (14)$$

Таким образом, задача оптимального частотного управления асинхронными позиционными электроприводами сводится к решению краевой задачи для дифференциальных уравнений (7) и (13), в которых неизвестные постоянные параметры $\Psi_r(0)$, i_1 и $i_{2c}(0)$ определяются из граничных условий с учетом (14).

Решение краевой задачи не представляет трудности и можно легко осуществить на ЦВМ одним из градиентных методов, в частности, методом Эйлера. При $M_c = 2{,}25$ *Нм*, $J = 0{,}25$ *кг·м²*, $\gamma_k = 125$, $T = 3{,}7$ *сек* для двигателя АИ-62, имеющего параметры: $L_m = 1{,}593 \cdot 10^{-2}$ *гн*, $L_2 = 1{,}668 \cdot 10^{-2}$ *гн*, $L_r = 1{,}66 \cdot 10^{-2}$ *гн*, $R_s = 0{,}054$ *ом*, $R_r = 0{,}072$ *ом*. Результаты решения задачи представлены на рис. 1

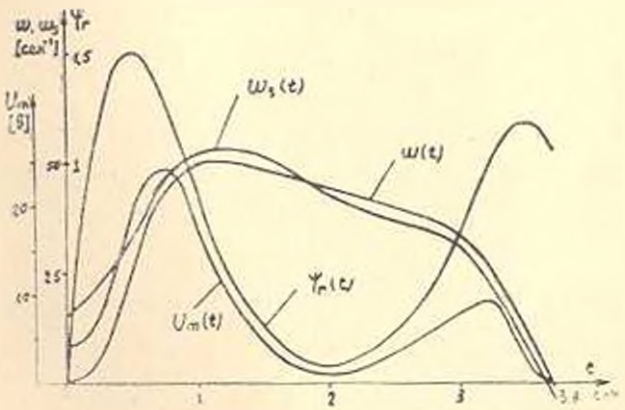


Рис. 1.

Нетрудно убедиться, что задача оптимального частного управления пуском *АД*, по минимуму активных потерь, является частным случаем позиционной задачи. Если на угол поворота ротора двигателя в конце процесса не поставить ограничения, то из условия трансверсальности $\frac{\partial F}{\partial \varphi}(T) = 0$ имеем $i_1 = 0$. При $M_c = \text{const}$ из (12) получим $i_{2c} = \text{const}$ и (13) превратится в известное уравнение [6]: $\Psi_r'' + A^2\Psi_r = 0$, где A — постоянная величина.

Если в (4) принять $R_3 = 0$, что равносильно условию $a = 0$, $p = 0$ в (7), получается задача оптимального частотного управления позиционным АД по минимуму потерь в обмотках ротора. При этом выражение (14) примет вид: $\Psi_r(T) = 0$, то есть, в конце процесса модуль вектора потокосцепления обмотки ротора достигает своего экстремального значения. Если учесть, что решение уравнения (13) имеет колебательный характер, а Ψ_r во время позиционирования должен быть положительным, то оказывается, что этот экстремум является точкой максимума. На рис. 2 приведены результаты решения этой задачи для двигателя А11-62 при $M_c = 0$, $\varphi_z = 30$, $T = 3{,}7$ *сек*.

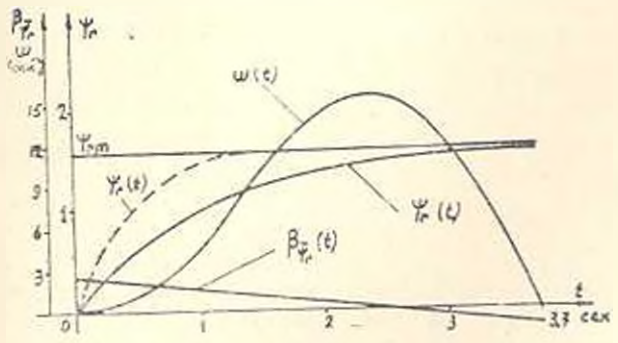


Рис. 2.

Из уравнения (7) и (13) видно, что для заданного T при увеличении φ_z увеличивается и $\Psi_r(t)$, следовательно, начиная с некоторого значения φ_z^* на Ψ_r необходимо поставить ограничение, так как в момент $t = T$ нарушается условие $\Psi_r(t) \leqslant \Psi_{rm}$, где Ψ_{rm} — максимальное значение модуля вектора потокосцепления. При $\varphi_z > \varphi_z^*$ оптимальный процесс $\Psi_r(t)$ аналогично [7] состоит из экстремала (пунктирные линии на рис. 2) и границы допустимой области Ψ_{rm}.

Если $\varphi_z \gg \varphi_z^*$, то в течение оптимального процесса практически потокосцепление должно принимать максимальное значение, что совпадает с результатами работы [2].

Таким образом, переход от (1) к (7) дает возможность значительно облегчить решение и получить достаточно простую методику для расчета оптимальных процессов по минимуму тепловых потерь в обмотках АД при позиционировании и пуске.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 16 V.1978

Ս. Ա. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

ՀԱՃԱԽԱԿԱՆԱՅԻՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ԴԻՐՔԱՅԻՆ ԱՍԻՆԽՐՈՆ ԷԼԵԿՏՐԱՀԱՂՈՐԴԱԿՆԵՐՈՒՄ ՕՊՏԻՄԱԼ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում բերված է կարճ միացված փաթույթով ասինխրոն շարժիչի օպտիմալ կառավարման դիրքային խնդրի լուծումը ցանկացած բեռի դեպքում լատ փաթույթներում նվազագույն ջերմային կորուստների, հաշվի առնելով էլեկտրամագնիսական պրոցեսները։ Ցույց է տրված, որ լատ օպտիմալության նույն չափանիշի բազարկման խնդիրը ուսումնասիրվող խնդրի մասնավոր դեպքն է։ Ճարտարված է նույն խնդրի լուծումը հագեցած շարժիչի համար, լատ ռոտորի փաթույթներում նվազագույն ջերմային կորուստների։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Саакян С. А.* Задача оптимального частотного управления асинхронными двигателями с фиксированным временем и закрепленным концом траектории. Межвуз. сб. науч. тр. «Автоматика и вычислительная техника», сер. XV, вып. II., Ереван, изд. ЕрПИ, 1976.
2. *Поляков Л. П., Шкловский Б. П., Кудринский П. А.* Оптимальное уравнение асинхронными позиционными электроприводами. «Электромеханика», 1976, № 3
3. *Листенгартен Б. А., Курдюков Ю. П., Зейналов Г. Б.* Вопросы оптимизации системы частотно-управляемого асинхронного электропривода в переходных режимах. Сб. «Асинхронный тиристорный электропривод». Свердловск, изд. УПИ, 1971.
4. *Старков С. В.* Переходные процессы в электрических цепях, содержащие машины переменного тока. М.—Л., Госэнергоиздат. 1960.
5. *Трикоми Ф.* Дифференциальные уравнения. М., «Наука», 1962.
6. *Шреинер Р. Т., Кривицкий М. Я.* Оптимальное по минимум потерь частотное управление асинхронным электроприводом в электромеханическом переходном процессе. «Электромеханика», 1975, № 1.
7. *Саакян С. А.* Оптимальное частотное управление асинхронным электроприводом с учетом электромагнитных переходных процессов и ограничений. Межвуз. сб. науч. тр. «Автоматика и вычислительная техника», сер. XV, вып. III. Ереван, изд. ЕрПИ, 1977.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. И. ЦАТУРЯН

О ДОЗИРОВАНИИ ПОРОШКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Удельный вес применения сыпучих и порошкообразных материалов увеличивается с развитием порошковой металлургии, радиотехники и электротехники, промышленности строительных материалов, химической и пищевой промышленности. В процессах по переработке сыпучих материалов (смесители, устройства для нанесения покрытий, измельчители и т. д.) дозирование является одной из основных операций. Удовлетворение требований, предъявляемых к операции дозирования, обеспечивает качество выпускаемой продукции и экономию сырья.

Основной метрологической характеристикой дозирования является его точность, которая обеспечивается применением соответствующих автоматических систем. Особо жесткие требования к точности дозирования предъявляются в непрерывных технологических процессах (изготовление порошковой проволоки, внесение металлических микродобавок при производстве медикаментов и комбикормов и т. д.).

Основным узлом дозирующего устройства является рабочий орган (питатель), состоящий из активных элементов, обеспечивающих перемещение материала. В качестве активных элементов, как правило, применяются движущиеся узлы (шнек, ленточный транспортер, сектор, тарель и т. д.) [1,2]. Движущиеся детали являются источником дополнительной (и вместе с тем непостоянной) погрешности и нестабильности режима работы дозирующего устройства в целом. В дозаторах с применением магнитного поля [3] изменение расхода сыпучего материала осуществляется рабочим органом с неподвижными узлами. Однако эти дозаторы пригодны для магнитных материалов, кроме того, при дозировании магнитным полем в материале остается остаточная намагниченность, что меняет свойства материала.

Ниже рассматривается возможность применения электрического поля в качестве рабочего органа дозирующих устройств.

В основе принципа работы подобного органа лежит явление отрыва и транспортировки частиц электрическим полем [4, 5]. Сущность дозирования сыпучих материалов путем отрыва частиц электрическим полем можно разъяснить на примере принципа работы устройства, схематический вид которого представлен на рис. 1. Сыпучий материал 1 подается в бункер 2, изготовленный из электроизоляционного материала. Продолжением бункера является канал с электроизоляционными стен-

ками 3, в котором сыпучий материал образует насыпь с углом естественного откоса. К верхней и нижней стенкам 3 канала установлены плоские электроды 4, подключенные к источнику 5 высокого напряжения переменного тока. Основание устройства снабжено подвижной опорой 6, при помощи которой изменяют угол наклона γ основания канала по отношению к горизонтальной плоскости.

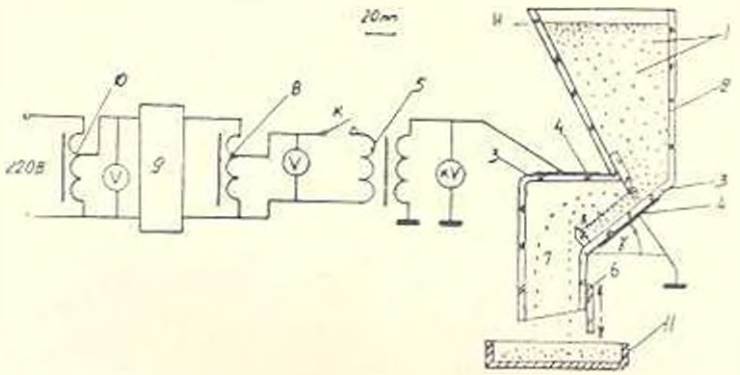


Рис. 1. Принципиальная схема устройства.

При подаче на электроды 4 напряжения в объеме канала возбуждается электрическое поле, максимальное значение которого имеет место на границе раздела «насыпь-воздух» (по линии AB естественного откоса). Под действием сильного поля частицы, лежащие на поверхности насыпи, заряжаются и, отрываясь по направлению нормали к электроду, стремятся к противоположному (верхнему) электроду. На оторванные частицы переменное электрическое поле действует также тангенциальной силой, под действием которой они удаляются от неподвижной насыпи к выпускному отверстию. На место частиц, оторванных от насыпи, из бункера свободным истечением поступают новые и откос насыпи остается без изменения. Стабильная насыпь материала с углом естественного откоса имеет место при наличии буртика 7 определенной высоты.

Результаты экспериментальных исследований дозирования сыпучих и порошкообразных материалов в электрическом поле показывают, что количество транспортируемых частиц (расход материала Q) определяется приложенным напряжением U, площадью S поверхности насыпи, конструкцией канала и физико-механическими свойствами материала. Эта связь может быть описана выражением типа

$$Q = K_1 K_2 S^{\alpha} U^{\beta}, \qquad (1)$$

где K_1, K_2—коэффициенты, зависящие от конструкции канала и физико-механических свойств материала; α и β— показатели, значения которых определяются многофакторной связью с вышеуказанными параметрами процесса и реализующего устройства.

Для транспортировки частиц, оторванных от вершин насыпи, нужно сообщить им больше энергии, чем частицам, оторванным у основания насыпи. Для этого канал выполнен с расширением к выходу, что усиливает поле у вершин насыпи и уменьшает столкновение частиц с верхней стенкой канала.

Исследование возможности применения электрического поля для дозирования материала проведено на устройстве, геометрические размеры которого указаны на рис. 1. Размер электродов в перпендикулярном к чертежу направлении составляет 185 *мм*. Для возбуждения электрического поля использован высоковольтный измерительный трансформатор 5 типа НОМ-10, подключенный к сети через автотрансформатор 8, стабилизатор напряжения 9 и автотрансформатор 10. Напряжение на электродах измерялось киловольтметром С96. В качестве объекта дозирования использовались порошковые материалы, в частности, железный порошок.

Исследование дозирования железного порошка в электрическом поле проводилось по следующей методике. При помощи автотрансформатора 8 на электродах дозирующего устройства устанавливалось определенное напряжение, заполнялся бункер железным порошком до фиксированного уровня H и включался ключ K на определенное время (от 10 *с* до 30 *с*—по случайной выборке). После истечения заданного времени ключ K отключался и взвешивался накопленный в приемнике 11 порошок. Для второго опыта бункер дополнялся до установленного уровня H, а напряжение на входе стабилизатора 9 изменялось автотрансформатором 10 в пределах $\pm 10\%$ при неизменном положении подвижного контакта автотрансформатора 8. Время второго опыта задавалось отличное от первого по шкале случайной выборки. Для каждого положения подвижного контакта автотрансформатора 8 было проведено 10 опытов с вариацией напряжения на входе стабилизатора 9 в пределах $\pm 10\%$ и времени действия электрического поля в пределах 10÷30 *с*. По весу материала и времени воздействия электрического поля определялся расход материала для десяти измерений с последующим их усреднением. Наибольшее отклонение из десяти измерений от среднего было принято в качестве характеристики качества дозирования, т. е. точности дозирования. Опыты проводились для напряжений от 5 *кВ* до 15 *кВ* (уровень напряжения устанавливался автотрансформатором 8) с шагом 1 *кВ* при пяти значениях угла γ.

Полученные результаты для железного порошка показаны на рис. 2 в виде зависимости расхода Q от приложенного напряжения U. Ход этой зависимости показывает, что $\frac{\partial Q}{\partial U} \leqslant 1$. Начальный участок характеристики $Q(U)$ всегда носит нестабильный характер (пунктирная часть кривых), что обусловлено неравномерным отрывом частиц с поверхности насыпи. С увеличением приложенного напряжения отрыв частиц становится массовым процессом и расход увеличивается. При дальнейшем повышении напряжения стартовая скорость частиц в момент отрыва увеличивается настолько, что частицы сталкиваются с верхней стенкой

канала и возвращаются к насыпи. Массовость процесса столкновения частиц с верхним электродом приводит к тому, что с увеличением приложенного к электродам напряжения расход практически не увеличивается. В интервале напряжений $(U_1 U_2$ при котором исключается нестабильный режим и режим массового столкновения частиц с верхним электродом, коэффициент β при прочих равных условиях определяется разностью $\gamma - \gamma_{кр}$, где $\gamma_{кр}$ — угол естественного откоса материала. При значениях $\gamma - \gamma_{кр}$, близких к нулю, $\beta = 1$. Для остальных случаев $\beta < 1$.

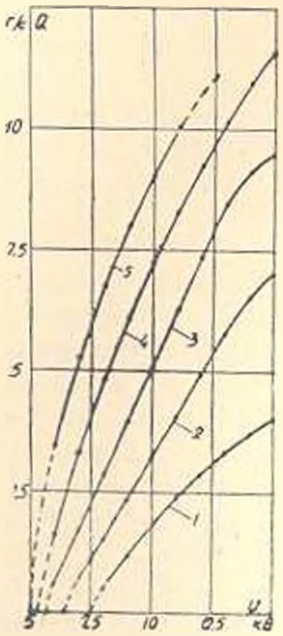


Рис. 2. Зависимость расхода материала от напряжения на электродах при различных углах нижнего электрода: $1 - \gamma = 36°$, $2 - \gamma = 38°$, $3 - \gamma = 40°$, $4 - \gamma = 42°$, $5 - \gamma = 44°$.

Из представленных на рис. 2 кривых линейность характеристики соблюдается для большого диапазона напряжений $\left(\frac{U_2}{U_1} \approx 2\right)$ при $\gamma \approx \gamma_{кр}$ (для использованного железного порошка $\gamma_{кр} \approx 38 \div 41°$).

Исследование принципа дозирования электрическим полем, проведенное для железного порошка и некоторых рудных материалов (по электрическим свойствам близким к полупроводникам), показывает, что для них можно установить режим дозирования, при котором линейность характеристики $Q(U)$ соблюдается для интервала напряжений $\frac{U_2}{U_1} = 2 \div 2.5$, причем, $\frac{Q_2}{Q_1} = 5 \div 10$. Этот экспериментальный результат указывает на то, что явление отрыва частиц с поверхности насыпи и их транспортировка электрическим полем может быть использовано для создания дозаторов без движущихся узлов.

В рассматриваемых экспериментах погрешность дозирования складывается из суммы четырех составляющих: стабилизации напряжения, его измерения, измерения времени и взвешивания. Нестабильность использованного стабилизатора составляет $\pm 0.5\%$. С учетом коэффициента трансформации высоковольтного трансформатора для кривой 3 при напряжениях более 8 $кВ$ погрешность дозирования от нестабильности напряжения составляет, приблизительно 2%. Точность измерения напряжения на низковольтной стороне трансформатора составляет $\pm 0.5\%$, а фиксирования длительности дозирования — $\pm 0.3\%$. Погрешность взвешивания на аналитических весах не превышает $\pm 0.1\%$. Таким образом, погрешность дозирования для условий эксперимента не должна выходить за пределы $1.1 \div 2.9\%$.

В таблице приведены максимальные отклонения веса материала от средних по десяти измерениям для экспериментов, результаты которых представлены на рис. 2. Фактическая точность для кривых 2 и 3 при напряжениях, соответствующих линейной части зависимости $Q(U)$, хорошо согласуется с ожидаемой точностью. Следовательно, наибольшая точность при дозировании электрическим полем по предлагаемому способу имеет место при угле наклона основания канала, равном углу естественного откоса материала ($\gamma = 38 \div 41°$) в интервале напряжений, где зависимость $Q(U)$ линейна. Кроме того, при установке нижнего основания канала под углом к горизонтальной плоскости, равным углу естественного откоса материала, обеспечивается интенсивное взаимодействие частиц с электрическим полем, так как при выполнении этого условия увеличивается рабочая поверхность насыпи и уменьшается расстояние последней от верхнего электрода.

Таблица

Фактическая погрешность дозирования в %

U, кВ / $\gamma°$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
36	—	—	15,3	8,11	5,47	4,39	3,86	3,94	4,16	4,81
38	—	6,15	1,93	1,56	1,51	1,42	1,29	1,54	2,49	3,56
40	9,35	3,41	1,86	1,23	1,11	0,72	0,58	0,95	2,56	5,62
42	7,23	4,96	3,53	3,12	2,46	2,05	3,87	3,94	4,31	5,59
44	4,81	3,92	3,11	4,61	4,43	—	—	—	—	—

Сравнивая величины составляющих суммарной погрешности дозирования, нетрудно заметить, что погрешность дозирования, в основном, определяется нестабильностью напряжения. Действительно, если при нестабильности напряжения, равной 0.5%, минимальная точность дозирования составляет 2.9%, то при нестабильности 0,1% минимальная точность дозирования не хуже 1%.

Таким образом, точность, предъявляемая процессу дозирования, можно обеспечить выбором соответствующей стабильности высокого напряжения. Отметим, что точность дозирования не ниже 2,5% без применения весоизмерительных средств регламентируется для многих технологических процессов [1]

Анализ полученных результатов указывает, что явление отрыва частиц с поверхности насыпи путем воздействия на нее переменного электрического поля можно использовать для дозирования проводниковых и полупроводниковых сыпучих материалов. При этом точность дозирования в конечном итоге определяется стабильностью возбуждающего электрическое поле напряжения. В частности, при применении схем стабилизации напряжения с нестабильностью 0.1% можно обеспечить регламентируемую для многих технологических процессов [1] точность дозирования.

АрмНИИМЭСХ

Поступило 25.X.1977

Ա. Ի. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ՓՈՇԻՆԵՐԻ ԴՈԶԱՎՈՐՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Դիտարկվում է սորուն նյութի լիտրաչափի մակընթացից էլեկտրական դաշտի միջոցով մասնիկների պոկման և տեղափոխման երևույթի կիրառման հնարավորությունը փոշիացված վիճակում գտնվող նյութերի դոզավորման համար։ Նկարագրվում է փորձնական հարմարանքը, որն իրականացնում է այդ հնարավորությունը։ Բերվում է երկաթի փոշու դոզավորման փորձերի արդյունքները, ինչպես նաև այդ պրոցեսի պարամետրերի փոխադարձ կապը ընդհանրացնող արտահայտությունը։ Ապացուցվում է, որ հարմարանքի լավագույն չափարանական բնութագրիչը տեղի ին ունենում, երբ հարմարանքի ներքևի էլեկտրոդը տեղակայված է հորիզոնական հարթության նկատմամբ սորուն նյութի բնական թեքության անկյանը հավասար անկյան տակ։ Պարզաբանվում է, որ այդ դեպքում նյութի ծախսի կախվածությունը էլեկտրոդներին կիրառված լարումից ուղղագծային է և որ դոզավորման սխալը հիմնականում պայմանավորված է էլեկտրոդների վրա լարման անկայունությունից։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Карпин Е. Б.* Средства автоматизации для измерения и дозирования массы. М., «Машиностроение», 1971, 469 с.
2. *Видинеев Ю. Д.* Автоматическое непрерывное дозирование сыпучих материалов. М., «Энергия», 1974. 118 с.
3. *Дозатор сыпучего магнитного материала.* Изобретение по авт. св. СССР № 391401 МКИ G01F 11/00. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1973, № 31.
4. *Лебедев Н. Н., Скальская И. П.* Сила, действующая на проводящий шарик, помещенный в поле плоского конденсатора. ЖТФ, т. XXXII, вып. 3, 1962, с. 375—378.
5. *Felici N. J.* Forces et charges de petits objects en contact avec une electrode a l'ecteo d'un champ electrique. „Rev. Gen. de L'Electricite", T. 65, 1956, № 10, p. 1145—1160.
6. *Зимон А. Д.* Адгезия пыли и порошков. М., «Химия», 1976. 432 с.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտություններ, հատոր XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

Дж. А. АВЕТИСЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО КЛАССА СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Современные системы энергоснабжения относятся к сложным системам с большим количеством элементов (источники, преобразователи и потребители энергии, устройства автоматического управления, защиты и т. д.), соединенных между собой сетью передачи и распределения энергии. Задачи синтеза подобных систем формулируются в виде таких многокритериальных задач оптимизации, которые трудно решать даже с помощью ЭВМ большой вычислительной мощности. Поэтому практически процесс синтеза осуществляется поэтапно с постепенным накоплением и последующим использованием информации о проектируемой системе.

На начальных этапах синтеза в первую очередь определяются структура и параметры системы. Под структурой понимается граф, характеризующий направленную передачу энергии от источников к преобразователям и от преобразователей к потребителям (стокам). К параметрам системы относятся показатели, характеризующие качество энергии в отдельных ветвях графа. Выбор структуры и параметров производится с учетом таких интегральных показателей системы как стоимость, масса, надежность и т. д.

Учитывая сложность решения многокритериальных задач оптимизации при неполной информации, в данной работе рассматривается однокритериальная задача оптимального выбора структуры и параметров с детерминированным характером критерия. В отличие от известных работ, например, [1] для решения используется метод динамического программирования, который достаточно универсален по отношению к таким свойствам задачи, как дискретность и непрерывность параметров, линейность и нелинейность функциональных связей [2, 3].

Класс рассматриваемых систем ограничивается следующими допущениями относительно их структуры и параметров. Все структурные элементы (узлы структурного графа системы) делятся на три группы: источники, преобразователи и потребители (стоки) энергии. Каждая группа имеет фиксированные иерархические уровни расположения элементов. На верхних уровнях располагаются источники, на средних — преобразователи и на нижних — стоки. Структурные связи между элементами учитывают лишь функциональную необходимость направленной передачи энергии от источников к преобразователям и от преобразовате-

лей к стокам. Структурные связи допускаются только между элементами, расположенными на разных, но соседних иерархических уровнях.

Структурные свойства реальных систем могут часто не соответствовать принятым допущениям. Так, например, благодаря автоматическим регуляторам или параллельной работе, возникают обратные или поперечные связи между элементами системы, которые не учитываются в рассматриваемой постановке задачи. Подобные несоответствия устраняются рассмотрением укрупненных структурных элементов. Например, вместо нескольких параллельно работающих электрических генераторов с регуляторами напряжения можно структурно рассматривать один эквивалентный источник электроэнергии. Таким образом, путем различной степени детализации и декомпозиции многие реальные системы могут рассматриваться в рамках допускаемых структур.

Параметры системы, характеризующие качество энергии, могут по физическому смыслу меняться как непрерывно (напряжение и т. д.), так и дискретно (число фаз и т. п.). Однако, в силу требований стандартизации и унификации непрерывные параметры также должны соответствовать определенным дискретным уровням. Поэтому можно предполагать, что все параметры являются дискретными и имеют конечное число допустимых значений.

С учетом принятых допущений задача синтеза структуры и параметров ставится следующим образом. Каждый структурный элемент может иметь конечное число вариантов, отличающихся друг от друга конструктивными решениями, параметрами и т. д. Исходя из функциональной равнозначности все варианты одного и того же элемента имеют на выходе одинаковое количество энергии заданного качества. Однако, питание отдельных вариантов может осуществляться различными видами энергии. Многовариантность отдельных элементов приводит к большому количеству возможных вариантов построения структуры и выбора параметров системы. Из возможного множества вариантов системы необходимо выбрать один или несколько так, чтобы минимизировать (максимизировать) значение целевой функции (критерия оптимальности).

Целевая функция является детерминированной, аддитивной и представляет сумму составляющих, определяющих долю отдельных элементов системы. Каждая составляющая является функцией выходной энергии или мощности элемента. Тогда целевая функция для системы с тремя иерархическими уровнями принимает следующий вид:

$$F=\sum_{i=1}^{n_{\text{и}}}\sum_{j=1}^{m_{\text{и}i}} f_{ij}^{\text{и}}(z_{ij})+\sum_{i=1}^{n_{\text{п}}}\sum_{j=1}^{m_{\text{п}i}} f_{ij}^{\text{п}}(y_{ij})+\sum_{i=1}^{n_{\text{с}}}\sum_{j=1}^{m_{\text{с}i}} f_{ij}^{\text{с}}(x_{ij}), \qquad (1)$$

где $n_{\text{и}}$, $n_{\text{п}}$, $n_{\text{с}}$ — соответственно, число источников, преобразователей и стоков; $m_{\text{и}i}$, $m_{\text{п}i}$, $m_{\text{с}i}$ — количество вариантов для i-го источника, преобразователя и стока; $f_{ij}^{\text{и}}$, $f_{ij}^{\text{п}}$, $f_{ij}^{\text{с}}$ — составляющие целевой функции для j-го варианта i-го источника, преобразователя и стока; z_{ij}, y_{ij},

x_{ij} — энергия (мощность) на выходе j-го варианта i-го источника, преобразователя и стока.

Условия реализуемости каждого элемента системы одновременно только в одном варианте можно получить, придав переменным z_{ij}, y_{ij}, x_{ij} буллевский смысл. Если вариант элемента реализован, то соответствующая переменная равна выходной мощности самого элемента. В противном случае она равна нулю. Следовательно, выходная мощность каждого элемента может рассматриваться как сумма выходных мощностей всех его вариатов, т. е.

$$\sum_{j=1}^{m_{\text{III}}} z_{ij} = z_i, \quad i = 1, \ldots, n_{\text{III}}, \quad z_{ij} = \{z_i, 0\}, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\text{II}}} y_{ij} = y_i, \quad i = 1, \ldots, n_{\text{II}}, \quad y_{ij} = \{y_i, 0\}, \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\text{C}}} x_{ij} = x_i, \quad i = 1, \ldots, n_{\text{C}}, \quad x_{ij} = \{x_i, 0\}, \tag{4}$$

где z_i, y_i, x_i — соответственно, энергия (мощность) на выходе i-го источника, преобразователя и стока.

Мощность на выходе элемента определяется как сумма мощностей, потребляемых на входе для тех вариантов элементов нижестоящего уровня, которые соединены с данным элементом. Потребляемая мощность на входе элемента для каждого варианта определяется через выходную с помощью соответствующего коэффициента полезного действия. Передача энергии по структурным связям от элемента к элементу предполагается без искажений и потерь, так как это может быть эквивалентно учтено в тех элементах, к которым направлены структурные связи. Тогда, вводя буллевы коэффициенты для структурных связей (1 при наличии и 0 при отсутствии), а также учитывая, что мощности на выходе стоков обычно известны, получим

$$z_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{II}}} \sum_{j=1}^{m_{\text{III}}} k^{\text{III}}_{i(ij)} q^{\text{II}}_{ij}(y_{ij}), \quad i = 1, \ldots, n_{\text{II}}, \quad k^{\text{III}}_{i(ij)} = \{1, 0\}, \tag{5}$$

$$y_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{C}}} \sum_{j=1}^{m_{\text{II}}} k^{\text{IIC}}_{i(ij)} q^{\text{C}}_{ij}(x_{ij}), \quad i = 1, \ldots, n_{\text{II}}, \quad k^{\text{IIC}}_{i(ij)} = \{1, 0\}, \tag{6}$$

$$x_i = a_i, \quad i = 1, \ldots, n_{\text{C}}, \tag{7}$$

где $k^{\text{III}}_{i(ij)}$ — коэффициент соединения i-го источника с j-м вариантом i-го преобразователя; $k^{\text{IIC}}_{i(ij)}$ — коэффициент соединения i-го преобразователя с j-м вариантом i-го стока; q^{II}_{ij}, q^{C}_{ij} — соответственно, энергия (мощность) на входе j-го варианта i-го преобразователя, стока, опре-

деленная как функция ресурсов на выходе; a_i — заданное значение мощности на выходе i-го стока.

Функции q_{ij}^{II} и q_{ij}^{C} являются непрерывными, монотонно возрастающими и выпуклыми вверх.

Характер этих кривых объясняется известным увеличением коэффициента полезного действия с ростом установленной мощности элемента энергетической системы, а также наличием в нем потерь даже при нулевой мощности на выходе.

Функции f_{ij}^{C}, f_{ij}^{II} и f_{ij}^{C}, дающие оценку вариантам элементов системы, фактически должны иметь характер кривых q_{ij} в силу известной закономерности уменьшения удельных показателей изделия с ростом его единичной мощности. С учетом дискретности стандартных шкал мощностей для отдельных элементов энергетических систем функции f_{ij} будут ступенчатыми. Здесь скачки имеют место не только в начале координат, но и при величинах выходных мощностей, равных дискретным значениям стандартной шкалы. Именно эти точки определяют выбор стандартного изделия для всех промежуточных значений мощностей. Следовательно, при дискретном изменении мощности элементов системы оценка элементов будет также дискретной, т. е.

$$f_{ij}^{\text{C}} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_{ij} = 0, \\ b_{ij}^1 & \text{при } 0 < x_{ij} \leqslant x_{ij}^1, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ b_{ij}^r & \text{при } x_{ij}^{r-1} < x_{ij} \leqslant x_{ij}^r, \end{cases} \tag{8}$$

где $b_{ij}^1, \ldots, b_{ij}^r$ — постоянные значения функции для указанных диапазонов изменения мощности; r — количество дискретных точек шкалы мощностей, охватывающих максимально возможный диапазон изменения мощности элемента; $x_{ij}^1, \ldots, x_{ij}^r$ — значения мощностей по стандартной шкале.

Выражения, аналогичные (8), можно записать для всех составляющих целевой функции системы. Таким образом, функции f_{ij} (так же, как и q_{ij}) считаются для каждого варианта отдельного элемента известными и заданными в общем случае дискретным способом. В первом приближении или при большой частоте дискретных точек в стандартных шкалах ступенчатые функции могут быть аппроксимированы непрерывными монотонно возрастающими функциями.

В результате задача синтеза получает следующую формулировку: найти значения z_{ij}, y_{ij}, x_{ij} для всех i и j, доставляющие мин (макс) F при выполнении условий (2)—(7) и заданных функциях f_{ij}, q_{ij}, значениях постоянных коэффициентов $k_{i(ij)}$ и a_i для всех i и j.

Данная задача относится к классу комбинаторных задач дискретного программирования и имеет практический смысл для оптимизации структуры и параметров энергосистемы по таким критериям как стоимость или масса. Критерии вероятностной структуры, например, надеж-

ность, в данной постановке могут быть учтены лишь косвенно путем ограничений на множество допустимых вариантов структуры или параметров системы или введением коэффициентов резервирования по числу элементов или его мощности.

В [4] показано, что при многоэтапной трактовке процесса синтеза в соответствии с иерархической структурой системы выражение (1) приводится к виду

$$F = F^{\mathrm{C}}(\bar{x}) - F^{\mathrm{II}}[\bar{y}(\bar{x})] + F^{\mathrm{II}}[\bar{z}(\bar{y})], \tag{9}$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ — векторы, определяемые как

$$\bar{x} = (x_{ij}) \in D_x, \quad i = 1, \ldots, n_{\mathrm{C}}, \quad j = 1, \ldots, m_{\mathrm{C}i};$$

$$\bar{y} = (y_{ij}) \in D_y, \quad i = 1, \ldots, n_{\mathrm{II}}, \quad j = 1, \ldots, m_{\mathrm{II}i};$$

$$\bar{z} = (z_{ij}) \in D_z, \quad i = 1, \ldots, n_{\mathrm{II}}, \quad j = 1, \ldots, m_{\mathrm{II}i};$$

D_x, D_y, D_z — счетные (конечные) множества векторов, определяемые, соответственно, условиями (4) и (7), (3) и (6), (2) и (5). Тогда процесс минимизации (максимизации) F можно записать как уравнение

$$\min F = \min_{\bar{x}} \{F^{\mathrm{C}}(\bar{x}) - \min_{\bar{y}} [F^{\mathrm{II}}(\bar{y}) + \min_{\bar{z}} F^{\mathrm{II}}(\bar{z})]\}, \tag{10}$$

которое относится к классу функциональных уравнений Р. Беллмана.

Таким образом, сформулированная выше задача синтеза может быть преобразована к задаче динамического программирования при достаточно слабых предположениях о свойствах F (однозначность определения по параметрам оптимизации и ограниченность по величине на замкнутом множестве параметров). Переход к задаче динамического программирования позволил для автономных электросистем построить простые алгоритмы решения в линейном приближении, апробированные на конкретных примерах [4]. Аналогичный подход можно распространить на энергосистемы более сложной структуры с элементами различной физической природы (электрические, тепловые, гидравлические и т. д.), если задача синтеза тем или иным образом может быть сведена к рассматриваемому классу систем.

Заключение. Задачи оптимизации структуры и параметров систем энергоснабжения с учетом условий стандартизации и унификации можно сформулировать в виде комбинаторных задач дискретного программирования. Последние с помощью анализа иерархической структуры систем преобразуются к задачам динамического программирования, терминология которого позволяет разбить исходную задачу на ряд взаимосвязанных, но более простых задач, которые легко решаются известными методами.

Поступило 3.X.1977

Ջ. Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ԷՆԵՐԳԱՄԱՏԱԿԱՐԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՄԻ ԴԱՍԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՒ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՕՊՏԻՄԻԶԱՑՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Ուսումնասիրվում է էլեմենտների տեղադրման աստիճանական կառուցվածքով էներգամատակարարման համակարգերի դասակարգը։ Կառուցվածքի օպտիմիզացման խնդիրներն ու այդպիսի համակարգերի պարամետրերը (չափերը) ձևակերպվում են դինամիկ ծրագրավորման տերմիններով։ Դա թույլ է տալիս ելակետային խնդիրը բաժանել մի խումբ փոխադարձ կապված, սակայն ավելի պարզ խնդիրների, որոնց լուծումը կատարվում է հայտնի մեթոդներով։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лазарев И. А.* Синтез структуры систем электроснабжения летательных аппаратов. М., «Машиностроение», 1976. 256 с.
2. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования. М., «Наука», 1965. 460 с.
3. *Аветисян Дж. А., Соколов В. С., Хан В. Х.* Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М., «Энергия», 1976. 208 с.
4. *Аветисян Дж. А.* О синтезе электрических систем. «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», 1978, № 2.

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXXI, № 6, 1978 Серия технических наук

ГИДРАВЛИКА

И. Н. ДОРОХОВ, В. В. КАФАРОВ, В. Т. ТУЧИН, Л. Л. ГОРБАЦЕВИЧ
А. В. ТАТЕВОСЯН

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ДИАГРАММ СВЯЗИ

В настоящее время находит все более широкое применение и использование направленных графов (или точнее орграфов) в синтезе САУ [1—3]. Однако, на наш взгляд, этот сильный и эффективный метод обладает некоторыми ограничениями:

1. Возможности его ограничены синтезом линейных САУ.

2. Трудность построения сигнальных графов, для чего необходимо иметь либо уравнение САУ, либо пытаться строить граф по принципиальным и структурным схемам САУ, что представляет собой известную сложность и требует определенных навыков.

3. Процедура синтеза обладает весьма слабым формализмом, который не позволяет задачу синтеза САУ проводить автоматизированно.

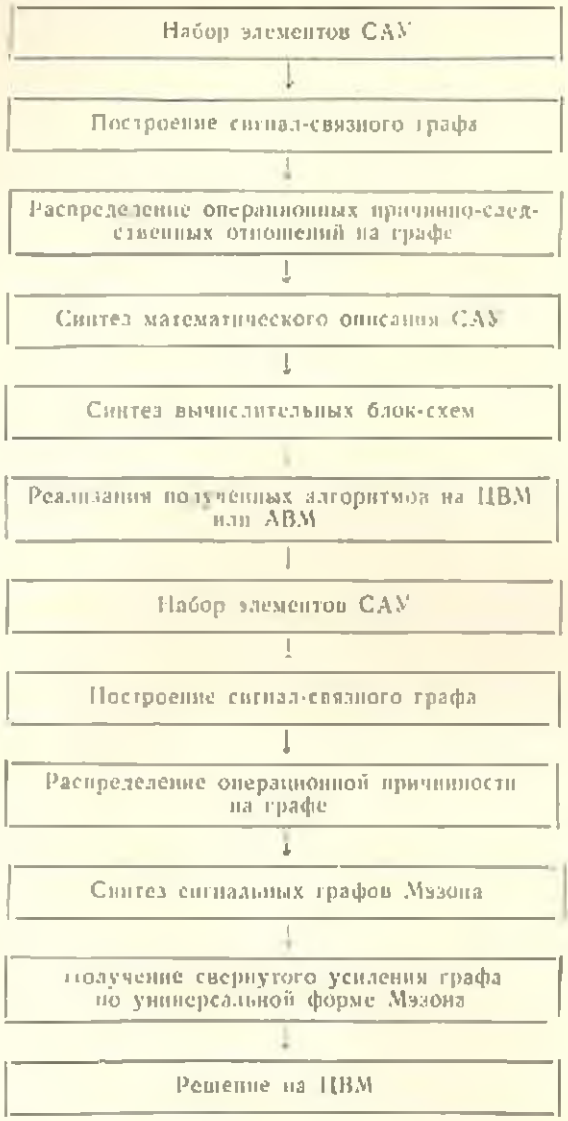
Между тем, существует метод комбинированной топологии, который позволяет снять вышеперечисленные ограничения метода орграфов (К-графов). Таким методом является развиваемый здесь принцип построения сигнал-связных графов (или диаграмм) [4—6].

Основными достоинствами этого метода являются сравнительная простота и наглядность перехода от рассматриваемого физического объекта (или элемента САУ) к его сигнал-связному графу, полный формализм в получении математического описания САУ и сигнальных графов линейных систем.

С помощью этого метода могут решаться следующие задачи:

а) синтез САУ; б) получение математического описания САУ заданной структуры.

Здесь и далее рассматривается задача второго рода, т. е. задача получения математического описания системы автоматического управления заданной структуры. Причем, метод сигнал-связных графов пригоден как для линейных, так и для нелинейных систем управления и может быть использован двояко:



Как видно из приведенных примеров (рис. 1—2), столь подробное математическое описание элементов САУ даст возможность специалистам промоделировать отдельные узлы САУ подробным образом и получить динамические характеристики узлов, выявить отдельные их элементы, неэффективные с точки зрения динамических свойств. Это позволит вплотную подойти к решению задачи оптимального проектирования узлов САУ.

Однако, при решении задачи синтеза математического описания физико-химических систем (ФХС), в состав которых могут входить системы автоматического управления, выгодно отвлечься от столь подробного изображения САУ и попытаться построить обобщенное (свернутое) топологическое изображение САУ ФХС.

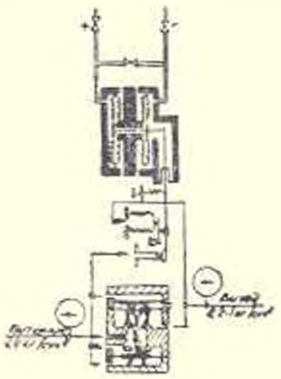
В автоматике принято входной величиной регулятора изображать отклонение измеряемого параметра от заданного его значения ($\Delta\varphi$). Выходом же регулятора всегда является положение регулирующего органа, в качестве которого берутся:

$$g(t) - g(t_0) = \int_{t_0}^{t} V dt$$

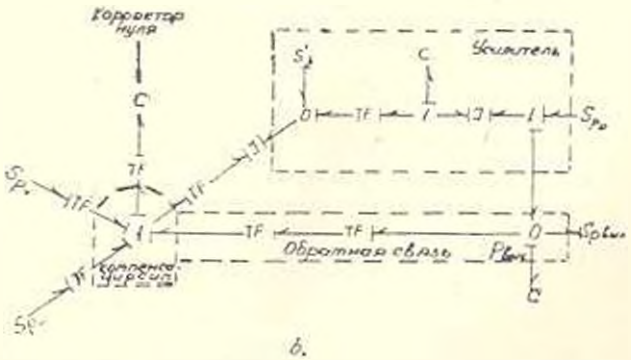
или

$$\vartheta(t) - \vartheta(t_0) = \int_{t_0}^{t} \omega dt,$$

где ω, V — угловая и линейная скорости перемещения регулирующего органа; $\vartheta(t)$, $g(t)$ — угловое и линейное перемещения.



а

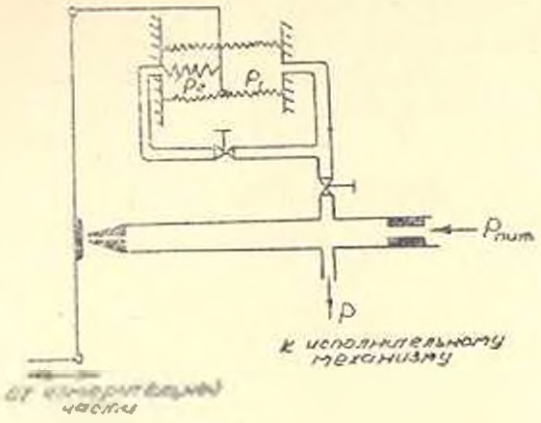


б

Рис. 1. Бесшкальный дифманометр (датчик) ДМПК-100:
а) принципиальная схема; б) диаграмма связи.

Если таковые брать в качестве f-переменных, то получим новую псевдоэнергетическую связь:

$$\frac{\Delta\Phi}{g(t)}; \qquad \frac{\Delta\varphi}{\vartheta(t)}.$$



а.

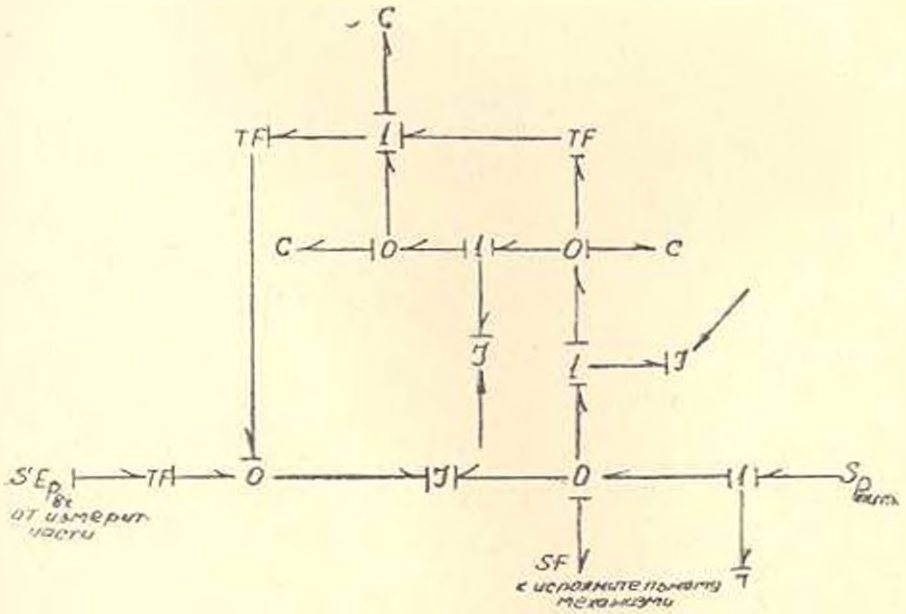


Рис. 2. ПИД-регулятор, построенный на принципе компенсации перемещений: а) принципиальная схема; б) диаграмма связи.

Наличие такой связи позволит решить некоторые вопросы получения обобщенных топологических изображений ТАУ ФХС.

Общее описание регулятора (структурное изображение регулятора)

1. Чувствительный элемент (источник измеряемого параметра):

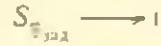
$$S_{q_{изм}} \longrightarrow$$

2. Преобразователь

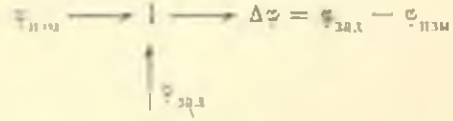
$$\longrightarrow \overset{m}{TF} \longrightarrow$$

Модуль преобразователя m определяется конкретным видом физической реализации преобразователя.

3. Задатчик (источник заданного параметра):

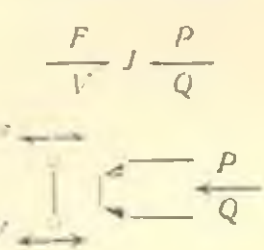


4. Элемент сравнения:



5. Управляющий элемент (регулятор):

сопло-заслонка



Управляющие элементы регуляторов, различных по физической реализации, осуществляют одни и те же законы регулирования. Получение связанных графов этих устройств является сложным. Тогда с целью простоты можно выделить три типа управляющего элемента:

а) пропорциональное — $\frac{\Delta\varphi}{g(t)}R$; б) интегральное — $\frac{\Delta\varphi}{g(z)}J$; в) дифференциальное — $\frac{\Delta\varphi}{g(t)}C$.

В качестве f-переменной берется $g(t)=\int Vdt$ — перемещение регулирующего органа системы:

Управляющее устройство + Исполнительный механизм + Регулирующий орган.

В этом случае все связи—псевдоэнергетические.

Тогда на основании проведенных рассуждений получим диаграммы связи П, ПИ и ПИД—регуляторов (рис. 3). Моделирующий алгоритм ПИД-регулятора, синтезированный по диаграмме связи, дан на рис. 4.

Рассмотрен процесс гидродинамики фонтанирующего слоя как ФХС и САР расхода газа на входе в аппарат, построена диаграмма связи (рис. 5), которая однозначно описывает структуру ФХС. На основании данной диаграммы в дальнейшем можно получить канонические уравнения.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Использование метода диаграмм связи позволяет эффективно проводить синтез математического описания элементов САР и САУ.

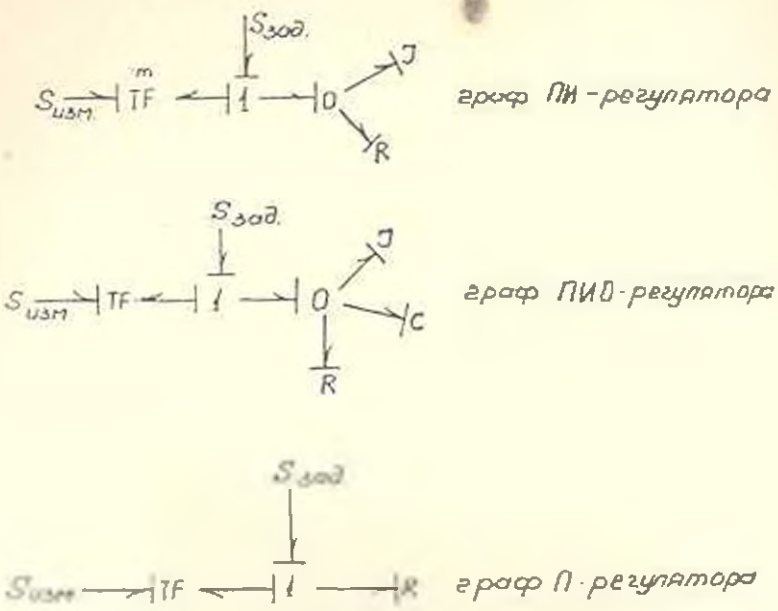


Рис. 3. Диаграммы связи П, ПИ и ПИД регуляторов.

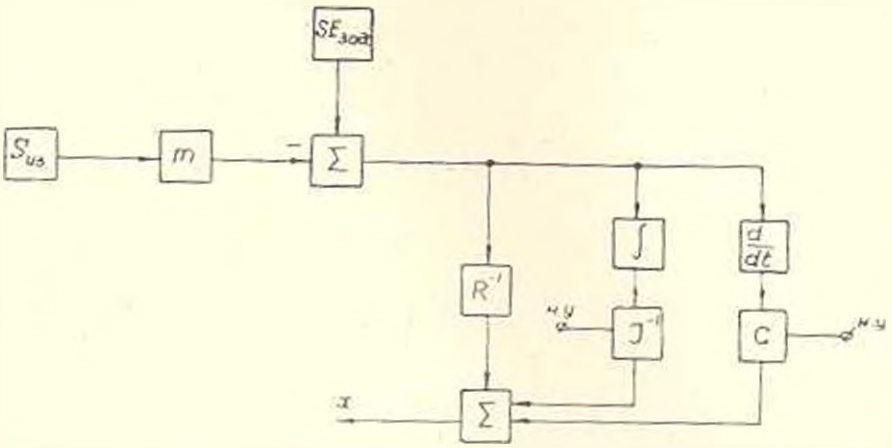


Рис. 4. Моделирующий алгоритм ПИД-регулятора, синтезированный по диаграмме связи.

2. Осуществление подробного математического описания элементов САУ на основании метода диаграмм связи позволяет вплотную подойти к вопросу их оптимального проектирования.

3. На основании предложенной новой псевдоэнергетической связи построены обобщенные (свернутые) топологические изображения регуляторов.

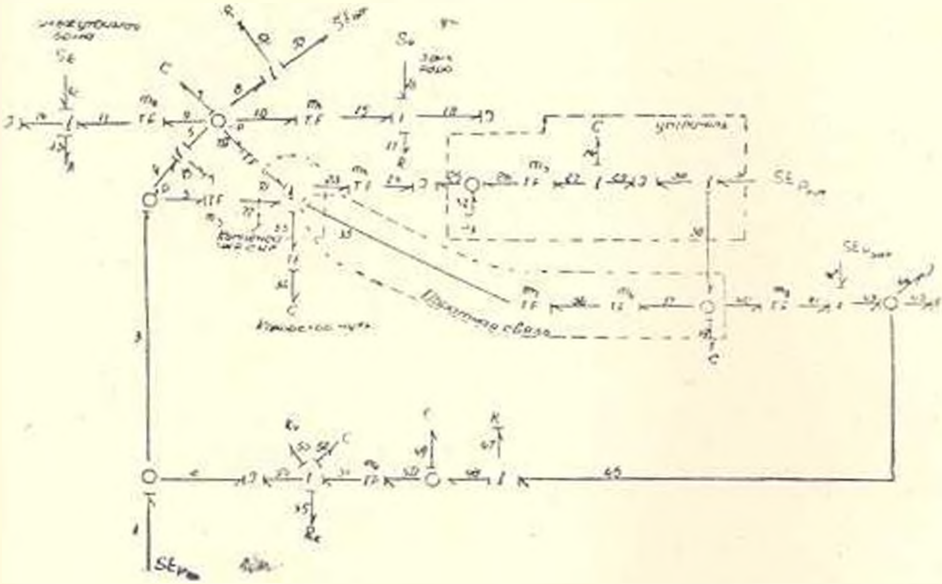


Рис. 5. Диаграмма САР расхода газа, поступающего в аппарат фонтанирующего слоя.

4. Решена задача построения диаграмм связи ФХС гидродинамики фонтанирующего слоя, в состав которой входит САР расхода газа на входе в аппарат.

НПО «Пластполимер» Поступило 19.IX.1978

Ի. Ն. ԴՈՐՈԽՈՎ, Վ. Վ. ԿԱՖԱՐՈՎ, Վ. Ն. ՏՈՒՉԻՆ,
Լ. Լ. ԴՈՐՐԱՑԵՎԻՉ, Ա. Վ. ԹԱՐԽԱՆՅԱՆ

ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՆԿԱՐԱԳՐՄԱՆ ՍԻՆԹԵԶԸ ԿԱՊԻ ԴԻԱԳՐԱՄՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում հիմնականում դիտվում է կապի դիագրամային մեթոդի օգտագործումը «САР» և «САУ» համակարգերի էլեմենտների մաթեմատիկական սինթեզի համար, որը հնարավորություն է տալիս իրագործել նրանց օպտիմալ նախագծումը: Ստացված են կարգավորիչների տիպային նկարագրությունները, որոնք օգտագործվում են շատրվանային շերտի հիդրոդինամիկայի ֆիզիկաքիմիական համակարգի կապի դիագրամի կառուցման համար, որը իր կազմի մեջ պարունակում է ապարատ մտնող գազի ծախսի ավտոմատ համակարգը:

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мэзон С., Циммерман Г.* Электронные цепи, сигналы и системы. М., ИЛ. 1963. 619 с.
2. *Райцын Т. Р.* Аналоговые вычислительные устройства в автоматике. М.—Л., «Энергия», 1965. 88 с.
3. *Берж К.* Теория графов и ее применение. М., ИЛ. 1962. с. 6—180.
4. *Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Горбацевич Л. Л.* Труды МХТИ им. Д. И. Менделеева, вып. 79, 1974. с. 131—136.
6. *Горбацевич Л. Л.* Автореферат кандид. дисс. МХТИ им. Д. И. Менделеева. 1975. 25 с.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

«ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԱ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ (տեխնիկական գիտությունների սերիա)» հանդեսի 31-րդ հատորի

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Ա. Ա. Ալեքսանյան: [illegible] . 2—8

Գ. Խ. Ավանեսով, Ռ. Ռ. Խաչատրյան: [illegible] . 2—21

Ս. Ա. Համբարյան, Վ. Ի. Վասիլև, Ա. Կ. Գալստյան: [illegible] 1—11

Վ. Ա. Խոմյակով: [illegible] . 1—3

Մ. Վ. Կասյան, Հ. Բ. Բաղդասարյան, Ռ. Ա. Փարսադանյան: [illegible] 2—3

Ա. Ռ. Կարապետյան: [illegible] . 2—23

Ս. Ռ. Կարապետյան: [illegible] . 3—13

Հ. Ա. Հովհաննիսյան, Կ. Խ. Նահրադյան: [illegible] . 4—3

Ռ. Է. Հայրիկյան, Կ. Ա. Մնացյան: [illegible] . 6—10

Լ. Մ. Մխոյան: [illegible] . 4—9

Ռ. Գ. Չախոյան: [illegible] . 1—12

Մ. Կ. Սասունյան: [illegible] . 5—3

Հ. Ռ. Սարգսյան: [illegible] . 6—15

Ն. Վ. Օլեյնիկ, Մ. Գ. Սահակյան, Ս. Հ. Դադայան: [illegible] . 3—8

Ն. Վ. Օլեյնիկ, Ս. Գ. Սահակյան: [illegible] . 6—3

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Ա. Կ. Սրապյան: [illegible] 2—31

Ռ. Գ. Ասատրյան: [illegible] . 5—26

Ջ. Ա. Ախվերդյան: [illegible] . 6—41

Հ. Բ. Ազոյան, Գ. Ս. Միրզոյան: [illegible] . 3—3

Դ. Մ. Բարսյան, Ա. Ա. Բաբաջանյան, Ա. Ի. Դուբինսկի, Ա. Ֆ. Դյակով. *Բարդ համակարգերի հուսալիության հաշվարկի մեթոդը ստոխաստիկ գրաֆների անալիզի միջոցով* . . . . 2—43

Մ. Ա. Բոյաջեկյան, Դ. Ա. Խաչատրյան։ *Դեկոմպոզիցիայի մեթոդով կայունացված ռեժիմների հավասարումների՝ Նյուտոնի ձևափոխման եղանակով լուծման դեպքում ալգորիթմական փորձնական հետազոտումը* . . . 4—29

Ա. Վ. Թեմուրյան։ *Զարգացող էներգահամակարգերի կառուցվածքի օպտիմալացման ժամանակ հանդիպող մի խնդրի լուծման զուգամիտության հետազոտությունը* 1—51

Վ. Ս. Խաչատրյան, Ա. Վ. Թեմուրյան, Մ. Ա. Բոյաջեկյան, Յու. Ա. Ղազարյան, Խ. Դ. Պետրոսյան, Ջ. Ս. Բոյաջանյան։ *Մեծ էներգահամակարգերի ընդգրկուն մեկ մաթեմատիկական մոդելի կառուցման մասին* . . . . . . 3—7

Դ. Ս. Հովհաննիսյան։ *Երկարատև էլեկտրամեխանիկական անցողիկ պրոցեսների հաշվարկի մեթոդիկա հավասարումների դիագնոստիկայով՝ ըստ պարամետրերի փոփոխման էականության հատկանիշների* . . . . 4—23

Ա. Ա. Ղարիբյան, Ն. Մ. Սահակյան, Կ. Ս. Սարգսյան։ *Կայունացված ռեժիմների հետազոտումը 35 կՎ և բարձր լարման ցանցերում* . . . . . 4—31

Ս. Ս. Մանուկյան, Ջ. Հ. Աբրահամյան, Ա. Գ. Բոյաջյան։ *Օդի կուտակման էլեկտրակայանի վառելիքային չափավորության որոշման ալգորիթմը* . . . 1—60

Ի. Ի. Նազարյան։ *Բարդ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի հաշվման ալգորիթմը* . . . . 5—15

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

Վ. Վ. Ալեքսեևսկի, Ա. Ա. Թերզյան, Է. Ս. Յոնջիբաշյան։ *Էլեկտրական մեքենաներում էլեկտրամագնիսական պրոցեսների մոդելավորման մեթոդների մասին* . 4—14

Է. Մ. Դիլանյան, Վ. Ս. Վարդանյան, Հ. Հ. Մովսիսյան, Ա. Գ. Տատևոսյան։ *Միկրոմոդուլյատորային մարտկոց-ինվերտորային կերպափոխիչ-հաստատուն հոսանքի շարժիչ համակարգի մաթեմատիկական մոդելը* . . . . 3—16

Ի. Ս. Չեքմոնի, Հ. Ա. Թերզյան։ *Հոսանքի ուղղանկյուն հաղորդիչով կիսափակ փորակի ցրման դաշտը* . . . .

Ա. Ի. Սարուրյան։ *Էլեկտրական դաշտի միջոցով փոշիների դոզավորման մասին* . 6—20

Ի. Մ. Սամվելյան, Լ. Ա. Տոնոյան։ *Ֆեռոմագնիսական գնդաձև էկրանի մագնիսական դիմադրության հաշվարկը* . . . . 3—21

Ն. Ի. Յանգել, Ն. Դ. Նիկիյան։ *Մագնիսական դաշտը ստատորի եզրային տեղամասում հանված ռոտորի ժամանակ* . . . . 1—45

Ս. Ա. Սանոսյան։ *Համախականային կառավարման ժամանակ դիրքային ասինխրոն էլեկտրահաղորդակներում օպտիմալ պրոցեսների հետազոտումը* . . . 6—29

ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ

Ռ. Ս. Ռաֆայելյան, Դ. Ի. Ղազարյան, Ա. Մ. Միրզոյան, Ա. Ն. Չեռնիխովա։ *Օպտիմիզացիայի ինքնահարմարվող պրոցեդուրա էջում տատանվող օղակ ունեցող ոչ-գծային օբյեկտների համար* . . . . 5—59

ՋԵՐՄԱՏԵԽՆԻԿԱ

Ռ. Լ. Ամիրյան, Վ. Կ. Կարապետյան, Հ. Վ. Կարապետյան։ *Ատոմային էլեկտրակայանի մաթեմատիկական մոդելը* . . . . 5—65

ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱ

Վ. Ա. Համբարձումյան։ *Նախալարված ծածկի ոլորանակային կոնստրուկցիայի նախագծումը հիմնական համախառնության տրված արժեքի դեպքում* . . . 1—[illegible]

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱ

Ս. Ա. Անանյան, Ժ. Ա. Աբոյան, Ա. Ն. Ասանյան. *Հողերում ֆիլտրացիոն հոսքով մասսափոխանակման պրոցեսների հետազոտման մի քանի արդյունքների մասին* . 1—40

Ժ. Ա. Աբոյան: *Հիդրոդինամիկայում մասսափոխանակման մի քանի հարցերի մասին ֆիլտրացիոն միջավայրում* . . . . 1—37

Ի. Ե. Իսրաֆիլով, Վ. Վ. Սաֆարով, Վ. Տ. Տուչին, Լ. Լ. Պոզպալնիչ, Ա. Վ. Քաղկոսյան: *Ավտոմատ կառավարման համակարգերի էլեմենտների մաթեմատիկական նկարագրման սինթեզը կապի դիագրամների մեթոդի միջոցով* . . . 6—27

Ս. Ն. Ենգիբարյան, Ի. Գ. Մուխլենով, Է. Յա. Տարատ. *Հիդրոդինամիկական գործոնների և հեղուկի ֆիզիկական հատկությունների ազդեցությունը փրփրաշերտի կառուցվածքային պարամետրերի վրա* . . . . 2—19

Վ. Հ. Թոմասյան: *Ոռ հատակով ջրանցքների հիդրավլիկական հաշվարկի մասին* . 3—2[illegible]

Վ. Հ. Թոմասյան, Հ. Ի. Կարապետյան: *Հորանային ջրաթափի հիդրավլիկական հաշվարկի մասին* . . . . 5—33

Ի. Ս. Հակոբյան. *Խիտ շերտում մանր դիսպերսային նյութերի պնևմատրանսպորտավորման հետազոտման մասին* . . . . 4—45

Ն. Լ. Մելիքյան: *Համատեղ գործող շատրվանող հորերի հաշվարկի մասին* . . 1—20

Ն. Լ. Մելիքյան: *Շատրվանող հորի հաշվարկի հարցի մասին* . . . . 2—37

Ի. Ս. Միրզախանյան, Ռ. Ն. Հակոբյան, Ն. Խ. Դանիելյան: *Սորուն նյութերի պնևմոտրանսպորտ խիտ շերտով* . . . . 1—27

ՀԻԴՐՈՏԵԽՆԻԿԱ

Ա. Բ. Բաղդասարյան: *Բետոնային գրավիտացիոն պատվարների ժայռային հիմնատակերում լարումների և քայքայման տիրույթների որոշումը* . . . . 5—52

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈԹԵՐ

Ի. Ս. Ալավերդյան: *Դարպասային և շրջանակային ընդհանուր շոշափող ուղիղների կառուցումը* . . . . 4—50

Հ. Ա. Համբարձումյան, Ա. Ն. Սարգսյան: *Զանգվածային սպասարկման մի մոդելի մասին* 3—39

Ի. Ս. Մելքոնյան, Ա. Ա. Ղազարյան: *Տվյալների սպեկտրալ անալիզի որոշ մեքենայական ալգորիթմների հետազոտություն* . . . . 2—61

Յու. Վ. Զուև, Ա. Մ. Մելքումյան, Ս. Վ. Հարությունյան, Հ. Ռ. Սարգսյան: *Ինտեգրալ նախագծական ինստիտուտի կազմակերպական կառուցվածքի օպտիմիզացիայի խնդրի լուծումը լրացուցիչ սահմանափակումների առկայության դեպքում* . 3—31

ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ԳՈՐԾԻՉՆԵՐ

Գ. Ի. Ապարենկով *(Ծննդյան 70-ամյակի առթիվ)* . . . . 2—71

СОДЕРЖАНИЕ

XXXI тома журнала «Известия АН АрмССР (серия технических наук)»

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. Н. Авакесова, Т. Т. Хачатурян. О свободных колебаниях защемленной по контуру эллиптической плиты . . . . . 2—9

А. А. Алексанян. О влиянии Эйлеровых сил реакции на относительное течение потока в колесах центробежных лопаточных машин . . . . . 2—8

Р. Л. Айрикян, К. А. Мнджоян. Определение статистических характеристик профиля абразивной ленты в рабочем состоянии . . . . . 6—10

Р. П. Джавахян. Об одном семействе зубчато-рычажных механизмов . . 2—12

С. Р. Карапетян. Сравнительная оценка весовых и энергетических характеристик инерционного компенсатора и гиростабилизатора . . . . . 2—25

С. Р. Карапетян. Гармоническая линеаризация нелинейного блока «люфт с упругостью и сухое трение» . . . . . 3—11

М. В. Киселян, Г. Б. Багдасарян, Р. А. Пароданян. Об одном методе оптимизации параметров процесса резания металлов в многофакторном пространстве . . . . . 2—3

Н. А. Ламбарян, В. Н. Васильев, А. К. Погосян. Поле температур в цилиндрическом шкиве при длительном возлействии фрикционного тепла . . 1—11

Л. М. Мхоян. Напряженное состояние, возникающее при поперечно-винтовой прокатке . . . . . 4—6

А. А. Оганесян, К. Х. Шахбазян. Вычисление параметров пространственного четырехзвенника (ВВСС) по направляющим нормали шатунной плоскости 4—3

Н. В. Олейник, М. Г. Стакян, С. А. Гаспарян. Выносливость деталей машин при нестационарном нагружении и заданном сроке службы . . . . . 5—8

Н. В. Олейник, М. Г. Стакян. Расчетная оценка несущей способности осей при знакопостоянном циклическом нагружении . . . . . 6—3

М. К. Ростомян. Исследование основных параметров текстильного оборудования методом статистического моделирования . . . . . 5—3

Г. Р. Сагателян. Расчет параметров притирочного диска, работающего в условиях ультразвуковых колебаний . . . . . 6—15

В. С. Хомяков. Использование методов планирования эксперимента для оптимизации динамических характеристик станков . . . . . 1—3

ЭНЕРГЕТИКА

А. К. Абрамян. Алгоритм оптимизации режимов энергосистем с учетом колебаний уровня нижнего бьефа ГЭС . . . . . 2—31

Дж. А. Аветисян. Оптимизация структуры и параметров одного класса системы энергоснабжения . . . . . 6—41

Г. Т. Адонц, Г. Е. Мирзоян. Новый критерий расчета динамической устойчивости электроэнергетической системы . . . . . 3—3

Г. А. Абрамян. Методика расчета длительных электромеханических процессов с диагностикой уравнений по признакам существенности изменения параметров . . . . . 4—23
Т. П. Асатрян. Управляемые фазовращатели . . . . . 5—26
Э. М. Бабиян, А. А. Бабаджанян, А. И. Губинский, А. Ф. Дьяков. Метод расчета надежности сложных систем путем анализа стохастических графов 2—43
М. А. Балабекян, Г. С. Хачатрян. Экспериментальное исследование сходимости модифицированного метода Ньютона при решении уравнений установившихся режимов методом декомпозиции . . . . . 4—29
А. А. Гарибян, Н. М. Саакян, К. С. Сагателян. Исследование сходимости в расчетах установившихся режимов в сетях 35 кВ и выше 4—34
Я. С. Максудян, З. А. Аланян, А. Г. Бояджян. Алгоритм определения топливной экономичности ВАЭС . . . . . 1—60
А. В. Темурджян. Исследование сходимости решения одной задачи, встречающейся при оптимизации структуры развивающихся энергосистем 1—51
В. С. Хачатрян, А. В. Темурджян, М. А. Балабекян, Ю. А. Козарян, А. Г. Демирчян, Д. А. Балаасанян. К построению одной математической модели из области больших систем энергетики . . . . . 3—7
Н. И. Шарабханян. Алгоритм расчета установившегося режима сложной электроэнергетической системы . . . . . 5—26

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. В. Алексеевский, А. А. Терзян, Э. С. Фриджибашян. К методам моделирования электромагнитных процессов электрических машин . . . . . 4—14
Э. М. Даланян, В. С. Варпетян, А. А. Момджян, А. И. Тарасян. Математическая модель системы «аккумуляторная батарея—импульсный преобразователь-двигатель постоянного тока». . . . . 3—10
М. Е. Мамдем, И. Г. Никиян. Магнитное поле в торцевой зоне статора при выпуклом роторе . . . . . 1—43
Б. С. Зечихин, А. А. Терзян. Поле рассеяния полузакрытого паза с массивным прямоугольным проводником . . . . . 6—20
Б. М. Мамиконян, Л. С. Тоноян. Расчет магнитного сопротивления ферромагнитного шарового экрана . . . . . 3—24
С. А. Саакян. Исследование оптимальных процессов в асинхронных позиционных электроприводах при частотном управлении . . . . . 6—29
А. И. Цатурян. О дозировании порошков электрическим полем 6—35

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Р. С. Рафаелян, Г. Л. Кинтарджян, А. М. Мирзоян, С. Н. Черемисинова. Шаговая самонастраивающаяся процедура оптимизации нелинейных объектов с колебательным звеном на выходе . . . . . 5—59

ТЕПЛОТЕХНИКА

Л. Р. Амиян, В. К. Карапетян, А. В. Кираустаян. Математическая модель электроварки стекла . . . . . 5—66

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

В. А. Амбарцумян. Проектирование рамной конструкции минимального объема при заданном значении основной частоты . . . . . 1—34

ГИДРАВЛИКА

Р. Е. Акопян. К исследованию пневмотранспорта мелкодисперсных материалов в плотном слое . . . . . 1—16
С. А. Ананян, Ж. А. Ачоян, А. К. Ананян. О некоторых результатах исследования процессов массопереноса фильтрационным потоком в грунтах . 5—10
Ж. А. Ачоян. О некоторых вопросах гидродинамики массообмена в фильтрующей среде . . . . . 4—37
И. И. Дорохов, В. В. Кафаров, В. Т. Тучин, Л. Л. Горбацевич, А. В. Татевосян. Синтез математического описания элементов систем автоматического управления методом диаграмм связи . . . . . 6—47
С. Н. Енгибарян, И. И. Мухленов, Э. Я. Тарат. Влияние гидродинамических факторов и физических свойств жидкости на структурные параметры пенного слоя . . . . . 2—49
Н. Л. Меликян. О расчете взаимодействующих фонтанирующих скважин . 1—20
Н. Л. Меликян. К вопросу расчета фонтанирующих скважин . . . . 2—57
Р. М. Мирзаханян, Р. Е. Акопян, Н. Х. Даниелян. Пневмотранспорт сыпучих материалов в плотном слое . . . . . 1—27
В. О. Токмаджян. О гидравлическом расчете каналов с криволинейным дном 3—29
В. О. Токмаджян, Г. Н. Карапетян. К гидравлическому расчету шахтного водослива . . . . . 5—33

ГИДРОТЕХНИКА

А. Б. Багдасарян. Об определении напряженного состояния и зон трещин скальных оснований бетонных гравитационных плотин . . . . . 5—52

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Р. А. Алавердян. Построение общих касательных прямых к параболе и окружности . . . . . 4—54
А. А. Джанджапанян, Л. М. Сагоян. Об одной модели массового обслуживания 3—39
Д. С. Мелконян, А. А. Газарян. Исследование некоторых машинных алгоритмов спектрального анализа данных . . . . . 2—64
Ю. В. Чуев, А. Н. Мелкумян, С. В. Арутюнян, Г. Б. Мурадян. Решение задачи оптимизации оргструктуры НИИ при дополнительных ограничениях . 3—34

ПЕРСОНАЛИИ

Г. Н. Абабков (к 70-летию со дня рождения) . . . . . 2—74

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Էջ

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Ն. Վ. Ոսկանյան, Մ. Դ. Ասատրյան: Սեղմակների կոորդինատային հաշվարկային գնահատումը հաստատուն նշանի ցիկլային բեռնավորման դեպքում 3
Է. Լ. Հայրիկյան, Կ. Ա. Մնջոյան: Հղկամապավենի պրոֆիլի վիճակագրական բնութագրերի որոշումը աշխատանքի վիճակում 10
Հ. Ս. Սարգսյան: Այլարաձայնային տատանումների պայմաններում աշխատող կտրամշակիչ սկավառակի պարամետրերի հաշվարկը 15

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

Թ. Ս. Չեչիբյան, Հ. Ա. Թևոսյան: Հոծ ուղղանկյուն հաղորդիչով կիսափակ փորակի ցրման դաշտը 20
Ս. Ա. Սահակյան: Համախականային կառավարման ժամանակ գծային առնենցով էլեկտրահաղորդակներում օպտիմալ պրոցեսների հետազոտումը . . . 29
Ս. Է. Մաղաքյան: Էլեկտրական դաշտի միջոցով փոշիների դոզավորման մասին . 35

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Հ. Ա. Ավետիսյան: Էներգամատակարարման համակարգերի մի դասի կառուցվածքի ու պարամետրերի օպտիմիզացումը 41

ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱ

Ի. Ն. Դորոխով, Վ. Վ. Կաֆարով, Վ. Տ. Տոպչին, Լ. Լ. Դավրանեկ, Ա. Վ. Թադևոսյան: Ավտոմատ կառավարման համակարգերի էլեմենտների մաթեմատիկական նկարագրման սինթեզը կապի դիագրամների մեթոդի միջոցով . . . 47

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. Олейник, М. Г. Стакян. Расчетная оценка несущей способности осей при знакопостоянном циклическом нагружении 3

Р. Л. Айрикян, К. А. Мнджоян. Определение статистических характеристик профиля абразивной ленты в рабочем состоянии 10

Г. Р. Сисителян. Расчет параметров притирочного диска, работающего в условиях ультразвуковых колебаний 15

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Б. С. Зечихин, А. А. Терзян. Поле рассеяния полузакрытого паза с массивным прямоугольным проводником 20

С. А. Саакян. Исследование оптимальных процессов в асинхронных позиционных электроприводах при частотном управлении 29

А. И. Цатурян. О дозировании порошков электрическим полем 35

ЭНЕРГЕТИКА

Дж. А. Ашетисян. Оптимизация структуры и параметров одного класса системы энергоснабжения 41

ГИДРАВЛИКА

И. И. Дорохов, В. В. Кафаров, В. Т. Тучин, Л. Л. Горбацевич, А. В. Татевосян. Синтез математического описания элементов систем автоматического управления методом диаграмм связи 47