

УДК 681.51.011

Р. А. МУНАСЫПОВ

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГТД СТРУКТУРНЫМИ МЕТОДАМИ

Предлагается подход к синтезу адаптивных многосвязных систем автоматического управления ГТД структурными методами. В развитие алгоритмов адаптивно координатно-параметрического управления предлагается новый более широкий класс алгоритмов адаптации: пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации для многосвязного обобщенного настраиваемого объекта, синтезированные на основе прямого метода Ляпунова. В статье также рассматривается подход к целенаправленному синтезу структур сложных динамических систем, основанный на представлении структуры системы в виде ориентированного структурного графа. Данный метод синтеза основывается на использовании структурных критериев, сформулированных в форме структурных функций. Система автоматического управления; газотурбинный двигатель; адаптация; структурный синтез; многосвязный объект управления; динамическая система; ориентированный граф

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые темпы научно-технического прогресса в течение последних десятилетий предопределяют ускоренное развитие управляемых сложных динамических систем и, в частности, систем автоматического управления (САУ) авиационными газотурбинными двигателями (ГТД). Анализ тенденций развития авиационных ГТД и их систем управления показывает, что объем функций, выполняемых САУ перспективными ГТД, определяется следующими основными факторами:

- дальнейшим усложнением конструкции двигателей, связанным с созданием адаптивных ГТД, изменяющих в широком диапазоне свою структуру и параметры с целью обеспечения наиболее эффективного (в данных условиях полета) режима работы [1, 2];

- дальнейшим повышением требований к качеству процессов управления, ресурсу, экономичности, необходимостью перехода к эксплуатации по состоянию [1, 3];

- включением системы управления ГТД в интегральную САУ полетом ЛА [4, 5].

Данные факторы приводят к повышенной сложности и большому количеству решаемых задач, к еще большему увеличению количества регулируемых параметров и регулирующих факторов в САУ на переходных режимах, ужесточению требований к различным свойствам системы, к качеству функциониро-

вания отдельных подсистем и их взаимодействию, т. е. современный авиационный ГТД как объект управления относится к классу многосвязных нестационарных и нелинейных объектов, функционирование которого происходит в условиях параметрической и структурной неопределенности. Это требует полной автоматизации процедур выбора оптимальных программ управления в зависимости от текущей цели управления, условий полета, состояния элементов конструкции силовой установки. Соответствующее изменение характера организации процесса управления возможно лишь при построении САУ авиационными ГТД в классе многоуровневых адаптивных систем.

Среди адаптивных САУ сложными динамическими объектами, в частности, для целей адаптации САУ ЛА широкое распространение получили системы, построенные в классе беспереисковых самонастраивающихся систем (БСНС) с эталонной моделью, настраиваемый регулятор параметрического управления которых реализован на основе концепции обобщенного настраиваемого объекта (ОНО). Теория таких систем разработана в трудах акад. Б. Н. Петрова, профессоров В. Ю. Рутковского, С. З. Землякова и др. [6, 7]. Принципы построения и методы синтеза БСНС с эталонной моделью ОНО наиболее близки к решению задачи синтеза адаптивных алгоритмов управления ГТД,

поскольку в БСНС данного типа существует принципиальная возможность раздельного рассмотрения регуляторов координатного управления (РКУ) в основном контуре системы и регулятора параметрического управления (РПУ) в контуре адаптации. Данный подход обеспечивает большую гибкость при разработке и доводке системы, позволяя, например, изменять принципы построения, структуру или параметры РКУ, не затрагивая при этом той части системы, которая придает ей свойство адаптации. Однако широко распространенные на практике интегральные законы изменения настраиваемых коэффициентов ОНО, обеспечивая при выполнении определенных условий асимптотическую устойчивость системы в целом, равномерную по начальному моменту времени и начальным расхождением в системе относительно движения эталонной модели, зачастую приводят к медленно затухающим и сильно колебательным процессам отработки параметрических возмущений. Поэтому расширение класса возможных алгоритмов адаптации, позволяющих повысить динамическую точность отработки широкого класса параметрических возмущений и тем самым расширить границы применимости на практике МСАУ ГТД с замкнутыми алгоритмами адаптации, является актуальной задачей.

При проектировании основного контура САУ ГТД в классе многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) возникают серьезные проблемы, связанные с тем, что эти системы относятся к классу многофункциональных систем, поскольку при изменении компоновки МСАУ или изменении динамических свойств отдельных подсистем меняется и описывающая ее система дифференциальных уравнений [1, 3, 8, 9]. Основная трудность при этом заключается в обеспечении на всех режимах устойчивости и желаемого качества функционирования как МСАУ в целом, так и её отдельных подсистем. Поэтому с целью придания адаптивной МСАУ ГТД свойств самоорганизации требуется разработка обоснованных рекомендаций по выбору структуры многосвязного РКУ.

В настоящее время можно выделить два основных подхода к описанию задач и методов анализа и синтеза структур линейных МСАУ:

- 1) основанный на использовании классических операторно-частотных методов;
- 2) в уравнениях пространства состояний.

Достоинством первого подхода является простота и наглядность, а также возможность описания динамических свойств МСАУ как на уровне подсистем, элементов и связей между ними, так и на уровне системы в целом, что обусловило широкое применение данного подхода в инженерной практике. Второй подход наиболее полно отражает внутреннее строение динамической системы.

Представляется актуальной разработка формализованного подхода к выбору структур динамических систем (ДС), который объединил бы преимущества обеих форм описания и позволил бы целенаправленно формировать структуру системы в соответствии с выбранными критериями, а также был максимально ориентирован на широкое использование вычислительной техники вследствие необходимости перебора большого количества вариантов. Для этого необходимо найти такую характеристику структуры ДС, которая являлась бы базовым элементом для преобразования структуры всей системы и позволяла бы при этом оценивать влияние структур отдельных подсистем и многомерных элементов связи на структуру МСАУ в целом, а также давала бы принципиальную возможность для построения самоорганизующихся систем.

1. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА АДАПТИВНОЙ МСАУ ГТД

На основе методологических принципов построения САУ сложными динамическими объектами, а также принципов построения многоуровневого адаптивного и интеллектуального управления в условиях неопределенности может быть предложена обобщенная структура адаптивной МСАУ ГТД, представленная на рис. 1. Здесь можно выделить три уровня управления: *стратегический, тактический и исполнительный*.

На *стратегическом* уровне по командам от внешней управляющей системы (САУ ЛА) производится формализация цели управления и соответствующее планирование поведения системы с учетом реальной обстановки. Для этого планировщик задач генерирует оптимальную последовательность действий, которая с помощью планировщика функций декомпозируется на локальные планы действий отдельных функциональных модулей (отдельных подсистем или агентов) САУ.

На *тактическом* уровне по командам стратегического уровня производится формирование программных траекторий для отдель-

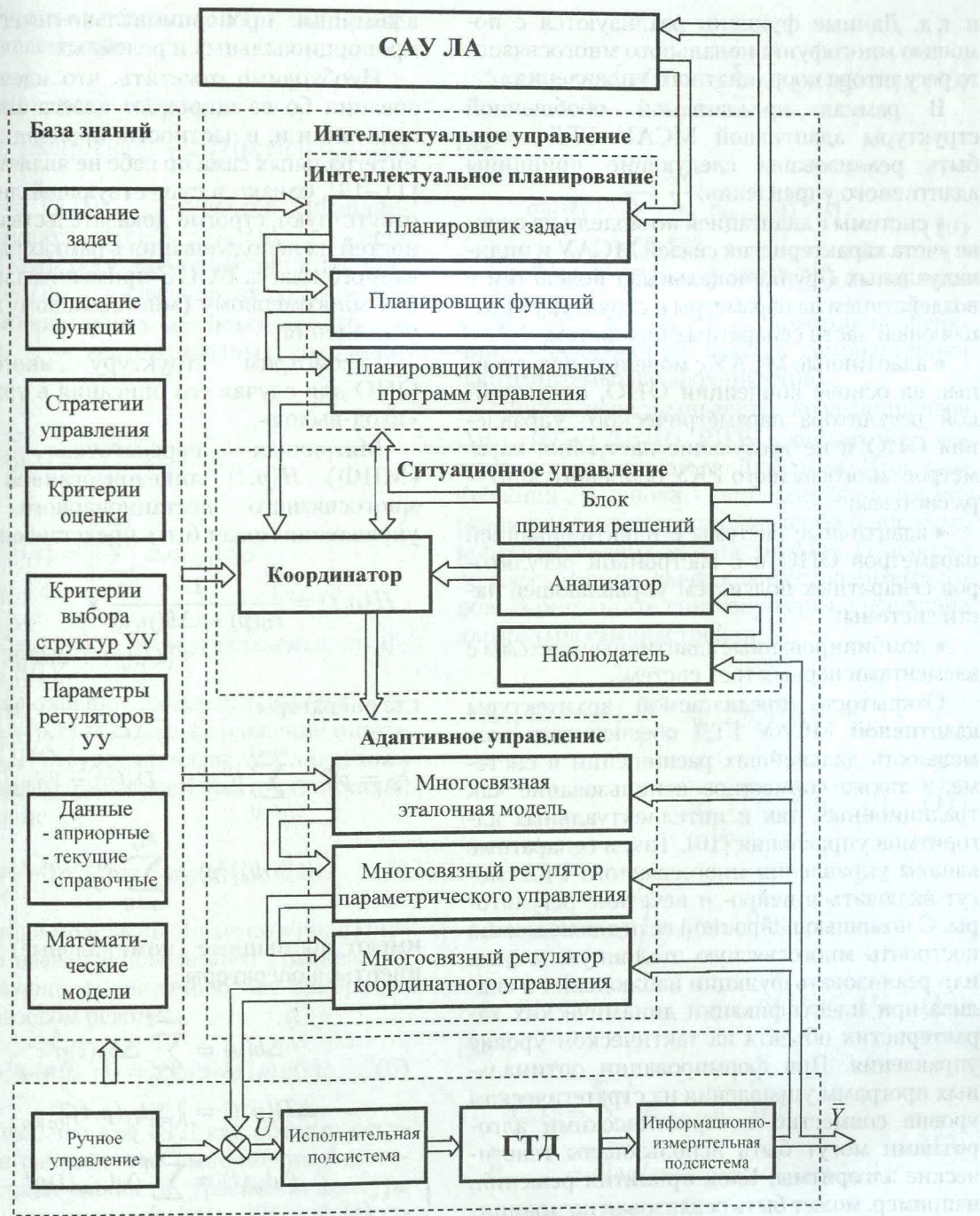


Рис. 1. Обобщенная структура адаптивной МСАУ ГТД

ных функциональных модулей САУ, координация (согласование) процессов управления и взаимодействия элементов системы, а также адаптация подсистемы управления исполнительного уровня к изменяющимся условиям функционирования. Для реализации функций адаптации на основе принципа управления по модели в систему вводятся многосвязная эталонная модель и построенный на основе принципа инвариантности многосвязный регулятор параметрического управления, на-

страиваемые коэффициенты которого обеспечивают желаемое движение управляемых координат многосвязного объекта управления, задаваемое эталонной моделью.

На исполнительном уровне решаются задачи стабилизации нелинейных характеристик механизмов и устройств исполнительской подсистемы, отработки заданных программ управления с требуемым качеством переходных процессов, обеспечение робастности к внутренним и внешним возмущениям

и т. д. Данные функции реализуются с помощью многофункционального многосвязного регулятора координатного управления.

В рамках предлагаемой обобщенной структуры адаптивной МСАУ ГТД могут быть реализованы следующие принципы адаптивного управления:

- системы с адаптацией по модели на основе учета характеристик связей МСАУ и индивидуальных (функциональных) подсистем с воздействием на параметры и структуру управляющей части сепаратных подсистем;
- адаптивные МСАУ с моделью, построенные на основе концепции ОНО, с настройкой регулятора параметрического управления ОНО и не требующие настройки параметров многосвязного РКУ основного контура системы;
- адаптивные системы с идентификацией параметров ОНО и с настройкой регуляторов сепаратных подсистем управляющей части системы;
- комбинированные адаптивные системы с элементами первых трех систем.

Открытость предлагаемой архитектуры адаптивной МСАУ ГТД обеспечивает возможность дальнейших расширений в системе, а также совместное использование как традиционных, так и интеллектуальных алгоритмов управления [10]. Так, в сепаратные каналы управления многосвязного РКУ могут включаться нейро- и нечеткие регуляторы. С помощью нейронной сети также можно построить многосвязную эталонную модель или реализовать функции наблюдения и анализа при идентификации динамических характеристик объекта на тактическом уровне управления. При формировании оптимальных программ управления на стратегическом уровне совместно с эвристическими алгоритмами могут быть использованы генетические алгоритмы. Блок принятия решений, например, может быть реализован по принципам построения нечетких экспертных систем и т. д.

2. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО КООРДИНАТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ

В развитие алгоритмов адаптивного координатно-параметрического управления многосвязными нестационарными объектами для построения адаптивных МСАУ в классе БНС с эталонной моделью ОНО проведем синтез более широкого класса алгоритмов

адаптации: пропорционально-интегральных, пропорциональных и релейных.

Необходимо отметить, что идея использования более широкого класса алгоритмов адаптации и, в частности, пропорционально-интегральных сама по себе не является новой [11–13], однако в существующей литературе отсутствуют строгие доказательства возможностей их использования в рамках рассматриваемого класса БНС применительно к ГТД как многомерному (многосвязному) объекту управления.

Рассмотрим структуру многомерного ОНО для случая его описания в уравнениях «вход-выход».

Матричная передаточная функция (МПФ) $H(p, t)$ линеаризованной модели многосвязного нестационарного объекта управления может быть представлена в виде

$$H(p, t) = \frac{1}{b_0(p) - \Delta b(p, t)} \times [D_0(p) + \Delta D(p, t)], \quad (1)$$

где операторы

$$b_0 = p^m + \sum_{\nu=0}^{m-1} b_\nu^0 p^\nu; \quad D_0(p) = \|d_{0ij}(p)\|_{n \times n},$$

$$d_{0ij}(p) = \sum_{\alpha=0}^{h_{ij}} d_{ij,\alpha}^0 p^\alpha$$

имеют постоянные (номинальные) коэффициенты, а операторы

$$\Delta b(p) = \sum_{\nu=0}^{m-1} \Delta b_\nu(t) p^\nu;$$

$$\Delta D(p, t) = \|\Delta d_{ij}(p, t)\|_{n \times n},$$

$$\Delta d_{ij}(t) = \sum_{\alpha=0}^{h_{ij}} \Delta d_{ij,\alpha}(t) p^\alpha$$

имеют переменные коэффициенты, соответствующие действующим на объект параметрическим возмущениям.

Исполнительная часть системы задается матричным оператором

$$W_{\text{им}}(p) = \text{diag}\{W_{\text{им}1}(p), W_{\text{им}2}(p), \dots, W_{\text{им}n}(p)\}, \quad (2)$$

где $W_{\text{им}}(p) = (1/a(p))M_i(p)$ — дробно-рациональные операторы, описывающие динамические свойства стационарных исполнительных механизмов.

Структура многосвязного РПУ выбирается в следующем виде:

$$\bar{\eta}(t) = \bar{u}(t) - W_{им}^{-1}(p)D_0^{-1}(p) \times [\Delta k(p, t)\bar{y}(t) + \Delta N(p, t)\bar{\rho}(t)], \quad (3)$$

где $\bar{y}(t) = \|y_i(t)\|_{1 \times n}$ — вектор управляемых координат; $\bar{\rho}(t) = \|\rho_i(t)\|_{1 \times n}$ — вектор координат регулирующих органов ОУ; $\bar{\eta}(t) = \|\eta_i(t)\|_{1 \times n}$ — вектор входных координат исполнительных механизмов; $\bar{u}(t) = \|u_i(t)\|_{1 \times n}$ — вектор входных координат ОНО,

$$\Delta k(p, t) = \sum_{\nu=0}^{m-1} \Delta k_{\nu}(t)p^{\nu}; \quad (4)$$

$$\Delta N(p, t) = \left\| \sum_{\alpha=0}^{h_{ij}} \Delta n_{ij,\alpha}(t)p^{\alpha} \right\|_{n \times n};$$

$\Delta k_{\nu}(t)$ и $\Delta n_{ij,\alpha}(t)$ — перестраиваемые коэффициенты РПУ.

При выполнении тождеств $\Delta k(p, t) \equiv \Delta b(p, t)$; $\Delta N(p, t) \equiv \Delta D(p, t)$ движение многосвязного ОНО будет описываться линейным стационарным уравнением в матрично-операторной форме

$$a(p)b_0(p)\bar{y}(t) = D_0(p)M(p)\bar{u}(t). \quad (5)$$

Эталонная модель выбирается в виде многомерного звена, описываемого уравнением, соответствующим движению многомерного ОНО на базовом режиме:

$$a(p)b_0(p)\bar{y}_m(t) = D_0(p)M(p)\bar{u}(t). \quad (6)$$

Учитывая, что для ГТД как объекта регулирования справедливо выполнение гипотезы квазистационарности, уравнение контура адаптации относительно $\bar{\delta}(t) = \bar{y}(t) - \bar{y}_m(t)$ запишется в виде

$$b_0(p)\bar{\delta}(t) = [\Delta b(p, t) - \Delta k(p, t)]\bar{y}(t) + [\Delta D(p, t) - \Delta N(p, t)]\bar{\rho}(t). \quad (7)$$

В отличие от известных интегральных законов адаптации настраиваемые коэффициенты $\Delta n_{ij,\alpha}(t)$ и $\Delta k_{\nu}(t)$ представим состоящими из двух слагаемых:

$$\Delta n_{ij,\alpha}(t) = \Delta \tilde{n}_{ij,\alpha}(t) + \beta_{ij,\alpha}\sigma_{\pi_i}(t)\rho_j^{(\alpha)}(t); \quad (8)$$

$$\Delta k_{\nu}(t) = \Delta \tilde{k}_{\nu}(t) + \gamma_{\nu} \sum_{k=1}^n \sigma_{\pi_k}(t)y_k^{(\nu)}(t), \quad (9)$$

где

$$\sigma_{\pi_i}(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{\nu=0}^{m-1} c_{ij,\nu+1} \delta_j^{(\nu)}(t), \quad (10)$$

$$\beta_{ij,\alpha}, \gamma_{\nu}, c_{ij,\nu+1} = \text{const} > 0,$$

а $\Delta \tilde{n}_{ij,\alpha}(t)$ и $\Delta \tilde{k}_{\nu}(t)$ — некоторые функции, определяющие законы самонастройки настраиваемых коэффициентов.

Синтез перестраиваемых коэффициентов $\Delta \tilde{n}_{ij,\alpha}(t)$ и $\Delta \tilde{k}_{\nu}(t)$ РПУ проводится с помощью второго метода Ляпунова. При этом функция Ляпунова V выбирается таким образом, чтобы при настройке перестраиваемых корректирующих устройств $\Delta k(p, t)$ использовалось минимальное количество интеграторов. В результате синтезированы следующие алгоритмы самонастройки:

$$\Delta k_{\nu}(t) = \chi \int_0^t \sum_{k=1}^n \sigma_{\pi_k}(t)y_k^{(\nu)}(t) dt + \gamma_{\nu} \sum_{k=1}^n \sigma_{\pi_k}(t)y_k^{(\nu)}(t); \quad (11)$$

$$\Delta n_{ij,\alpha}(t) = \chi \int_0^t \sigma_{\pi_i}(t)\rho_j^{(\alpha)}(t) dt + \beta_{ij,\alpha}\sigma_{\pi_i}(t)\rho_j^{(\alpha)}(t), \quad (12)$$

где

$$\bar{\sigma}_{\pi}(t) = \sum_{\nu=0}^{m-1} P_{\nu+1,m} \bar{\delta}^{(\nu)}(t), \quad (13)$$

$$P_{\nu+1,m} = \text{diag}\{p_{11,\nu}, p_{22,\nu}, \dots, p_{nn,\nu}\},$$

$$p_{ii,\nu} = \text{const} > 0.$$

Таким образом, в отличие от известных алгоритмов самонастройки, полученные алгоритмы наряду с интегральными составляющими также содержат пропорциональные составляющие, что существенно расширяет возможности придания БСНС заданной высокой динамической точности.

Реализация как интегральных (при $\gamma_{\nu} = \beta_{ij,\alpha} = 0$), так и пропорционально-интегральных алгоритмов адаптивного параметрического управления требует большого числа интеграторов (равного числу настраиваемых коэффициентов) в контуре адаптации. В

ряде случаев это может привести к недопустимому снижению запасов устойчивости системы. Упрощение алгоритмов самонастройки (11) и (12) можно произвести, исключив из них интегральную составляющую, т. е. положив $\chi = 0$. Можно показать, что условия устойчивости системы с пропорциональными алгоритмами адаптации

$$\begin{aligned} \Delta k_\nu(t) &= \gamma_\nu \sum_{k=1}^n \sigma_{п_k}(t) y_k^{(\nu)}(t), \\ \Delta n_{ij,\alpha}(t) &= \beta_{ij,\alpha} \sigma_{п_i}(t) \rho_j^{(\alpha)}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

совпадают с условиями асимптотической устойчивости системы с пропорционально-интегральными алгоритмами адаптации.

Если положить коэффициенты γ_ν и $\beta_{ij,\alpha}$ достаточно большими (в пределе $\gamma_\nu = \infty$ и $\beta_{ij,\alpha} = \infty$), то можно получить релейные алгоритмы адаптации вида

$$\begin{aligned} \Delta k_\nu(t) &= \overline{\Delta k}_\nu \operatorname{sign} \left[\sum_{k=1}^n \sigma_{п_k}(t) y_k^{(\nu)}(t) \right], \\ \Delta n_{ij,\alpha}(t) &= \overline{\Delta n}_{ij,\alpha} \operatorname{sign} \left[\sigma_{п_i}(t) \rho_j^{(\alpha)}(t) \right], \end{aligned} \quad (15)$$

где $\overline{\Delta k}_\nu = \operatorname{const} > 0$ и $\overline{\Delta n}_{ij,\alpha} = \operatorname{const} > 0$.

Дальнейшее сокращение числа настраиваемых коэффициентов в контуре адаптации требует использования априорно известной информации о функциональной зависимости между коэффициентами передаточной функции ОУ. В частности, при проектировании БСНС управления ГТД на основе теории подобия могут быть найдены достаточно простые функциональные зависимости между коэффициентами $\Delta d_{ij,\alpha}(t)$, которые не требуют измерения информативных параметров, характеризующих внешние условия полета ЛА [14].

Нахождение функциональных зависимостей между коэффициентами МПФ объекта предполагает разделение данных коэффициентов на базовые коэффициенты, параметрические возмущения по которым компенсируются непосредственно соответствующими цепями самонастройки, и зависимые от них коэффициенты, параметрические возмущения по которым компенсируются косвенно на основе функциональных зависимостей между соответствующими настраиваемыми коэффициентами. Синтез пропорционально-интегральных, пропорциональных и релейных алгоритмов самонастройки для многосвязного ОНО с учетом функциональной

зависимости между коэффициентами МПФ объекта управления показывает, что в этом случае для обеспечения устойчивости процесса самонастройки необходимо учитывать не только координаты ОНО, но и также выходные координаты функциональных преобразователей соответствующих зависимых коэффициентов РПУ.

Задача синтеза пропорционально-интегральных, пропорциональных и релейных алгоритмов самонастройки БСНС для случая описания многосвязного ОНО в уравнениях пространства состояний решается аналогичным образом.

Нестационарный многомерный объект описывается матричным уравнением

$$\begin{aligned} \dot{\bar{y}}(t) + (B_0 - \Delta B(t))\bar{y}(t) &= \\ &= (D_0 + \Delta D(t))\bar{\rho}(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь $\bar{y}(t) = |y_i(t)|_{n \times 1}$ — вектор выходных координат (переменных состояния) объекта; $\bar{\rho}(t) = |\rho_i(t)|_{n \times 1}$ — вектор входных координат объекта; $\Delta B(t)$ и $\Delta D(t)$ — нестационарные составляющие, отражающие действующие на ОУ параметрические возмущения, а матрицы B_0 и D_0 соответствуют номинальному режиму работы ОУ.

С учетом описания исполнительской части системы вида (2) структура многосвязного РПУ выбирается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(t) &= \bar{u}(t) - [D_0 W_{\text{им}}(p)]^{-1} \times \\ &\times [\Delta K(t)\bar{y}(t) + \Delta N(t)\bar{\rho}(t)], \end{aligned} \quad (17)$$

где $\Delta K(t) = |\Delta k_{ij}(t)|_{n \times n}$ и $\Delta N(t) = |\Delta n_{ij}(t)|_{n \times n}$ — матрицы настраиваемых коэффициентов РПУ; $\bar{u}(t)$ — вектор входных координат ОНО.

При выполнении тождеств $\Delta K(t) \equiv \Delta B(t)$ и $\Delta N(t) \equiv \Delta D(t)$ движение многосвязного ОНО будет описываться линейным стационарным уравнением

$$\dot{\bar{y}}(t) + B_0 \bar{y}(t) = W_{\text{им}}(p) D_0 \bar{u}(t). \quad (18)$$

В качестве эталонной модели выбирается многомерное звено, описываемое уравнением и соответствующее движению многомерного ОНО на базовом режиме:

$$\dot{\bar{y}}_M(t) + B_0 \bar{y}_M(t) = W_{\text{им}}(p) D_0 \bar{u}(t). \quad (19)$$

С учетом выражений (16)–(19) и гипотезы квазистационарности уравнение контура

адаптации относительно $\bar{\delta}(t) = \bar{y}(t) - \bar{y}_m(t)$ запишется в виде

$$\dot{\bar{\delta}}(t) + B_0 \bar{\delta}(t) = [\Delta D(t) - \Delta N(t)] \bar{\rho}(t) + [\Delta B(t) - \Delta K(t)] \bar{y}(t). \quad (20)$$

Аналогично (8) и (9) настраиваемые коэффициенты $\Delta n_{ij}(t)$ и $\Delta k_{ij}(t)$ представим состоящими из интегральной и пропорциональной составляющих:

$$\Delta n_{ij}(t) = \Delta \tilde{n}_{ij}(t) + \beta_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) \rho_j(t), \quad (21)$$

$$\Delta k_{ij}(t) = \Delta \tilde{k}_{ij}(t) + \gamma_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) y_j(t), \quad (22)$$

где

$$\sigma_{\pi_i}(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij} \delta_j(t), \quad \begin{matrix} \beta_{ij} = \text{const} > 0, \\ \gamma_{ij} = \text{const} > 0, \\ c_{ij} = \text{const} > 0, \end{matrix} \quad (23)$$

а $\Delta \tilde{n}_{ij}(t)$ и $\Delta \tilde{k}_{ij}(t)$ — некоторые функции, определяющие законы самонастройки настраиваемых коэффициентов.

На основе прямого метода Ляпунова из условий устойчивости процессов самонастройки синтезированы следующие алгоритмы самонастройки:

- пропорционально интегральные

$$\Delta k_{ij}(t) = \chi \int \sigma_{\pi_i} y_j(t) dt + \gamma_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) y_j(t); \quad (24)$$

$$\Delta n_{ij}(t) = \chi \int \sigma_{\pi_i} \rho_j(t) dt + \beta_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) \rho_j(t);$$

- пропорциональные

$$\begin{matrix} \Delta k_{ij}(t) = \gamma_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) y_j(t); \\ \Delta n_{ij}(t) = \beta_{ij} \sigma_{\pi_i}(t) \rho_j(t); \end{matrix} \quad (25)$$

- релейные

$$\begin{matrix} \Delta k_{ij}(t) = \overline{\Delta k}_{ij} \text{sign} [\sigma_{\pi_i}(t) y_j(t)], \\ \Delta n_{ij}(t) = \overline{\Delta n}_{ij} \text{sign} [\sigma_{\pi_i}(t) \rho_j(t)], \end{matrix} \quad (26)$$

где

$$\sigma_{\pi_i}(t) = \sum_{j=1}^n p_{ij} \delta_j(t). \quad (27)$$

Таким образом, если в качестве вектора измеряемых выходных координат объекта можно принять вектор состояний, то в этом случае существенно упрощается техническая реализация алгоритмов самонастройки БСНС, поскольку устраняется необходимость в измерении производных выходных и входных координат ОУ.

Проведенные путем моделирования сравнительные экспериментальные исследования подтверждают более высокую эффективность предлагаемых пропорционально-интегральных алгоритмов адаптации по отношению к известным интегральным алгоритмам адаптации, время отработки параметрических возмущений уменьшается более чем в 2 раза.

3. СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ АДАПТИВНЫХ МСАУ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ

Дальнейшее развитие многоуровневых адаптивных МСАУ ГТД ориентировано на придание им свойств самоорганизации. Предлагаемый метод основан на первичном описании динамической системы в форме Коши и представлении ее структуры в виде орграфа сигналов и состояний.

Задача структурного синтеза МСАУ в классе систем модального управления на основе теории графов может быть сформулирована следующим образом.

Пусть заданными являются структура неизменяемой части системы, удовлетворяющей условию полной управляемости, список корректирующих звеньев, ограничения на способы соединения указанных структур друг с другом. При этом предполагается, что заданная часть системы и корректирующие звенья описываются системой линейных дифференциальных уравнений и могут быть представлены соответствующим орграфом сигналов и состояний в базисе дуг-интеграторов и дуг-усилителей. При этом предполагается, что требуемые динамические свойства в системе обеспечиваются заданным распределением на комплексной плоскости корней характеристического полинома замкнутой системы $D(s)$, т. е. выполнением условия

$$D(s) = D^*(s), \quad (28)$$

где $D^*(s)$ — желаемый полином с заданным распределением корней.

Требуется определить структуру управляющей части, позволяющую решить относительно искомым параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$ системе нелинейных уравнений вида

$$d_i^* = d_i = f_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r), \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (29)$$

и обеспечивающую выполнение следующих условий структурного синтеза:

- 1) математической корректности задачи синтеза;
- 2) структурной устойчивости системы;
- 3) астатизма заданного порядка;
- 4) физической реализуемости управляющей части.

Рассматриваются условия разрешимости системы уравнений (29) в терминах орграфа системы. Для решения поставленных выше задач ДС представляется в форме нагруженного ориентированного псевдографа следующего вида [15].

Пусть W и V — конечные множества, элементы которых называются соответственно дугами и вершинами. Ориентированным псевдографом называется функция $\varphi: W \rightarrow V^2 = V \times V$, отображающая множество дуг в декартов квадрат множества вершин. Пусть $l: W \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ — отображение, указывающее вес дуги в соответствии с типом элемента. Если w — интегратор, то $l(w) = -1$; если w — усилитель, то $l(w) = 0$; если w — дифференциатор, то $l(w) = 1$. Пусть $k: W \rightarrow R \setminus \{0\}$ — отображение в группу вещественных чисел по умножению. Значение этого отображения на дуге $w \in W$ называется коэффициентом усиления дуги.

Пусть $v_i \in V, w_j \in W$. Последовательность $v_1 \cdot w_2 \cdot v_2 \cdot w_3 \cdot v_3 \cdot w_4 \cdot v_4 \cdot w_5 \cdot v_5$ называется ормаршрутом из вершины v_1 в вершину v_{n+1} , если для всякого $i = 1, 2, \dots, n$ $\varphi(w_i) = (v_i, v_{i+1})$. Если все вершины ормаршрута попарно различны, то это путь. Путь, который начинается и заканчивается в одной и той же вершине, называется контуром. Совокупность не пересекающихся ни по одной вершине контуров называется фактором, а совокупность не пересекающихся пути и фактора — предфактором.

Можно показать, что в этом случае характеристический полином $D(s)$ может быть вычислен по ее орграфу сигналов и состояний следующим образом:

$$D(s) = (1 + z_0)s^n + z_1s^{n-1} + \dots + z_j s^{n-j} + \dots + z_n, \quad (30)$$

где $d_i = z_{n-i} = \sum_{l(F)=i-n} k(F)$ — сумма значений всех факторов веса $(i - n)$.

Таким образом, порядок характеристического полинома замкнутой системы определяется максимальным весом факторов орграфа сигналов и состояний, т. е. максимальным количеством интеграторов в контурах, входящих в один фактор. С учетом последнего можно обобщить требования к допустимой струк-

туре многосвязного модального регулятора в терминах орграфа сигналов и состояний.

Математическая корректность

Теорема 1. Для разрешимости системы уравнений (29) необходимо и достаточно, чтобы орграф структуры содержал n варьируемых рационально независимых контуров $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, причем вес i -го контура $l(\theta_i)$ равен $(-i)$ и каждый контур θ_i рационально независим от всех варьируемых контуров большего веса.

Структурная устойчивость

Теорема 2. Для структурной устойчивости ДС необходимо, чтобы приведенный орграф системы содержал хотя бы по одному контуру θ веса $l(\theta) = (-i)$, для всех $i = 1, 2, \dots, n$.

Требуемый порядок астатизма

Теорема 3. Система n -го порядка обладает астатизмом порядка ν относительно вектора задающих воздействий $G(t) = \|g_i(t)\|_{n \times 1}$ в том и только в том случае, если подграф разомкнутой системы не содержит ни одного фактора с весами от $-(n - \nu + 1)$ до $-n$.

Введем в рассмотрение следующий структурный орграф.

Под структурным орграфом понимается орграф, получаемый из некоторого исходного орграфа системы, вершины которого соответствуют вершинам исходного орграфа, а дуге (i, j) , соединяющей некоторую i -ю входную вершину с некоторой j -й вершиной и описываемой передаточной функцией $W_{i,j}(s)$, ставится в соответствие дуга, описываемая парой структурных функций $(L_{i,j}, Q_{i,j})$, соответствующих следующим определениям.

Определение 1. Структурной функцией (СФ) L_{ij} будем называть многоразрядное число вида

$$L_{ij} = l_{ij,n} l_{ij,n-1} \dots l_{ij,1} l_{ij,0}, \quad (31)$$

где целое число $l_{ij,k}$ в k -м разряде равно количеству прямых путей веса k (k — количество последовательно соединенных дуг-интеграторов), содержащихся в исходном орграфе системы между i -й входной и j -й выходной вершинами.

Определение 2. Структурной функцией Q_{ij} будем называть многоразрядное число вида

$$Q_{ij} = q_{ij,n} q_{ij,n-1} \dots q_{ij,1} q_{ij,0}, \quad (32)$$

где целое число $q_{ij,k}$ в k -м разряде равно количеству контуров веса k , содержащихся в исходном орграфе между i -й входной и j -й выходной вершинами.

Таким образом, числа $l_{ij,k} \in N$ и $q_{ij,k} \in N$, где N — подмножество целых положительных чисел. При этом наличие нулевого i -го коэффициента в знаменателе ПФ звена, т. е. $b_i = 0$ ($i = \overline{0, n}$), означает, что оргграф звена не содержит контура веса ($n - i$). Аналогично, наличие нулевого j -го коэффициента числителя, т. е. $a_j = 0$ ($j = \overline{0, m}$), означает, что оргграф не содержит прямого пути веса ($j - n$). Следовательно, при $m < n$ будут отсутствовать прямые пути веса от 0 до $(n - m)$.

Таким образом, можно построить структурные функции L и Q дуг структурного орграфа для любого физически реализуемого звена, представленного соответствующей ПФ, без предварительного преобразования его уравнений к форме Коши.

Полученные в работе [16] операции преобразования структуры системы с помощью СФ в дальнейшем могут быть использованы для определения эквивалентных структурных функций замкнутой системы в целом. В частности, в случае одномерной системы СФ замкнутой системы ($L^{\text{зам}}, Q^{\text{зам}}$) могут быть вычислены через СФ разомкнутой системы ($L^{\text{раз}}, Q^{\text{раз}}$) и глобальной обратной связи ($L^{\text{ос}}, Q^{\text{ос}}$) следующим образом:

$$\begin{aligned} L^{\text{зам}} &= L^{\text{раз}}; \\ Q^{\text{зам}} &= Q^{\text{раз}} + Q^{\text{ос}} + L^{\text{раз}} \times L^{\text{ос}}. \end{aligned} \quad (33)$$

Очевидно, что для наиболее распространенного случая, когда в качестве обратной связи используется единичная обратная связь, которой соответствуют СФ вида $(L^{\text{ос}}, Q^{\text{ос}}) = (1, 0)$, можно получить частный случай выражения (34) вида

$$L^{\text{зам}} = L^{\text{раз}}; \quad Q^{\text{зам}} = Q^{\text{раз}} + L^{\text{раз}}. \quad (34)$$

Таким образом, с учетом введенного структурного орграфа ДС задачу структурного синтеза управляющей части системы можно сформулировать как задачу нахождения совокупности дуг корректирующих устройств ($L_{\text{ку}}^j, Q_{\text{ку}}^j$) (входных, выходных вершин и значений СФ ($L_{\text{ку}}^j, Q_{\text{ку}}^j$)), обеспечивающих выполнение заданных требований к допустимой структуре системы в целом.

Учитывая, что структурный оргграф полностью раскрывает внутреннее строение системы в базе усилителей и интеграторов, требования к допустимой структуре модального регулятора на структурном орграфе с учетом требований к исходному орграфу сигналов и состояний могут быть сформулированы в виде определенных ограничений на вид

соответствующих СФ ($L_{\text{ку}}^j, Q_{\text{ку}}^j$), удовлетворяющих некоторым множествам допустимых значений L и Q , т. е. $L_{\text{ку}}^j \in L, Q_{\text{ку}}^j \in Q$ в рамках заданной совокупности допустимых вершин изменяемой части системы. В результате можно получить следующие критерии структурного синтеза.

1) *Структурная устойчивость.* Для обеспечения структурной устойчивости системы необходимо, чтобы в эквивалентной СФ $Q^{\text{зам}}$, вычисленное по структурному орграфу для замкнутой системы как сумма эквивалентных СФ $Q^{\text{кон}}$ всех его контуров, т. е.

$$Q^{\text{зам}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{кон}}} Q_j^{\text{кон}}, \quad (35)$$

где $N_{\text{кон}}$ — общее количество контуров структурного орграфа, во всех разрядах, кроме младшего, содержало ненулевые значения, т. е. выполнялось условие

$$q_i^{\text{зам}} \neq 0 \quad \text{для всех } i = \overline{2, (n+1)}. \quad (36)$$

2) *Условие математической корректности.* Необходимое условие математической корректности задачи синтеза структуры модального регулятора по структурному орграфу можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} q_i^{\text{вар}} &\neq 0 \quad \text{для всех } i = \overline{2, (n+1)}; \\ \sum_{i=1}^{n-1} q_i^{\text{вар}} &\geq 0. \end{aligned} \quad (37)$$

3) *Требуемый порядок астатизма.* Замкнутая система n -го порядка обладает астатизмом порядка ν , если во всех эквивалентных структурных функциях между i -ми входными и j -ми выходными вершинами структурного подграфа разомкнутой системы старшие разряды, начиная с разряда под номером $(n - \nu + 2)$ до $(n + 1)$ -го разряда содержат нулевые значения, а $(n - \nu + 1)$ -й разряд является ненулевым, т. е. для каждого $Q_{ij}^{\text{раз}}$ должно выполняться следующее условие:

$$q_k^{\text{раз}_{ij}} \begin{cases} = 0, & \text{для всех } k = \overline{(n - \nu + 2), (n + 1)}; \\ \neq 0, & \text{для } k = n - \nu + 1, \text{ где } k \neq 0. \end{cases} \quad (38)$$

4) *Критерий минимальной сложности.* Количество варьируемых параметров определяется по структурному орграфу системы суммированием значений всех разрядов структурных функций ($L_{\text{ку}}^{ij}, Q_{\text{ку}}^{ij}$) для всех корректирующим устройств:

$$N_{\text{вар}} = \sum_{i,j=1}^{N_{\text{кы}}} \sum_k^{n_{\text{кы}}^{ij}} [b_{\text{кы}k}^{ij} + q_{\text{кы}k}^{ij}] = \min. \quad (39)$$

Анализ выражений (35)–(38) показывает, что выполнение условия синтеза системы модального управления (32), т. е. обеспечение близости коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы $D(s)$ к значениям коэффициентов желаемого полинома $D^*(s)$, обеспечивающего заданное распределение корней на комплексной плоскости, на структурном орграфе системы трансформируется в условие

$$Q^{\text{вар}} = Q^{\text{вар}*}, \quad (40)$$

где $Q^{\text{вар}*}$ — желаемая структурная функция, интегрально обеспечивающая выполнение критериев синтеза (35)–(39). При этом решение задачи структурного синтеза в рассматриваемой постановке в силу свойств структурного орграфа гарантируется в классе физически реализуемых корректирующих устройств. Следует отметить, что возможна модификация структурных функций таким образом, чтобы они содержали информацию о количестве положительных или отрицательных контуров системы, а также информацию о количестве положительных и отрицательных прямых путей, что позволяет учитывать знаковые условия структурной устойчивости системы.

На основе полученных критериев структурного синтеза в работе [16] предложена многошаговая процедура структурного синтеза с использованием СФ на примере синтеза структур управляющей части систем модального управления методом СФ. С целью автоматизации процедуры синтеза структур МСАУ на основе метода структурных функций разработан пакет прикладных программ — «Среда визуального проектирования „Структурный синтез“» [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен новый более широкий класс алгоритмов адаптивного координатно-параметрического управления: пропорционально-интегральные, пропорциональные и релейные алгоритмы адаптации, синтезированные на основе прямого метода Ляпунова для случаев описания многосвязного ОНО как в уравнениях «вход-выход»,

так и в уравнениях пространства состояний. Данные алгоритмы позволяют расширить структуры бесперебойных адаптивных МСАУ ГТД, обеспечивающих более широкую область устойчивости процессов самонастройки и тем самым повышающих эффективность замкнутых алгоритмов адаптации в условиях параметрической неопределенности.

Предложен новый способ представления структур сложных динамических систем в виде базовых элементарных структурных характеристик — структурных функций, представляющих собой многоуровневые целые числа, которые несут качественную информацию о внутреннем строении ДС независимо от способа ее описания и позволяют связывать динамические свойства системы с ее структурой, описывать структурные свойства как отдельных подсистем, так и МСАУ в целом, что дает принципиальную возможность для построения самоорганизующихся управляемых сложных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1999. 609 с.
2. **Проектирование** авиационных ГТД / А. М. Ахмедзянов, Х. С. Гумеров, А. А. Рыжов и др. Уфа: УАИ. 1992. 236 с.
3. **Оптимизация** многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А. А. Шевяков, Т. С. Мартыанова, В. Ю. Рутковский и др.: Под общей ред. А. А. Шевякова и Т. О. Мартыановой. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
4. **Интегральные** системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
5. **Гуревич О. С., Гольберг Ф. Д., Селиванов О. Д.** Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета / Под общей ред. О. С. Гуревича. М.: Машиностроение, 1994. 304 с.
6. **Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И. Н., Земляков С. Д.** Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. М.: Машиностроение, 1972. 260 с.
7. **Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Земляков С. Д.** Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами. М.: Наука, 1980. 244 с.
8. **Проектирование** систем автоматического управления газотурбинных двигателей (нор-

- мальные и нештатные режимы) / Ю. М. Гусев, Н. К. Зайнашев, А. И. Иванов и др.; Под ред. Б. Н. Петрова. М.: Машиностроение, 1981. 400 с.
9. **Многоуровневое** управление динамически объектами / В. И. Васильев, Ю. М. Гусев, В. Н. Ефанов и др.; Под ред. В. Ю. Рутковского и С. Д. Землякова. М.: Наука, 1987. 309 с.
 10. **Мунасыпов Р. А.** Нейро-нечеткий подход к управлению газотурбинным двигателем // Тр. междунар. симп. по актуальным проблемам авиадвигателестроения. Уфа: УГАТУ, 1999. С. 170–173. (На англ. яз.)
 11. **Кабальнов Ю. С.** Использование пропорционально-интегральных алгоритмов самонастройки в адаптивных системах с эталонной моделью. Деп. в ВИНТИ № 777-В97, 14.03.97.
 12. **Никин А. Д.** Адаптивная система управления температурно-силовыми режимами процесса резания металлов. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1999. 194 с.
 13. **Фрадков А. Л.** Адаптивное управление в сложных системах. Беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 292 с.
 14. **Любомудров Е. В.** Применение теории подобия при проектировании систем управления ГТД. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
 15. **Бабак С. Ф., Ильясов Б. Г., Рутковский В. Ю.** Способ аналитического вы-

числения коэффициентов передаточных функций многомерных систем // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 3. С. 557–559.

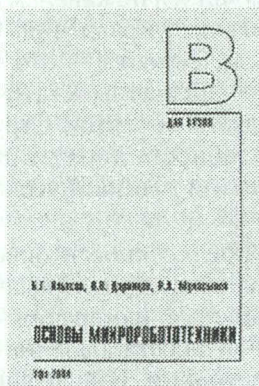
16. **Ильясов Б. Г., Мунасыпов Р. А., Мунасыпова Э. С.** Синтез структур сложных динамических систем методом функциональных структурных чисел // Рос. АН. Изв. АН. Теория и системы управления. М.: Наука, 1997. № 3. С. 3–11.
17. **Свид.** об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2002611210. Среда визуального проектирования «Структурный синтез» / Р. А. Мунасыпов, Г. И. Таназлы, И. Н. Яговцев. М.: Рос-Патент, 25 июля 2002.

ОБ АВТОРЕ



Мунасыпов Рустэм Анварович, доц., проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж. электронной тех-ки (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по сист. анализу, управл. и обр. информации (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. управления сложн. техн. системами.

Сигнальная информация



Б. Г. Ильясов, О. В. Даринцев, Р. А. Мунасыпов

ОСНОВЫ МИКРОРОБОТОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Научный редактор д-р техн. наук, проф. **Б. Г. Ильясов**

Уфа: УГАТУ, 2004

161 с. Табл. 9. Ил. 78. Библиогр.: 38 назв. ISBN 5-86911-452-7

Рецензенты: канд. техн. наук **Е. В. Денисова**;
д-р техн. наук, проф. **В. Ц. Зориктуев**

Излагаются основы проектирования и построения микроэлектромеханических систем. Приводятся систематизированные сведения о существующих в настоящее время технологиях изготовления микромеханических систем, классификация существующих микроприводов и микророботов, построенных на их базе. Рассматривается множество конструкций микроэлектромеханических систем и компонентов, анализируется достигнутый уровень разработок, демонстрируется их практическая значимость.

Рекомендовано УМО вузов по университетскому политехническому образованию для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 652000 «Мехатроника и робототехника».