

чатного узла с разработанным конструктивом корпуса. Кроме того, 3D-модели стали неотъемлемой частью различных тестов, которым подвергаются бортовые ЭС, устройства военного назначения и системы жизнеобеспечения гражданского использования, т. е. устройства, к которым предъявляются повышенные требования по надежности и качеству.

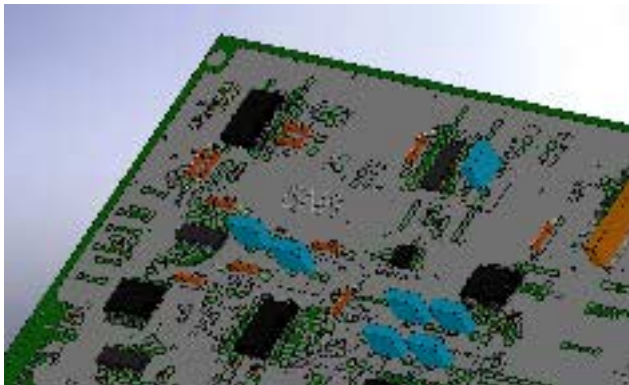


Рис. 5. Визуальное отображение печатного узла при использовании форматов DXF и IDF

В этом плане наиболее перспективным, на наш взгляд, является информационный обмен в рамках ЕИП, который обеспечивается подходом CALS. В этом случае можно свести к минимуму бумажный документооборот для более производительного использования квалифицированных проектировщиков ЭС.

Функционирование единого информационного пространства и взаимодействие EDA-, CAD-, CAE-систем САПР обеспечивается PLM-технологиями, на основе которых могут создаваться электронные сетевые предприятия.

Библиографический список

1. Жаднов, В. В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств / В. В. Жаднов, А. В. Сарафанов. М. : Солон-Пресс, 2004.

A. V. Sarafanov, V. S. Eresko, A. M. Fen, S. I. Tregubov, A. S. Nekrasov

PROBLEMS OF DESIGNING 3D-MODELS OF PRINTED KNOTS FOR ELECTRONIC DEVICES

One of the ways of designing printed boards and elements in single information space using applied systems of automation of design is presented. It considers transfer problems of visual representation of printed device by its 3D-model. Also considered number of features of usage universal format in application systems and testing of its possibilities. In addition the method of reception single information space based on PLM vault is considered.

Keywords: SIP, 3D-model, design, printed circuit knot.

УДК 621.001.05

С. В. Доронин, Д. В. Косолапов

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА РЕСУРСА ПРИ УДАРНО-ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Предложен и реализован методический подход к оценке ресурса деталей машин при ударно-циклическом нагружении, основанный на совместном использовании скорректированной линейной гипотезы накопления усталостных повреждений и методов схематизации нестационарных нерегулярных процессов нагружения, получаемых вычислительным моделированием методом конечных элементов.

Ключевые слова: ударно-циклическое нагружение, ресурс, моделирование.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей машин и элементов конструкций при их проектировании в настоящее время методически хорошо разработан, апробирован и обеспечен современными CAD/CAE-системами. Вместе с тем задачи оценки и обеспечения не только прочности, но и ресурса деталей имеют ряд особенностей, учет которых требует детального исследования взаимосвязи НДС и интенсивности расходования ресурса.

Расчетное прогнозирование ресурса деталей и элементов машиностроительных конструкций является одной из важнейших задач, решаемых при проектировании и эксплуатации машин и оборудования во всех отраслях промышленности. Методическая и информационная база инженерных расчетов, основанная на общих представлениях о закономерностях расходования ресурса, содержит значительное число специфических моделей и алгоритмов, учитывающих отраслевую принадлежность конст-

рукций, особенности их деформирования и характерные предельные состояния. При этом если точность оценок ресурса для некоторых типов конструкций достигает приемлемого для решения практических задач уровня, то для других типов многие аспекты расчета ресурса остаются слабо разработанными, что связано со сложным характером деградационных процессов и отсутствием описывающих их достоверных моделей. К таким конструкциям относятся, в частности, детали машин, предельные состояния которых формируются в условиях ударно-циклического нагружения. Недостаточная методическая разработанность расчета ресурса при таких нагрузках обусловлена в основном тем, что следствием импульсного нагружения деталей являются их последующие свободные колебания, приводящие к циклическому знакопеременному деформированию материала. Характер НДС этих деталей является весьма сложным, поскольку он развивается во времени при распространении и отражении от всех поверхностей детали волн деформаций и их взаимодействии. Разрушение материала в данном случае связано с накоплением усталостных повреждений.

Таким образом, возникает задача разработки, апробации и использования в инженерной практике методического подхода к оценке ресурса деталей машин и элементов конструкций, разрушающихся вследствие накопления усталостных повреждений при ударно-циклическом нагружении.

Теоретической и методической основой разработанного авторами подхода являются широко известные и апробированные корректированная линейная гипотеза накопления усталостных повреждений [1] и методы схематизации нестационарных нерегулярных процессов нагружения [1], получаемых вычислительным моделированием с учетом конструктивной формы деталей, кинематических и энергетических характеристик машин.

В соответствии с корректированной линейной гипотезой ресурс детали, выраженный числом блоков нагружения λ до появления трещины, составляет

$$\lambda = \frac{a_p \sigma_{-1d}^m N_G}{\sum_{\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1d}} \sigma_{ai}^m v_{i\sigma}}, \quad (1)$$

где a_p – корректированное значение суммы относительных долговечностей, соответствующее предельному повреждению; $v_{i\sigma}$ – число циклов повторения амплитуд σ_{ai} в i -м блоке нагружения; m – показатель наклона кривой усталости в двойных логарифмических координатах; σ_{-1d} – предел выносливости с учетом конструктивно-технологических факторов; N_G – абсцисса точки перелома кривой усталости.

Величины a_p , m , σ_{-1d} , N_G определяются экспериментально при скоростях нагружения образцов, соответствующих скоростям соударения деталей. При отсутствии экспериментальных данных предварительные оценки могут быть получены при использовании обобщенных расчетных значений этих величин.

Оценки величин σ_{ai} и $v_{i\sigma}$ для нестационарных нерегулярных процессов $\sigma = f(t)$ изменения напряжений у во времени t могут быть получены путем их схематизации одним из известных методов, среди которых наиболее предпочтительным принято считать метод полных циклов [1].

Рассмотрим далее особенности и условия вычислительного моделирования процессов нагружения, связанные с получением оценок ресурса на базе корректированной линейной гипотезы и методов схематизации. При этом следует иметь в виду, что в данной статье под процессом нагружения понимается процесс изменения напряжений во времени $\sigma = f(t)$ в некоторой потенциально опасной с точки зрения возникновения усталостной трещины локальной зоне детали, и тогда оценка ресурса соответствует именно этой локальной зоне. Таким образом, в детали могут быть рассмотрены несколько потенциально опасных зон (в первую очередь конструктивных концентраторов напряжений) с оценкой ресурса для каждой из них.

Эти особенности и условия связаны с тем, что в основу методики оценки ресурса положено получение модели процесса $\sigma = f(t)$ методом конечных элементов (МКЭ), позволяющим снять ограничения, накладываемые на конструктивную форму деталей другими известными расчетными схемами. При всей общности подхода к моделированию систем с распределенными параметрами МКЭ предполагает выбор ряда характеристик вычислительного процесса в зависимости от исследуемого объекта. По выбору этих характеристик однозначных рекомендаций не существует, они обосновываются преимущественно путем вычислительных экспериментов и являются оптимальными или рациональными только для объектов рассматриваемого класса и применяемых при их описании типов расчетных схем.

При расчете НДС деталей машин импульсного действия решаются дифференциальные уравнения движения деформируемого тела в перемещениях следующего вида:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{g(t)\}, \quad (2)$$

где $[M]$, $[K]$ – матрицы масс и жесткости системы соответственно; $\{\ddot{x}\}$, $\{x\}$ – векторы узловых ускорений и перемещений соответственно; $\{g(t)\}$ – вектор узловых усилий. Для адекватного описания характера деформирования применяется модель упруго-пластического тела. В качестве уравнения состояния материала, т. е. определяющего уравнения, используется аппроксимация экспериментальной диаграммы деформирования, учитывающей эффекты задержки пластической деформации при достижении предела текучести и последующего его всплеска [2]. Характеристики смоделированного процесса $\sigma = f(t)$ в значительной степени зависят от шага интегрирования Δt уравнения (2).

Теоретически выбор шага Δt неоднозначен и связан с одновременным учетом частот собственных колебаний и нелинейного поведения конструкции, эффектов распространения волн деформаций, доступных вычислительных ресурсов, а также ряда других факторов. С уменьшением шага интегрирования увеличивается степень соответствия смоделированного процесса нагружения реальному, но при этом резко возрастают объем и длительность расчетов, что оказывается критичным даже для современных средств вычислительной техники. В связи с тем что в данном случае смоделированный процесс $\sigma = f(t)$ не является самостоятельным объектом исследования, а представ-

ляет интерес с позиций его схематизации, учитывающей в первую очередь количество экстремумов процесса и размах напряжений между ними, оценку повреждающего воздействия и ресурса в соответствии с (1), обоснуем рациональную величину шага интегрирования с помощью следующих рассуждений.

Рассмотрим реальный процесс нагружения $\sigma = f(t)$ в сравнении с процессами, смоделированными при различных величинах шага интегрирования Δt (рис. 1). С уменьшением шага интегрирования смоделированный процесс становится все более детализированным, приближаясь по форме к реальному, и начинает содержать большее число экстремумов. Например, в интервале времени $[t_b; t_c]$ процесс, смоделированный с шагом $\Delta_1 t$, не содержит экстремумов, при шаге $\Delta_2 t$ этот процесс содержит один экстремум, а при шаге $\Delta_3 t$ – уже два экстремума (экстремумы в граничных точках t_b и t_c диапазона не учитываются).

Однако не все экстремумы напряжений вносят свой вклад в накопление повреждений и расходование ресурса, поскольку с увеличением их числа средние значения σ_{ai} уменьшаются и смоделированный процесс, в соответствии с выражением (1), содержит все меньше циклов амплитуд $\sigma_{ai} \geq \sigma_{-1d}$. Кроме того, при достаточно малом шаге интегрирования в смоделированном процессе перестают появляться новые экстремумы и повреждающее действие процесса нагружения не изменяется. Так, процессы $\sigma = f(t)$, смоделированные на интервале времени $[0; t_d]$ с шагом $\Delta_3 t$ и $\Delta_4 t$, обладают одинаковым повреждающим воздействием и приводят к неизменным оценкам ресурса. Таким образом, уменьшение величины шага интегрирования ниже некоторого рационального значения $\Delta_p t$ приводит к дальнейшим затратам вычислительных ресурсов и увеличению соответствия смоделированного процесса $\sigma = f(t)$ реальному, но не повышает точность оценки ресурса λ . По мере уменьшения величины шага Δt расчетный ресурс λ снижается, как и интенсивность этого снижения, достигая стабильных значений $\lambda \rightarrow \lambda_p$ при $\Delta t \rightarrow \Delta_p t$ (см. рис. 1).

С учетом вышесказанного для выбора шага интегрирования уравнения (2) в задачах, конечным результатом решения которых являются оценки ресурса деталей, может быть предложено проведение дополнительной вычислительной процедуры, обеспечивающей учет повреждающего воздействия большинства экстремумов, характерных для реального процесса нагружения.

В разработанной авторами и конечно-элементной модели конструкции решение уравнения (2) выполняется многократно при варьировании шага интегрирования Δt . При каждом решении получается нерегулярный процесс нагружения $\sigma = f(t)$, схематизируемый методом полных циклов. При подстановке определенных при этом значений σ_{ai} и $v_{i\sigma}$ в уравнение (1) вычисляются соответствующие оценки ресурса λ , которые в данном случае зависят от величины шага интегрирования. Таким образом, на каждой j -й итерации варьирования Δt получаются пары значений $\Delta t - \lambda_j$, по которым строится зависимость $\lambda = h(\Delta t)$. Анализ чувствительности последнего выражения позволяет установить ту величину шага Δt , при которой наблюдается стабилизация оценок ресурса λ . Эта величина должна быть такой, чтобы уменьшение шага интегрирования в k раз приводило к изменению ресурса не более чем на величину p . При этом процедура выбора шага интегрирования сводится к последовательному уменьшению Δt на каждой следующей итерации $\Delta_{j+1} t = \Delta_j t / k$, где $\Delta_j t$ – шаг интегрирования на предыдущей итерации, до выполнения условия $(\lambda_{j+1} - \lambda_j) / \lambda_j \leq p$. Величина p зависит от требуемой точности оценки ресурса и обычно может быть принята на уровне 3...5 %. С увеличением величины k уменьшается как число итераций, так и точность получаемой зависимости $\lambda = h(\Delta t)$. Принятие $k = 2$, как правило, обеспечивает приемлемые объем и точность вычислений.

Описанная выше процедура позволяет смоделировать процесс, порождаемый одиночным соударением. Кроме обоснования величины Δt , обеспечивающей моделирование процесса $\sigma = f(t)$ с требуемым уровнем детализации, дополнительного рассмотрения требуют следующие

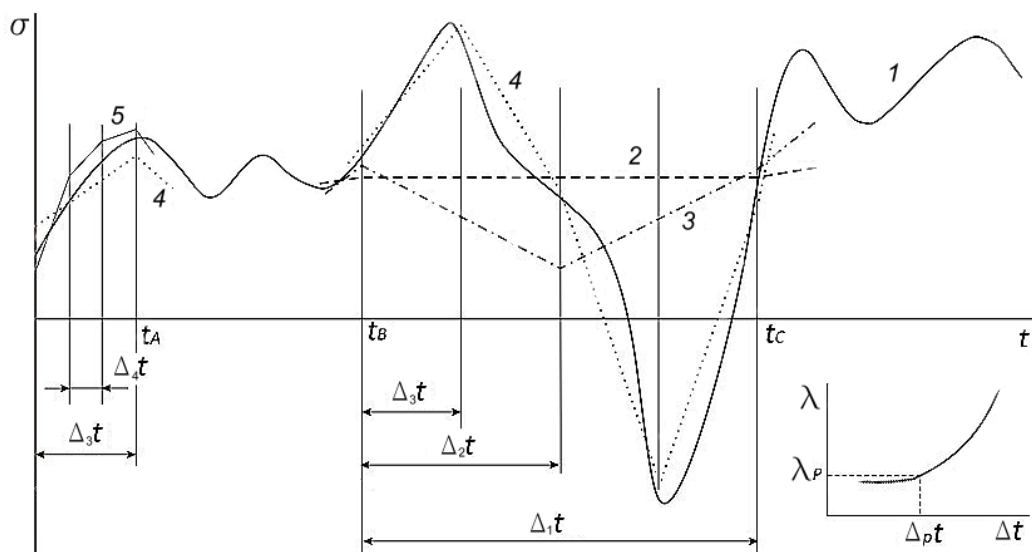


Рис. 1. Схематизация реального процесса нагружения (1) процессами, смоделированными при шаге интегрирования $\Delta_1 t$ (2), $\Delta_2 t$ (3), $\Delta_3 t$ (4), $\Delta_4 t$ (5)

щие важные факторы: характер и интенсивность затухания процессов $\sigma = f(t)$ и взаимодействие этих процессов, порождаемое отдельными соударениями деталей.

Необходимость в анализе и учете характера затухания процесса $\sigma = f(t)$ обусловлена очевидным снижением амплитуд и размахов напряжений с течением времени после приложения ударного импульса. Благодаря этому по достижении некоторого момента времени t^* повреждающее действие процесса $\sigma = f(t)$ значительно уменьшается, а после момента времени t^{**} , когда все амплитуды σ_{ai} оказываются меньше σ_{-1d} , прекращается вовсе (рис. 2). Учет повреждающего действия процесса после момента времени t^* требует дополнительного объема вычислений, не оказывая при этом ощутимого влияния на оценку ресурса. Отсюда становится понятным, что выбранной на предыдущем этапе рациональной величины шага интегрирования $\Delta_p t$ достаточно для осуществления аналогичной по сути вычислительной процедуры, сводящейся к варьированию величины t_p , получению соответствующих оценок ресурса λ_p , построению зависимости $\lambda = s(t)$ по парам значений $t_j - \lambda_j$ и определению такого значения $\lambda^* = \lambda_{j+1}$ на $(j+1)$ -й итерации, при котором $(\lambda_{j+1} - \lambda_j) / \lambda_j \leq p$, откуда и находится величина t^* (рис. 2).

Таким образом, моделирование процесса $\sigma = f(t)$ с шагом интегрирования $\Delta_p t$ в течение времени t^* после начала приложения ударного импульса позволяет получить оценки ресурса с приемлемой точностью при минимальных объеме вычислений и затратах времени. При этом оказываются учтенными все особенности процесса нагружения, обусловленного единичным соударением деталей. Процесс $\sigma = f(t)$ на интервале времени от начала соударения до t^* можно рассматривать в качестве блока нагружения, а ресурс λ измерять количеством N соударений деталей.

Для виброударных систем, в которых частота соударений соизмерима с частотой собственных колебаний взаимодействующих элементов, промежутки времени между ударами в большинстве случаев больше времени, необходимого для затухания колебаний, что позволяет рассматривать процесс

нагружения как последовательность независимых ударов. Если частота собственных колебаний деталей намного больше частоты соударений, то необходим дополнительный анализ взаимодействия отдельных соударений.

Процессы нагружения, вызванные отдельными соударениями деталей, можно считать независимыми при $t_n \gg t^{**}$, где t_n – периодичность приложения ударного импульса (см. рис. 2). В противном случае необходим учет взаимодействия процессов нагружения, порожденных соседними во времени соударениями, поскольку «хвосты» процесса $\sigma = f(t)$, не учитываемые при $t > t^*$ как не оказывающие повреждающего воздействия, суммируются с процессом $\sigma = f(t)$ от последующего соударения на интервале времени $t > t_n$ и могут привести к увеличению амплитуд напряжений, числа экстремумов и повреждающего действия этого процесса. И тогда суммирование напряжений, порождаемых каждой волной деформаций, приводит к получению выражения для нерегулярного процесса изменения интенсивности напряжений во времени для рассматриваемой локальной зоны детали:

$$\sigma_{\Sigma}(t) = \sum_{l=1}^n \sigma_l(t), \quad (3)$$

где $\sigma_l(t)$ – процесс нагружения, порождаемый l -й волной деформации; n – количество ударных импульсов за анализируемый промежуток времени. Здесь в качестве блока нагружения следует рассматривать периодически повторяющуюся часть процесса $\sigma_{\Sigma}(t)$ на интервале времени между последовательными соударениями деталей, а ресурс, как и в случае невзаимодействующих процессов $\sigma = f(t)$, измерять количеством N соударений деталей.

Применение формулы (3) оправдано в случае упругого характера деформирования рассматриваемой локальной конструктивной зоны. При появлении упругопластических эффектов необходимо моделировать процесс $\sigma = f(t)$ при нагружении детали последовательностью ударных импульсов.

Описанный в данной статье методический подход можно рассматривать как исследование рациональных

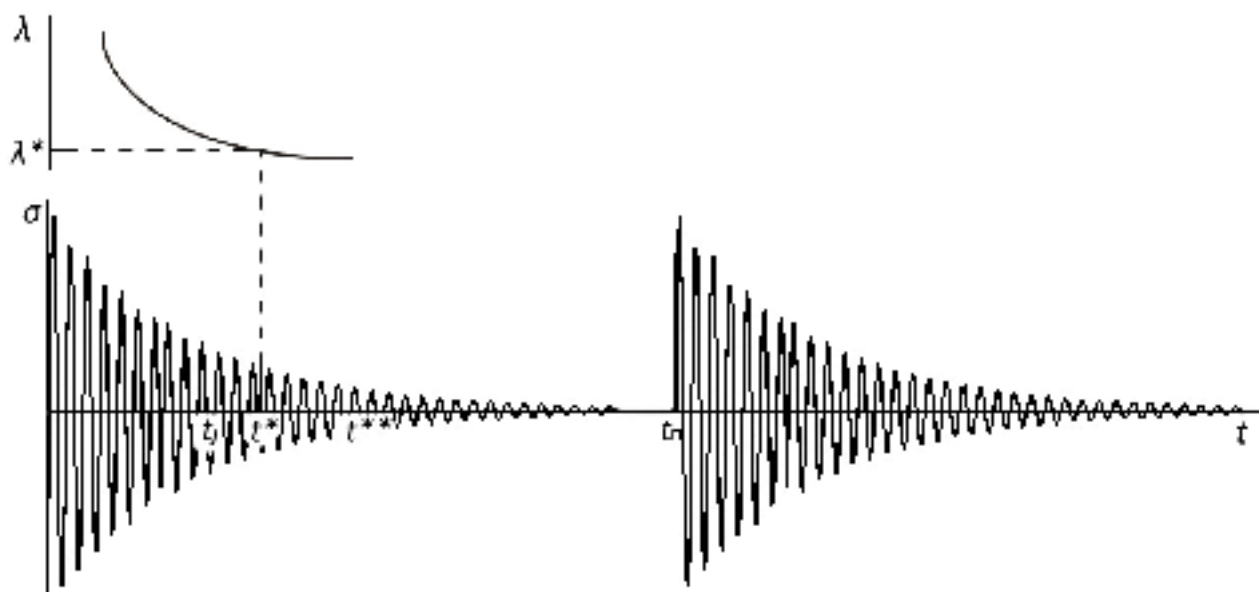


Рис. 2. Оценка ресурса с учетом затухания колебаний напряжений

характеристик вычислительного процесса, осуществляемое для деталей и элементов конструкций определенного класса. Полученные результаты могут быть положены в основу расчета всех деталей с аналогичными конфигурацией и условиями нагружения.

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт расчетов НДС и ресурса деталей погружных пневмоударников [3]. Это позволяет рекомендовать рассмотренный выше подход к апробации в проектных расчетах деталей других типов, применяемых в машинах импульсного действия.

Библиографический список

1. Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. М. : Машиностроение, 1993.
2. Погодин-Алексеев, Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Г. И. Погодин-Алексеев. М. : Машиностроение, 1966.
3. Доронин, С. В. Оценка конструктивных решений и расчетное обоснование рациональных параметров деталей машин ударного действия для разрушения горных пород / С. В. Доронин, Д. В. Косолапов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 10. С. 47–53.

S. V. Doronin, D. V. Kosolapov

STRESS-STRAIN STATE MODELING AND LIFETIME AT PERCUSSIVE-CYCLIC LOADING ESTIMATION

The methodical approach to lifetime estimation of machines details at percussive-cyclic loading is offered. The realization is based on sharing the corrected linear hypothesis of tireless damages accumulation and schematization the irregular transitional loading processes methods, calculated by the finite elements method.

Keywords: percussive-cyclic loading, lifetime, modeling.

УДК 681.51

А. Т. Когут

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С ПРИБЛИЖЕННЫМИ АЛГОРИТМАМИ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОДНИМ КЛАССОМ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена методика синтеза локальных регуляторов при управлении многомерными объектами, содержащими несколько нелинейных элементов. Исследована устойчивость замкнутых систем при реализации приближенных алгоритмов формирования управляющих воздействий. Проведен сравнительный анализ полученных аналитических выражений и результатов имитационного моделирования.

Ключевые слова: объект, модель, система, регулятор, алгоритм, устойчивость.

Задача исследования процессов управления в нелинейных системах вторым методом Ляпунова остается и в настоящее время достаточно актуальной [1], особенно если объект описывается многомерными моделями. В этом случае рекомендуется разделять сложную систему на подсистемы и для каждой из них решать локальную задачу управления, а затем объединить их по условию обеспечения требуемого движения всей системы [2]. Законы управления для каждой из подсистем отыскиваются по условиям устойчивости, полученным на основе локальных функций Ляпунова, для полной системы применяется векторная функция Ляпунова.

В данной статье автором предлагается не разделять общую желаемую траекторию на локальные, что не всегда возможно, особенно в системах пространственного движения, а использовать в качестве модели объекта такие переменные состояния, у которых каждая координата зависит не более чем от одного управления. Для этих целей можно применять, например, преобразование

Луенбергера [3]. Синтез алгоритмов управления в этом случае осуществляется исходя из условия обеспечения устойчивости желаемого движения на основе достаточно известных и хорошо изученных скалярных функций Ляпунова [4]. Траекторное управление тогда сводится к обратной задаче динамики [3], которую можно решать с помощью приближенных методов, построенных на линеаризации и использующих первые [5] и вторые производные достаточно гладкой нелинейной функции [6].

Постановка задачи. Пусть стационарная нелинейная система описывается уравнениями

$$\dot{y}(t) = A y(t) + B \Phi[u(t)], \quad y(0) = y_0, \quad (1)$$

$$e(t) = g(t) - y(t), \quad (2)$$

$$u(t) = C e(t). \quad (3)$$

Здесь $y(t)$, $u(t)$, $e(t)$ и $g(t)$ – n -мерные векторы состояния, управления, ошибки и входного воздействия соответственно, поэтому все рассматриваемые в данной статье матрицы имеют размер $n \times n$. Собственные значения си-