

Раздел II. Нелинейная динамика и системный синтез

УДК 681.51

Г.Е. Веселов

ПРОБЛЕМА СИНТЕЗА ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРАТЕГИЙ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ*

Предлагаемый в статье новый подход к проектированию систем иерархического управления группами робототехнических систем базируется на использовании нелинейных моделей движения исследуемых систем. Применение синергетической идеологии позволяет провести естественную динамическую декомпозицию сложной нелинейной многосвязной системы на множество взаимодействующих подсистем, при этом в результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных аттракторов – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество целей, а вся система в целом «погружается» в глобальный аттрактор, соответствующий исходному множеству целей. При проектировании координирующего регулятора учитывается поведение подсистем, находящихся на нижних уровнях, в виде уравнений, описывающих их "остаточную динамику" – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях). Применение предлагаемой идеологии иерархического синтеза стратегий группового управления робототехническими системами позволяет синтезировать на каждом уровне иерархии подсистемы управления, полностью реализующие соответствующие целевые функции и обеспечивающие асимптотически устойчивое поведение подсистем.

Иерархическая структура; системный синтез; нелинейные системы; робототехнические системы; синергетика; групповое управление.

G.E. Veselov

THE PROBLEM OF GROUP CONTROL HIERARCHICAL STRATEGIES DESIGN FOR ROBOTICS SYSTEMS

In the paper we propose the new approach to hierarchical control system design for groups of robotics systems based on using of nonlinear math. models of explored system motion. By using of synergetics ideology, we can perform a natural dynamics decomposition of complex nonlinear multilinked system on a variety of interacted sub-systems. Here, as a result of synergetics design procedure, each of sub-system (or their groups) is embedded on the intersection of corresponding local attractors, i.e. invariant manifolds reflecting particular subset of targets. And the whole system is embedding into the global attractor that corresponds to initial subset of targets. While designing the coordinating regulator, we account the behavior of sub-systems, that are situated on the lower levels, as an equations describe their residual dynamics, i.e. behavior on local attractors (invariant manifolds). Application of the proposed ideology of robotics system group control strategies hierarchical design provides synthesis of control sub-system on the each level of hierarchy that can realize the corresponding target function and guarantee the asymptotic stability of sub-system behavior.

Hierarchical structure, system synthesis; nonlinear systems; robotics systems; synergetics; group control.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №10-08-00912-а).

Введение. Все возрастающая роль процессов автоматизации во всех сферах человеческой деятельности в значительной мере определяет потребности во внедрении робототехнических систем (РТС) практически во всех отраслях производства (машиностроение, электронная и электротехническая промышленность, приборостроение, энергетика и т.д.). Повышенный интерес к РТС обусловлен их способностью работать в различного рода специфических и экстремальных средах, в том числе в условиях неопределенности и противодействия внешней среды. Причем круг задач, решаемых РТС, непрерывно расширяется, и соответственно возрастают требования к их функциональным возможностям. Усилия ведущих западных фирм, занятых разработкой РТС, сосредоточены на важнейших направлениях реализации функциональных блоков (модулей) РТС: задачах разработки и создания средств перемещения и манипулирования, сенсорных устройств и систем приводов; средств управления и обеспечения связи с оператором и т.д. При решении же задач группового управления роботами исследования направлены на создание систем управления группами роботов для стационарных и реальных сред. При этом основной задачей планирования коллективных действий роботов является определение действий каждого робота в составе группы для оптимального достижения поставленной перед группой цели [1, 2].

Комплексы перечисленных проблем объединяются в национальные крупномасштабные проекты, направленные на создание РТС с предельными возможностями. По всем перечисленным проблемам получены интересные и практически значимые результаты, но создание нового поколения РТС, обладающих свойствами адаптируемости к внешней среде и надежно функционирующих, продолжает оставаться важнейшей стратегической проблемой современной техники. Однако в основу существующих подходов положены методы теории автоматического управления и теории организаций, базирующиеся, как правило, на использовании линеаризованных или упрощенных моделей движения исследуемых объектов. При этом очевидно, что РТС как многосвязные и многомерные нелинейные динамические объекты, состоящие из ряда функциональных модулей, требуют разработки системного подхода к организации их функционирования, учета свойств взаимосвязанности и взаимовлияния, которые особенно проявляются в условиях неопределенности и противодействия внешней среды. Адекватное математическое описание поведения РТС в таких режимах должно, как правило, определяться в виде нелинейных моделей движения. Необходимость учета нелинейных явлений определяется наличием механических, электрических, тепловых и др. ограничений. Учет этих ограничений в настоящее время становится обязательным в связи с требованиями интенсификации режимов функционирования РТС, их приближения к предельно допустимым. Кроме того, РТС могут иметь (и имеют) высокую размерность математических моделей, описывающих динамические свойства их функциональных модулей.

Таким образом, специфика структурных и функциональных свойств перспективных РТС позволяет выделить их следующие динамические особенности: многосвязность, нелинейность и многомерность. Отмеченные характерные особенности РТС требуют перехода на новые идейные и концептуальные основы построения и управления РТС. Такой фундаментальной направляющей концепцией, на наш взгляд, является концепция управляемого взаимодействия энергии, вещества и информации, в основе которой лежат методы синергетической теории управления и которая позволит совершить принципиальный прорыв в решении стратегических проблем управления РТС.

Предлагаемый в статье подход позволяет принципиально по-новому решить задачу группового управления коллективами роботов, повысить эффективность и

надежность этих систем. При изучении сложных многомерных и многосвязных РТС, состоящих из групп взаимодействующих роботов, необходимо оперировать с большим числом координат состояния. Их количество может оказаться столь значительным, что проблема синтеза таких систем известными методами становится практически необозримой и, следовательно, неразрешимой. Данная проблема разрешается в виде принципа иерархической структуризации, положенного в основу предлагаемой теории и методов синтеза, согласно которому любой сложный РТС можно представить в виде некоторой совокупности локальных систем, каждая из которых, в свою очередь, включает в себя энергетическую (т.е. динамическую или силовую) и информационную или управляющую подсистемы, находящиеся друг с другом в тесном взаимодействии. Иначе говоря, на общем энергетическом фоне силовой динамики поведение сложного РТС, находящегося в изменяющейся внешней среде, будет также определяться и его информационными свойствами. Добавление к энергетической компоненте РТС его информационной составляющей расширяет область фазового пространства его устойчивого существования. Информационная составляющая такого РТС связана с его целью и во многом определяется структурой формируемых обратных связей, а энергетическая или силовая составляющая создает основу для его информационного поведения. В свою очередь, каждая из указанных локальных систем может содержать несколько уровней иерархии, когда на более высокий уровень поступает некоторая обобщенная информация, а на низших уровнях эта информация конкретизируется. Очевидно, что повышение статуса объекта в иерархии общего РТС ведет к соответствующему увеличению числа его степеней свободы, т.е. к расширению фазового пространства системы путем, например, перевода ряда его существенных показателей и параметров в разряд новых переменных. Очевидно, что такое расширение должно производиться с учетом целей – аттракторов, поставленных перед синтезируемой системой.

Постановка задачи синергетического синтеза иерархических стратегий группового управления робототехническими системами. Предлагаемые подходы опираются на принципы синергетической концепции в теории управления [3–5]. Исследованию и синтезу многоуровневых систем управления посвящено большое количество литературы. Отличительной особенностью предлагаемого подхода к синтезу таких систем является то, что, во-первых, применение синергетической идеологии позволяет провести естественную динамическую декомпозицию сложного нелинейного многосвязного РТС на множество подсистем; во-вторых, в результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных аттракторов – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество целей, а вся система в целом «погружается» в глобальный аттрактор, соответствующий исходному множеству целей, на выполнения которого направлена ее работа; и, в-третьих, на более высоком уровне сложности принятия решений учитывается поведение подсистем, находящихся на нижних уровнях, в виде уравнений, описывающих их «остаточную динамику» – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях) [6–8].

Синергетическая концепция управления направленными процессами в технических системах, и в РТС в частности, состоит в формировании и поддержании внешне- и внутрисистемных энергетических, технологических и функциональных инвариантов. В зависимости от поставленных целей вводимые инварианты могут быть постоянными или изменяющимися, что соответственно означает стабилизацию динамического режима системы или же переход ее в новое динамическое состояние. Введение инвариантов в теорию управления РТС как ее основных элементов позволяет придать этой теории естественно-технологическое единство и

концептуально-методологическую целостность. Следует отметить, что при управлении РТС могут возникать внутренние противоречия и конкурентные физические процессы. При этом традиционные методы системного анализа не позволяют в полной мере учитывать такого рода действующие противоречия. Это связано с тем, что важнейшим элементом научно-технического прогресса при создании сложных динамических систем является автоматическое управление, а системно-информационный анализ таких управляемых систем – это действенный инструмент для оценки эффективности их функционирования и развития. Представление об управлении сложными системами неразрывно связано с понятиями: информация, организованность функционирования и цель. Однако в современной литературе размыто четкое понимание сущности информационных процессов, связанных с управлением. В этой связи необходимо подчеркнуть, что при информационном анализе процессов управления информация должна рассматриваться как средство достижения цели при обязательном учете ее ценности. Это связано с тем, что для управления важна лишь та информация, которая конкретно полезна и используется для достижения цели. Системно-информационный анализ имеет особое значение для таких систем, так как они представляют собой совокупность большого числа иерархически зависимых локальных подсистем, обладающих определенной степенью автономности и объединенных между собой средствами организации, исходя из действующей иерархии целей, в общем случае энергетическими, вещественными и информационными связями для обеспечения целенаправленного функционирования всей системы как единого целого.

При информационном подходе модель РТС представляется иерархической структурой, на нижних уровнях которой находятся отдельные роботы, а на более высоких уровнях размещаются узлы управления, связанные с роботами и между собой каналами связи. Информация, циркулирующая в общей модели системы, должна представляться в трех формах: осведомляющей, управляющей и преобразующей, определяющей закономерности поведения узлов управления. Такие структуры отражают важную особенность этих систем – целенаправленность их функционирования и связь информации с целями управления. Следует особо подчеркнуть, что функционирование РТС протекает в мире различных внутренних и внешних противоречий, которые вовсе не обязательно будут антагонистическими и, следовательно, должным образом построенное взаимосогласованное целенаправленное управление членами коллектива роботов позволит обеспечить заданные свойства технологического гомеостазиса всего комплекса. В поставленной проблеме согласованного управления РТС возникает необходимость изучения влияния противоречий на его работу и поиска методов компромисса в подсистемах.

Для устранения конфликтов между роботами в статье предполагается новый подход по организации их эффективного взаимосогласованного функционирования путем введения соответствующего управления. Итак, взаимодействия между членами коллектива роботов во многом определяются отношениями между действиями их узлов управления или между заданными им целями и, следовательно, при конкуренции и конфликте могут характеризоваться противоречием.

Цели функционирования роботов в нормальных режимах работы обычно остаются неизменными (или меняющимися в экстренных ситуациях), а их достижение носит циклически повторяющийся характер. При предположении, что управление роботами стремится полностью обработать заданные им цели функционирования, действующее противоречие между роботами выступает как противоречие между их целями, а само противоречие определяется двумя показателями: различием целей подсистем и степенью противоположности этих целей. Так, если в группе роботов имеется множественность целей отдельных элементов, при этом локальные цели $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ трех подсистем, находящихся в группе G_1 , противоречивы, то пу-

тем введения более важной общей цели второго порядка Σ^2 , относящейся к группе G_2 , достигается компромисс поведения этих подсистем (рис. 1). Для этого необходимо ввести координирующее управление. Тогда локальные цели $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots, \Sigma_i$ не будут противоречивы целям второго, третьего и L -порядка. Итак, в сложной системе можно построить множество подцелей управления.

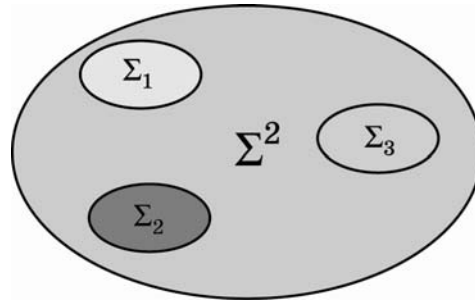


Рис. 1. Множественность целей сложной системы

Предлагаемый подход позволяет конструировать координирующее управление противоречиями, действующими между конкурирующими подсистемами, исходя из глобальных целей всего РТС, что существенно повышает качество управления ими, целенаправленно используя имеющиеся ресурсы энергии, вещества и информации. Известно, что такой принцип управления противоречиями взят на вооружение живыми организмами, но за него они платят избыточностью в виде дополнительных затрат энергии, вещества и информации. Таким образом, действующие противоречия на уровне конкурирующих подсистем вызывают у них внутренние негативные последствия, а на уровне всей системы при условии оптимального координирующего управления – создают позитивные последствия.

Согласно предлагаемому подходу, первоначально определяется множество целей Φ – набор технологических, электромагнитных, энергетических и др. инвариантов как для отдельных роботов, так и для всей РТС в целом, выполнение которого должно обеспечиваться в синтезируемой многоуровневой системе управления РТС. Это множество можно представить в виде *иерархической структуры подчинения целей*, т.е. разбить его на некоторое количество подмножеств $\Sigma_j, j = \overline{1, N+1}$, состоящих из целей для конкретного робота, при этом

$$\bigcup_{j=1}^{N+1} \Sigma_j = \Phi. \quad (1)$$

Для множества целей синтезируемой системы должно выполняться также условие $\bigcap_{j=1}^{N+1} \Sigma_j = \emptyset$. В случае же если данное условие не выполняется, то необходимо строить схему компромисса, в которой определять приоритет действия и процедуру горизонтальной координации. Для того чтобы синтезируемая система обеспечивала выполнение целей (1), ей необходимо вырабатывать соответствующее множество решений Ξ , которое аналогично (1) состоит из подмножеств решений $\Delta_j, j = \overline{1, N+1}$, для которых справедливо равенство

$$\bigcup_{j=1}^{N+1} \Delta_j = \Xi. \quad (2)$$

Таким образом, каждому подмножеству целей $\Sigma_j, j = \overline{1, N+1}$, система управления ставит в соответствие подмножество решений $\Delta_j, j = \overline{1, N+1}$. Отличительной особенностью предлагаемого подхода к синтезу систем группового управления РТС является то, что, во-первых, с применением синергетической идеологии общее дерево целей системы можно разбить на отдельные подмножества, определяющие поведение каждого из роботов, входящих в группу; во-вторых, в результате синергетического синтеза изображающие точки движения каждого из роботов «погружаются» на пересечение соответствующих *локальных аттракторов* – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество целей $\Sigma_j, j = \overline{1, M}$, а вся РТС в целом «погружается» в *глобальный аттрактор*, соответствующий исходному множеству целей (1) (рис. 2); и, в-третьих, на более высоком уровне сложности принятия решений (при синтезе системы управления РТС) учитывается поведение каждого из роботов в виде уравнений, описывающих их «остаточную динамику» – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях).

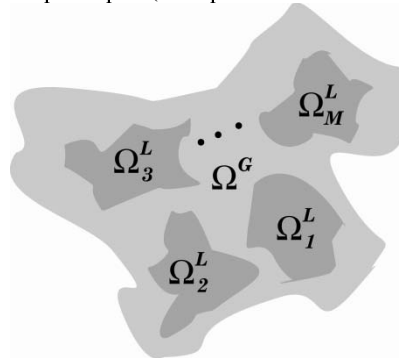


Рис. 2. Структура поглощения аттракторов

Процедура синергетического синтеза. Итак, применение синергетических методов синтеза позволяет судить о поведении каждого из роботов, входящих в группу, по упрощенной декомпозированной модели, описывающей поведение этого робота относительно введенного для него локального аттрактора. Размерность этой модели значительно ниже по сравнению с полной моделью робота. Так, для манипуляционных роботов размерность модели будет определяться конструкцией робота и будет равна числу степеней подвижности манипулятора [6–8], а для мобильных роботов, как правило, – трём [9, 10]. В общем случае остаточная динамика i -го робота будет описываться нелинейным дифференциальным уравнением

$$S_i : \dot{\mathbf{z}}^{(i)}(t) = \mathbf{R}^{(i)}(\mathbf{z}^{(i)}, \mathbf{v}^{(i)}); \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где $\mathbf{z}^{(i)} \in R^{n_i}$ – декомпозированный вектор состояния i -го робота в окрестности аттрактора; $\mathbf{v}^{(i)} \in R^{m_i}$ – вектор параметров i -го локального аттрактора.

Между декомпозированными векторами состояния роботов и вектора пространства состояния РТС имеется некоторая функциональная связь

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{z}), \quad (4)$$

где $\mathbf{z} = \left[\left(\mathbf{z}^{(1)} \right)^T \quad \left(\mathbf{z}^{(2)} \right)^T \quad \dots \quad \left(\mathbf{z}^{(N)} \right)^T \right]^T$.

Тогда поведение РТС в целом описывается векторным дифференциальным уравнением

$$S_{N+1} : \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{v}), \quad (5)$$

где $\mathbf{x} \in R^n$ – вектор состояния РТС; $\mathbf{v} = \left[\left(\mathbf{v}^{(1)} \right)^T \quad \left(\mathbf{v}^{(2)} \right)^T \quad \dots \quad \left(\mathbf{v}^{(N)} \right)^T \right]^T$ – вектор управляющих воздействий РТС.

Для синтеза координирующего регулятора необходимо определить подмножество целей верхнего уровня РТС (5), на основе которого формируется последовательно-параллельная совокупность инвариантных многообразий $\Psi^{(N+1)} = \mathbf{0}$, удовлетворяющая решению векторного функционального уравнения

$$\dot{\Psi}^{(N+1)}(t) + \Lambda^{(N+1)} \Psi^{(N+1)} = \mathbf{0}. \quad (6)$$

Из совместного решения (6) и (5) формируется координирующий регулятор

$$\mathbf{v} = \Phi(\mathbf{x}), \quad (7)$$

который вырабатывает подмножество решений Δ_{N+1} , обеспечивающих выполнение подмножества целей Σ_{N+1} .

Синтезированная таким образом иерархическая система управления РТС обеспечивает выполнение технологических задач, отражаемых в виде совокупности инвариантов Φ , на базе которых конструируются соответствующие совокупности инвариантных многообразий подсистем верхнего $\Psi^{(N+1)} = \mathbf{0}$ и нижнего $\Psi^{(j)} = \mathbf{0}$ уровней. Под действием локальных регуляторов изображающие точки роботов неизбежно попадают в окрестность пересечения соответствующей совокупности многообразий $\Psi^{(j)} = \mathbf{0}$, параметры которых в свою очередь меняются под действием заданий, поступающих от координатора верхнего уровня (7). Таким образом, реализуется вмешательство сверху вниз. Попадание же системы в окрестность пересечения соответствующей совокупности многообразий гарантирует эффективное выполнение поставленных перед системой целей Φ . При этом обеспечивается асимптотическая устойчивость синтезированной иерархической системы управления во всей допустимой области изменения фазовых координат.

Таким образом, в основу предлагаемого подхода положена процедура последовательного погружения подсистем в области притяжения соответствующих целевых аттракторов, называемая в СТУ *эстафетой аттракторов* [3–5], которую можно сравнить по своей сути с *эффектом лестницы* в теории эволюционной кибернетики [11]. Действительно, при погружении отдельных элементов РТС в области притяжения их аттракторов, осуществляется метасистемный переход, в результате которого появляется подсистема (более высокого уровня), обладающая принципиально новыми свойствами по сравнению с совокупностью входящих в нее подсистем. При этом воздействия, являющиеся управляющими для этих элементов РТС, преобразуются в управляемые в подсистеме более высокого уровня. Данное преобразование соответствует синергетическому принципу *эквивалентности (сохранения) управлений*. Принцип эквивалентности управлений широко используется в предлагаемом подходе как на этапе синтеза локальных стратегий управления, так и при синтезе координаторов-регуляторов более высоких уровней. Но, помимо этого, при переходе к более высокому уровню (метасистемном переходе) подсистема верхнего уровня наделяется принципиально новым видом дея-

тельности, заключающимся в управлении деятельностью, т.е. подсистема верхнего уровня способна не просто контролировать процесс движения подчиненных ей подсистем, и управлять им, а наделяется дополнительной возможностью воздействовать на деятельность этих подсистем, изменяя их цели движения – целевые аттракторы.

Заключение. Следует отметить, что отличительной особенностью предлагаемого нового подхода к синтезу многоуровневых систем управления РТС является то, что, во-первых, применение синергетической идеологии позволяет провести естественную динамическую декомпозицию РТС на множество подсистем; во-вторых, в результате синергетического синтеза каждая из подсистем (или групп подсистем) «погружается» на пересечение соответствующих локальных аттракторов – инвариантных многообразий, отражающих конкретное подмножество целей, а РТС в целом «погружается» в глобальный аттрактор, соответствующий исходному множеству целей; и, в-третьих, на более высоком уровне сложности принятия решений учитывается поведение подсистем, находящихся на нижних уровнях, в виде уравнений, описывающих их «остаточную динамику» – поведение на локальных аттракторах (инвариантных многообразиях). Эти особенности синергетического синтеза систем управления РТС позволят избежать проблем, связанных с агрегированием информации и возникновением противоречий в принятии решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юревич Е.И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 9-13.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 7-27.
5. Колесников А.А. Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия ТРТУ. – 2006. – № 6 (61). – С. 10-38.
6. Колесников А.А., Веселов Г.Е. Синергетический принцип иерархизации и аналитический синтез регуляторов взаимосвязанных электромеханических систем // Известия ТРТУ. – 2001. – № 5 (23). – С. 80-99.
7. Веселов Г.Е. Синергетический синтез иерархических взаимосвязанных робототехнических комплексов // Синергетика и проблемы теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 270-288.
8. Веселов Г.Е. Прикладная теория синергетического синтеза иерархических систем управления: Дисс. ... док-ра тех. наук. – Таганрог, 2006.
9. Топчиев Б.В. Синергетический синтез нелинейных кинематических регуляторов мобильных роботов // Синергетика и проблемы теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 324-334.
10. Колесников А.А., Веселов Г.Е. и др. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / Под общ. ред. А.А. Колесникова. – М.: КомКнига, 2006.
11. Турчин В.Ф. Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. – М.: Наука, 1993.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Веселов Геннадий Евгеньевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: deanfib@tti.sfedu.ru.

347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2.

Тел.: 88634360450.

Факультет информационной безопасности; декан.

Veselov Gennady Evgen'evich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: deanfib@tti.sfedu.ru.

2, Chekhov Street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634360450.

College of Informational Security; Dean.

УДК 681.51.

В.Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг

**ПЕРЕСТРОЙКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ,
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ,
В ХОДЕ ЕЁ ЭВОЛЮЦИИ**

Предлагается новый способ математического моделирования эволюционных преобразований в динамической системе, взаимодействующей со средой. Процесс резания, образующийся в результате взаимодействия механических подсистем инструмента и заготовки, рассматривается в качестве среды. Особенность среды зависит не только от координат состояния системы, но и от траектории. Поэтому параметры динамической модели среды представляются в виде интегральных операторов Вольтера относительно траекторий работы и мощности необратимых преобразований.

Моделирование; эволюция; интегральные операторы.

V.L. Zakovorotny, Pham Dinh Tung

**THE REORGANIZATION OF THE DYNAMIC SYSTEM INTERACTING
WITH THE CUTTING PROCESS, DURING ITS EVOLUTION**

The article proposes a new method of mathematical modeling of evolutionary transformations in the dynamic system, which interacts with the medium. The cutting process, which is formed as a result of interaction of mechanical subsystems of the tool and workpiece, is considered a medium. The features of the medium depend not only on the state coordinates of the system, but on the trajectories. Therefore the parameters of dynamic model of environment are represented in the form of Voltaire's integrated operators relative to the trajectories of the work and power of irreversible transformations.

Modeling; evolution; integrated operators.

Изучение эволюции технической системы является традиционным, и оно связано с проблемой обеспечения надёжности. В частности, при обработке изделий на металлорежущих станках изучение эволюционных преобразований затрагивает такие вопросы, как развитие износа инструмента, изменение показателей качества изделий в ходе функционирования системы резания и др. Однако все эти показатели характеризуют внешнее проявление эволюционных изменений. Большое значение имеют эволюционные изменения динамической характеристики процесса резания, которая оказывает влияние на параметры геометрического качества изделия и состояние процесса обработки через процессы динамической перестройки системы. Последние проблемы обсуждаются в настоящей статье.

Математическая модель эволюционных преобразований. При построении динамических моделей используется иерархический принцип, основанный на разделении движений на «медленные» движения исполнительных элементов и «быстрые», которые рассматриваются в вариациях относительно траекторий «медленных» движений [1]. Будем считать заданными траектории «медленных» дви-