

АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНОГО ОБЪЕКТА СТАБИЛИЗАЦИИ С ПРОИЗВОЛОМ В ДИНАМИКЕ.

Л.Н. Блохин¹, В.Г. Вовк², Ю. Безкоровайный³, Н. Мацюк⁴,

Национальный авиационный университет, 03680, Украина, г.Киев, просп. Космонавта Комарова, 1, Институт электроники и систем управления, факультет аэрокосмических систем управления.

E-mail: biest@rambler.ru

Аннотация

Ключевые слова: структурная идентификация, обработка результатов эксперимента

Обсуждаются особенности постановок и содержания этапов исследований, обеспечивающих создание новых конкурентоспособных или модернизацию существующих систем «жесткой» стохастической стабилизации подвижных объектов в пространстве и ориентации с предельно достижимыми рубежами качества. Подробно рассмотрены новые задачи и алгоритмы структурной идентификации требуемых моделей динамики многомерного объекта стабилизации с произволом в динамике при стохастических контролируемых и неконтролируемых воздействиях как базового этапа намечаемых работ.

На современном этапе развития авиакосмической техники по ряду объективных причин ровно возрастают требования к качеству (точности) процессов навигации, управления и стабилизации подвижных объектов, предназначенных для выполнения ряда ответственных функций. Как известно, например [1], качество перечисленных выше процессов в определяющей мере зависит от совершенства используемых бортовых кибернетических комплексов (измерительных, управляющих, специального назначения и т.д.) и непосредственно от характера и качества оптимальной оперативной обработки используемой навигационной стохастической информации. Современные наукоемкие технологии обработки навигационной информации, возникающей при реальном движении объекта, и оптимального управления (стабилизации) предполагают априорное знание таких моделей динамики объектов управления (стабилизации) в интересующих режимах движения и реальных стохастических воздействий на объект в указанных режимах, которые описывают лишь важнейшие для интересующих режимов движения и качества их выполнения стороны исследуемых процессов. Очевидно, что одним из основных и эффективных этапов получения необходимой первичной информации о стохастических сигналах «вход-выход» сложного динамического объекта, которая требуется в качестве априорной в задачах структурной идентификации моделей динамики как самого подвижного объекта, так и стохастических воздействий на него в реальном движении является этап проведения по специальной программе натурных (иногда полунатурных) исследований имеющегося в наличии прототипа объекта, система стабилизации которого, в дальнейшем, подлежит модернизации. Конечно, при таких исследованиях должны быть задействованы как штатные бортовые, так и новые наземные средства измерений требуемой навигационной информации. Этап заканчивается сбором и первичной обработкой (оцениванием моделей динамики доступных измерениям стохастических сигналов «вход-выход» объекта) собранной стохастической навигационной информации.

Последующим этапом, на котором непосредственно используются полученные по результатам натурных исследований модели динамики векторов сигналов «вход-выход»

¹ доктор технических наук, профессор, академик АНУД

² кандидат технических наук

³ кандидат технических наук

⁴ студентка

объекта, является структурная идентификация моделей динамики как самого объекта исследований в интересующем режиме его функционирования, так и моделей динамики неконтролируемых в реальном движении стохастических возмущающих воздействий на объект. Здесь следует сразу же оговорить и тот факт, что по результатам первичной обработки навигационной информации, а именно по силе взаимной коррелированности между собой исследуемых навигационных сигналов, возможно судить о целесообразности и характере целесообразного расчленения «полной» модели динамики исследуемого объекта на отдельные частные для дальнейшего обоснованного упрощения процедур оптимального синтеза систем стохастической стабилизации каждой из частей объекта.

Последующие этапы модернизации систем, такие как синтез оптимальных структур систем стабилизации объекта с уже известными моделями динамики объекта (его части) и стохастических возмущений на него, а также сравнительный анализ качества (точности) модернизированной и существующей систем стабилизации выходят за рамки доклада. Теперь кратко рассмотрим новую задачу и алгоритмы структурной идентификации объектов стабилизации.

Отличительные особенности структурной идентификации моделей динамики линейного неустойчивого объекта. Пусть по аналогии с работой [2] ставится задача идентифицировать структуру и параметры неустойчивого линейного объекта. Измеряются лишь векторы стохастических сигналов «вход-выход» стабилизируемого объекта (рис.1), причем в рассматриваемом случае нестационарные детерминированные сигналы x_2 составляют лишь часть вектора выходных сигналов x и устанавливаются при эксперименте. Часть x_1 вектора выходных сигналов, полученная при эксперименте, представляет собой стационарный эргодический многомерный случайный процесс.

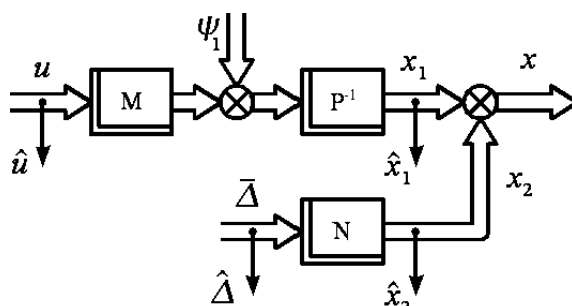


Рис.1. Структурная схема, поясняющая первую стадию процесса идентификации моделей динамики неустойчивого объекта.

Очевидно, что устойчивая часть линейного объекта идентификации может быть описана системой дифференциальных уравнений, преобразованного по Фурье, вида

$$P_1 x_1 = M_1 u + \psi_1,$$

где P_1 и M_1 – полиномиальные матрицы размерности $n \times n$ и $n \times m$ соответственно, структуры и параметры которых не известны; x_1 – n -мерный вектор выходных случайных сигналов, u – m -мерный вектор входных (управляющих) сигналов, ψ_1 – n -мерный вектор случайных стационарных воздействий с неизвестной матрицей спектральных плотностей $S_{\psi_1 \psi_1}$, N – матрица передаточных функций части объекта, которая определяет преобразование лишь детерминированных сигналов и на которую воздействует вектор Δ – входных δ -функций.

Как уже показано [2], структуру (рис.1) возможно преобразовать к виду (рис.2), вводя следующие обозначения

$$\begin{aligned} P^{-1}M &= P_1^{-1}M_1 + NF^{-1} \\ P^{-1} &= P_1^{-1}P_2^{-1} \end{aligned}$$

$$\mathbf{P}^{-1}\Psi_1 = \mathbf{P}_1^{-1}\mathbf{P}_2^{-1}\mathbf{P}_2\Psi_1 = \mathbf{P}^{-1}\Psi$$

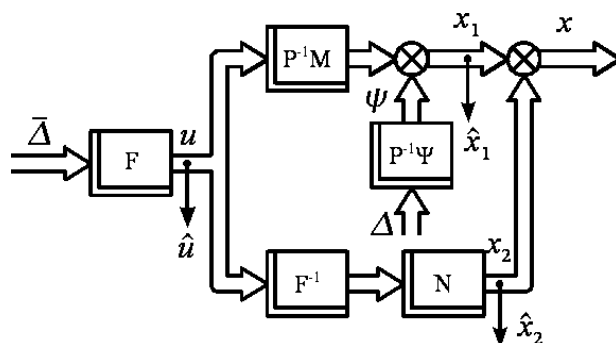


Рис.2. Структурная схема, поясняющая модели динамики эквивалентного неустойчивого объекта.

На рисунке блоком F обозначена матрица передаточных функций фильтра, формирующего вектор управления из вектора «белых» шумов, которая также легко устанавливается по результатам эксперимента.

Таким образом, после ряда структурных преобразований [2] как результат идентификации можно получить уравнение движения идентифицируемого неустойчивого объекта вида

$$x = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{M}u + \mathbf{P}^{-1}\Psi\Delta$$

или

$$\mathbf{P}x = \mathbf{M}u + \Psi\Delta$$

Итак, зная как результат эксперимента матрицы \mathbf{P}_1^{-1} , \mathbf{M} , \mathbf{N} , \mathbf{F} и Ψ , по предложенному выше алгоритму можно установить структуры $\mathbf{P}^{-1}\mathbf{M}$ и $\mathbf{P}^{-1}\Psi$ неустойчивого объекта.

Новая задача и алгоритмы структурной идентификации устойчивой части объекта стабилизации по данным ее натуральных исследований. Пусть движение устойчивого линейного многомерного объекта стабилизации, подверженного действию контролируемых ζ и неконтролируемых ψ стохастических возмущающих факторов, может быть описано системой обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразованных по Фурье, вида

$$\mathbf{P}x = \mathbf{M}u + \mathbf{N}\zeta + \psi \quad (1)$$

где \mathbf{P} , \mathbf{M} и \mathbf{N} – неизвестные матрицы размерностей $n \times n$, $n \times m$ и $n \times l$ соответственно, все элементы которых полиномы аргумента $s = j\omega$; x - n -мерный вектор измеряемых выходных сигналов, u – m -мерный вектор измеряемых управлений, ζ – l -мерный вектор контролируемых возмущений, ψ – n -мерный вектор неконтролируемых возмущений. Полагается, что векторы x, u, ζ и ψ представляют собой случайные, многомерные, стационарные процессы, причем все требуемые неслучайные динамические характеристики векторов x, u и ζ известны по данным эксперимента и этапа их первичной обработки; вектор ψ недоступен измерениям, но предполагается некоррелированность его с вектором управлений u . Полагается также что измерения векторов x, u и ζ производятся с помощью специальных оптимальных наблюдателей и помехи измерений отсутствуют.

Таким образом, по результатам первичной обработки данных эксперимента получены оценки следующих матриц спектральных и взаимных спектральных плотностей:

$$S_{xx}, S_{uu}, S_{\zeta\zeta}, S_{xu}, S_{ux}, S_{\zeta x}, S_{x\zeta}, S_{u\zeta}, S_{\zeta u} \quad (2)$$

Используя требуемые матрицы из ряда (2) с помощью теоремы Винера-Хинчина [1] оценим транспонированные матрицы спектральных и взаимных спектральных плотностей векторов, обозначенных в индексах определяемых выражений

$$\begin{aligned} S'_{xx} = & P^{-1}MS'_{um}M_*P_*^{-1} + P^{-1}MS'_{\hat{u}}N_*P_*^{-1} + P^{-1}NS'_{u\zeta}M_*P_*^{-1} + \\ & + P^{-1}NS'_{\zeta}N_*P_*^{-1} + P^{-1}S'_{\phi}P_*^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$S'_{ux} = P^{-1}MS'_{um} + P^{-1}NS'_{u\zeta} \quad (4)$$

$$S'_{\zeta x} = P^{-1}MS'_{\hat{u}} + P^{-1}NS'_{\zeta\zeta} \quad (5)$$

Где «*»- знак эрмитова сопряжения.

Очевидно, что в выражениях (3), (4), и (5) неизвестными остаются матрицы $P^{-1}M$, $P^{-1}N$ и S'_{ϕ} .

Совместно решая систему матричных уравнений (4) и (5), определим матрицу передаточных функций системы $P^{-1}M$ от управления к выходу и матрицу $P^{-1}N$ передаточных функций системы от контролируемого возмущения к выходу, после чего запишем их следующим образом

$$P^{-1}N = [S'_{ux} - S'_{\zeta}(S'_{\zeta})^{-1}S'_{u\zeta}] \cdot [S'_{um} - S'_{\hat{u}}(S'_{\zeta})^{-1}S'_{u\zeta}]^{-1}; \quad (6)$$

$$P^{-1}M = [S'_{\zeta} - S'_{ux}(S'_{um})^{-1}S'_{\hat{u}}] \cdot [S'_{\zeta} - S'_{u\zeta}(S'_{um})^{-1}S'_{\hat{u}}]^{-1}. \quad (7)$$

Подставляя матрицы (6) и (7) в выражение (3) и разрешая его относительно неизвестной матрицы, получим

$$P^{-1}S'_{\phi}P_*^{-1} = S'_{xx} - P^{-1}MS'_{um}M_*P_*^{-1} - P^{-1}MS'_{\hat{u}}N_*P_*^{-1}P^{-1}NS'_{u\zeta}M_*P_*^{-1} - P^{-1}NS'_{\zeta}N_*P_*^{-1} \quad (8)$$

Полагая, что изображение вектора ψ неконтролируемых возмущений может быть представлено через неизвестную структуру Ψ фильтра, формирующего вектор ψ из вектора «белых» единичных шумов Δ , т.е. как

$$\psi = \Psi\Delta \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в структуру (8) и факторизуя по Дэвису [1] полученное выражение, определим матрицу передаточных функций объекта от вектора Δ к выходу как

$$P^{-1}\Psi = [S'_{xx} - P^{-1}MS'_{um}M_*P_*^{-1} - P^{-1}MS'_{\hat{u}}N_*P_*^{-1}P^{-1}NS'_{u\zeta}M_*P_*^{-1} - P^{-1}NS'_{\zeta}N_*P_*^{-1}]_+ \quad (10)$$

где символ «+» - знак факторизации выражения (8).

Зная матрицы (6), (7) и (10), можно переписать искомое уравнение движения (1) как

$$\dot{x} = P^{-1}M\dot{u} + P^{-1}N\zeta + P^{-1}\Psi\Delta \quad (11)$$

Уравнение движения в виде (11) составлено однозначно. Если желать представить уравнение (11) в виде (1), то возможно получить большое число «эквивалентных» систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику исследуемого объекта.

Частный случай задачи – отсутствие контролируемого возмущения. Очевидно, что алгоритм структурной идентификации в таком варианте выглядит следующим образом:

$$P^{-1}M = S'_{ux}(S'_{um})^{-1}; \quad (12)$$

$$P^{-1}\Psi = [S'_{xx} - S'_{ux}(S'_{um})^{-1}S'_{xu}]_+^{\dagger}, \quad (13)$$

а уравнение движения вида (11) так

$$\dot{x} = P^{-1}M\dot{u} + P^{-1}\Psi\Delta. \quad (14)$$

Некоторые результаты экспериментальных исследований вертолета с грузовой подвеской в режиме висения с целью структурной идентификации моделей динамики.

В рамках доклада трудно осветить все аспекты первичной и вторичной (структурная идентификация) обработки навигационной информации, полученной при проведенных экспериментальных исследованиях вертолета Ми-8 с грузовой подвеской.

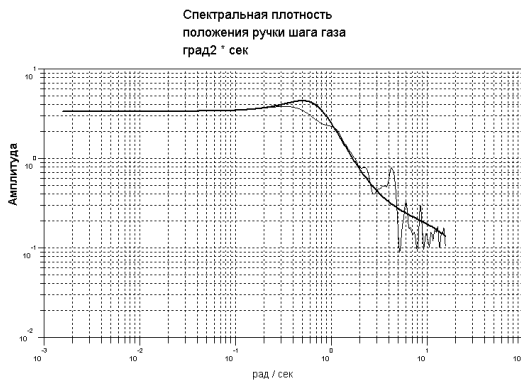
В качестве примера приведены только некоторые результаты и выводы, на наш взгляд, весьма значительные и касающиеся структурной идентификации как неслучайных динамических характеристик векторов стохастических сигналов «вход-выход» вертолета Ми-8 с грузовой подвеской, так и моделей динамики вертолета с грузовой подвеской и неконтролируемых стохастических воздействий, действующих на него в режиме висения.

Таблица 1
Аналитические обозначение
коэффициентов взаимной корреляции
Analytical a designation of factors of
mutual correlation

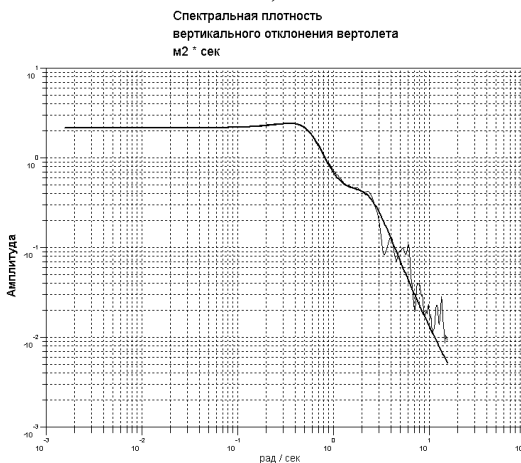
1	μ_{δ_1, δ_2}	μ_{δ_1, δ_3}	μ_{δ_1, δ_4}	μ_{δ_1, δ_5}	μ_{δ_1, δ_6}	μ_{δ_1, δ_7}	μ_{δ_1, δ_8}	μ_{δ_1, δ_9}	$\mu_{\delta_1, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_1, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_1, \delta_{12}}$
μ_{δ_2, δ_1}	1	μ_{δ_2, δ_3}	μ_{δ_2, δ_4}	μ_{δ_2, δ_5}	μ_{δ_2, δ_6}	μ_{δ_2, δ_7}	μ_{δ_2, δ_8}	μ_{δ_2, δ_9}	$\mu_{\delta_2, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_2, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_2, \delta_{12}}$
μ_{δ_3, δ_1}	μ_{δ_3, δ_2}	1	μ_{δ_3, δ_4}	μ_{δ_3, δ_5}	μ_{δ_3, δ_6}	μ_{δ_3, δ_7}	μ_{δ_3, δ_8}	μ_{δ_3, δ_9}	$\mu_{\delta_3, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_3, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_3, \delta_{12}}$
μ_{δ_4, δ_1}	μ_{δ_4, δ_2}	μ_{δ_4, δ_3}	1	μ_{δ_4, δ_5}	μ_{δ_4, δ_6}	μ_{δ_4, δ_7}	μ_{δ_4, δ_8}	μ_{δ_4, δ_9}	$\mu_{\delta_4, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_4, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_4, \delta_{12}}$
μ_{δ_5, δ_1}	μ_{δ_5, δ_2}	μ_{δ_5, δ_3}	μ_{δ_5, δ_4}	1	μ_{δ_5, δ_6}	μ_{δ_5, δ_7}	μ_{δ_5, δ_8}	μ_{δ_5, δ_9}	$\mu_{\delta_5, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_5, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_5, \delta_{12}}$
μ_{δ_6, δ_1}	μ_{δ_6, δ_2}	μ_{δ_6, δ_3}	μ_{δ_6, δ_4}	μ_{δ_6, δ_5}	1	μ_{δ_6, δ_7}	μ_{δ_6, δ_8}	μ_{δ_6, δ_9}	$\mu_{\delta_6, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_6, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_6, \delta_{12}}$
μ_{δ_7, δ_1}	μ_{δ_7, δ_2}	μ_{δ_7, δ_3}	μ_{δ_7, δ_4}	μ_{δ_7, δ_5}	μ_{δ_7, δ_6}	1	μ_{δ_7, δ_8}	μ_{δ_7, δ_9}	$\mu_{\delta_7, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_7, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_7, \delta_{12}}$
μ_{δ_8, δ_1}	μ_{δ_8, δ_2}	μ_{δ_8, δ_3}	μ_{δ_8, δ_4}	μ_{δ_8, δ_5}	μ_{δ_8, δ_6}	μ_{δ_8, δ_7}	1	μ_{δ_8, δ_9}	$\mu_{\delta_8, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_8, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_8, \delta_{12}}$
μ_{δ_9, δ_1}	μ_{δ_9, δ_2}	μ_{δ_9, δ_3}	μ_{δ_9, δ_4}	μ_{δ_9, δ_5}	μ_{δ_9, δ_6}	μ_{δ_9, δ_7}	μ_{δ_9, δ_8}	1	$\mu_{\delta_9, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_9, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_9, \delta_{12}}$
$\mu_{\delta_{10}, \delta_1}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_2}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_3}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_4}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_5}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_6}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_7}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_8}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_9}$	1	$\mu_{\delta_{10}, \delta_{11}}$	$\mu_{\delta_{10}, \delta_{12}}$
$\mu_{\delta_{11}, \delta_1}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_2}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_3}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_4}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_5}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_6}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_7}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_8}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_9}$	$\mu_{\delta_{11}, \delta_{10}}$	1	$\mu_{\delta_{11}, \delta_{12}}$
$\mu_{\delta_{12}, \delta_1}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_2}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_3}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_4}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_5}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_6}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_7}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_8}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_9}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_{10}}$	$\mu_{\delta_{12}, \delta_{11}}$	1

Таблица 2
Значение коэффициентов взаимной корреляции
зарегистрированных параметров
Value of factors of mutual correlation of the registered
parameters

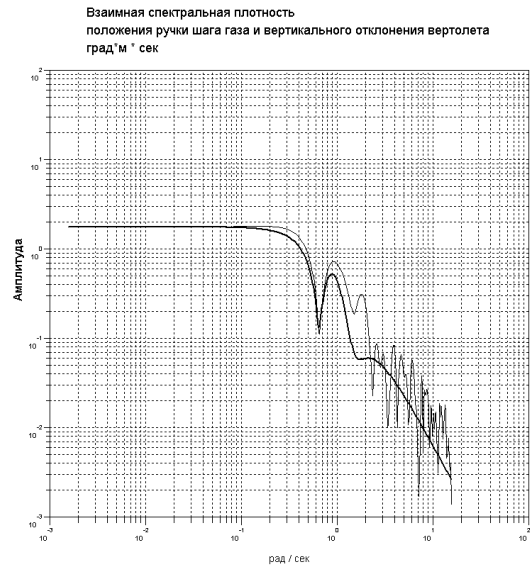
1.	0.0780.316	0.74	0.4440.2650.5680.3590.4860.2030.2340.172
0.078	1.	0.3140.2970.0790.1370.1670.202	0.29 0.0570.0210.186
0.3160.314	1.	0.304 0.31	0.8220.5610.2570.3570.1560.4690.119
0.74	0.2970.304	1.	0.1310.3630.4530.2220.3790.0710.5930.067
0.4440.079	0.31 0.131	1.	0.4940.0450.217 0.1 0.5550.3780.387
0.2650.1370.8220.3630.494	1.	0.35 0.2590.1450.1790.6570.215	0.5680.1670.5610.4530.045 0.35 1. 0.0490.917 0.12 0.2920.032
0.3590.2020.2570.2220.2170.2590.049	1.	0.0570.3750.178 0.18	
0.486 0.29 0.3570.379 0.1 0.1450.9170.057	1.	0.0430.092 0.02	
0.2030.0570.1560.0710.5550.179 0.12 0.3750.043	1.	0.2460.227	
0.2340.0210.4690.5930.3780.6570.2920.1780.0920.246	1.	0.253	
0.1720.1860.1190.0670.3870.2150.032 0.18 0.02 0.2270.253	1.		



а)



б)



в)

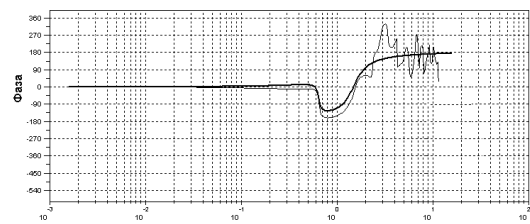


Рис.3. Примеры некоторых спектральных и взаимных спектральных плотностей и их аппроксимаций дробно-рациональными функциями

Закключение

На основании проведенных экспериментальных исследований и оценок эффективности разработанных алгоритмов структурной идентификации можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. При традиционных средствах стабилизации вертолета с грузовой подвеской не достигается так называемая «жесткая» стабилизация вертолета в пространстве и в ориентации. Ошибки стабилизации носят стохастический характер, причем их случайные

составляющие, которые фактически лимитируют уровни точности стабилизации, достигают значительных величин. Презентационные материалы наглядно иллюстрируют сказанное.

Очевидно, что для подавления обязательно имеющих место случайных воздействий на объект стабилизации необходимы новые оптимальные системы стабилизации, созданные на базе современных технологий обработки стохастической информации.

2. Важным, на взгляд авторов доклада, является выясненный при экспериментальных исследованиях вертолета факт сильной взаимной корреляции между собой всех синхронно фиксируемых навигационных параметров вертолета и груза (см. таблицу коэффициентов взаимной корреляции параметров). Это обстоятельство резко меняет традиционно сложившиеся представления о так называемых «сильных» и «слабых» взаимосвязях между координатами объекта стабилизации и безусловно должно сказаться на принципах расчленения общей модели динамики объекта в исследуемом режиме движения на частные модели с целью упрощения последующих процедур синтеза системы стабилизации, использующих полученные модели.

3. Для достижения высших рубежей точности стабилизации объекта в ответственном режиме движения целесообразно использовать на этапах структурной идентификации и последующего синтеза оптимальной структуры системы стабилизации всю полученную информацию о исследуемых навигационных параметрах, т.е. весь набор матриц спектральных и взаимных спектральных плоскостей векторов стохастических сигналов «вход-выход» объекта. Очевидно, что это обстоятельство потребует существенной коррекции используемых в настоящее время вычислительных процедур идентификации и синтеза.

4. Если положить малыми взаимные корреляционные связи параметров при коэффициентах взаимной корреляции $K \leq 0,25$, то общая модель динамики стабилизируемого вертолета может быть расчленена на две частные: модель, соответствующую подсистеме управления центром масс вертолета только органами управления (здесь используется частный случай предложенного в докладе алгоритма структурной идентификации); модель подсистемы управления ориентацией, на результаты которого влияет как перемещения органов управления, так и характер колебаний груза (здесь должен быть использован приведенный в докладе алгоритм структурной идентификации).

5. Предложена научно обоснованная и удобная при практическом использовании технология структурной идентификации моделей динамики стабилизируемого объекта и действующих на него стохастических возмущений, позволяющая эффективно выполнять этапы структурной идентификации моделей динамики сложного объекта по данным натурных (полунатурных) исследований прототипа объекта в интересующих режимах движения.

Литература.

1. Азарсков В.Н., Блохин Л.Н., Житецкий Л.С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации. Монография. – К.: НАУ, 2006. – 437 с.

2. Блохин Л.Н., Осадчий С.И., Безкоровайный Ю.Н. Технология структурной идентификации и последующего синтеза оптимальных систем стабилизации неустойчивых динамических объектов// Международный научно-технический журнал “Проблемы управления и информатики”. – 2007. – №6. – С.57–65.