Заключение (Conclusions). Учитывая темпы малоэтажного строительства в субъектах федерации, прогнозы Минэкономразвития РФ роста тарифов на электроэнергию и газ и прогнозируемый темп инфляции, необходимо более эффективно пропагандировать установку тепловых насосов на цели теплоснабжения жилых зданий.

1. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. Утверждено и введено в действие указанием Москомархитектуры от 31.01.2001 г. № 8.
2. Тепловые насосы. <http://wreferat.baza-referat.ru/>
3. Пеклов А.А. Тепловой насос. Принципиальная схема теплового насоса. http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue
4. <http://www.energsovet.ru/stat919.html>. Тепловые насосы: достоинства, недостатки и перспективы применения в России
5. Гутонова З.Х. ст. гр. группы ООС-08 СКГМИ, Цгоев Т.Ф. – руководитель проекта. Дипломный проект: «Разработка проекта получения альтернативных видов энергии на основе тепловых насосов», – Владикавказ: – 99 с.

Шевченко В.А.

Методы декомпозиции сложных динамических систем для организации децентрализованного управления

*Южный федеральный университет
(Россия, Таганрог)*

doi: 10.18411/sr-10-12-2018-18

idsp: sciencerrussia-10-12-2018-18

Аннотация

В статье представлен обзор методов и подходов к декомпозиции сложных динамических систем. Рассмотренные методы анализировались с точки зрения применимости и эффективности использования для класса крупных многосвязных технических объектов, представленных сетевой архитектурой, цель функционирования которых описывается транспортной задачей. Рассмотрены традиционные методы декомпозиции сложных динамических систем, основанные на выделении подсистем с различными связями или процессами и их скоростью, а также пространственные методы, топологические и графоаналитические. Сделан вывод о перспективности применения топологических методов декомпозиции для эффективного управления сложными динамическими системами с сетевой архитектурой.

Ключевые слова: декомпозиция, сложная динамическая система, сетевая архитектура, диакоптика, транспортная задача.

Системы управления сложными динамическими системами (ДС), строятся на принципах централизованного или децентрализованного управления. Полностью централизованное управление сложными ДС можно считать идеальным случаем, позволяющим получить наибольший эффект. Применение в сложных многосвязных системах единого регулятора, способного вырабатывать всю совокупность управляющих воздействий, теоретически может дать более высокий эффект, чем группа локальных регуляторов [0]. Однако, анализ и синтез централизованного управления в сложных распределенных системах является труднореализуемой задачей, сопряженной с большими вычислительными затратами и необходимостью введения дополнительных упрощений. Таким образом, управление сложными ДС рассматривается как задача децентрализованного управления её элементами [2-12].

Концепция децентрализованного управления подразумевает наличие подсистем в структуре единой ДС, которые управляются локальными регуляторами. Традиционно, разделение сложных ДС происходит поэлементно. Рассматривая ДС, представленную

на рисунке Рисунок 1, и предполагая, что динамика элементов системы нелинейная, уравнения внутреннего состояния можно представить в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Af_{ij}(x_i(t), x_j(t)) + G(x(t))u(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

где $x(t)$ – вектор переменных состояния, $G(x(t)) \neq 0$ – функциональная матрица, $u(t)$ – вектор управляющих воздействий, $A = [a_{ij}]$ – матрица связности элементов, $f_{ij}(x_i(t), x_j(t))$ – функция, отражающая влияние j -го элемента системы на i -ый, i, j – номера элементов, $i = 1, \dots, n$.

Тогда разбить систему на элементы возможно следующим образом:

$$\dot{x}_i(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} f_{ij}(x_i(t), x_j(t)) + \begin{bmatrix} g_1(x(t)) \\ \dots \\ g_n(x(t)) \end{bmatrix} u_i(t)$$

Рисунок 1 – Графовое представление динамической системы

В случае, когда задача функционирования сложной ДС выражается как транспортная, влияние смежных узлов на элементы учитывается в уравнениях по выходу $y(t)$. Так, что декомпозиция по элементам для анализа внутреннего состояния в этом случае является наиболее целесообразной. Далее возникает задача декомпозиции сложной ДС по выходу $y(t)$ на подсистемы агрегированных элементов для поиска таких целевых внутренних состояний $x(t)$, чтобы обеспечить общую задачу функционирования системы.

Традиционно, методы декомпозиции строятся на выделении подсистем с различными связями [0-19]. Если недиагональные элементы матрицы связи $a_{ij, i \neq j}$ представить как εa_{ij} , где $0 \leq \varepsilon \leq 1$, то при обращении ε в 0, возникают изменения структуры ДС, т.к. нарушаются связи внутри ДС. Такое преобразование называют структурным возмущением. В случае, если ε очень мало или стремится к нулю, так что $a_{ii} \square a_{ij, i \neq j}$, считается что связи между элементами в системе слабые и можно

анализировать систему, полагая $\sum_{j=1}^n a_{ij} f_{ij}(x_i(t), x_j(t)) = 0$. В случае, когда εa_{ij} и a_{ii}

соизмеримы, связи считаются сильными. Провести декомпозицию ДС по выходу $y(t)$ данным методом с сильными связями формально возможно, но это приведёт к нарушению связей и переходу к рассмотрению отдельных элементов как по внутреннему состоянию, так и по выходу. В случае сильных связей необходимо искать иные способы декомпозиции. Случай, когда возникают сингулярные возмущения [14], т.е. структурные возмущения, приводящие к изменению порядка системы, не

рассматриваются в контексте транспортной задачи анализа сложной ДС по выходу, т.к. случай когда $a_{ij, i \neq j} \square a_{ii}$, означает, что элемент i является транспортным узлом, не трансформируя и не влияя на поток продукции. В [16] предложен метод частотной декомпозиции, основанный на выделении слабосвязных парциальных подсистем. В выделенных подсистемах разделяют низкочастотные и высокочастотные колебания, далее формируют систему как низкочастотное объединение подсистем, путем перестановки строк и столбцов в исходной матрице связей. В [17] предложено разделять систему на подсистемы, соответствующие различным направлениям движения (различным целям и режимам функционирования). Для уравнений типа: $S(t) = F[S(t-1), S(t-2), \dots; U(t); P | G(t)]$ вводятся критериальные векторы состояний $S_m^T = (S_1^m, S_2^m, \dots, S_N^m)$, где $m = 1, \dots, M$, а M – число направлений движений, таким образом, что систему разбивают на m связанных подсистем: $S(t) = S_m(t) + H(t)$, где $G(t)$ и $H(t)$ – вектора нормальных помех. Идея такой декомпозиции применена в [18] для разделения многокомпонентной робототехнической системы, где в качестве направления движения предлагается рассматривать цели управления, разделяемые на локальные, свойственные отдельным подсистемам, и глобальные, относящиеся ко всей системе в целом. Похожий подход использован в [19], с той разницей, что предполагается смена направления движения в рамках ДС, по аналогии с жизненным циклом. Т.е. декомпозированная система S имеет математическое описание в линейном представлении следующего вида: $\dot{x}_{S_k} = a_{S_k, S_k} x_{S_k} + \dots + a_{S_k, S_m} x_{S_m}$, где подсистема S_i описывается одним из слагаемых. Подсистемы разбиваются на два типа: активные и пассивные. Активные подсистемы S_k , где $k = 1, \dots, m$ – количество активных подсистем, влияют на динамику S в некоторый момент времени. Пассивные подсистемы S_j , где $j = 1, \dots, n$ – количество пассивных подсистем, либо не влияют на общую динамику S , либо их влиянием в некоторый момент времени можно пренебречь.

Широко рассматриваются методы декомпозиции, позволяющие выделить быстрые и медленные процессы в разнотемповых ДС [20-24]. Наиболее применимы методы декомпозиции, основанные на выделении «сильных» (медленных) и отбрасывании «слабых» (быстрых) факторов, определяющих динамику системы [Ошибка! Источник ссылки не найден. - Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Упрощенная модель, получаемая при отбрасывании быстрых составляющих, описывает медленные процессы, называемые движением, в системе [22]. Возможность применения данного подхода к декомпозиции обусловлен возможностью выделить движения в системе разного темпа протекания. Разнотемповость может порождаться внутренними особенностями системы или вводится искусственно, путем включения в систему звеньев с большими коэффициентами усиления, разрывными характеристиками и т.д. [22]. В обоих случаях можно трактовать декомпозицию как выделение в фазовом пространстве системы некоторых множеств, попадание траекторий в которые соответствует желаемым свойствам или требуемому упрощению системы. Траектории системы быстро приближаются к выделенным множествам, а последующее медленное движение обеспечивает приемлемые свойства системы в целом. В [23] предложен метод выделения вынужденных периодических движений как развитие подходов к преобразованию моделей в работах [25, 26], позволяющий не налагать дополнительные ограничения на эти преобразования по полной управляемости системы по выходу и нулевым начальным значениям переменных состояний модели. Вынужденные периодические движения в пространстве состояний исходной системы могут быть получены по движениям в пространстве состояний преобразованной системы в соответствии с применяемым преобразованием. Рассматривается модель ДС с нелинейными зависимостями: $\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B[v + \psi(t)]$,

$v = N(y)$, $y = C\bar{x}$, где $\bar{x}(t)$ – вектор переменных состояния, $v(t)$ – вектор управления, $N(y)$ – вектор столбец нелинейных функций. Применяемое преобразование заключается в построении неособого канонического преобразования $\bar{x}(t) = Mx(t)$, $x(t) = M^{-1}\bar{x}(t)$, приводящего матрицу A к Жордановой форме $J = M^{-1}AM$, а матрицы B , C – к определенному виду $B_m = M^{-1}B$, $C_m = CM$, которое в результате декомпозиции приводятся к блочной форме. В [24] предложен метод асимптотического расщепления уравнений, позволяющий упростить задачу по исследованию линейных систем автоматического управления путем преобразования исходной системы дифференциальных уравнений к независимым подсистемам меньшего порядка. В работе рассматривается модель вида: $A(t)\dot{x}(t) = B(t)x(t) + f(t)$, которая преобразуется к виду $A(\tau, \varepsilon)\dot{x}(t) = B(\tau, \varepsilon)x(t) + f(t, \tau, \varepsilon)$, где $\tau = \varepsilon t$, а $A(\tau, \varepsilon), B(\tau, \varepsilon)$ – квадратные матрицы, допускающие разложение по степеням ε :

$$A(\tau, \varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k A_k(\tau), \quad B(\tau, \varepsilon) = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^k B_k(\tau). \text{ Если } A_k(\tau) = B_k(\tau) = 0, \text{ а } \varepsilon = 1, \text{ то}$$

преобразованная модель вернется к исходному виду.

В работе [27] предложен метод декомпозиции, основанный на выделении элементов системы, обеспечивающих минимальную вероятность заставить систему в неработоспособном состоянии. Для этого определяется функция интегральной эффективности на некотором временном интервале:

$$E(0, t) = \sum_i \int_0^t \text{Pr}_i(\tau) h_i d\tau + \sum_{i,j} \int_0^t \omega_{i,j}(\tau) h_{i,j} d\tau, \text{ где } \text{Pr}_i(t) - \text{вероятность заставить систему в}$$

некоторый момент времени в i -м состоянии, $\omega_{i,j}(t)$ – параметр потока переходов в некоторый момент времени из i -го состояния в j -е. Таким образом, определяется состояние общей системы в различных вариациях её структурных и параметрических состояний. Далее определяется функция вероятности отказа системы в некоторый момент времени в зависимости от её состояния, что позволяет разбивать исходную систему на части.

Для декомпозиции распределенных систем часто используют топологические методы разделения ДС [28-38]. Основоположителем топологических методов декомпозиции является Г. Крон, представивший ряд методов изучения сложных систем по частям, под общим названием диакоптика [28]. Диакоптика определяет алгоритмы нахождения областей взаимосвязанных элементов, разрывая связи между образованными сегментами [29]. Далее возможно анализировать два новых образования – полученные и несвязанные сегменты и межсегментарные связи, где сегменты являются элементами. В [30-32] рассматривается топологический метод декомпозиции для определенным образом соединенных систем: последовательных, циклических и радиальных. Предложен вариант попарного разделения на основе матрицы связей, где каждый предыдущий элемент, связан с последующим, образуя круговые структуры. В [33-35] представлен расширенный вариант данного метода, когда в один сегмент включаются более двух элементов, но не более некоторого порогового значения, заданного в начале процесса декомпозиции. Метод представляет собой рекурсивный алгоритм перестановки разряженных матриц в блочно-диагональную форму для формирования граничных блоков. В [36] данный подход использован для нахождения решения системы многосвязных линейных уравнений. В [37,38] представлен диакоптический подход к организации последовательных и параллельных вычислительных процессов при моделировании больших систем на базе математического описания моделируемой системы в виде блочно-диагональной окаймленной структуры.

Анализ рассмотренных методов декомпозиции с точки зрения разделения сложной ДС, представленной сетью связанных элементов, общая цель которой может быть описана транспортной задачей, показал, что наиболее подходящим классом методов являются топологические методы на базе диакоптики Крона. Методы выделения сильных и слабых связей требуют формализации математической модели таким образом, чтобы матрица связей содержала не только информацию о взаимосвязи элементов, но и их качественных или количественных характеристиках. Однако, даже такая формализация может не привести к желаемому результату, т.к. разрыв слабой связи может способствовать образованию дисбаланса потока продукции. В ином случае, все связи являются сопоставимыми по их «силе», что не приведет к разделению или приведет к разбиению системы на базовые элементы. Методы на основе выделения разнотемповых или разнородных процессов не могут быть применены в контексте транспортной задачи, т.к. рассматривается линейная задача распространения потока продукции без дополнительных процессов. Данные методы могут быть применены для разделения моделей элементов ДС, т.к. элементы зачастую описываются сложными нелинейными системами дифференциальных уравнений с более чем одним управляющим воздействием. Однако, для большинства элементов, которые составляют сложные ДС (генераторы, двигатели, насосные станции и т.д.) могут быть успешно применены адаптивные методы управления без разделения моделей на части.

Работа поддержана грантом Южного федерального университета №ВнГр-07/2017-15 «Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии», грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 16-08-00013.

1. Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 352 с.
2. R. Ghadami and B. Shafai, "Decomposition-Based Distributed Control for Continuous-Time Multi-Agent Systems" // IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 1, pp. 258-264.
3. Massioni and M. Verhaegen, "Distributed Control for Identical Dynamically Coupled Systems: A Decomposition Approach," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 1, pp. 124-135.
4. F. Borrelli ; T. Keviczky Distributed LQR Design for Identical Dynamically Decoupled Systems // IEEE Transactions on Automatic Control, Volume 53, Issue 8 , Sept. 2008, pp. 1901 – 1912.
5. B. Bamieh ; F. Paganini ; M.A. Dahleh Distributed control of spatially invariant systems // IEEE Transactions on Automatic Control, Volume 47, Issue 7, Jul 2002, pp. 1091 – 1107.
6. R. D'Andrea and G. E. Dullerud, "Distributed control design for spatially interconnected systems," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 9, pp. 1478-1495, Sept. 2003
7. E. Camponogara, D. Jia, B. H. Krogh and S. Talukdar, "Distributed model predictive control," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 22, no. 1, pp. 44-52.
8. Jing, Yuanwei, et al. "Decentralized Control of Complex Dynamic Systems Employing Function Emulation by Neural Networks." Complex Systems. Springer, Cham, 2016, pp. 249-266.
9. Фрадков А.Л., Григорьев Г.К. Децентрализованное адаптивное управление синхронизацией сетей динамических систем при ограниченных возмущениях // Автоматика и телемеханика. 2013. № 5. сс. 137-155.
10. Фридман О.В., Фридман А.Я. Градиентный метод координации управлений иерархическими и сетевыми структурами // Информационно-управляющие системы. 2010. № 6 (49). сс. 13-20.
11. Шеленок Е.А. Децентрализованное робастное управление одним классом многосвязных неаффинных объектов с запаздыванием по состоянию // Информатика и системы управления, № 2(52), 2017 г., сс. 119-130.
12. Паршева Е.А. Применение адаптивного динамического регулятора для децентрализованного управления по выходу многосвязным объектом с запаздыванием // Вестник астраханского государственного технического университета, № 1(36), 2007 г., сс. 31-39.
13. Воропаев Н.В., Соболев В.А. Геометрическая декомпозиция сингулярно возмущенных систем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 256 с.
14. Дмитриев М.Г., Курина Г.А. Сингулярные возмущения в задачах управления // Автоматика и телемеханика, №1, 2006 г., с. 3-51.
15. Шаршеналиев Ж., Бакасова А.Б. О некоторых методах декомпозиции сложных динамических систем управления // Проблемы автоматизации и управления, №1(22), 2012 г., с. 5-15.
16. Банах Л.Я. Методы декомпозиции и редукции динамических моделей механических систем // Нелинейная динамика машин - SCHOOL-NDM 2017, 2017 г., с. 41-55.

17. Краснов А.Е., Сагинов Ю.Л., Феоктистова Н.А. Алгебраические основы нейросетевой декомпозиции и агрегирования динамических систем // Сборник трудов V Международной конференции: III международный конкурс научных и научно-методических работ. Международная академия информатизации, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, 2015 г., с. 23-27.
18. Веселов Г.Е. Проблема синтеза иерархических стратегий группового управления робототехническими системами // Известия ЮФУ. Технические науки, 2011 г., с. 41-49.
19. Кириллов А. Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем управления со структурными изменениями // Информационно-управляющие системы, 2009 г., с. 20-24.
20. Первозванский А.А., Гайцгори В.Г. Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. – М.: Наука, 1979. – 344 с.
21. Абгарян К.А. Расщепление сингулярно возмущенной многотемповой системы // Известия академии наук Армянской ССР, Математика, №5, 1979 г., с. 327-337.
22. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 296 с.
23. Камачкин А.М., Шамберов В.Н. Метод декомпозиции в многомерных нелинейных динамических системах // Вестник воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии, №1, 2012 г., с. 47-55.
24. Абгарян К.А. Асимптотическое расщепление уравнений линейной системы автоматического управления//ДАН СССР. 1966. Т. 166. № 2, с. 301-304.
25. Петров В. В. Нелинейные сервомеханизмы: монография / В. В. Петров, А. А. Гордеев. – М.: Машиностроение, 1979. – 471 с.
26. Дерусо П. Пространство состояний в теории управления (для инженеров): монография / П. Дерусо, Р. Рой, Ч. Клоуз; пер. с англ. Р. Т. Янушевского; под ред. М. В. Меерова, – М.: Наука, 1970. – 620 с.
27. Викторова В.С., Свердлов Ю.М., Степанянц А.С. Анализ надежности систем сложной структуры на многоуровневых моделях // Автоматика и телемеханика, 2010 г., с. 143-148.
28. Крон Г. Исследование систем по частям: диаоптика М.: Наука. 1972. 544с.
29. Петров А.Е. Обобщенная диаоптика для управления в системах с переменной структурой // Десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2017, 2017, с. 207-209.
30. A. Iftar Decentralized estimation and control with overlapping input, state and output decomposition// Automatica, №29 (1993), pp. 511-516.
31. Xin-Yu OUYANG, Xue-Bo CHEN, Wei WANG Modeling and decomposition of complex dynamic interconnected systems, IFAC Proceedings Volumes, Volume 42, Issue 4, 2009, pp. 1002-1007.
32. Xue-Bo Chen, Srdjan S. Stanković Decomposition and decentralized control of systems with multi-overlapping structure, Automatica, Volume 41, Issue 10, 2005, pp. 1765-1772.
33. A.I. Zečević, D.D. Šiljak Balanced decompositions of sparse systems for multilevel parallel processing, IEEE Transactions CAS, 41 (1994), pp. 220-233.
34. Alvarado, F.L., Reitan, D.K., Bahari-Kashani, M. Sparsity in diakoptic algorithms, (1977) IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 96 (5), pp. 1450-1459.
35. Felix F. WU. Solution of Large-Scale Networks by Tearing // IEEE transactions on circuits and systems, Vol. CAS-23, № 12, December 1976, pp. 706-713.
36. P. W. Aitchison Diakoptics as a general approach in engineering// Journal of Engineering Mathematics, Volume 21, 1987, issue 1, pp. 47-58.
37. Грудинин В.Н., Анисимов В.И., Алмаасали С.А. Повышение эффективности процессов моделирования нелинейных систем // Информационные технологии в проектировании и производстве, №4(152), 2013 г., с. 10-13.
38. Анисимов В.И., Тарасова О.Б., Алмаасали С.А. Организация вычислительных процессов при моделировании систем на основе методов диаоптики // Информационные технологии в проектировании и производстве, №4(152), 2013 г., с. 14-17.

Morozova O.O.

The mathematical models in the process of organization of the services of search and rescue ensuring flights

Autonomous noncommercial organization of additional education" Agency of Technological development Ulyanovsk region", leading specialist in science (Russia, Ulyanovsk)

doi: 10.18411/sr-10-12-2018-19

idsp: sciencerrussia-10-12-2018-19

Abstract

This article discusses the approach to the planning of the service of search and rescue support of flights on the basis of the application of a mathematical model.

Keywords: mathematical model, list of measures, emergency situation.