

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

621.01

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ В МОДУЛЯТОРЕ С ТРЕУГОЛЬНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПЛОЩАДИ ЕГО ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ

Асп. О.В. МАРШАЛОВ, д-р. техн. наук., проф. В.Ф. ЮДАЕВ, канд. техн. наук., доц. В.И. БИГЛЕР

Решена задача о нестационарном течении несжимаемой жидкости через модулятор, площадь проходного сечения которого изменяется во времени. Определены формы импульсов скорости и переменного давления в модулированном потоке жидкости, а также спектральный состав импульсов давления.

The problem about non-stationary current of an incompressible liquid through the modulator with changing area is solved. Forms of impulses of speed and variable pressure in the modulated stream of a liquid and also spectral structure of impulses of pressure are certain.

Задачи такого рода возникают при проектировании роторных аппаратов с модуляцией потока (РАМП) [1], когда необходимо определить гидравлические и акустические характеристики аппарата. При расчете воздушных динамических сирен и клапанных преобразователей обычно пренебрегают влиянием инерции воздуха. Это позволяет считать изменение объемной скорости $Q(t)$ подобным изменению площади проходного сечения модулятора $S(t)$ при любом законе модуляции: $Q(t) \sim S(t)$. Однако если рабочая среда имеет значительную плотность (а РАМП предназначены для процессов диспергирования и гомогенизации именно в жидкостях, плотность которых на три порядка больше плотности воздуха), то можно ожидать, что инерционность жидкости будет приводить к существенному изменению закона модуляции объемной скорости и соответственно спектра колебаний давления, возникающих при перекрытии отверстий в статоре вращающимся ротором.

Уравнение течения несжимаемой жидкости с плотностью ρ в упрощённом модуляторе (рис. 1), представляющем собой патрубок длиной l и площадью поперечного сечения S_0 , в котором установлена диафрагма с изменяющейся площадью $S(t)$ отверстия, при разности давлений $\Delta P = (P_1 - P_2)$ на модуляторе имеет вид [2]

$$\rho l \frac{dv}{dt} + \zeta \frac{\rho v^2}{2} = \Delta P \quad (1)$$

где $v = \frac{Q(t)}{S_0}$ — средняя по сечению патрубка скорость жидкости; $Q(t)$ — объёмный расход; S_0 — площадь поперечного сечения модулятора; l — длина модулятора; $\zeta = \zeta_{\text{ка}} + \frac{A}{\text{Re}}$ — коэффициент гидравлического сопротивления; Re — критерий Рейнольдса; $\zeta_{\text{ка}}$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений в квадратичной области сопротивления; A — коэффициент, зависящий от вида местных сопротивлений и включающий в себя также сопротивление трения по длине модулятора; ρ — плотность жидкости;

Для развитого турбулентного течения потерями энергии на трение (A/Re) в коротком патрубке можно пренебречь. Тогда $\zeta \approx \zeta_{\text{ка}}$, т.е. сопротивление течению жидкости через диафрагму принимаем пропорциональной квадрату скорости. Коэффициент сопротивления в квадратичной области складывается из трех местных сопротивлений: входа в патрубок, диафрагмы и выхода из патрубка [3]

$$\zeta_{\text{ка}} = (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}}) + \zeta_{\text{диаф}} = 1,5 + \left(\frac{1}{\varepsilon(t')S'(t')} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{вх}}, \zeta_{\text{вых}}$ — гидравлические сопротивления входа и выхода модулятора; $\zeta_{\text{диаф}}$ — гидравлическое сопротивление диафрагмы; $S'(t') = S(t)/S_0$ — относительная площадь отверстия диафрагмы, $\varepsilon(t')$ — коэффициент сжатия струи, определяемый из таблиц Жуковского [4].

Приводя уравнение (1) к безразмерному виду, в приближении развитого турбулентного течения получим

$$\frac{dv'}{dt'} = H_0 (1 - \zeta_{\text{ка}} v'^2) \quad (3)$$

где v' — безразмерная скорость; H_0 — критерий гомохронности, который определяет степень нестационарности течения.

Чем меньше период изменения $S(t)$ и перепад давления на модуляторе, тем дальше про-

цесс течения от стационарного.

Задачей является спектральный анализ импульсов ускорения жидкости в патрубке модулятора. Важность задачи определяется тем, что форма импульсов ускорения подобна форме импульсов переменного давления $p(t)$ в различных зонах аппарата, поэтому они имеют схожий спектральный состав. От спектрального состава зависит распределение энергии акустического поля по частотам колебаний.

При перекрытии прямоугольных отверстий ротора и статора аппарата функция, описывающая зависимость относительной площади S' проходного сечения диафрагмы от безразмерного времени $t' = t/T$, где T — период модуляции, представлена в графическом виде на рис. 2. Степень перекрытия отверстия диафрагмы будем характеризовать глубиной модуляции

$$m = \frac{S_0 - S_{\min}}{S_0}$$

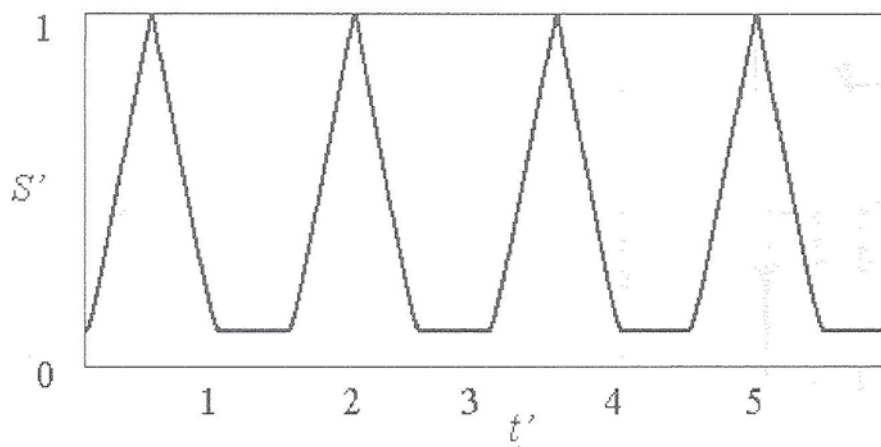


Рис 2. Зависимость относительной площади проходного сечения диафрагмы от безразмерного времени

Дифференциальное уравнение (3) является уравнением типа Риккати и в общем случае не интегрируется в квадратурах. Поэтому был использован математический редактор MathCad, в котором методом Рунге-Кутты решалось (3) с коэффициентом сопротивления (2) и площадью диафрагмы. Условием нахождения частичного решения (3) принимаем $v(t) = v(t + T)$, так как $\zeta_{\text{кв}}(t) = \zeta_{\text{кв}}(t + T)$ — периодическая функция. В результате решения получены зависимости скорости $v(t')$ и ускорения $dv(t')/dt'$ жидкости от времени.

Некоторые решения представлены в графическом виде на рис.3.

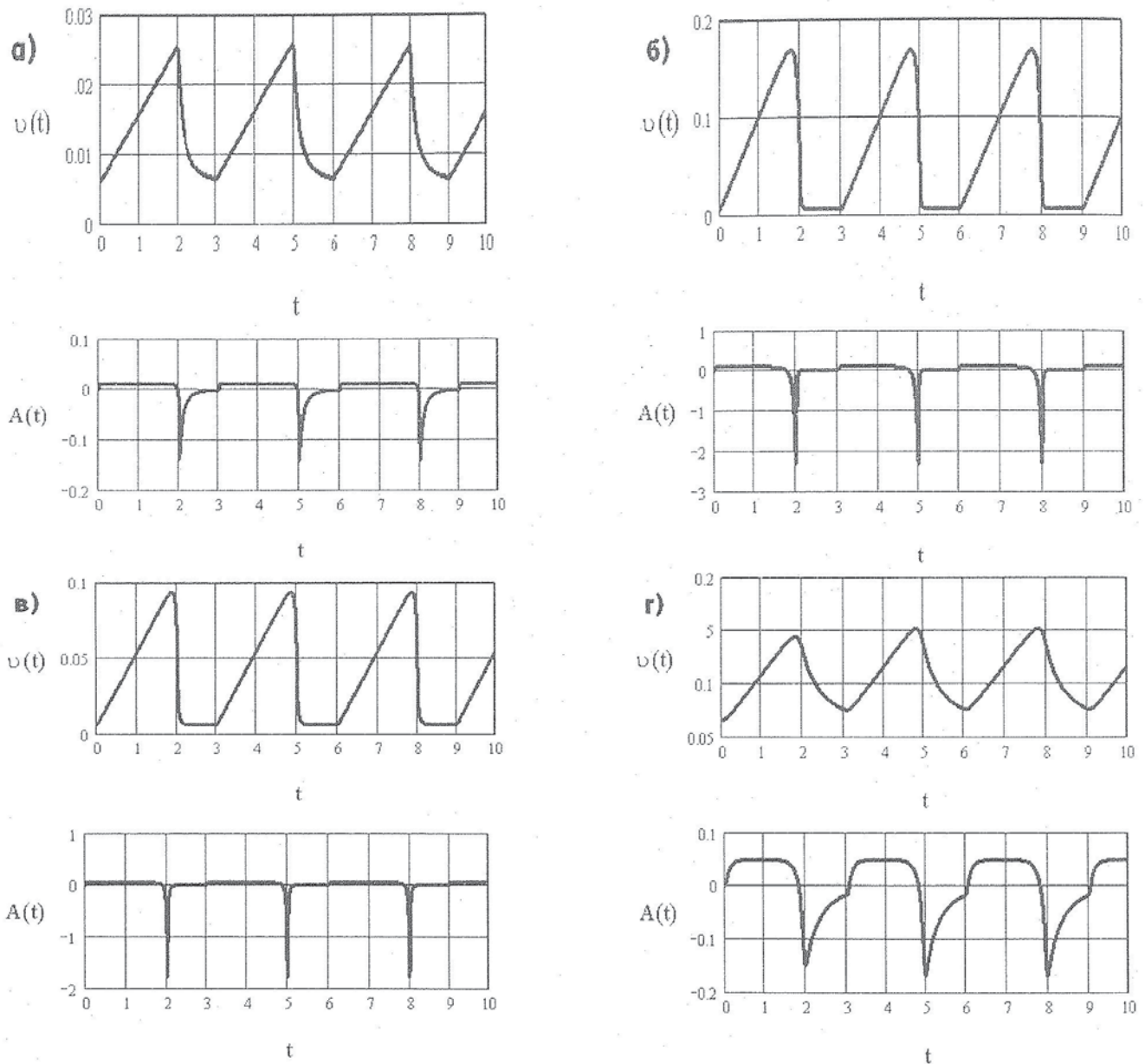


Рис 3. Динамические характеристики при: а) $H_0 = 0,01$ $m = 0,99$; б) $H_0 = 0,1$ $m = 0,99$; в) $H_0 = 0,05$, $m = 0,99$, г) $H_0 = 0,05$ $m = 0,9$.

Как следует из графиков, чем больше глубина модуляции ($m \rightarrow 1$) и меньше H_0 , тем острее форма импульсов ускорения; у импульсов скорости наблюдаются пологий подъем и крутой спад, что соответствует медленному разгону и быстрому торможению потока. Следовательно, импульсы переменного давления $p(t)$, которое пропорционально ускорению жидкости, имеют далеко не синусоидальную форму, и соответственно в акустическом поле РАМП должно присутствовать большое число гармоник.

Полученные импульсы ускорения были разложены в ряд Фурье. На графиках, представ-

ленных на рис.4 показаны спектральные характеристики импульса при различных значениях критерия гомохронности при постоянном значении глубины модуляции, равном 0,99.

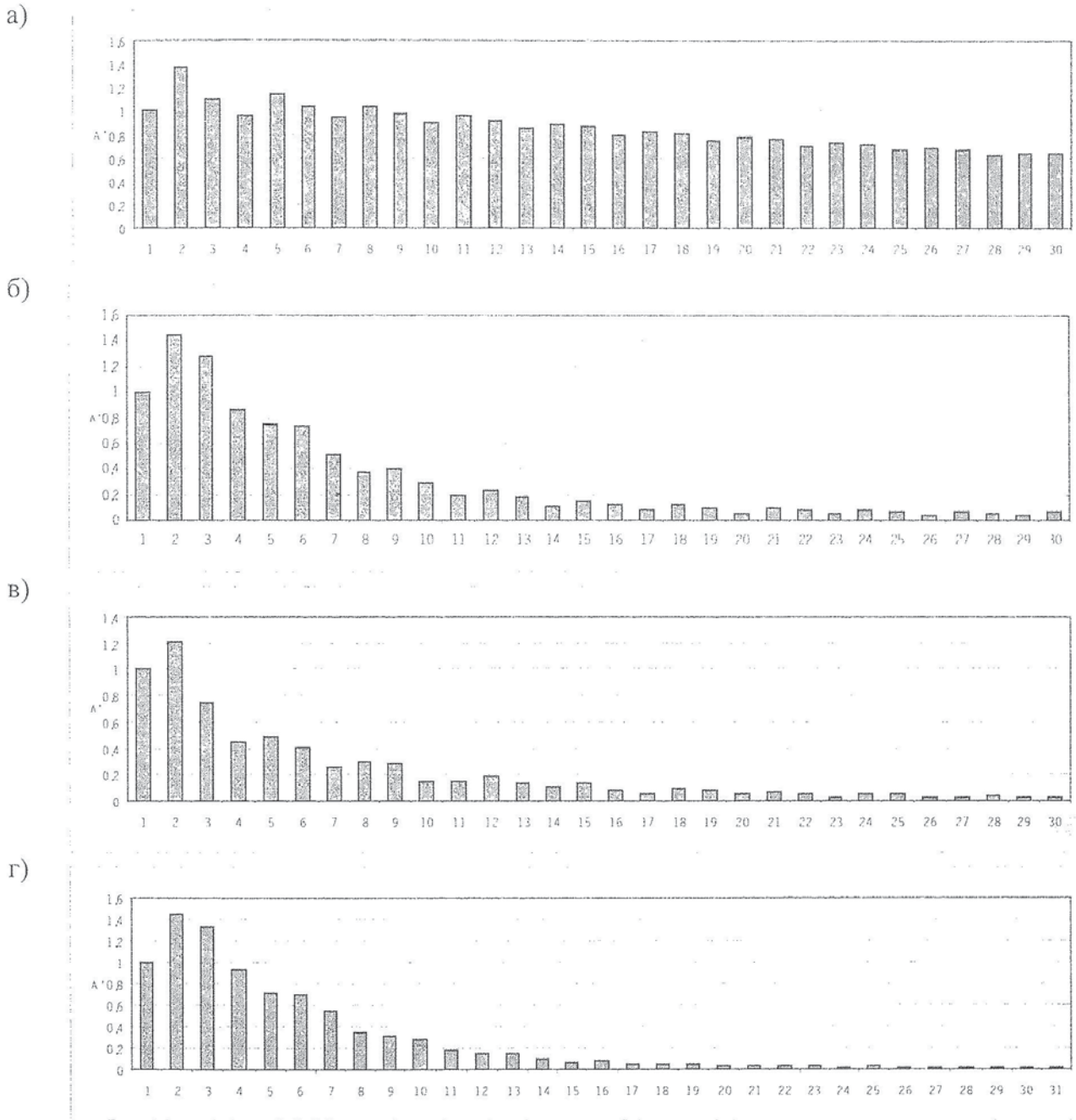


Рис 4. Спектральные характеристики импульсов ускорения при: а) $H_0 = 0,05$ $m = 0,99$; б) $H_0 = 0,5$ $m = 0,99$

;

в) $H_0 = 0,05$ $m = 0,9$, г) $H_0 = 0,5$ $m = 0,9$.

Величина амплитуд гармоник в спектре импульса представлена в относительном виде:

$$A' = \frac{A_n}{A_1}, \text{ где } n - \text{ номер гармоники.}$$

Из графиков видно, что уменьшение критерия гомохронности приводит к возрастанию доли обертонов в частотном спектре импульсов ускорения, а следовательно, и переменного давления. Энергия акустического поля распределяется на большее число гармоник.

Но данный эффект имеет место только при достаточно глубокой модуляции ($m = 0,99$).

При уменьшении глубины модуляции доля обертонов в частотном спектре импульсов снижается и перестаёт сильно зависеть от значения критерия гомохронности.

Выводы

Так как форма импульсов ускорения определяет форму импульсов акустического давления в аппарате, то, подбирая значения критерия гомохронности и глубины модуляции соответствующим образом, можно получить акустическое поле с заданным распределением энергии по частотам. Вид распределения будет определяться технологическими параметрами процесса диспергирования и физическими характеристиками обрабатываемой среды, такими как вязкость, плотность, упругость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение. — М.: Недра, 1992. — 176с.
2. Юдаев В.Ф. Истечение газожидкостной смеси через отверстия ротора и статора сирены // Известия вузов. Машиностроение. — 1985. — №12. — С. 60—66.
3. Зимин А.И. Прикладная механика прерывистых течений. — М.: Фолиант, 1997. — 308с.
4. Альтшуль А.Г. Гидравлические сопротивления. — М.: Недра, 1982. — 224с.