

## Синергетическое управление преобразователями энергии в системе электромобиля

*К.А. Олейников*

*Институт компьютерных технологий и информационной безопасности Южного  
Федерального Университета, г. Таганрог.*

**Аннотация:** Статья посвящена исследованию процессов управления энергосистемой электромобиля и процессов распределения энергии в ней с помощью широтно-импульсных преобразователей напряжения. Описывается общая структура энергосистемы электромобиля и элементы ее подсистем. Рассматриваются широтно-импульсные повышающие и понижающие преобразователи постоянного тока. На основе приведенной математической модели проведен синтез регуляторов с использованием методов синергетической теории управления. Выполнено математическое моделирование замкнутой системы управления преобразователями, обеспечивающих асимптотическую устойчивость и адаптивность к параметрическим возмущениям.

**Ключевые слова:** электромобиль, широтно-импульсные преобразователи, система управления, АКАР, синергетическая теория управления, интегральная адаптация.

### Введение

В настоящее время все более строгие стандарты выбросов и топливной экономии стимулируют развитие работ, направленных на создание экологичных транспортных средств. Электрические, гибридные электромобили и автомобили с топливно-батарейной системой являются наиболее перспективными решениями для автомобиля в обозримом будущем, а также методов и средств по улучшению их эксплуатационных параметров. Однако есть ряд задач по созданию высокоэффективной и экономичной системы управления электромобилем.

### Система управления электромобилем

Общая структура системы управления электромобилем показана на рис.1 и включает в себя: подсистему движения транспортного средства и колеса и подсистему источника энергии. Подсистема движения состоит из контроллера транспортного средства, широтно-импульсного преобразователя (ШИП) энергии, шины постоянного тока (ШПТ), электродвигателя, ведущих колес, автономного инвертора напряжения (АИН). Подсистема источника энергии включает в себя модуль управления распределения энергии, аккумуляторную батарею, энергоснабжение систем: климат контроля, усилителя руля, вспомогательных систем [1, 2].

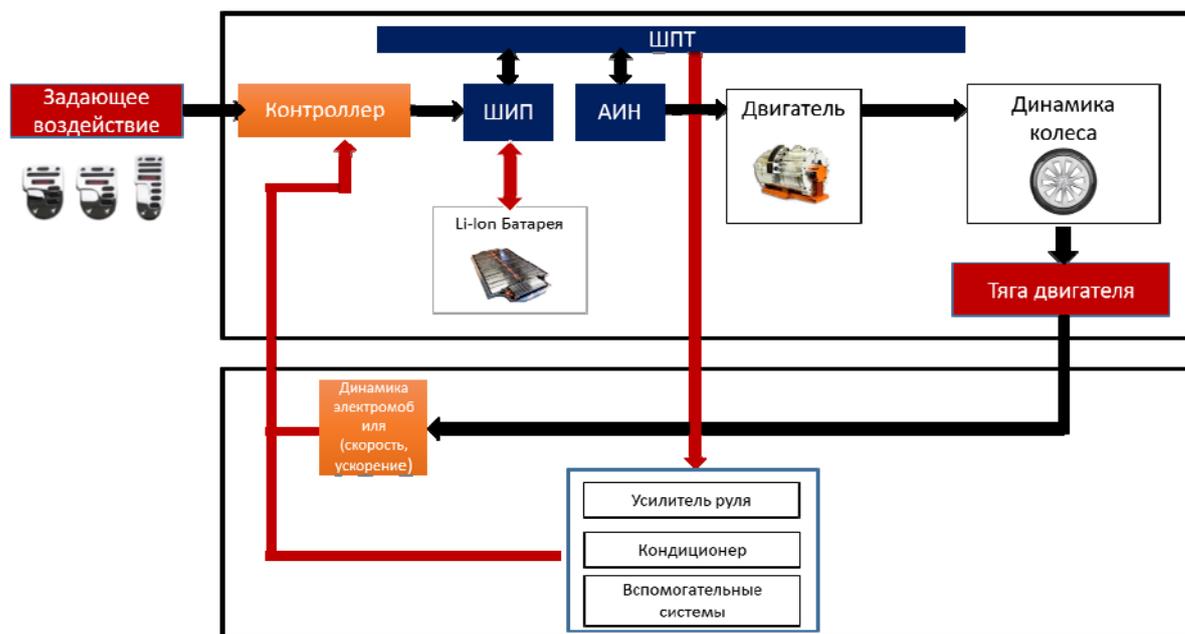


Рис. 1. – Структурная схема управления электромобилем

Контроллер электромобиля, управляющий педалями ускорения и тормоза, обеспечивает способность управления сигналами в направлении преобразователя энергии, главная функция которого регулирование энергии между двигателем и источником энергии через ШПТ. Обратный поток энергии также связан с рекуперативным торможением электромобиля. Энергия, восстановленная на данном этапе может вернуться в источник энергии при условии того, что источник сможет принять эту энергию через преобразователь энергии. В работе будет рассматриваться часть системы управления энергосистемой, а именно использование и управление широтно-импульсными преобразователями постоянного тока (DC-DC Converter).

### Преобразователи напряжения в электромобилях

Наибольшее распространение в электромобилях получил повышающий преобразователь напряжения постоянного тока (Boost Converter), способный выдавать большее по величине напряжение чем входное напряжение. При фиксированном уровне мощности более высокие значения напряжения уменьшают токи, что означает что можно использовать провода меньшего сечения. Современные электромобили для обеспечения достаточной мощности двигателя должны достигать значений от 400 до 800 В. Понижающий преобразователь обеспечивает питанием устройства 12 В, а также заряд аккумулятора [3 – 6].

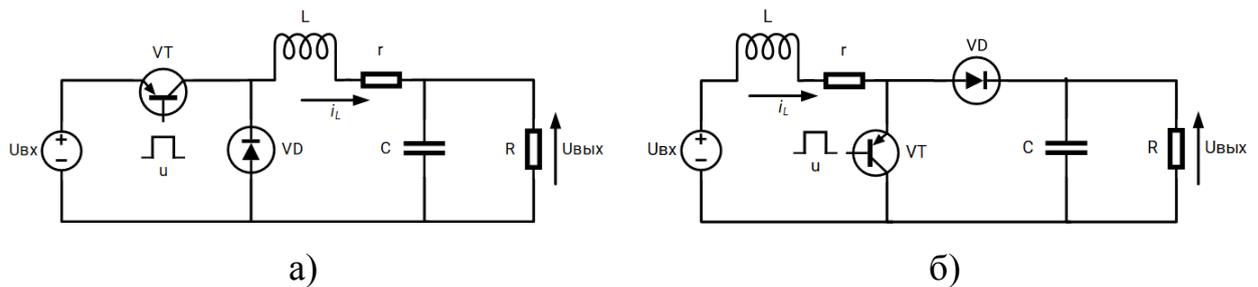


Рис. 2. – Схема преобразователя а) Понижающего б) Повышающего

Схема понижающего преобразователя представлена на рис. 2а. На управляющий вход преобразователя подается широтно-импульсный сигнал с периодом следования импульсов  $T$ . В период длительности импульса транзистор  $VT$  находится во включенном состоянии, напряжение с входа преобразователя подается через индуктивность  $L$  с активным сопротивлением  $r$  на нагрузку  $R$ , а энергия накапливается в выходной емкости  $C$ . При выключении транзистора, конденсатор начинает разряжаться, замыкая через себя ток нагрузки  $i_L$ . Усредненная математическая модель в форме дифференциальных уравнений 2-ого порядка:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{U_{вх} \cdot u - U_{вых} - r \cdot i_L}{L} \\ \frac{dU_{вых}}{dt} &= \frac{R \cdot i_L - U_{вых}}{C \cdot R} - M(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M(t)$  – возмущение. ШИП преобразует постоянное напряжение в импульсное, изменяя ширину импульса, можно управлять системой преобразователя. Управляющее воздействие  $u$  изменяется в диапазоне от 0 до 1, а частота импульсов зависит от динамических свойств преобразователя. Для повышающего преобразователя напряжения необходим коэффициент напряжения больше единицы. Это можно обеспечить путем регулирования в цепи обмена энергией между реактивными элементами. На рис. 2б представлена схема повышающего преобразователя напряжения. На транзистор  $VT$  подается импульсный сигнал, что обеспечивает разбиение сигнала на 2 этапа: накопление энергии на в реактивном элементе на катушке индуктивности, а на втором – передача накопленной энергии в емкость  $C$ . При включенном транзисторе в индуктивности  $L$  будет нарастать ток и запасаться энергия от входного источника напряжения. Динамика повышающего преобразователя может быть описана следующей усредненной формулой:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{U_{ex} - r \cdot i_L - U_{вблх} \cdot (1-u)}{L} \\ \frac{dU_{вблх}}{dt} &= \frac{R \cdot i_L \cdot (1-u) - U_{вблх}}{C \cdot R} - M(t), \end{aligned} \quad (2)$$

Зачастую используются совмещенные понижающие-повышающие преобразователи (Buck-Boost Converter), например, преобразователи Кука, которые способны как увеличивать, так и уменьшать напряжения постоянного тока и менять его полярность.

### Синтез системы управления преобразователем

Анализ динамических характеристик преобразователей обычно ограничивается моделями 2-ого порядка за исключением специальных случаев. В классической теории управления подобные системы обычно используют линейные законы управления, заключающиеся в анализе поведения корней характеристического полинома линеаризованной замкнутой системы. Однако в реальных системах ШИП наличие негладких бифуркаций может приводить к хаотическому поведению системы и ограниченностью устойчивости системы только в области линеаризации системы, неспособных анализировать систему в целом. В работе используется современный подход к анализу системы, основанный на полной нелинейной модели объекта управления принципами синергетической теории управления (СТУ) и методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Синтезированный регулятор обеспечит асимптотическую устойчивость и желаемые показатели качества на всей области работы системы. Существенный вклад в развитие данной теории и подходов внес профессор А.А. Колесников и его ученики. СТУ как направление общей теории управления базируется на принципах самоорганизации системы, принципа сжатия-расширения фазового пространства и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем вводя притягивающие инвариантные многообразия (ИМ) [6 – 8].

Рассмотрим применение данной теории на примере понижающего преобразователя напряжения. Для обеспечения инвариантности к действию внешних возмущений  $M(t)$  в формуле (1) исходная модель расширяется и вводится дополнительная переменная  $z$ , являющаяся интегральной оценкой возмущений:

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{U_{ex} \cdot u - U_{вых} - r \cdot i_L}{L} \\ \frac{dU_{вых}}{dt} &= \frac{R \cdot i_L - U_{вых}}{C \cdot R} - z, \\ \frac{dz}{dt} &= \eta \cdot (U_{жс} - U_{вых}) \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_{жс}$  – желаемое значение напряжения на выходе преобразователя,  $\eta$  – коэффициент. Закон управления  $u(i_L, U_{вых}, z)$  будет формировать сигнал, равный  $z$ , который в момент  $U_{жс} = U_{вых}$  компенсирует влияние возмущения. Данный метод используется в СТУ под названием интегральная адаптация или в иностранной литературе называемый *backstepping* в широком классе электромеханических систем, подавляя возмущения различного рода: кусочно-постоянные, линейные, гармонические [9, 10]. Далее для расширенной модели синтеза (3) вводится 1-я макропеременная  $\psi_1 = i_L - \varphi$ , где  $\varphi$  – это пока неизвестная функция внутреннего управления, удовлетворяющая решению  $\psi_1 = 0$  функционального уравнения:

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \alpha_1 \psi_1 = 0, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – положительный коэффициент регулятора. Система, попадая в окрестность инвариантного многообразия  $\psi_1 = 0$  декомпозируется и может быть описана следующей системой уравнений меньшего порядка:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{вых}}{dt} &= \frac{R \cdot \varphi - U_{вых}}{C \cdot R} - z \\ \frac{dz}{dt} &= \eta \cdot (U_{жс} - U_{вых}) \end{aligned} \quad (5)$$

Для декомпозированной системы (5) введем вторую макропеременную вида:  
 $\psi_2 = U_{\text{вых}} + \gamma \cdot z$  и, решая основное функциональное уравнение:

$\frac{d\psi_2}{dt} + \alpha_2 \psi_2 = 0$ ,  $\alpha_2 > 0$  найдем выражения для внутреннего управления  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{U_{\text{вых}}}{R} + C \cdot (\gamma \cdot z) \cdot (U_{\text{жс}} - U_{\text{вых}}) - \alpha_2 \cdot (U_{\text{вых}} + \gamma \cdot z) + z. \quad (6)$$

После получения функции внутреннего управления можно подставить (6) в (5) и, решив функциональное уравнение (4), получить значение для искомого закона управления  $u(i_L, U_{\text{вых}}, z)$ . Синтезированный закон управления обеспечивает подавление внешних возмущений и перевод замкнутой системы сначала в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$ , а затем в состояние  $\psi_2$ , определяемое требуемым значением напряжения  $U_{\text{жс}} - U_{\text{вых}}$ .

По аналогии решается задача для повышающего преобразователя системы (2). При моделировании системы синтез регулятора проводится в программе математики Maple, а само моделирование выполнялось в Matlab. Значение входного напряжения для понижающего преобразователя  $U_{\text{вх}} = 600\text{В}$ , желаемым значением  $U_{\text{жс}} = 14\text{В}$ , для повышающего преобразователя  $U_{\text{вх}} = 10\text{В}$ ,  $U_{\text{жс}} = 200\text{В}$ . Для того, чтобы убедиться в инвариантности и адаптивности к возмущениям значения варьировались на временном интервале значения сопротивления нагрузки  $R$  и кусочно-постоянные возмущения  $M(t)$ . Результаты моделирования представлены на рис. 3 – 5.

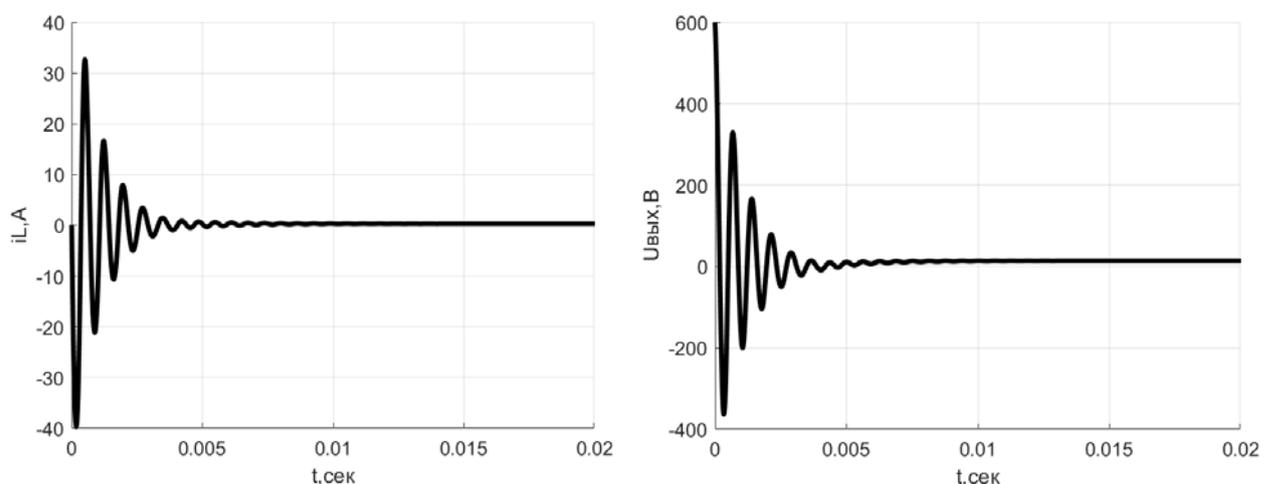


Рис. 3. – Выходное напряжение и ток понижающего преобразователя

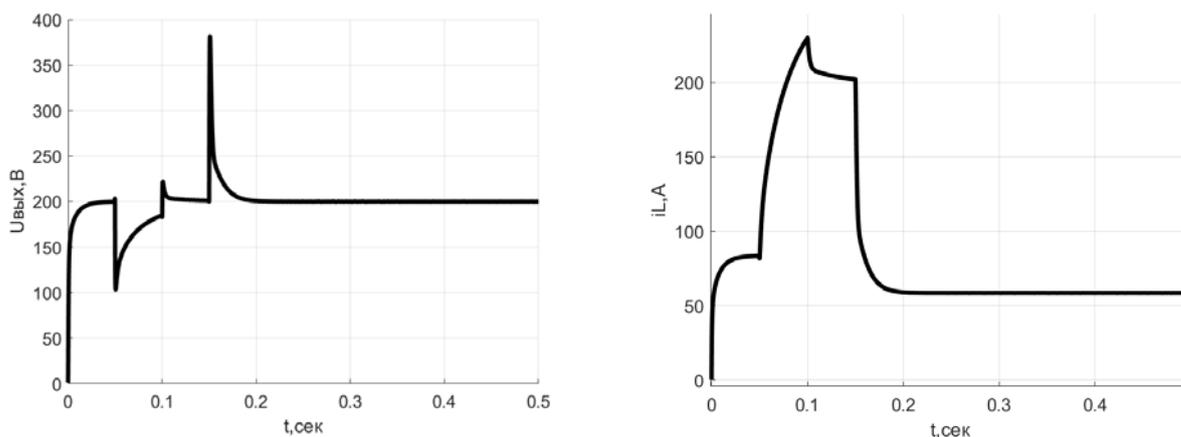


Рис. 4. – Выходное напряжение и ток повышающего преобразователя

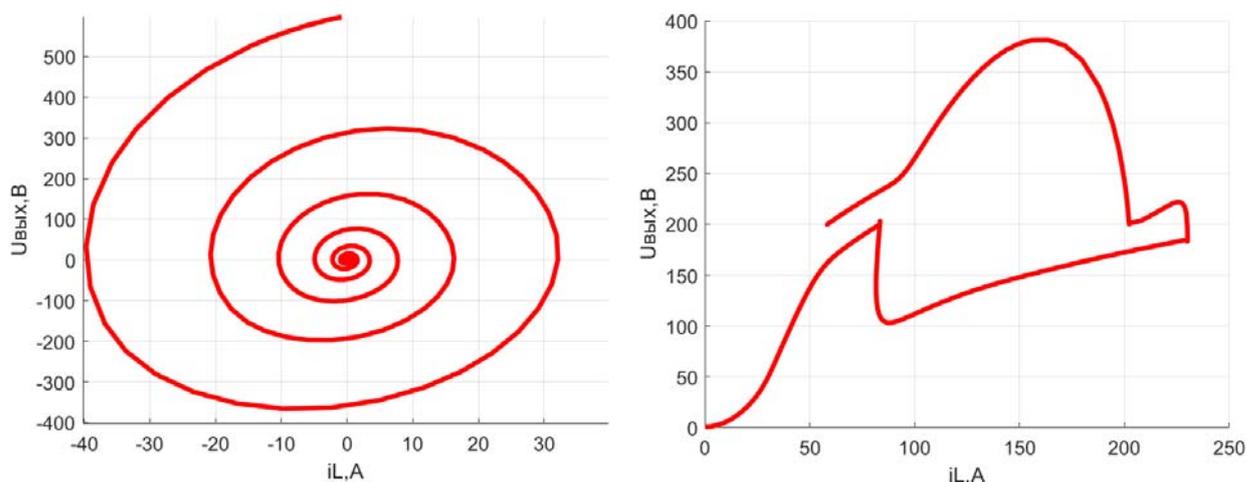


Рис. 5. – Фазовые портреты понижающего и повышающего преобразователей постоянного тока

### Заключение

В статье была рассмотрена структура энергосистемы электромобиля и системы управления на ее основе. Рассмотрены повышающие и понижающие преобразователи напряжения постоянного тока аккумуляторной батареи электромобиля, отражены их схемы и математические модели на основе дифференциальных уравнений. Проведенный синтез синергетических регуляторов замкнутой системы обеспечивает достижение желаемых выходных характеристик напряжения преобразователей, инвариантность к возмущениям кусочно-постоянного типа, изменениям нагрузки, робастности системы. Полученные результаты могут быть использованы в подсистеме общей иерархической структуры управления электромобилем и внедрены в микропроцессорную систему управления преобразователем.

*\*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00924: «Разработка теоретических основ построения иерархических систем управления силовыми установками электромобилей»*

### Литература

1. Kwang H. N. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press: 2019. 556 p.
2. Chau K.T. Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application. «John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.», 2015, 400 p.
3. Титов В.Г., Плехов К.А., Бинда Д.Ю., Титов Д.Ю. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909.
4. Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Антропов А.П., Михайличенко Е.А. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564
5. Садилов Д.Г. Выбор перспективной топологии построения преобразователя частоты для электроприводного газоперекачивающего агрегата // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244.
6. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011, 584 с.
7. Ретинский С.Н., Косчинский С.Л. Синтез адаптивного нечеткого регулятора импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2007. №1. С. 69-76.
8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 354 с.
9. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с.
10. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н., Колесников Ал. А., Топчиев Б.В., Мушенко А.С., Кобзев В.А. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы. URSS, 2019. 300 с.

## References

1. Kwang H. N. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press, 2019. 556 p.
2. Chau K.T. Electric vehicle machine and drives: design, analysis and application. «John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.», 2015, 400 p.
3. Titov V.G., Plehov K.A., Binda D.Ju., Titov D.Ju. Inzenernyj vestnik Dona 2013, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1909).
4. Chivenkov A.I., Grebenshnikov V.I., Antropov A.P., Mihajlichenko E.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1564)
5. Sadikov D.G. Inzenernyj vestnik Dona 2014, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2244)
6. Meleshin V.I., Ovchinnikov D.A. Upravlenie tranzistornymi preobrazovateljami jelektrojenergii [Transistor Power Converters]. M.: Tehnosfera, 2011, 584 p.
7. Retinskij S.N., Koschinskij S.L. Jelektrotehnicheskie kompleksy i sistemy upravlenija. 2007. №1. pp. 69-76.
8. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskaja teorija upravlenija [Synergetic Control Theory]. M.: Jenergoatomizdat, 1994. 354 p.
9. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskie metody upravlenija slozhnymi sistemami: teorija sistemnogo sinteza [Synergetic Control Methods for Complex Systems: Theory of System Synthesis]. M.: KomKniga, 2006. 240 p.
10. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Popov A.N., Kolesnikov Al. A., Topchiev B.V., Mushenko A.S., Kobzev V.A. Sinergeticheskie metody upravlenija slozhnymi sistemami: mehanicheskie i jelektromehaniicheskie sistemy [Synergetic control methods for complex systems: mechanical and electromechanical systems]. URSS, 2019. 300 p.