

# I. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 681.513.685

*Микеланджело спросили, как ему удается из бесформенной глыбы делать выдающиеся скульптуры. Скульптор ответил: «Беру глыбу и отсекаю все ненужное».*

Д-р техн. наук Е. М. Потапенко, канд. техн. наук А. Е. Казурова,  
канд. физ.-мат наук А. В. Савранская

Запорожский национальный технический университет

## ОБЗОР РАБОТ ПО ДИНАМИКЕ МНОГОМАССОВЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА КАФЕДРЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЗНТУ

*Дано сравнение методов управления неопределенными многомассовыми системами. Сделан краткий обзор работ, проведенных на кафедре электропривода ЗНТУ, по динамике многомассовых неопределенных электромеханических систем. Показаны возможности управления указанными системами в условиях сильной параметрической, экзогенной неопределенности и ограниченной информации о векторе состояния системы. Дан перечень публикаций по теории комбинированного робастного управления и применению этого метода для управления различными объектами.*

**Ключевые слова:** высокоточное позиционное управление, многомассовый объект, робастность, двухмассовая упругая система, наблюдатель неопределенности, наблюдатель вектора состояния.

### Введение

Постоянное ужесточение требований к количеству и качеству выпускаемой продукции приводит к необходимости увеличения точности и быстродействия управления различными объектами (транспорт, научные исследования, космические аппараты, системы прицеливания стрелкового оружия, в том числе и на подвижном основании). Расширение областей автоматизации приводит к появлению всё более неопределённых (менее детерминированных) многомассовых объектов управления (ОУ). Под неопределенными многомассовыми объектами понимаются составные ОУ, описываемые в общем случае нелинейными уравнениями с неизвестными массово-инерционными характеристиками, с не полностью и не точно известным вектором состояния, подверженные неизвестным внешним и внутренним воздействиям, а также с не точно известным управляющим воздействием.

**Целью данной статьи** является сравнение методов управления неопределенными многомассовыми системами.

В качестве кандидатов для управления подобными системами могут рассматриваться:

- методы с большими коэффициентами усиления (МБКУ);
- релейные методы управления с переменной структурой (РМПС);
- сглаженные методы с переменной структурой (СМПС);
- метод управления с обратной динамикой (МУОД);
- комбинированные методы управления с наблюдателями неопределенности (КМУН).

МБКУ [1–6], допускающие большой коэффициент усиления разомкнутой системы, обладают повышенной точностью и робастной устойчивостью по отношению к неопределенности параметров и внешним низкочастотным воздействиям, причем точность возрастает с увеличением коэффициента передачи разомкнутой цепи. Однако при больших коэффициентах передачи возможно появление неустойчивости высокочастотной не учитываемой динамики, а также появление ошибок из-за высокочастотных помех. Кроме того, не все СУ допускают неограниченное увеличение коэффициента передачи.

Для повышения робастности и уменьшения управляющих воздействий были предложены РМПС [7–10], работающие в релейном режиме без зоны нечувстви-

тельности (бесконечно большие коэффициенты усиления). Эта особенность, помимо увеличения робастности, обуславливает появление скользких режимов работы (режим противовключения исполнительных органов). Скользящие режимы могут приводить к неустойчивости неучтенной динамики, увеличивают потребление энергии на управление и износ механизмов, уменьшают помехоустойчивость системы. Кроме того, РМПС обладают робастностью только при движении по линии переключения и не являются робастными в процессе достижения линий переключения.

Для уменьшения некоторых недостатков РМПС, но с ухудшением точности, в них релейные звенья с ограничениями (*signum*) меняют на линейные звенья с насыщением (*saturation*), в результате чего получаются СМПС [11, 12]. Эти системы по динамическим характеристикам близки к МБКУ, но развивают ограниченные управляющие воздействия. Для назначения ограничения в звене *saturation* необходимо знать максимальные значения суммарных внешних воздействий. Кроме того, МБКУ является статическим (имеет статическую ошибку в установившемся режиме).

В теории управления можно выделить две основные задачи. Прямой задачей является определение процессов в системе заданной структуры. Обратной задачей является определение структуры и параметров регулятора (закона управления) по заданным процессам на выходе СУ. Этот метод управления выше был назван МУОД [13–15]. Робастность МУОД обычно обеспечивается за счет применения описанных выше методов управления МБКУ, РМПС, СМПС. Следовательно, МУОД обладает теми же достоинствами и недостатками, что и перечисленные методы управления. Кроме того, этот метод требует знания всего вектора состояния.

Основным методом обеспечения инвариантности управления по отношению к внешним воздействиям является комбинированное управление. В 1993 г. для управления описанными выше неопределенными объектами был предложен комбинированный метод управления с оценкой и компенсацией вектора неопределенности [16, 17]. Суть метода отражена в эпиграфе и заключается в следующем. Все неопределенности, нелинейности, нежелательные перекрестные связи, паразитная динамика, внешние воздействия и неизвестные составляющие управляющих воздействий объединяются в один вектор неопределенности. В результате исходная система представляется в виде линейной декомпозированной детерминированной системы с постоянными коэффициентами, на которую действует в виде возмущения неизвестный вектор неопределенности. Детерминированная часть системы рассматривается в качестве измерения вектора неопределенности (аналогично методу обратной динамики). Вектор неопределенности с помощью быстродействующего наблюдателя оценивается вместе с неизвестной час-

тью вектора состояния и компенсируется специальной составляющей комбинированного регулятора. В результате задача синтеза управления исходной неопределенной системой сводится, например, к модальному управлению линейной декомпозированной детерминированной системой с постоянными коэффициентами и с полностью известным вектором состояния. В результате обеспечивается робастность по отношению к перечисленным выше неопределенностям. Более того, система управления оказывается робастной по отношению к ошибкам, допущенным при составлении исходной математической модели. В отличие от систем с переменной структурой, предложенное управление линейное (без скользких режимов) и гораздо более экономичное. При этом показатели качества общей нелинейной нестационарной неопределенной СУ будут охарактеризованы показателями качества, используемыми для линейных систем. Дальнейшие разработки кафедры электропривода в области теории робастного комбинированного управления с наблюдателями неопределенности представлены в работах [16–37]. Применение этой теории к управлению различными объектами дано в работах [38–50].

### Выводы

Приведенный обзор робастных методов управления позволяет сделать заключение, что наибольшей робастностью обладают МБКУ, РМПС, СМПС, МУОД, КМУН. Помимо робастности, эти методы превосходят другие методы по точности управления. В отличие от первых четырех методов, КМУН, имея лучшую точность, не требует больших коэффициентов передачи регуляторов, его применение не сопровождается скользкими режимами, он не предъявляет к структуре ОУ ограничительных требований по сохранению устойчивости при бесконечном увеличении коэффициента передачи. С помощью наблюдателя, входящего в КМУН, можно исключить влияние погрешностей датчиков. Поскольку КМУН компенсируют влияние всех неопределенностей, включая внешние воздействия и погрешности датчиков, то данный метод обладает наибольшими возможностями обеспечения высокой точности. Так как в этом регуляторе не используются ни большие коэффициенты передачи, ни релейные звенья, КМУН обеспечивают точное «мягкое» управление с уменьшенной вероятностью возбуждения неучтенной динамики. С учетом сказанного, в дальнейших исследованиях и приложениях рекомендуется ориентироваться на КМУН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности / М. В. Мееров – М. : Наука, 1967. – 423 с.
2. Мееров М. В. Исследование и оптимизация многосвязных систем управления / М. В. Мееров – М. : Наука, 1986. – 236 с.
3. Многосвязные системы управления / [М. В. Мееров,

- А. В. Ахметзянов, Я. М. Берщанский и др.] ; под ред. М. В. Меерова. – М. : Наука, 1990. – 264 с.
4. Лозинский Л. Д. Синтез одного класса САУ с жесткой структурой, обладающего адаптивными свойствами : 1. Асимптотические свойства корней характеристических уравнений САУ, устойчивых при неограниченном увеличении коэффициентов усиления / Л. Д. Лозинский, М. В. Мееров // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 9. – С. 22–30.
  5. Лозинский Л. Д. Синтез одного класса САУ с жесткой структурой, обладающего адаптивными свойствами : 2. Методы синтеза структур САУ для односвязных и многосвязных объектов / Л. Д. Лозинский, М. В. Мееров // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 10. – С. 46–55.
  6. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов / Крутько П. Д. – М. : Наука, 1991. – 336 с.
  7. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления / Уткин В. И. – М. : Наука, 1981. – 368 с.
  8. Уткин В. И. Системы с переменной структурой: состояние, проблемы, перспективы / В. И. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 9. – С. 5–25.
  9. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2004. – 834 с.
  10. Oz H. Variable structure control system (VSCS) maneuvering of flexible spacecraft / H. Oz, O. Mostafa // The Journal of the Astronautical Sciences. – 1988. – 36. – № 3. – P. 311–344.
  11. Mostafa O. Chatter elimination in variable structure control maneuvering of flexible spacecraft / O. Mostafa, H. Oz // The Journal of the Astronautical Sciences. – 1989. – 37. – № 4. – P. 529–550.
  12. Yang Z. J. A novel robust nonlinear motion controller with disturbance observer / Z. J. Yang, H. Tsubakihara, S. Kanae, K. Wada, C. Y. Su // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2008. – 16. – № 1. – P. 137–147.
  13. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели / П. Д. Крутько. – М. : Наука, 1987. – 304 с.
  14. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели / П. Д. Крутько. – М. : Наука, 1988. – 328 с.
  15. Костенко Ю. Т. Системы управления с динамическими моделями / Ю. Т. Костенко, Л. М. Любчик. – Х. : Основа, 1996. – 212 с.
  16. Потапенко Е. М. Робастное управление роботом / Е. М. Потапенко // Российская АН. Техническая кибернетика. – 1993. – № 3. – С. 183–190.
  17. Potapenko E. M. Robust control of a robot / E. M. Potapenko // Journal of computer and systems sciences international. – 1995. – Vol. 32. – № 2. – P. 86–93.
  18. Потапенко Е. М. Исследование робастности систем управления с наблюдателем / Е. М. Потапенко // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 2. – С. 104–108.
  19. Потапенко Е. М. Робастные системы управления с наблюдателями второго порядка / Е. М. Потапенко // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 2. – С. 100–107.
  20. Potapenko E. M. Robust Combined Control Systems with Observers / E. M. Potapenko // Journal of Automation and Information Sciences. – 1996. – V. 28, № 1 & 2. – P. 16–25.
  21. Potapenko E. M. Simplified Linear-System Restorability and Controllability Criteria and Their Application in Robotics / E. M. Potapenko // Journal of Automation and Information Sciences. – 1996. – Vol. 28, № 5 & 6. – P. 146–151.
  22. Потапенко Е. М. Синтез и сравнительный анализ робастных компенсаторов пониженного порядка / Е. М. Потапенко // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 4. – С. 65–74.
  23. Потапенко Е. М. Узагальнення теореми Тихонова для сингулярно збудженої системи / С. М. Потапенко, А. В. Савранська // Вісник Запорізького університету. – 1998. – № 1. – С. 61–65.
  24. Потапенко Е. М. Дослідження робастної стійкості комбінованої системи з нерозширеним спостерігачем / С. М. Потапенко, А. В. Савранська // Вісник Запорізького університету. – 1999. – № 1. – С. 90–93.
  25. Потапенко Е. М. Дослідження робастної стійкості системи зі спостерігачем вектора невизначеності / С. М. Потапенко, А. В. Савранська // Вісник Запорізького університету. – 1999. – № 2. – С. 108–113.
  26. Потапенко Е. М. Робастное управление неопределенной электромеханической системой / Е. М. Потапенко, Е. Е. Казурова // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2006. – № 1. – С. 129–136.
  27. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными объектами. Сравнение методов управления / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // 36. наук. праць Дніпродзержинського техн. університету (технічні науки). Тематичний вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2007. – С. 412–414.
  28. Потапенко Е. М. Обобщение результатов исследования робастных комбинированных систем управления с наблюдателями вектора неопределенности / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Механіка та машинобудування. – 2008. – № 1. – С. 223–233.
  29. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными многосвязными объектами. Часть 1. Синтез и анализ алгоритмов управления / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Кибернетика и вычислительная техника. – 2007. – Вып. 155. – С. 58–71.
  30. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенными многосвязными объектами : Ч. 2. Пример. Управление роботом / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2009. – № 1. – С. 132–137.
  31. Потапенко Е. М. Высокоточное позиционное управление неопределенными многомассовыми объектами / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта : сб. научн. тр. в 2 т. – Херсон : Херсонский нац. техн. ун-т, 2010. – Т. 2. – С. 138–142.
  32. Потапенко Е. М. Компенсация воздействия нелинейного трения на системы управления / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2009. – № 2. – С. 134–143.
  33. Потапенко Е. М. Математические модели трения и методы компенсации его влияния на системы управления / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Вісник НТУ «ХПІ» – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 28. – С. 139–140.
  34. Казурова А. Е. Возможные варианты построения высокоточных систем управления упругой неопределен-

- ной электромеханической системой / А. Е. Казурова, Е. М. Потапенко // Электротехника и электроэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 4–14.
35. Казурова А. Е. Высокоточное позиционное управление двухмассовой электромеханической системой / А. Е. Казурова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51). – Ч. 1. – С. 53–57.
  36. Потапенко Е. М. Высокоточное управление упругой электромеханической системой с нелинейным трением / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – № 1 (21). – С. 118–125.
  37. Казурова А. Е. Высокоточное позиционное управление упругой электромеханической системой с минимальным количеством датчиков / А. Е. Казурова // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2008. – № 30. – С. 213–214.
  38. Потапенко Е. М. Робастное управление маневрирующим упругим космическим аппаратом / Е. М. Потапенко, В. Г. Бичай // Проблемы управления и информатики. – 1998. – № 4. – С. 72–85.
  39. Потапенко Е. М. Синтез и анализ робастной системы управления маневрирующего космического аппарата / Е. М. Потапенко, В. Г. Бичай // Космические исследования. – 1998. – Т. 36. – № 4. – С. 399–406.
  40. Potapenko E. M. Synthesis and Analysis of the Robust System of Control by a Maneuvering Spacecraft / E. M. Potapenko, V. G. Bichai // Cosmic Research. – 1998. – Vol. 36. – № 4. – P. 374–380.
  41. Потапенко Е. Е. Энергосберегающее робастное управление асинхронными приводами / Е. Е. Потапенко, Е. М. Потапенко // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 106–111.
  42. Бичай В. Г. Управление космическим аппаратом с избыточными исполнительными органами / В. Г. Бичай, Е. М. Потапенко // Проблемы управления и информатики. – 1999. – № 4. – С. 129–142.
  43. Потапенко Е. Е. Синтез экстремального робастного управления асинхронным приводом / Е. Е. Потапенко, Е. М. Потапенко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 6. – К. : ІЕ НАНУ. – 2000. – С. 34–37.
  44. Потапенко Е. М. Синтез робастных комбинированных регуляторов токовых контуров при векторном управлении двигателями переменного тока / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 6. – С. 45–54.
  45. Potapenko E. M. Synthesis of Robust Combined Regulators of Current Circuits under Vector Control of Alternating-Current Motors / E. M. Potapenko, E. E. Potapenko // Journal of Automation and Information Sciences. – 2006. – Vol. 38. – Issue 11. – P. 45–55.
  46. Потапенко Е. М. Высокоточное управление неопределенным упругим роботом. Ч. 1. Синтез и анализ алгоритмов управления / Е. М. Потапенко, А. Е. Казурова // Складні системи і процеси. – 2009. – № 1 (15). – С. 39–48.
  47. Потапенко Е. М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом / Е. М. Потапенко, Е. Е. Потапенко. – Запорожье : ЗНТУ. – 2009. – 352 с.
  48. Казурова А. Е. Робастная система управления наведением и стабилизацией вооружения бронированной машины / А. Е. Казурова, Е. М. Потапенко // Электротехника и электроэнергетика (в данном номере журнала).
  49. Деев С. Г. Оптимальное робастное управление космическим аппаратом с избыточным количеством электродвигателей-маховиков / С. Г. Деев, Е. М. Потапенко // Электротехника и электроэнергетика (в данном номере журнала).
  50. Электропривод поворота антенны радиолокационной станции / [Е. В. Душинова, Е. М. Потапенко, С. Г. Деев и др.] // Электротехника и электроэнергетика (в данном номере журнала).

Надійшла до редакції 10.03.2011

### **Потапенко Є.М., Казурова А.Є., Савранська А.В. Огляд робіт з динаміки багатомасових невизначених електромеханічних систем, виконаних на кафедрі електропривода ЗНТУ**

*Наведено порівняння методів керування невизначеними багатомасовими системами. Зроблено короткий огляд робіт, проведених на кафедрі електропривода ЗНТУ, з динаміки багатомасових невизначених електромеханічних систем. Показано можливості керування зазначеними системами в умовах значної параметричної, екзогенної невизначеності й обмеженої інформації про вектор стану системи. Надано перелік публікацій з теорії комбінованого робастного керування та застосування цього методу для керування різними об'єктами.*

**Ключові слова:** високоточне позиційне керування, багатомасовий об'єкт, робастність, двомасова пружна система, спостережник невизначеності, спостережник вектора стану.

### **Potapenko E., Kazurova A., Savranskaya A. Review of works on dynamics of multimass uncertain electromechanical systems carried out in ZNTU electric drive department**

*The authors compare the methods of uncertain multimass systems control. A brief review of works on dynamics of multimass uncertain electromechanical systems carried out in ZNTU electric drive department is presented. The possibilities of these systems control in conditions of parametrical, exogenous uncertainty and limited information on the system state vector are shown. The list of publications on combined robust control theory and application of this method for various objects control is given.*

**Key words:** high-precision position control, multimass object, robustness, two-mass elastic system, uncertainty observer, state vector observer.