

СВЯЗИ НЕСВОБОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ

П. Д. Балакин

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В работе дана полная классификация связей несвободных механических техногенных систем. Показано, что совместное использование в конструкциях механических систем голономных и неголономных связей позволяет создавать системы с адаптивными свойствами.

Основным приемом синтеза таких систем является дополнительное к основному движение звеньев, которое может быть как малым движением самоустановки или упругой деформации, так и значимым, исходящим от встроенной в систему цепи управления.

Ключевые слова: связи механической системы, дополнительное к основному движение звеньев, встроенная цепь управления.

Введение

Как известно, механические техногенные системы (механизмы) состоят из звеньев (деталей или групп деталей, не имеющих относительного движения), макродвижение которых несвободно и ограничивается внешними по отношению к звеньям связями. Метрика звеньев и характер внешних связей в полной мере определяют характер несвободного движения звеньев и преобразование движения механизмом в целом.

При создании механических техногенных систем нужно преобразование движения в них, как правило, известно и входит в техническое задание на проектирование, а определению подлежат именно метрика звеньев и характер внешних связей; последние являются основным объектом при модернизации систем и наделении их новыми свойствами.

У несвободной системы материальные тела (звенья) взаимодействуют между собой в смысле третьего закона Ньютона, уровень взаимодействия оценивается реакциями связей, связи могут быть математически оформлены в форме уравнений связей, определяющих, например, неизменность расстояний между точками твердого тела; принадлежность точек в принятой системе координат какой-либо поверхности, линии или точек, занимающих неизменное положение. Такие связи координат называют геометрическими или позиционными, они технически реализуются в виде кинематических пар, нитей, стержней и др.

Связи могут быть наложены как на координаты точек системы, так и на их скорости. В последнем случае их называют дифференциальными или кинематическими. Технически они реализуются в виде механических передач; устройств движения тел буксировкой в вязкой среде; движения саней; движения при взаимодействии тел-источников электромагнитных полей; качения обруча или шара с верчением; качения тела произвольной формы; движения тела с полостью; с жидкостью и др.

Дополнительно различают стационарные (в уравнение связи время не входит) и нестационарные; удерживающие (двусторонние) и недерживающие (односторонние), последние математически выражаются неравенствами.

В общем случае условия связи аналитически выражаются уравнениями (неравенствами) вида:

$$F(t, x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}) \geq 0, \quad (1)$$

где t — время; x, y, z — координаты; $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ — скорости в принятой системе отсчета.

Все геометрические связи голономны (интегрируемы). Голономны и дифференциальные, если после интегрирования они по форме становятся геометрическими, т.е. связывают координаты точек системы.

Постановка задачи

Представляет интерес определение набора связей и их характеристик при синтезе механических систем с адаптивными свойствами.

В частности, набор связей в таких системах должен ослабить или исключить вредное влияние на работоспособность систем первичных, силовых, температурных ошибок [1–4], порождающих локальные, повторяющиеся, контурные избыточные связи и, кроме того, правильно подобранные характеристики и параметры связей позволяют реализовать адаптирующее управляемое трансформируемое переменным силовым потоком дополнительное к основному движение звеньев, приводящее к автоизменению передаточной функции механической системы, натягов во фрикционных контактах и др.

Тогда условия связи (1) аналитически дополняются аргументами в уравнениях (неравенствах), учитывающих параметры силового потока, т.е.

$$F(t, x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, P, M) \geq 0, \quad (2)$$

где P и M — приведенные к звеньям приведения силовая или моментная характеристики переменного внешнего силового потока.

Связь типа (2) может быть реализована в механических системах приемами как дискретно изменяемой передаточной функции скорости, так и плавным изменением последней без разрыва силового потока, что вполне достижимо техническими решениями механических автовариаторов [5, 6].

Поставим и решим задачу управления связью в условиях переменного внешнего силового нагру-

жения приемом изменения передаточной функции скорости механической системы по дополнительно вводимому критерию постоянства мощности энергетической установки машины.

Теория

Физически автовариатор удобно представить двухвальной моделью с отдельным приводом сил и масс к двум звеньям привода, находящимся по разные стороны от управляемого двухподвижного фрикционного контакта, который представляет собой, в общем случае, неголономную связь [7–10], если между парциальными движениями качения и скольжения не установлена зависимость, которая и составляет искомую закономерность управления значением передаточной функции автовариатора от уровня внешнего силового нагружения по критерию постоянства мощности двигателя машины.

Обозначим обобщенные координаты входного (ведущего) вала 1 механической системы и выходного (ведомого) вала 2 — φ_1 и φ_2 соответственно, тогда дифференциальное уравнение связи обобщенных координат будет таким:

$$U_{1,2}d\varphi_2 - d\varphi_1 = 0, \quad (3)$$

где $U_{1,2}$ — переменная передаточная функция автовариатора, реализуемая внутренней встроенной цепью управления, или

$$U_{1,2}(t) = \frac{\dot{\varphi}_1}{\dot{\varphi}_2}. \quad (4)$$

Следовательно, для поддержания постоянной мощности N двигателя $N = \text{const}$ без учета потерь имеет место $N = M_1\dot{\varphi}_1 = M_2\dot{\varphi}_2$, т. е. автовариатор должен обеспечить

$$\dot{\varphi}_2 = \frac{N}{M_2(t)}, \quad (5)$$

где $M_2(t)$ — переменный, приведенный к валу 2 силовой момент внешнего нагружения, который представлен некоторой известной закономерностью в функции времени t , либо табулированным массивом значений, изменяемым во времени.

Зависимость (5) является гиперболической от комплексного аргумента — изменяемого значения $M_2(t)$, и она технически реализуема схемными решениями встроенных цепей управления автовариаторов.

Переменный силовой поток $M_2(t)$ воздействует на чувствительный элемент управляющей цепи, элемент представляет собой упругое звено, и его деформация преобразуется цепью управления в автоизменение кинематических размеров основных звеньев механической системы, что приводит к автоизменению передаточной функции $U_{1,2}$ основной цепи автовариатора, который может быть построен на базе лобовой схемы, торовой, клиноремной, плоскоремной, цилиндрической и др.

При идеализации цепи управления, опуская массу ее звеньев и диссипацию энергии в ней, оставляя активным параметром только жесткость чувствительного элемента, причем величина жесткости также является варьируемым параметром, такое первое приближение вполне допустимо в условиях медленно изменяющейся величины $M_2(t)$, в которой переходной колебательный процесс исключен.

По известной $N = \text{const}$ и, следовательно, $\dot{\varphi}_1 = \text{const}$, вначале определяется $\dot{\varphi}_2$, затем по (4) уста-

навливается $U_{1,2}(t)$ или $U_{1,2}[M(t)]$ и синтезируется цепь управления, включая подбор жесткости чувствительного элемента цепи.

Второе приближение модели цепи управления должно учитывать реальные параметры цепи и возможное развитие в ней колебательного процесса и вторичных динамических явлений в приводе машины.

Обсуждение результатов

На основе классификации связей несвободных механических техногенных систем показано, что на основе комбинаторики связей, и особенно использования в системах одновременно голономных и неголономных связей, могут быть построены механические системы с адаптивными свойствами, в которых исключено вредное влияние реальных параметров систем, порождающих неопределенности в распределении сил на звенья и связи и даже наделить систему способностью самоорганизующегося поведения при многорежимной эксплуатации в сочетании с выполнением дополнительных критериев качества.

С помощью встроенной цепи управления передаточной функцией механического автовариатора можно обеспечить необходимое, дополнительное к основному движению звеньев, при этом цепь управления преобразует неголономную связь во вполне определенную по относительному движению звеньев и технически реализуемую.

Выводы и заключение

1. Показано, что разработка новых и модификация существующих реальных механических систем машин основаны на комбинаторике и совершенствовании связей.

2. Дополнительное к основному движению звеньев, реализуемое с помощью двухподвижной неголономной связи, способно наделить механическую систему машины адаптивными свойствами к реальным параметрам и к режиму эксплуатации при сохранении стационарной работы энергетической установки.

3. Определенность относительного движения в неголономной связи общего вида достигается с помощью встроенной в конструкцию вариатора управляющей цепи, получающей движение в форме деформации чувствительного упругого элемента цепи под воздействием переменного внешнего нагружения, и преобразованием этого движения в автоизменение кинематических размеров основных звеньев.

Список источников

1. Балакин П. Д., Згонник И. П. Длинноходовые механизмы с минимальной боковой реакцией в поступательной паре // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 1. С. 17–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-17-21.
2. Гапшоев Т. Т., Голобоков М. Г. Структурный анализ и классификация устройства преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное и наоборот // Известия Горского государственного аграрного университета. 2013. Т. 50, № 2. С. 186–189.
3. Кожевников С. Н. Основания структурного синтеза механизмов: моногр. Киев: Наукова думка, 1979. 231 с.

4. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы: справ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.

5. Балакин П. Д., Згонник И. П. Механические автовариаторы в приводах транспортных машин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 1 (670). С. 65–70.

6. Balakin P. D. Automatic control of the preload in adaptive friction drives of chemical production machines // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. DOI: 10.1063/1.4998842.

7. Солтаханов Ш. Х. Основы механики голономных и неголономных систем. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 184 с. ISBN 978-5-9221-1455-4.

8. Зегжда С. А., Солтаханов Ш. Х., Юшков М. П. Неголономная механика. Теория и приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 344 с. ISBN 978-5-9221-1080-8.

9. Лобов Н. А. Некоторые замечания по динамике неголономных систем // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2005. № 2. С. 118–125.

10. Шемелова О. В. Уравнения динамики управляемых систем с неголономными связями // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 12. С. 285–288.

БАЛАКИН Павел Дмитриевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиноведение».

SPIN-код: 5494-0218

AuthorID (РИНЦ): 267798

AuthorID (SCOPUS): 57191041281

Адрес для переписки: tmm@omgtu.ru

Для цитирования

Балакин П. Д. Связи несвободных механических техногенных систем // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 3. С. 9–12. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-9-12.

Статья поступила в редакцию 29.05.2018 г.

© П. Д. Балакин

LINKS OF NON-FREE MECHANICAL MAN-MADE SYSTEMS

P. D. Balakin

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The paper gives a complete classification of the links of non-free mechanical technogenic systems. It is shown that the joint use of holonomic and non-holonomic constraints in mechanical systems allows the creation of systems with adaptive properties.

The main method of synthesis of such systems is an additional motion to the main motion of the links, which can be either a small motion of self-adjustment or elastic deformation, or significant coming from the control circuit integrated in the system.

Keywords: mechanical system; additional to the main movement of the links; built-in control circuit.

References

1. Balakin P. D., Zgonnik I. P. Dlinnokhodovyye mekhanizmy s minimal'noy bokovoy reaktsiyey v postupatel'noy pare [Long-stroke mechanisms with minimal side reaction in the translational pair] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 1. P. 17–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-1-17-21. (In Russ.).
2. Gappoyev T. T., Golobokov M. G. Strukturnyy analiz i klassifikatsiya ustroystva preobrazovaniya vrashchatel'nogo dvizheniya v vozvratno-postupatel'noye i naoborot [Structural analysis and classification of the device for conversion of rotary motion into reciprocating motion] // Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2013. Vol. 50, no. 2. P. 186–189. (In Russ.).
3. Kozhevnikov S. N. Osnovaniya strukturnogo sinteza mekhanizmov [Foundations of structural synthesis of mechanisms]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
4. Reshetov L. N. Samoustavnivayushchiyesya mekhanizmy: Spravochnik [Self-aligning mechanisms: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1985. 272 p. (In Russ.).
5. Balakin P. D., Zgonnik I. P. Mekhanicheskiye avtovariatory v privodakh transportnykh mashin [Mechanical Variators in the Drives of Transportation Vehicle] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. *Mashinostroyeniye. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2016. No. 1 (670). P. 65–70. (In Russ.).
6. Balakin P. D. Automatic control of the preload in adaptive friction drives of chemical production machines // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1876, Issue 1. DOI: 10.1063/1.4998842. (In Engl.).
7. Soltakhanov Sh. Kh. Osnovy mekhaniki golonomnykh i negolonomnykh sistem [Fundamentals of mechanics of holonomic and non-holonomic systems]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2013. 184 p. ISBN 978-5-9221-1455-4. (In Russ.).
8. Zegzhda S. A., Soltakhanov Sh. Kh., Yushkov M. P. Negolonomnaya mekhanika. Teoriya i prilozheniya [Non-holonomic mechanics. Theory and applications]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2009. 344 p. ISBN 978-5-9221-1080-8. (In Russ.).
9. Lobov N. A. Nekotoryye zamechaniya po dinamike negolonomnykh sistem [Some remarks on the dynamics of non-holonomic systems] // Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroyeniye». *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*. 2005. No. 2. P. 118–125. (In Russ.).
10. Shemelova O. V. Uravneniya dinamiki upravlyayemykh sistem s negolonomnymi svyaziyami [Equations of dynamics of controlled systems with nonholonomic constraints] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. *Herald of Kazan Technological University. Series «Mechanical Engineering»*. 2013. Vol. 16, no. 12. P. 285–288. (In Russ.).

BALAKIN Pavel Dmitriyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Machine Science Department.

SPIN-code: 5494-0218

AuthorID (RSCI): 267798

AuthorID (SCOPUS): 57191041281

Address for correspondence: tmm@omgtu.ru

For citations

Balakin P. D. Links of non-free mechanical man-made systems // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 9–12. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-9-12.

Received 29 May 2018.

© P. D. Balakin