



А. Р. КОЛГАНОВ

С. К. ЛЕБЕДЕВ

Н. Е. ГНЕЗДОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
УПРАВЛЕНИЯ, РЕАЛИЗАЦИИ
И ПРИМЕНЕНИЯ

А. Р. КОЛГАНОВ, С. К. ЛЕБЕДЕВ, Н. Е. ГНЕЗДОВ

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ,
РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ**

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2019

УДК 62-83:681.351
ББК 32.965.3
К60

Научный редактор:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Глазунов*

Рецензент:
доктор технических наук, профессор *Б. А. Староверов* (заведующий кафедрой автоматике и микропроцессорной техники Института автоматизированных систем и технологий ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет»)

Колганов, А. Р.
К60 Электромеханотронные системы. Современные методы управления, реализации и применения : учебное пособие / А. Р. Колганов, С. К. Лебедев, Н. Е. Гнездов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 256 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0295-8

Представлены основные аспекты разработки, реализации и применения в электромеханотронных системах регуляторов и наблюдателей на основе теории пространства состояний. Рассмотрены основные методики создания структур и расчета параметров как нелинейных регуляторов состояния с переменной структурой, так и астатических наблюдателей состояния и нагрузки с переменным порядком астатизма для электромеханотронных модулей с эластичной и жесткой механикой.

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования предлагаемых типов регуляторов и наблюдателей. Подробно обоснована и детально показана технологическая цепочка микропроцессорной реализации теоретических разработок с использованием современных *DSP*-контроллеров ведущих производителей.

Ориентирована на инженеров, научных сотрудников и аспирантов, специализирующихся в области электромеханотронных систем управления технологическими объектами на основе автоматизированных электроприводов, и должна способствовать повышению качества обучения студентов в рамках высшего профессионального и послевузовского образования.

УДК 62-83:681.351
ББК 32.965.3

ISBN 978-5-9729-0295-8 © А. Р. Колганов, С. К. Лебедев, Н. Е. Гнездов, 2019
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2019
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Разработка методик синтеза регуляторов состояния с ограничением внутренних переменных.....	9
1.1. Синтез регулятора состояния с учетом ограничения вязкоупругого момента путем изменения структуры системы управления.....	9
1.1.1. Синтез линейного регулятора состояния.....	9
1.1.2. Ограничение моментов в механических передачах.....	17
1.1.3. Оптимизация контура вязкоупругого момента.....	24
1.1.4. Устойчивость и особенности практической реализации системы управления с регулятором состояния переменной структуры	32
1.2. Методика настройки параметров регулятора состояния с переменной структурой для обеспечения робастных свойств электромеханотронной системы.....	33
1.2.1. Использование пакета <i>Simulink Response Optimization</i>	34
1.2.2. Настройка параметров линейного регулятора состояния..	40
1.2.3. Настройка параметров компенсатора вязкоупругого момента.....	53
2. Синтез регуляторов состояния для электромеханотронных систем с жесткой и упругой механикой.....	60
3. Разработка методик синтеза наблюдателей состояния и нагрузки.....	78
3.1. Процедуры определения наблюдаемости электромеханотронных систем и синтеза наблюдателей состояния полного порядка.....	78
3.2. Оценка влияния возмущения на восстановление переменных состояния.....	85
3.3. Методика синтеза астатических наблюдателей состояния...	88
3.4. Методика синтеза наблюдателей состояния с заданной полосой пропускания по возмущению.....	94

3.5. Компенсация динамической ошибки восстановления переменных.....	97
3.5.1. Влияние ненулевых начальных условий на переходной процесс наблюдателя.....	97
3.5.2. Влияние астатизма на переходной процесс восстановления вектора возмущения.....	101
4. Синтез наблюдателей состояния и нагрузки для электромехатронных систем с жесткой и упругой механикой...	107
4.1. Синтез наблюдателей состояния и нагрузки для электромеханотронных систем упругой механикой.....	107
4.1.1. Синтез наблюдателей состояния с повышенным порядком астатизма.....	107
4.1.2. Исследование характеристик наблюдателей с повышенным порядком астатизма.....	122
4.2. Синтез наблюдателей состояния и нагрузки для электромеханотронных систем с жесткой механикой.....	131
4.2.1. Синтез наблюдателя полного порядка с датчиком положения и астатизмом второго порядка.....	134
4.2.2. Синтез наблюдателя полного порядка с заданной полосой пропускания по возмущению.....	141
4.2.3. Синтез редуцированного наблюдателя состояния с астатизмом второго порядка и датчиками положения и скорости.....	146
4.2.4. Моделирование наблюдателей и исследование процессов восстановления состояния объекта и нагрузки.....	152
5. Формирование экспериментальной установки для исследования электромеханотронной системы с регуляторами состояния и наблюдателями состояния и нагрузки.....	167
5.1. Определение требований к экспериментальной установке	167
5.2. Разработка функциональной схемы установки.....	168
5.3. Выбор оборудования.....	168
6. Разработка и отладка кодов программ для микроконтроллера <i>TMS320F28335</i>	188

6.1. Общее описание процесса реализации наблюдателей состояния в микроконтроллере.....	188
6.2. Инструменты среды <i>CCStudio</i> для реализации и исследований систем управления.....	190
6.3. Конвертирование компьютерных моделей в программный код.....	201
6.4. Корректировка и дополнение программного кода.....	231
7. Разработка методики проведения исследований и экспериментальные исследования наблюдателей.....	236
7.1. Методика проведения экспериментальных исследований...	236
7.2. Результаты экспериментов.....	237
7.3. Анализ результатов.....	247
7.4. Корректировка методик синтеза наблюдателей по результатам их реализации и экспериментальных исследований.....	248
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	250
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	251

ВВЕДЕНИЕ

Первые годы третьего тысячелетия можно не без основания считать началом новой эры – эры высокотехнологичных электромеханотронных систем с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающих высокую точность поддержания на требуемом уровне параметров сложного технологического комплекса и стабильную его работу в различных режимах функционирования, в том числе и аварийных.

Современная электромеханотронная система может быть представлена в виде совокупности взаимосвязанных электромеханотронных модулей: технологического агрегата, обеспечивающего материальную реализацию требуемого технологического процесса, автоматизированного электропривода, осуществляющего необходимый характер движения технологического агрегата, и устройства управления, обеспечивающего оптимальное, в некотором смысле, выполнение программы технологического процесса.

Электромеханотронная система и электромеханотронный модуль являются частью сложного взаимосвязанного производственного комплекса, что определяет интенсивное повышение технологических требований к системе управления, в первую очередь в отношении снижения энергопотребления, к динамическим и точностным показателям, требует обеспечения инвариантности к изменениям параметров, неизбежным в процессе эксплуатации.

Возрастание требований к электромеханотронным системам и электромеханотронным модулям требует учета новых факторов сложности объектов управления, к числу которых, прежде всего, относятся:

- повышенная размерность математического описания;
- связи между координатами состояния объекта;
- действие на объект управления внешних возмущений произвольной формы;
- необходимость демпфирования колебаний, вызванных нежесткостью кинематических связей.
- наличие слабодемпфированных собственных движений (резонансов) в диапазоне существенных частот;
- необходимость ограничения координат электромеханотронной системы, прежде всего токов и электромагнитных моментов.

Кроме того, постоянное увеличение технических характеристик (быстродействия, полосы пропускания) комплектных электроприводов, являющихся основой построения электромеханотронных систем, обостряет проблему наличия резонансов.

В этих условиях эффективность типовых регуляторов невысокого порядка (П, И, ПИД и других типов), а также каскадных регуляторов, фор-

мирующих структуры систем подчиненного регулирования координат, существенно снижается. Поэтому, на передний план выдвигаются новые методы оптимального и адаптивно-самоорганизующегося управления и регуляторы состояния с повышенной размерностью и количеством настраиваемых параметров. С повышением размерности объекта управления возрастает целесообразность использования для этого наблюдателей состояния.

В работах Ю. А. Борцова, Б. Ш. Бургина, Г. М. Иванова, Б. В. Квартального, В. И. Ключева, Г. Г. Соколовского, С. В. Тарарыкина, В. М. Шестакова и ряда других выполнены исследования взаимного влияния электрической и механической частей электропривода. Так же предложены последовательная и параллельная коррекция систем подчиненного регулирования, синтез регуляторов состояния, обеспечивающих необходимое качество регулирования. Однако к настоящему времени практически отсутствуют приемлемые решения построения систем управлениями в условиях ограничения координат электромеханотронных систем.

В настоящей работе содержатся результаты решения задач ограничения внутренних переменных электромеханотронных систем, основанные на применении нелинейных регуляторов состояния переменной структуры.

Одним из самых распространенных современных систем электропривода переменного тока является регулируемый асинхронный электропривод с векторным управлением. Его технико-экономические показатели, такие как высокое быстродействие и точность обработки задания в сочетании с надежностью и низкой стоимостью, обеспечили широкое применение во многих отраслях народного хозяйства (машиностроение, нефтегазодобыча, коммунальное хозяйство и др.).

Бурное развитие элементной базы частотных преобразователей открывает новые возможности для улучшения их энергетических и технологических показателей. Из всего вышесказанного ясно, что разработка и исследование элементов системы управления асинхронного электропривода является актуальной проблемой.

Наблюдатели состояния позволяют по доступной для измерения информации об электроприводе восстанавливать переменные, необходимые для реализации высококачественных систем управления электроприводами в различных отраслях промышленности.

Основные теоретические положения синтеза и анализа наблюдателей состояния разработаны в середине XX века. Но только в последнее время наблюдатели состояния стали использоваться в быстродействующих системах электроприводов переменного тока. Это вызвано в первую очередь изменением элементной базы – широким распространением недорогих, быстродействующих, высокой разрядности управляющих контроллеров на базе использования микропроцессоров.

При синтезе наблюдателей состояния для реализации систем управления многодвигательными электроприводами возникает ряд аспектов требующих пристального рассмотрения.

К ним следует отнести оптимизацию структуры наблюдателей состояния с целью при заданных динамических качествах обеспечения практической реализуемости для систем, подверженных действию возмущений различной природы.

При действии на электропривод моментов возмущения сложной формы предлагаются методики построения наблюдателей состояния с астатизмом повышенного порядка, обеспечивающие восстановление для целей управления электроприводом необходимых механических переменных.

Наряду с теоретическим анализом и результатами имитационного моделирования авторы предлагают детально описанную технологию современной технической реализации регуляторов и наблюдателей в микропроцессорных системах управления электромеханотронными модулями. Показано формирование оборудования экспериментальной установки на основе использования *DSP*-контроллеров в электромеханотронном модуле. Методически проработан вопрос прикладного программирования *DSP*-контроллеров.

Исследования проводились при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт №02.740.11.0067).

Результаты работы внедрены в образовательный процесс реализации ФГОС третьего поколения обучения студентов и специалистов по профилю «Электропривод и автоматика» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» в рамках высшего профессионального и послевузовского образования на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ивановского государственного энергетического университета.

Авторы выражают особую благодарность доктору технических наук, профессору В. Ф. Глазунову за полезные советы и замечания по улучшению содержания книги в процессе научного редактирования, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой «Автоматика и микропроцессорные системы» Костромского государственного технологического университета Б. А. Староверу за внимательное и объективное рецензирование и ценные рекомендации.

1. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ СОСТОЯНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕМЕННЫХ

1.1. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГОГО МОМЕНТА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Полная управляемость и наблюдаемость объекта определяет принципиальную возможность синтеза регуляторов состояния. Наиболее известными и часто употребляемыми являются критерии полной управляемости и наблюдаемости Калмана [8, 14]. Поскольку в рассматриваемых системах управления применяются и регулятора состояния, и наблюдателя, удобнее воспользоваться критерием управляемости по выходу [45], что позволяет проверить одновременное выполнение условий полной управляемости и наблюдаемости объекта.

1.1.1 Синтез линейного регулятора состояния

Согласно критерию управляемости по выходу одновременное выполнение условий полной управляемости и наблюдаемости будет обеспечено тогда, когда матрица U_0 окажется невырожденной –

$$U_0 = V^T U = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CB & CAB & CA^2B \\ CAB & CA^2B & CA^3B \\ CA^2B & CA^3B & CA^4B \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где U – матрица управляемости,

V – матрица наблюдаемости,

A, B, C – матрицы параметров объекта управления.

Иначе условие невырожденности (1.1) может быть представлено в виде следующего выражения

$$\det U_0 = |U_0| \neq 0 \quad (1.2)$$

Для двухмассовой вязкоупругой электромеханической системы, структура которой представлена на рис. 1.1, система операторных уравнений имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y = \frac{c}{s}(\Omega_1 - \Omega_2); \\ M_{тр} = b(\Omega_1 - \Omega_2); \\ M_{ув} = M_y + M_{тр}; \\ M - M_{ув} = J_1 s \Omega_1; \\ M_{ув} - M_c = J_2 s \Omega_2. \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где J_2 – момент инерции второй массы;

Ω_1 – скорость 1-й массы (двигателя);

Ω_2 – скорости 2-й массы (нагрузки);

M – вращающий момент, создаваемый двигателем;

M_y – упругий момент;

$M_{тр}$ – момент вязкого трения;

$M_{ув}$ – вязкоупругий момент соответственно.

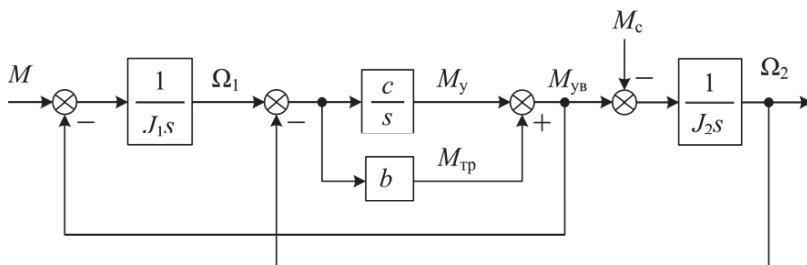


Рис. 1.1. Структурная схема объекта управления

Для использования методов теории пространства состояний получим математическое описание 2-х массовой вязкоупругой электромеханической системой (рис. 1.1) в виде векторно-матричных уравнений состояния и выхода [5, 20]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \vec{x} = \mathbf{A} \vec{x} + \mathbf{B} u; \\ \vec{y} = \mathbf{C} \vec{x}. \end{array} \right. \quad (1.4)$$

Для этого представим уравнения системы (1.3) в форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} M - \frac{1}{J_1} M_y - \frac{b}{J_1} \Omega_1 + \frac{b}{J_1} \Omega_2; \\ \frac{dM_y}{dt} = c\Omega_1 - c\Omega_2; \\ \frac{d\Omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_y + \frac{b}{J_2} \Omega_1 - \frac{1}{J_2} \Omega_2 - \frac{1}{J_2} M_c. \end{array} \right. \quad (1.5)$$

Задаем

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_y \\ \Omega_2 \end{bmatrix} - \text{вектор состояния,}$$

$$u = M - \text{координата управления,}$$

$$y = \Omega_2 - \text{выходная координата.}$$

В итоге получаем матрицы параметров уравнения состояния и выхода (1.4)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & \frac{b}{J_1} \\ c & 0 & -c \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1].$$

В результате векторно-матричное описание 2-х массовой вязко-упругой системы имеет вид [53]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_y \\ \Omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_1} & -\frac{1}{J_1} & \frac{b}{J_1} \\ c & 0 & -c \\ \frac{b}{J_2} & \frac{1}{J_2} & -\frac{b}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_y \\ \Omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} M; \\ \Omega_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_y \\ \Omega_2 \end{bmatrix}. \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Для нашего объекта (1.2) примет вид:

$$\det U_0 = \det \begin{bmatrix} \mathbf{CB} & \mathbf{CAB} & \mathbf{CA^2B} \\ \mathbf{CAB} & \mathbf{CA^2B} & \mathbf{CA^3B} \\ \mathbf{CA^2B} & \mathbf{CA^3B} & \mathbf{CA^4B} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{vmatrix} = -\frac{c^3}{J_1^3 J_2^3} \neq 0.$$

где $u_{11} = 0$;

$$u_{12} = u_{21} = \frac{b}{J_1 J_2};$$

$$u_{13} = u_{22} = u_{31} = \frac{b^2 (J_1 + J_2) - c J_1 J_2}{J_1^2 J_2^2};$$

$$u_{23} = u_{32} = \frac{b (J_1 + J_2) (b^2 (J_1 + J_2) - 2c J_1 J_2)}{J_1^3 J_2^3};$$

$$u_{33} = \frac{b (J_1 + J_2) (b^2 (J_1 + J_2) (b^2 (J_1 + J_2) - 2c J_1 J_2) + c^2 J_1^2 J_2^2)}{J_1^3 J_2^3}.$$

Таким образом, принятый для синтеза объект (1.6) полностью управляем и наблюдаем.

Уравнение состояния системы с регулятором состояния имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \vec{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK}) \vec{x} + \mathbf{B} \vec{u}, \quad (1.7)$$

где $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов регулятора состояния,

$\vec{u} = U$ – управление.

Для расчета коэффициентов регулятора состояния используем метод стандартных коэффициентов [20].

Свободное движение системы определяется характеристическим уравнением:

$$\det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}) = 0, \quad (1.8)$$

где s – оператор Лапласа;

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – единичная матрица 3-го порядка.}$$

После подстановки матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{I}$ в (1.8) и преобразований получаем:

$$\begin{aligned} s^3 + \frac{b(J_1 + J_2) + J_2 k_1}{J_1 J_2} s^2 + \frac{c(J_1 + J_2) + b(k_1 + k_3) + cJ_2 k_2}{J_1 J_2} s + \\ + \frac{c(k_1 + k_3)}{J_1 J_2} = 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Для обеспечения монотонного изменения регулируемой переменной примем в качестве стандартного полинома бином Ньютона 3-го порядка [20]:

$$s^3 + 3\omega_{0r} s^2 + 3\omega_{0r}^2 s + \omega_{0r}^3 = 0. \quad (1.10)$$

Приравняв коэффициенты при соответствующих степенях переменной s характеристического (1.9) и стандартного (1.10) уравнений, получаем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов регулятора состояния

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{b(J_1 + J_2) + J_2 k_1}{J_1 J_2} = 3\omega_{0r}; \\ \frac{c(J_1 + J_2) + b(k_1 + k_3) + cJ_2 k_2}{J_1 J_2} = 3\omega_{0r}^2; \\ \frac{c(k_1 + k_3)}{J_1 J_2} = \omega_{0r}^3, \end{array} \right. \quad (1.11)$$

решив которую относительно неизвестных коэффициентов регулятора, находим аналитическую зависимость коэффициентов регулятора состояния от параметров механики электропривода J_1, J_2, c, b и среднегеометрического корня системы ω_{0r} [2, 53], определяющего быстродействие системы управления:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{3J_1 J_2 \omega_{0r} - b(J_1 + J_2)}{J_2}; \\ k_2 = \frac{-bJ_1 J_2 \omega_{0r}^3 + 3cJ_1 J_2 \omega_{0r}^3 - c^2(J_1 + J_2)}{J_2 c^2}; \\ k_3 = \frac{J_1 J_2^2 \omega_{0r}^3 - 3cJ_1 J_2 \omega_{0r} + bc(J_1 + J_2)}{J_2 c}. \end{array} \right. \quad (1.12)$$

Матричная передаточная функция системы управления с регулятором состояния имеет вид:

$$\vec{x}(s) = \mathbf{H}(s) \vec{u}(s); \quad \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_y \\ \Omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{U\Omega_1} \\ H_{UM_y} \\ H_{U\Omega_2} \end{bmatrix} U; \quad (1.13)$$

$$\mathbf{H}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK})^{-1} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} H_{U\Omega_1} \\ H_{UM_y} \\ H_{U\Omega_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{c + bs + J_2 s^2}{J_1 J_2 Z(s)} \\ \frac{c J_2 s}{J_1 J_2 Z(s)} \\ \frac{c + bs}{J_1 J_2 Z(s)} \end{bmatrix}, \quad (1.14)$$

где $H_{U\Omega_1}$, H_{UM_y} , $H_{U\Omega_2}$ – передаточные функции между координатой управления U и соответствующей координатой состояния системы;

– характеристический полином системы,

$$Z(s) = \det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}) = s^3 + \frac{b(J_1 + J_2) + J_2 k_1}{J_1 J_2} \cdot s^2 + \frac{c(J_1 + J_2) + b(k_1 + k_3) + c J_2 k_2}{J_1 J_2} \cdot s + \frac{c(k_1 + k_3)}{J_1 J_2}. \quad (1.15)$$

Для устранения влияния на переходные процессы в системе управления нулей передаточной функции $H_{U\Omega_2}$ используем входной фильтр с передаточной функцией:

$$H_\Phi(s) = \frac{J_1 J_2 Z(0)}{c + b \cdot s} = \frac{k_1 + k_3}{1 + \frac{b}{c} s}. \quad (1.16)$$

Структурная схема системы управления с регулятором состояния представлена на рис. 1.2.

Таким образом, для принятой математической модели объекта возможно синтезировать регулятор состояния, обеспечивающий устойчивость системы и обеспечение монотонного характера переходных процессов по скорости вращения вала рабочего механизма и вязкоупругого момента при пуске, реверсе и торможении.

Рассмотрим теперь, каким образом можно обеспечить ограничение вязкоупругих моментов в пределах перегрузочной способности по электромагнитному моменту.

1.1.2. Ограничение моментов в механических передачах

В электромехатронных системах в общем случае требуется ограничивать три основные группы параметров:

- энергетические (ток, напряжение), что связано с ограниченной мощностью источника энергии и коммутационными возможностями ключей;
- механические (силы и моменты в кинематических передачах), что связано с прочностью элементов передач;
- параметры движения исполнительного органа электропривода (ограничение угла поворота, скорости, ускорения, рывка).

В соответствии с принятым в данном разделе работе подходом полагаем, что ограничение энергетических переменных реализовано в контуре электромагнитного момента комплектного электропривода переменного тока, на основе которого разрабатывается система управления.

Ограничения механических параметров и параметров движения в электроприводе могут быть обусловлены аварийными режимами (короткое замыкание, стопорение, перегрузка и т.п.) или переходными процессами.

Указанные ограничения, связанные с аварийными режимами, реализуются защитными устройствами комплектного электропривода и при синтезе системы управления не рассматриваются. Ограничения в переходных режимах рассматриваются в том случае, если они часты или существенно влияют на качество продукции.

Рассмотрим детально ограничение моментов, возникающих в механических передачах многосвязного асинхронного электропривода с нежесткой механикой в переходных режимах при использовании регулятора состояния, учитывая необходимость простоты их реализации.

Для ограничения координат электропривода применяют четыре основных способа:

- с помощью отсечек [4, 43-45];
- с ограничением сигнала на входе контура регулирования переменной [3, 4, 5, 7, 43, 44, 47],
- с логическим переключающим устройством [4, 19];

- с задатчиком интенсивности на входе контура регулирования переменной [42].

В структуре системы с отсечками (рис. 1.3) используются нелинейные элементы с зоной нечувствительности, в структуре системы с ограничением сигналов на входе контура (рис. 1.4) – нелинейные элементы с насыщением. В первом случае при достижении переменной x_n своего предельно допустимого значения начинает действовать отрицательная обратная связь, и сигнал $U_{вп}$ поддерживается постоянным независимо от величины сигнала задания $U_{зн}$. Во втором случае сигнал $U_{зн}$ поддерживается постоянным и соответствующим максимально допустимому значению при значениях $U_{рп}$, превышающих уровень насыщения.

В обоих случаях контур переменной x_{n-1} размыкается на время поддержания переменной x_n на максимально допустимом уровне. В результате динамика разомкнутой системы может не соответствовать требуемой, а при определенных параметрах объекта и величинах входных воздействий система может оказаться неустойчивой.

Особенно это актуально для систем электропривода с нежесткой механикой, в которых колебательный характер переходных процессов скоростей двигателя и рабочей машины, а также моментов в передачах обуславливает необходимость разработки регуляторов этих координат. Кроме того, использование отсечек или ограничения сигнала на входе контура подразумевает наличие независимого контура ограничиваемой координаты, как, например, в системах подчиненного регулирования [5]. В системах управления с регуляторами состояния независимых контуров координат электропривода нет.

При использовании структуры рис. 1.5 процесс регулирования каждой переменной происходит с помощью своего регулятора W_{pi} . Выбор управляющего сигнала для подачи на объект осуществляет логическое переключающее устройство. Такое же структурное решение (рис. 1.6) предложено в [19].

В этом случае ограничение координат основано на использовании отдельных регуляторов выходной и промежуточных координат с выбором минимального значения на выходах регуляторов для формирования напряжения силового преобразователя. Такой способ ограничения координат усложняет структуру системы управления. Это особенно ощутимо в электроприводах с нежесткой механикой, где количество промежуточных координат не менее двух (скорость двигателя, упругий момент). К тому же, как отмечают сами авторы [17], система может быть неустойчивой либо переходить в автоколебательный режим в зависимости от уровня и формы внешних воздействий.

Задатчик интенсивности в системах управления электроприводами [4-7, 42] располагается на входе контура регулирования скорости и предназначен для ограничения ускорения и рывка – первой и второй производных скорости соответственно. Такая задача стоит в электроприводах, например, транспортеров, подъемно-транспортных механизмов и, прежде всего, лифтов. В принятых к рассмотрению объектах, например, опорно-поворотных устройствах антенн, телескопов, использование задатчика интенсивности не рационально, поскольку в структурах таких систем есть внешний контур управления перемещением (позиционирования).

Ограничение моментов, возникающих в кинематических связях нежесткой механики, может достигаться построением регуляторов состояния в реальных, а не фазовых, координатах, что позволяет выделить в синтезированной системе управления (рис. 1.2) контур упругого момента и поставить на его входе ограничение [11]. Структура нелинейного регулятора состояния показана на рис. 1.7. Упругий момент здесь ограничивается сигналом на входе контура упругого момента.

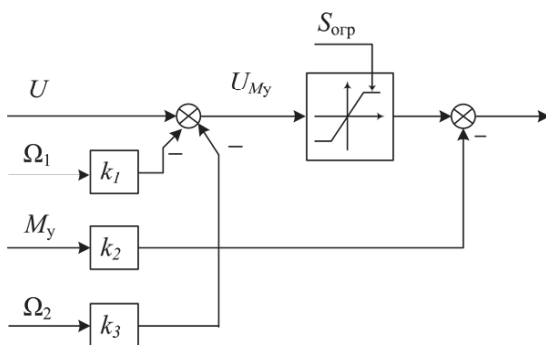


Рис. 1.7. Нелинейный регулятор состояния с ограничением момента

Чтобы найти аналитическое выражение для уровня ограничения сигнала на входе контура упругого момента $S_{огр}$ необходимо:

- найти передаточную функцию между входом $U_{My}(s)$ и выходом $M_y(s)$ контура упругого момента:

$$W_{My}(s) = \frac{M_y(s)}{U_{My}(s)} =$$

Научное издание

КОЛГАНОВ Алексей Руфимович
ЛЕБЕДЕВ Сергей Константинович
ГНЕЗДОВ Николай Евгеньевич

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ, РЕАЛИЗАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЯ

Учебное пособие

ISBN 978-5-9729-0295-8



Подписано в печать 30.01.2019
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63
Тел.: 8 (800) 250-66-01
E-mail: booking@infra-e.ru
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает
к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы