

О РЕЗУЛЬТАТАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАБИЛИЗАЦИИ СИСТЕМ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ НАБЛЮДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Наличие падающего участка отрицательного вязкого трения на кинетической характеристике трения зачастую требует особых методов проектирования электропривода машин и механизмов с фрикционной нагрузкой. Многие задачи в этой области еще не получили своего полного теоретического и практического решения. Проблемным остается не только обеспечение заданных показателей качества процессов управления электроприводом на всем многообразии динамики объектов с фрикционной нагрузкой, но и обеспечение устойчивости этих процессов. Одним из факторов, усложняющих решение задач управления, является недоступность некоторых координат электромеханических систем (ЭМС) с отрицательным вязким трением (ОВТ) прямому измерению. Для косвенного измерения этих координат могут использоваться наблюдающие устройства (наблюдатели), но и они, в свою очередь, в основном неблагоприятно влияют на процессы регулирования, включая их устойчивость. Исследования этого влияния и поиск средств его уменьшения проводились в течение ряда лет на кафедре АЭМС НТУ «ХПИ» в рамках созданного В.Б.Клепиковым научного направления «Динамика систем с отрицательным вязким трением». Предлагаемая статья является изложением результатов работы ее авторов, полученных за последние 15 лет.

В 1994-95 гг. был проведен поиск известных в теории управления и теории электропривода вариантов построения наблюдающих устройств [1, 13]. Среди найденных вариантов для дальнейших исследований были выделены те, которые целесообразно применять в составе систем управления электроприводов с фрикционной нагрузкой. Существенно уменьшить число подлежащих исследованию вариантов наблюдателей, ориентируясь на специфику характеристик фрикционной нагрузки, нельзя – как показал проведенный анализ, сложность процессов трения определяет многообразие моделей трения и, как следствие, многообразие моделей объектов наблюдения и соответствующих им типов наблюдателей. Положительным практическим результатом анализа моделей трения явилась разработанная в его ходе компьютерная база данных по характеристикам трения [2], применявшаяся в дальнейших исследованиях ЭМС с ОВТ.

Для выделения задач и проблем наблюдения (разные постановки задач могут требовать разных наблюдателей) был проведен информационный поиск тех средств управления электроприводом с фрикционной нагрузкой, для реализации которых применение наблюдателей известно или перспективно. В результате поиска выявлено, что число возможных комбинаций «регулятор+наблюдатель», как и число проблем их применения, настолько велико, что, по-видимому, их невозможно в полном объеме учесть в рамках обычного инженерного проектирования конкретных систем управления. В практике инженерной работы подобные задачи выбора одного из альтернативных технических решений зачастую решаются эвристически, на основе опыта проектирования и интуиции. Но поскольку число вариантов действительно велико, инженер-проектировщик вряд ли может приобрести соответствующий опыт в рамках своей профессиональной деятельности. С ростом числа структур и методов параметрического синтеза наблюдателей и регуляторов объем необходимых исследований вариантов решения увеличивается чрезвычайно быстро.

Поэтому необходима методика обоснованного выбора ограниченного числа наиболее подходящих наблюдателей, основанная на систематизации и обобщении (на первых этапах исследования неизбежно индуктивном) их свойств. Отбор вариантов следует вести, исходя, прежде всего, из требований устойчивости ЭМС с ОВТ, то есть, исходя из степени влияния наблюдателей на устойчивость замыкаемой через них системы с тем или иным регулятором. Далее в отобранных классах устройств, различающихся их влиянием на устойчивость замкнутой системы, могут быть выделены подклассы, характеризующиеся влиянием на другие показатели качества управления. Либо же, к наблюдателю и регулятору, обеспечивающим устойчивость, могут добавляться другие средства управления, обеспечивающие требуемые показатели качества. Результаты такой систематизации свойств наблюдателей должны быть представлены в форме, допускающей их использование в САПР электропривода.

Отсутствие в известных публикациях по наблюдателям достаточного для целей систематизации фактического материала потребовало проведения синтеза и анализа ряда систем управления электроприводом с фрикционной нагрузкой, включая структурный и параметрический синтез не только наблюдателей, но и ряда регуляторов. В основу синтеза и анализа положены подходы, хорошо зарекомендовавшие себя в ранее выполненных под руководством В.Б. Клепикова исследованиях ЭМС с ОВТ на кафедре АЭМС НТУ «ХПИ». Так, для обеспечения необходимой степени общности рассматривалась двухмассовая ЭМС с обобщенными параметрами, на первых этапах исследования – линеаризованная. Свойства такого объекта четвертого порядка определяются четырьмя параметрами: T_{MI}^* – относительная электромеханическая постоянная времени, γ – коэффициент инерции, ν – отношение квадратов частот недемпфированных резонансов в механизме и двигателе, b – отношение жесткостей механических характеристик нагрузки и электродвигателя в точке статического равновесия.

Существенно неопределенным всегда является параметр b , характеризующий зависимость сил трения от скорости относительного скольжения тел фрикционной пары. Отрицательному вязкому трению соответствуют отрицательные значения b .

Были изучены специфичные для задач наблюдения свойства данного объекта и его частей, такие как полная **наблюдаемость и детектируемость**. Хотя подобные исследования проводились и ранее (известна, например, зависимость полной наблюдаемости от внутреннего вязкого трения в упругой связи), но имеющиеся их результаты ограничены либо частными случаями параметров системы, либо перечнем исследуемых ее свойств. Свойства же эти разнообразны и дают ответ не только на вопрос о возможности построения наблюдателя для системы с конкретными значениями параметров, но и, в частности, позволяют:

- указать характерные признаки объектов, для которых неполная наблюдаемость принципиально не возможна;
- выявить свойства инвариантности систем управления и упростить исследование их абсолютной устойчивости;
- определить минимальный порядок наблюдающих устройств для исследуемого объекта;
- определить вид зависимости коэффициентов корректирующих связей наблюдателей от параметров объекта.

Невысокий порядок выбранных объектов наблюдения позволил применить к ним критерии наблюдаемости, базирующиеся на анализе аналитических выражений передаточных функций и определителей матриц наблюдаемости. Этот анализ показал, что как для всей ЭМС, так и для ее частей возможна неполная наблюдаемость [3, 16], причем как параметрическая, так и структурная. Примером первой является ненаблюдаемость ЭМС по скорости первой массы при выполнении равенства $b = (v^2 + T_{M1}^{*2} \gamma)(\gamma - 1) / \gamma v$. Подобным образом не полностью наблюдаемой может быть и система пятого порядка с инерционным силовым преобразователем.

Физический смысл такой зависящей от характеристик трения неполной наблюдаемости прояснен путем декомпозиции объекта [16]. Она объясняется характером взаимодействия электрической и механической частей электропривода. К неполной наблюдаемости будут близки объекты хорошо демпфированные, в том числе благодаря фрикционной нагрузке на восходящем участке характеристики трения. Такой не полностью наблюдаемый объект будет, вместе с тем, детектируемым, так как его не наблюдаемые собственные движения устойчивы. Они имеют апериодический характер и амплитуду, изменяющуюся с постоянной времени, равной отношению v / T_{M1}^* . Так как при заданных T_{M1}^* , v и γ условие неполной наблюдаемости выполняется лишь для одного значения b , то использование наблюдателя для такого объекта в принципе возможно (и, по крайней мере, неполная наблюдаемость не приведет к неустойчивости системы).

Свойство наблюдаемости объекта зависит, как известно, и от обратной связи по его состоянию. Проведенный анализ показал, что введение жестких обратных связей по координатам ЭМС с ОВТ не устраняет возможность неполной наблюдаемости, а лишь изменяет вид ее параметрического условия. Более того, при определенных коэффициентах передачи этих связей система не полностью наблюдаема не только при $b > 0$, как это имеет место для разомкнутой ЭМС, но и при $b < 0$, что делает использование наблюдателя совершенно невозможным, так как не полностью наблюдаемый объект может оказаться еще и неустойчивым.

Структурная неполная наблюдаемость возникает, если в механическую часть ЭМС второго порядка со входом – скоростью первой массы и измеряемым выходом – скоростью второй массы ввести модель постоянного момента сопротивления в виде интегратора.

Важным показателем наблюдаемости является индекс наблюдаемости – наименьшее целое число k , при котором матрица наблюдаемости $[C^T \ A^T C^T \ (A^T)^2 C^T \dots \ (A^T)^{k-1} C^T]$ имеет ранг, равный порядку объекта наблюдения. Известно, что для полностью наблюдаемой системы справедливо неравенство $(n - r) \geq (k - 1)$, где n – порядок объекта, r – размер вектора его выходных сигналов. Это означает, что переменные состояния объекта можно оценивать устройством пониженного $(k-1)$ -го порядка. Анализ индексов наблюдаемости ЭМС с ОВТ и ее частей показал, что минимальный (первый) порядок наблюдателя достигается при наблюдении за ЭМС с векторным измеряемым выходом, одна из составляющих которого – скорость второй массы.

Таким образом, понижение порядка наблюдающего устройства для ЭМС с ОВТ возможно, по крайней мере, тремя способами – построение наблюдателя полного порядка для части объекта, построение редуцированного наблюдателя состояния, построение устройства минимального порядка, оценивающего линейный функционал вектора переменных состояния.

Рассмотрение частей ЭМС представляет интерес не только из-за уменьшения порядка наблюдателей. Изменение структуры объекта наблюдения влияет и на другие свойства наблюдателей, в частности на максимальную величину их коэффициентов коррекции, в выражения для которых порядок объекта входит в виде показателей степени. Следует отметить, что к построению наблюдателей для части объекта приводит не только понижающее порядок объекта исключение из него динамических звеньев, но и исключение части его внутренних связей по переменным состояния без изменения порядка [16]. Конечно, и в этом случае вызванное изменением структуры отсутствие сигналов в модели должно компенсироваться подачей на наблюдатель соответствующих сигналов, полученных от самого объекта. В своем большинстве такие модели с исключенными связями распадаются на независимые друг от друга модели более низкого порядка. Но этого не происходит, если при скалярном измеряемом выходе разбивается только одна из внутренних связей по этому выходу. Этот случай интересен тем, что такой разрыв связи упрощает аналитические выражения коэффициентов коррекции наблюдателя, не влияя при этом на характеристический полином замкнутой через наблюдатель системы, а значит, не влияя на ее устойчивость. То есть, все результаты исследования устойчивости, полученные для наблюдателей без разрыва

связей, можно без изменений переносить на наблюдатели с их разрывом.

Для полностью наблюдаемых объектов выполнен *синтез наблюдателей* ряда типов, включая редуцированные и оценивающие линейный функционал вектора переменных состояния, которые ранее для ЭМС с ОВТ не применялись. Использовались корневые методы синтеза с применением пакетов компьютерной алгебры [10, 11]. Кроме известных матричных методов синтеза использовался и метод синтеза наблюдателей полного порядка, основанный на математическом аппарате передаточных функций [7]. Этот метод сокращает число этапов синтеза, упрощает реализацию и наладку наблюдателей.

Предварительно проведенный анализ [4, 7] стандартных распределений корней и форм характеристических полиномов (более трех десятков) выявил те из них, что наиболее пригодны для использования в наблюдателях. Эти распределения включены в разработанную компьютерную информационную систему по стандартным формам полиномов. Кроме нормирования известных распределений и отображения их свойств различными способами, она позволяет получать новые формы методом интерполяции коэффициентов полиномов.

Предложены для использования и новые формы полиномов, полученные путем модификации одного из известных методов расположения корней на кривой второго порядка [5]. Модификация ориентирована на синтез наблюдателей, при котором жесткие требования накладываются на положение левой и правой границ области расположения корней. Выполнение этих требований обеспечивается расположением корней на эллипсе, целиком размещенном в левой полуплоскости. Для получения формы полинома задаются параметры эллипса, влияние которых на положение корней и переходные процессы оказывается интуитивно понятным.

Результатом проведенного синтеза явились аналитические выражения для коэффициентов передачи корректирующих связей наблюдателей. Путем их анализа установлена связь величины коэффициентов с задаваемыми при синтезе параметрами объекта и наблюдателя, такими как показатель быстродействия [11]. Знание этой связи необходимо, так как устойчивость системы, замкнутой через наблюдатель, непосредственно связана с быстродействием последнего, которое, в свою очередь, ограничено диапазоном реально возможных коэффициентов коррекции. Вместе с тем, известные выводы о величине этих коэффициентов либо носят общий характер, либо относятся к частным случаям, отличающимся от рассматриваемых наблюдателей для ЭМС с ОВТ. Особенностью ряда исследованных наблюдателей является, например, то, что в заданном диапазоне быстродействия максимальная величина коэффициентов коррекции определяется свойством наблюдаемости объекта. Вблизи точки пространства параметров, соответствующей неполной наблюдаемости, максимальные значения коэффициентов коррекции резко увеличиваются. С другой стороны, изменение параметра b при синтезе наблюдателя менее чем на 1% способно уменьшить эти коэффициенты на порядок и более.

Особое внимание было уделено наблюдателям полного порядка с коррекцией по векторному выходу. Такие наблюдатели обычно не рассматривают, так как для коррекции состояния наблюдателя достаточно измерения и одной координаты объекта. Тем не менее, для их изучения есть ряд причин, в частности: а) аналитические выражения для их коэффициентов являются общим случаем выражений для случая скалярного выхода; б) одно и то же распределение корней возможно при различных коэффициентах коррекции, что позволяет ограничить их величину. Имеющаяся свобода выбора коэффициентов корректирующих связей позволяет минимизировать величину максимального из них [11]. В ряде случаев этот существующий минимум позволяет снизить максимальную величину коэффициентов на несколько порядков. Уменьшить величину коэффициентов наблюдателей позволяет и предложенная методика синтеза [7], основанная на преобразовании структурной схемы системы управления с наблюдателем, которое можно назвать дроблением коэффициентов.

Проведенный синтез позволил выделить области целесообразного применения редуцированных наблюдателей для ЭМС с ОВТ. Использование таких устройств целесообразно не всегда, что обусловлено их зачастую более низкой помехоустойчивостью, сложностью в наладке и прочими факторами. Их применение оказывается оправданным тогда, например, когда ставятся задачи *обеспечения инвариантности наблюдателя* к неизмеряемым внешним воздействиям и минимизации числа датчиков измерений при пониженном порядке наблюдателя. Для ЭМС с ОВТ особенно важна инвариантность, так как ее обеспечение по отношению к моменту сопротивления означает, что замыкание системы через наблюдатель (вместо замыкания непосредственно по измеряемым координатам) не приведет к изменению областей устойчивости вследствие ошибок наблюдения, вызванных неопределенностью характеристик фрикционной нагрузки [6, 8, 9].

Среди установленных особенностей синтезированных *редуцированных наблюдателей* можно отметить, например, следующие:

- 1) Как и для наблюдателей полного порядка, коррекция по векторному выходу позволяет снизить максимальную величину коэффициентов коррекции в сравнении со случаем скалярного выхода. Однако необходимость в таком снижении возникает реже в силу малого порядка редуцированных наблюдателей.
- 2) Структура редуцированных наблюдателей при их коррекции по скорости второй массы обеспечивает независимость коэффициентов коррекции и характеристических полиномов наблюдателей от параметра b фрикционной нагрузки (но от него зависят прямые связи между объектом и наблюдателем);
- 3) Возможна инвариантность наблюдателя к неизмеряемому моменту сопротивления [6, 8, 9].

Сущность инвариантности редуцированных наблюдателей не очевидна из-за различия структур объектов и построенных для них наблюдателей. Физический смысл инвариантности был прояснен путем структурных преобразований наблюдателей. Эта параметрическая инвариантность не основана на принципе двухканальности, и в силу тех же причин наблюдатели инвариантны и к моменту инерции второй массы.

Структурное преобразование редуцированного наблюдателя, направленное на сохранение в ней исходной для синтеза структуры объекта было положено и в основу методики синтеза наблюдателя с управлением по моменту (току) двигателя и коррекцией по скорости первой массы [15]. При этом в структурной схеме наблюдателя в явной форме присутствуют сигналы, соответствующие наблюдаемым переменным состояниям (что отличает эту структуру от классической реализации редуцированного наблюдателя). Расчет коэффициентов коррекции и наладка такого редуцированного наблюдателя не сложнее, чем для наблюдателя полного порядка, ошибка наблюдения имеет физический смысл, представляя собой динамический момент двигателя в составе двухмассовой ЭМС.

Подобные исследования проведены и для *наблюдателей минимального порядка, оценивающих линейный функционал вектора переменных состояний* ЭМС с ОБТ [9, 16]. В теории электропривода они изучены мало, в основном в рамках построения наблюдателей для так называемых объектов с неизвестным входом (systems with unknown input). По сравнению с другими наблюдателями синтез таких устройств более сложен. Их структура сильно отличается от структуры объекта наблюдения, а коэффициенты передачи связей зависят от выбранного закона управления, для реализации которого и строится наблюдатель. Применительно к ЭМС с ОБТ решение задачи синтеза таких наблюдателей было получено в аналитическом виде. Анализ аналитических выражений позволил установить условия инвариантности наблюдателя к неизмеряемому моменту сопротивления [9]. Установлено, что быстродействие инвариантного наблюдателя не может выбираться произвольно. Выявлена связь показателя быстродействия замкнутого по состоянию объекта с показателем быстродействия инвариантного наблюдателя, и сделан вывод о целесообразности выбора для этих показателей близких по величине значений. Неизбежное на практике незначительное нарушение условий параметрической инвариантности наблюдающего устройства не приводит к существенным изменениям устойчивости замкнутой через него системы управления.

Задача синтеза не инвариантного наблюдателя, заведомо влияющего на качество процессов управления, может быть поставлена как задача синтеза оптимальной или робастной динамической системы. При этом оптимизации подлежат не только параметры наблюдателя, но и его структура. Эффективность оптимизации зачастую определяется выбором первого приближения к оптимуму. Это приближение должно быть достаточно хорошим, близким к оптимуму. Для его задания нужно иметь представление о поведении целевой функции, ее зависимости от параметров оптимизации. В наших исследованиях такими параметрами являются тип наблюдателя, тип распределения его корней и показатель быстродействия. В качестве исследуемой целевой функции выбрано изменение областей устойчивости (их конфигурации и размера) вследствие замыкания системы через наблюдатель, а не непосредственно по измеряемым координатам объекта.

В первую очередь были рассмотрены *замкнутые системы с безынерционными регуляторами*, которые на практике требуют оценивания координат объекта. К ним относятся жесткая обратная связь по упругому моменту, модальные регуляторы, ряд оптимальных и робастных регуляторов состояний [12, 13, 16, 17]. В ранее выполненных работах было определено, что связь по упругому моменту с точки зрения подавления фрикционных колебаний зачастую эффективна, хотя прямое измерение этого момента обычно затруднено. Эффективность такой связи в данных работах оценивалась либо по необходимому алгебраическому условию устойчивости, либо путем построения областей устойчивости с последующим их визуальным сравнением. В исследованиях [12] значение коэффициента передачи жесткой связи по упругому моменту определялось, исходя из требования устойчивости замкнутой системы при минимально возможных значениях параметра b . То есть, решению задачи анализа предшествует решение задачи условной параметрической оптимизации. Критерием минимизации выступала граница устойчивости по параметру b . Такая задача для ряда сочетаний параметров ЭМС с ОБТ имеет эффективное решение, определены области наибольшей эффективности.

Решения, полученные для жесткой обратной связи по упругому моменту, сопоставлены с другими решениями задач синтеза регуляторов для ЭМС с ОБТ. К ним, в частности, относится синтез средствами пакета программ PARADISE (автор M. Muhler) робастной системы, замкнутой по полному или не полному вектору состояния [17]. В ходе синтеза заданные области расположения корневых годографов, соответствующие ограничениям на показатели качества динамических процессов, отображались на плоскости параметров системы. Полученное в результате решение обеспечивает не только устойчивость системы, но и заданные показатели качества регулирования. Используемые в PARADISE методы синтеза близки к методу D-разбиения и основаны на методах компьютерной алгебры.

Анализу подверглись также системы модального управления и системы, оптимальные по линейно-квадратичному критерию качества. При этом был выделен класс модальных регуляторов, не требующих связей по всем переменным состояниям, то есть тех регуляторов, синтез которых дает нулевые значения некоторых коэффициентов обратных связей. Установлены условия существования таких регуляторов, накладывающие ограничения на показатель быстродействия замкнутой системы. Решалась и задача выбора оптимальной стандартной формы характеристического полинома системы модального управления, обеспечивающей при фиксированном показателе быстродействия максимальную область устойчивости по параметру b .

Среди других использованных критериев оптимизации связей по координатам ЭМС с ОБТ отметим прямые показатели качества переходного процесса, графически задаваемые и обеспечиваемые в ходе синтеза средствами пакета Matlab/Nonlinear Control Design Toolbox, а также H_2 - и H_∞ нормы передаточных функций, применяемые при синтезе робастных регуляторов [12, 19, 20]. В итоге сделан вывод, что в большей мере принятым кри-

териям выбора средств регулирования удовлетворяет оптимальная в вышеуказанном смысле жесткая обратная связь по упругому моменту. Направленный на расширение областей устойчивости поиск коэффициента передачи этой связи был полностью автоматизирован, и не требует априорного задания значений параметра b .

Области устойчивости ЭМС с ОБТ, замкнутой по измеряемым координатам, были приняты в качестве эталона для сравнения с областями устойчивости систем с теми же регуляторами, но замкнутыми по оценкам их координат наблюдателями. Для параметров T_{MI}^* , γ и ν в объекте и наблюдателе при сравнении принимались одни и те же значения, а области устойчивости строились на плоскости (b, b_0) , где b_0 – принятое при синтезе наблюдателя значение параметра b . Отклонение действительного значения параметра b в объекте от его значения b_0 , принятого в наблюдателе, ведет к нарушению теоремы о разделении и, соответственно, влияет на устойчивость системы.

Построенные области устойчивости характеризовались формой их границ, размером и расположением на плоскости параметров. Эти характеристики определялись как визуально, так и в автоматическом режиме методами кластерного анализа [23]. Анализ характеристик областей выявил закономерности влияния наблюдателей на устойчивость замкнутой ЭМС с ОБТ [9, 17]. Так, например, увеличение степени устойчивости при $b \neq b_0$ в сравнении с $b = b_0$ наблюдается редко, в основном при существенном увеличении быстродействия наблюдателей. Различные наблюдатели при их равном заданном быстродействии могут давать существенно различные размеры и расположение областей устойчивости, то есть зависимость областей устойчивости от структуры и параметров наблюдателей хорошо выражена. Большие области устойчивости наблюдаются чаще при $b > b_0$. При значительном быстродействии наблюдателя дальнейшее увеличение показателя быстродействия может не оказывать заметного влияния на области устойчивости. Иначе говоря, иногда невозможно устранить неустойчивость, увеличивая быстродействие. Для ряда параметров ЭМС и типов наблюдателей (прежде всего с коррекцией по скорости второй массы) при относительно невысоком быстродействии наблюдателей существуют локальные максимумы областей устойчивости. В итоге, влияние наблюдателей на устойчивость замкнутой системы охарактеризовано геометрическими показателями областей устойчивости при $b > b_0$ и $b < b_0$; значениями показателя быстродействия, обеспечивающего локальный максимум величины областей устойчивости и значениями этого минимума.

Сравнение полученных для разных типов наблюдателей областей устойчивости позволило выдвинуть ряд гипотез о предпочтительности тех или иных вариантов построения наблюдателей в определенных диапазонах значений их параметров. Например, наблюдатели с коррекцией по скорости второй массы могут давать большие области устойчивости при низком и среднем быстродействии и параметрах $\nu > 4 \cdot 10$, $\gamma < 1,5 \dots 2,5$. Коррекция по моменту двигателя зачастую близка по влиянию на устойчивость к коррекции по скорости первой массы, и тогда области устойчивости для последней обычно несколько больше. Однако коррекция по моменту может быть целесообразна в верхнем диапазоне быстродействия, когда коррекция по скоростям ЭМС добиться устойчивости не позволяет. Расширенные наблюдатели достаточно часто имеют преимущество перед эквивалентными наблюдателями с коррекцией по той же координате при среднем и большом быстродействии. Часто приводит к увеличению области устойчивости и понижение порядка наблюдателя тем или иным способом.

Для этих предварительных гипотез о преимуществе одного типа наблюдателей над другим проведен статистический анализ, состоящий в многократной полностью автоматической проверке гипотезы на представительном наборе исходных данных с последующим усреднением результатов. Набор исходных данных содержал порядка 10^3 точек пространства параметров ЭМС. Координаты точек выбирались не на прямоугольной сетке, а были получены методом равномерно распределенных последовательностей, что дает большее разнообразие сочетаний параметров. Такая проверка путем компьютерного эксперимента выдвинутых относительно свойств системы предположений широко применяется в теории систем, дающей многочисленные примеры успешного получения этим методом статистически достоверных результатов, например, о влиянии на устойчивость размерности системы (числа переменных состояния) и ее связности (числа зависимостей между переменными). Статистическая достоверность в данном случае проявляется в использовании таких терминов как «скорее всего устойчивая система», «скорее всего неустойчивая система».

В результате анализа структуры наблюдателей были упорядочены по их влиянию на устойчивость, а номер наблюдателя в такой упорядоченной последовательности структур предлагается использовать как параметр оптимизации (очевидно, целочисленной) по критерию максимума площади областей устойчивости.

Полученные выводы о влиянии наблюдателей на устойчивость ЭМС с ОБТ легко представить в виде предикатов первого порядка, то есть логических выражений вида «если условие, то заключение» [13, 17]. Фактически они представляют собой правила синтеза, и в таком виде могут включаться в продукционные экспертные системы. Разработан демонстрационный прототип такой системы.

Противоположность влияния разных наблюдателей в разных параметрических областях привела к идее параллельного включения двух наблюдателей и использования в законе управления их средневзвешенных оценок переменных состояния ЭМС [18]. Весовые коэффициенты в таких оценках можно варьировать, используя их как параметр оптимизации. Было установлено, что существуют оптимальные значения весовых коэффициентов, обеспечивающие расширение областей устойчивости по сравнению с применением одного наблюдателя. Ранее, насколько известно, такое параллельное включение наблюдателей применялось лишь для повышения надежности устройств оценивания.

Все перечисленные выше результаты являются решением задачи наблюдения в ее узкой математической постановке. Они базируются на ряде допущений, касающихся *технической реализации и условий применения наблюдателей*, среди которых: физическая реализуемость передаточных функций наблюдателей; адекватность моделей объектов условиям применения наблюдателей; малое влияние на процесс наблюдения примененных в наблюдателе элементной базы, форм представления и методов обработки сигналов. Эти допущения были подвергнуты анализу и проверке. В частности, для ряда случаев оценено влияние точности параметрической идентификации на качество наблюдения и изучено влияние на процессы в системах с наблюдателями неучтенных при их синтезе нелинейностей, сигнальных возмущений, запаздываний сигналов и др. [12, 16].

Установлено, что не учтенное в наблюдателе чистое запаздывание в преобразователе и других элементах замкнутой ЭМС с ОБТ может влиять на устойчивость системы как отрицательно, так и положительно. Показана возможность сильной зависимости характера процессов в нелинейной ЭМС от начальных условий [12]. Их устойчивость проверена с помощью кругового критерия абсолютной устойчивости. Выявлены различия во влиянии регуляторов и наблюдателей разных типов на границы абсолютной устойчивости [12, 20]. Установлено, что применение линейных стационарных наблюдателей ухудшает соотношение границ абсолютной устойчивости с границами устойчивости в малом. Улучшать качество наблюдения при существенно нелинейной характеристике трения рекомендовано путем применения нелинейных наблюдателей для полиномиальных систем [12], синтезируемых средствами пакета программ Nonlinear System Toolbox (автор A.J. Kremer). При синтезе линейной части таких наблюдателей можно использовать перечисленные выше результаты, полученные для линейных наблюдателей. Влияние эффектов дискретизации по времени и квантования по уровню при цифровой реализации наблюдателей изучено путем моделирования систем управления средствами пакета Matlab и макетирования на базе восьмиразрядных микропроцессоров [16].

Методы построения цифрового наблюдающего устройства для непрерывного объекта могут базироваться либо на дискретизации полученного ранее непрерывного наблюдателя, либо на синтезе дискретного наблюдателя для заранее дискретизированного непрерывного объекта. Проведенное моделирование исходной непрерывной системы с непрерывными и цифровыми наблюдателями показало, что имеются значительные отличия между непрерывными и дискретными наблюдаемыми переменными состояния [15], хотя величина периода квантования была выбрана корректно – в результате общепринятой оценки полосы пропускания замкнутого непрерывного наблюдателя. И лишь в результате существенного уменьшения периода квантования (на порядок и более) переменные состояния дискретного и непрерывного наблюдателя оказались близки с точностью до $5\div 10\%$ по амплитуде в начале переходного процесса. Из результатов моделирования следует вывод, что на качество наблюдения цифрового наблюдателя оказывает влияние его подключение к непрерывному объекту. Установлены причины возникновения описанного эффекта, в частности, нарушение теоремы о разделении, и предложен способ его компенсации [15]. Способ основан на отдельной реализации и дискретизации передаточных функций наблюдателя для его входов управления и коррекции.

В случаях, когда для повышения производительности или точности управления существенно увеличивается быстродействие электропривода простой двухмассовой модели для описания свойств объекта зачастую оказывается недостаточно. Ряд не учтенных в ней свойств объекта начинает оказывать существенное влияние на процессы управления. К таким свойствам относятся, в частности, волновые процессы в упругодеформируемых валах. Для устранения их негативного влияния на динамику процессов в системе с регулятором состояния следует расширить пространство состояний модели объекта и синтезировать регулятор и наблюдатель не для двухмассовой системы, а для N -массовой, с количеством переменных состояния $2N$. Техника построения наблюдателей при решении таких задач может быть различной. В зависимости от приемов аппроксимации характеристик объекта построенные наблюдатели будут отличаться структурой, удобством настройки, размерностью и обладать рядом других особенностей. Простейший прием получения расширенной модели объекта – это представление его N -мерной цепочкой осцилляторов [14]. Такой подход, сохраняющий в наблюдателе структуру и базовые переменные состояния объекта, позволил учесть не только волновые процессы в валу, но и особенности его геометрии в продольном осевом сечении, не требуя измерения упругого момента или скорости вала в качестве корректирующего сигнала наблюдателя. Полученный наблюдатель прост в наладке, поскольку физичен. Недостатком этого метода является то, что порядок наблюдателя получается достаточно высоким. Возможны и другие подходы к выбору модели, лежащей в основе наблюдателя. Их сравнение также дано в [14]. Но даже относительно простой наблюдатель, не учитывающий многие существенные особенности динамики сложного объекта наблюдения, может оказаться вполне работоспособным, по крайней мере, в определенном диапазоне быстродействия [21, 22]. В итоге адекватность теоретических положений условиям практики была признана удовлетворительной, хотя и нуждающейся в дальнейших исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клепиков В.Б., Котляров В.О., Осичев А.В. Об использовании наблюдателей для обеспечения устойчивости электромеханических систем с нелинейной характеристикой трения // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. - Харьков: Основа, 1996. С. 118-119;
2. Клепиков В.Б., Котляров В.О., Марков В.С. О выборе модели трения при исследовании электромеханических систем с нелинейной характеристикой трения // Информационные технологии: наука, техника, ...: Материалы междунаучно-техн. конф. Часть 3.-Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ,МУ,МТУ, 1997. С. 104-106;

3. Котляров В.О. О наблюдаемости двухмассовой электромеханической системы // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. - Харьков: Основа, 1997, С. 99;
4. Осичев А.В., Котляров В.О., Марков В.С. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. - Харьков: Основа, 1997. С. 104-109;
5. Котляров В.О. Метод размещения полюсов стационарного асимптотического наблюдающего устройства // Информационные технологии: наука, техника, технология ...: Материалы междунаучно-техн. конф. Часть 3. - Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ, 1997, С. 117-119;
6. Котляров В.О. Об уменьшении ошибок оценивания координат электромеханической системы с отрицательным вязким трением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. - Харьков: Основа, 1997, С. 102-103;
7. Осичев А.В., Котляров В.О., Камаль Наджи. Синтез асимптотического наблюдателя с задаваемым распределением полюсов для электромеханической системы с упругой связью и нагрузкой типа вязкого трения // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: [Труды конференции]. - Харьков, 1997, С. 92-96;
8. Клепиков В.Б., Котляров В.О., Осичев А.В. Синтез инвариантных наблюдателей состояния двухмассовой электромеханической системы // Информационные технологии: наука, техника...: Сборник научных трудов ХГПУ. Часть 2. - Харьков: ХГПУ, 1998, С. 276-279;
9. Клепиков В.Б., Котляров В.О., Осичев А.В. О влиянии наблюдающих устройств на устойчивость замкнутой электромеханической системы с отрицательным вязким трением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. - Харьков: ХГПУ, 1998, С. 59-62;
10. Котляров В.О. Синтез наблюдателей для электромеханической системы с отрицательным вязким трением средствами программ символьных вычислений // Вестник ХГПУ, Выпуск 27, 1998, С. 40-44;
11. Котляров В.О., Осичев А.В. О величине коэффициентов наблюдателей состояния двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Спец. выпуск. - Харьков: ХГПУ, 1998, С. 63-64;
12. Котляров В.О., Осичев А.В. Применение программно реализованных современных методов синтеза как средства решения инженерных задач в электроприводе // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 61. Харків, ХДПУ, 1999, С. 33-38;
13. Котляров В.О. Автоматизация разработки наблюдающих устройств для электромеханических систем. Построение прототипа экспертной системы // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 113. - Харків, ХДПУ, 2000, С. 142-145;
14. Осичев А.В. Об учете волновых процессов в кинематической цепи при синтезе регуляторов состояния двухмассовой модели ЭМС // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 113. - Харків, ХДПУ, 2000, С.34-40;
15. Осичев А.В. О синтезе непрерывного редуцированного наблюдателя для двухмассовой электромеханической системы и цифрового наблюдателя полного порядка для непрерывного объекта // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 113. - Харків, ХДПУ, 2000, С.137-141;
16. Котляров В.О. Погорелов С.В., Осичев А.В., Касторный П.М. Модели объектов наблюдения и управления при проектировании систем электропривода // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. - Харків, НТУ ХПІ, 2001, С.145-151;
17. Котляров В.О. Основанный на правилах синтез наблюдателей для систем с фрикционной нагрузкой // Вісник НТУ «ХПІ». Збірка наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002, №12. - Т. 1, С.138-141;
18. Котляров В.О. Применение наблюдающих устройств для обеспечения устойчивости систем с отрицательным вязким трением // Вісник Вісник НТУ «ХПІ». - Харків: НТУ "ХПІ", 2004, №43, С. 73-76;
19. Котляров В.О. Применение метода линейных матричных неравенств для синтеза робастных систем с отрицательным вязким трением // Вісник Вісник НТУ «ХПІ». - Харків: НТУ "ХПІ", 2004, №43, С. 95-97;
20. Котляров В.О. О сочетании критериев робастности и абсолютной устойчивости при синтезе систем с отрицательным вязким трением // Вісник Вісник НТУ «ХПІ». - Харків: НТУ "ХПІ", 2005, №45, С. 193-195;
21. Osichev A.V., Korolyova O.V. On design of traveling overhead crane 3-dimensional model with anti-swing control system and its dynamics analysis.// Респ. міжвід. наук.-техн. зб. «Електромашинобудування та електрообладнання». -Київ: «Техніка», - 2006. Вип. № 66. - С. 141-142.
22. Осичев А.В., Королева О.В. Сравнительная оценка лимитирующих факторов предельно допустимого быстродействия электроприводов механизмов перемещения мостового крана с регуляторами состояния // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного университета (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»/Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. -С. 136-140.
23. Котляров В.О. Методика определения областей эффективной стабилизации электромеханических систем с отрицательным вязким трением // Вісник НТУ «ХПІ». - Харків: НТУ «ХПІ», 2008, № 30, С. 204-206.