

Разработка benchmark-модели перевернутого маятника для исследования отказоустойчивых систем управления в среде AnyLogic

Ю. А. Кораблев¹, Д. М. Лосева²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹juri.korablev@gmail.com, ²ldm169@yandex.ru

Аннотация. В докладе рассматривается разработка в среде AnyLogic benchmark-модели инверсного маятника под управлением модуля, основанного на методе синергетического управления, и на этой основе принципы построения мультиагентной отказоустойчивой системы управления.

Ключевые слова: отказоустойчивая система управления; отказ; неисправность; инверсный маятник; аналитическая избыточность; мультиагентный подход; benchmark-модель; обнаружение; локализация и идентификация отказов

I. BENCHMARK-МОДЕЛЬ ПЕРЕВЕРнуТОГО МАЯТНИКА

Выбранный в качестве benchmark-модели инверсный маятник обладает сложным нелинейным поведением – двухмассовая модель в определенной мере отражает множество реальных механических систем. Это значит, что модель наилучшим образом подходит для апробирования на ней разрабатываемых методов обеспечения отказоустойчивости. В рамках данной benchmark-модели будут рассмотрены такие отказы, как:

- отказ датчиков: датчики положения каретки, ее скорости и угла наклона маятника;
- отказ исполнительных механизмов: несоответствия теоретического управляющего воздействия со значением реального;
- отказ, вызванный выходом системы за допустимую зону перемещения.

Внешний вид инверсного маятника представлен на рис. 1. Инверсный маятник состоит из каретки и маятника, закрепленного посередине на шарнирном механизме, ось которого перпендикулярна направлению движения. На каретке установлен двигатель, который приводит ее в движение через колесо меньшего диаметра. Вал колеса большего диаметра связан с потенциометром, откалиброванный который можно получить значение перемещения тележки. Для получения значения угла отклонения от нормали маятника используется второй потенциометр, связанный с опором маятника на каретке.

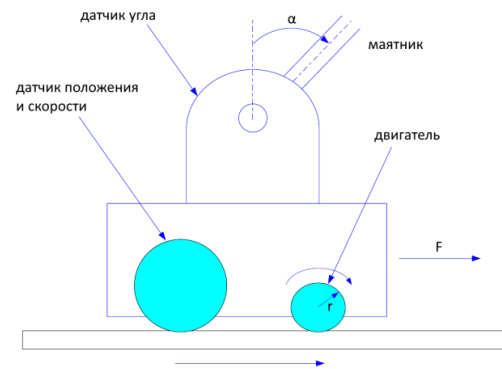


Рис. 1. Перевернутый маятник на каретке

Модель инверсного маятника достаточно популярна в литературе и имеет различные вариации схем системы и методов выравнивания. В данной работе использована стандартная двухмассовая схема: имеется жесткий стержень длиной L массой m , распределенной равномерно по стержню. Модель изображена на рис. 2. Сила F , действующая от каретки на маятник, всегда будет направлена вдоль оси маятника.

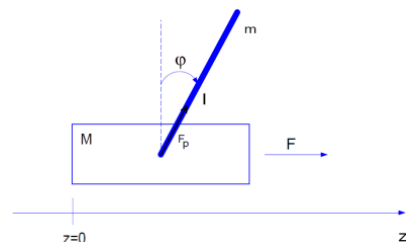


Рис. 2. Упрощенная модель перевернутого маятника

На рис. 2 приняты следующие обозначения параметров и переменных:

- m – масса маятника, кг;
- M – масса каретки, кг;
- L – длина маятника, м;

- Φ – угол отклонения маятника, рад;
- z – положение каретки, м;
- F – сила, действующая на каретку, Н (кг*м/сек²);
- F_p – сила действия каретки на маятник.

Из анализа сил и перемещений можно сформировать нелинейную математическую модель системы:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= x_4; \\ \dot{x}_3(t) &= u; \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{g}{L'} \sin x_2 - \frac{1}{L'} \cos x_2 \cdot u.\end{aligned}$$

где $x_1 = s$ – горизонтальное перемещение каретки; $x_2 = \varphi$ – угловое отклонение маятника от вертикального положения; x_3, x_4 – производные от $s(t)$ и $\varphi(t)$ соответственно; m, L – масса маятника и расстояние между осью и центром тяжести соответственно; J – момент инерции относительно центра тяжести; M – масса каретки; L' – эффективная длина маятника.

Для того чтобы сформировать закон управления кареткой в режиме средних и малых отклонений маятника, необходимо решить задачу синергетического управления [1] для модели «маятник на каретке». В результате применения метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) получаем

$$u = \frac{1}{M + m - \frac{mL \cos^2 x_2}{L'}} \left(\mu - D_3 x_3 - \frac{mLg \sin(2x_2)}{2L'} + mLx_4^2 \sin x_2 \right).$$

Приведенные выше уравнения определяют модель инверсного маятника с управляемой кареткой. Из этих уравнений следует, что одно и то же управление $u(t)$ и, следовательно, $\varphi(t)$, приложено к разным каналам, разделенным динамическими звеньями. В линейной теории это приводит к проблеме минимально-фазовости, что ограничивает управляемость системы. Именно это свойство могло стать причиной многолетних недостаточно успешных попыток решить задачу синтеза эффективных законов управления верхним положением маятника путем воздействия на положение каретки.

Для того чтобы разрабатываемая benchmark-модель отвечала требованиям исследования задач отказоустойчивого управления, необходимо учесть возможность внедрения в модель симуляции различных отказов с ответной реакцией системы на них. Ввиду сложного поведения инверсного маятника, не все отказы реального объекта могут быть отражены сразу в имитационной модели.

Наиболее очевидными являются отказы, связанные с объектом моделирования в окружающей среде – в процессе анализа модели определяется нормальное состояние системы, а также состояния отказов, когда стабильность работы системы снижается. Для обратного маятника такими отказами являются:

- отказ датчика угла (ошибка калибровки потенциометра, отвечающего за показания угла наклона маятника от вертикали);
- ошибка датчика положения и скорости (некорректные показания перемещения или полный отказ датчика скорости);
- выход каретки за пределы разрешенной зоны (в реальном инверсном маятнике пределы перемещений ограничены, и, как следствие, возникает возможность выхода каретки за ограничительные рамки);
- ошибка исполнительного механизма (электродвигатель перестает воздействовать на тележку с расчетным теоретическим воздействием, система становится неустойчивой).

Менее очевидными являются отказы, появляющиеся вследствие взаимодействия реальной системы с окружающей средой:

- отказы, появляющиеся при постоянном или периодическом воздействии окружающей среды на маятник (действие ветра, магнитного поля на маятник; помехи в электронике вследствие электромагнитного влияния);
- краткосрочное влияние (отказы, возникающие при резком скачке какого-либо параметра системы, которые могут приводить к не всегда предсказуемому поведению всей рассматриваемой системы).

Поскольку для задачи проекта важен подход построения системы на базе мультиагентного подхода, число отказов, которые рассматриваются в модели, ограничивается, ввиду простой масштабируемости системы.

II. МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД В СИСТЕМАХ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Мультиагентная система отказоустойчивого управления – это система, состоящая из нескольких взаимодействующих агентов. В данной работе используется схема системы диагностики, где для отработки каждого отказа имеется по два агента. Диагностирующий агент, ориентированный на опознание непосредственно привязанного к нему отказа, ищет симптомы отказа путем обработки данных с доступных ему датчиков и использования известных ему параметров системы. При обнаружении отказа, он обращается к корректирующему агенту, который, получив результаты диагностики, принимает решение о компенсации отказа. Представленная схема изображена на рис. 3.

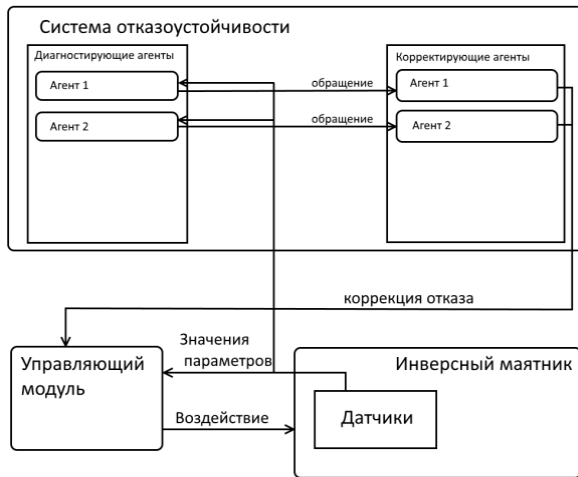


Рис. 3. Структурная схема разделения функций агентов

Для мультиагентного моделирования отказоустойчивой системы управления требуется реализовать базовое поведение агентов. В работе используются структуры диагностирующих и корректирующих агентов, приведенные на рис. 4 и 5:

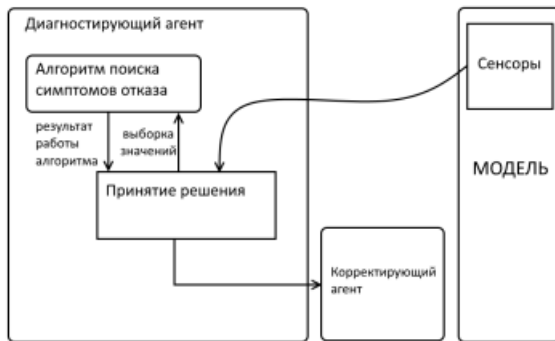


Рис. 4. Структура диагностирующего агента.

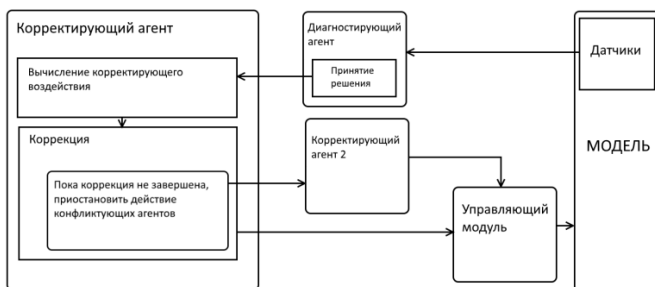


Рис. 5. Структура корректирующего агента

III. РЕАЛИЗАЦИЯ BENCHMARK-МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANYLOGIC

AnyLogic – программное обеспечение для имитационного моделирования, разработанное российской компанией The AnyLogic Company (бывшая «Экс Джей Текнолоджис», англ. XJ Technologies). Среда обладает современным интерфейсом и использует язык Java для разработки моделей. AnyLogic – единственный инструмент, поддерживающий сразу все виды моделей сразу: дискретно-событийный (процессно-

ориентированный), системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию [2]. Это позволяет свободно выбирать метод, подходящий для проекта и не испытывать искусственные ограничения инструментальной среды. Как результат – модели в данной среде строятся не только быстрее и легче, но и легче понимаются людьми, которые не сталкивались с имитационным моделированием.

Общий вид математической модели инверсного маятника, реализованного в инструментальной среде AnyLogic представлен на рис. 6.

Модель состоит из следующих основных элементов:

- x_1, x_2, x_3, x_4 – дифференциальные уравнения системы;
- u – синтезированный закон управления;
- $sSensor, speedSensor, alphaSensor$ – переменные, симулирующие показания датчиков;
- $m, M, l, g, muSredy, KmStat, Kg, r, R$ – физические параметры системы;
- $T1, T2, k1, k2, paramAlpha$ – параметры управляющего закона.

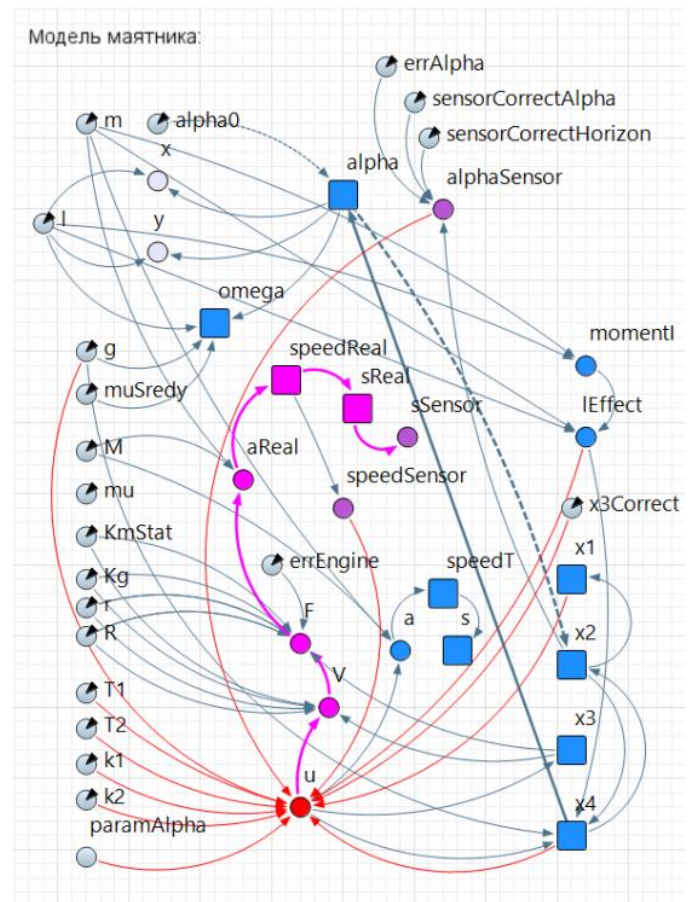


Рис. 6. Математическая модель инверсного маятника

В системе реализовано 3 вида диагностических агента:

- controlAlpha – агент, диагностирующий отказы, связанные с положением маятника относительно вертикали;
- controlHorizon – агент, отвечающий за контроль положения каретки на рейке с целью недопущения выхода системы за ее пределы;
- controlEngine – агент, который следит за соответствием расчетного воздействия с реальным, оказываемым на каретку электродвигателем.

В системе реализовано 2 вида корректирующих агента:

- correctAlpha – агент, корректирующий показания датчика угла отклонения маятника;
- correctHorizon – агент, корректирующий положение каретки при достижении опасной близости к концам рейки.

Построенная структура агентов [3] позволяет удерживать инверсный маятник в приближенном состоянии равновесия и следить за всеми отказами одновременно.

Проведем тест системы на примере коррекции ошибки датчика угла, ошибочно откалибровав его на +10 градусов (рис. 7):

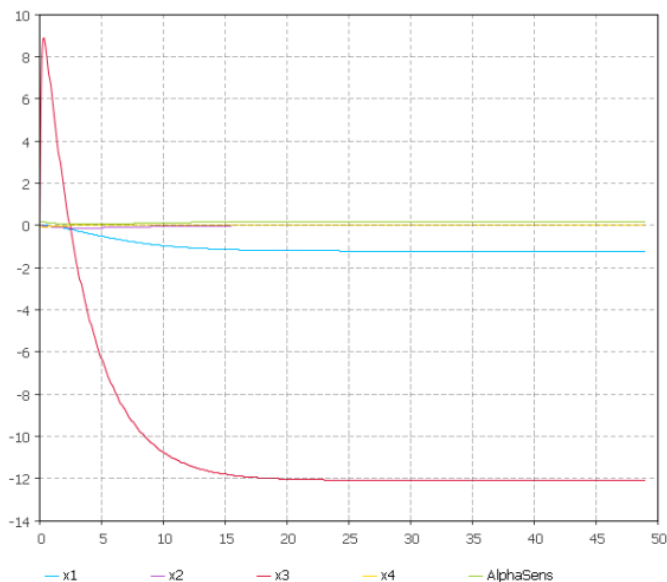


Рис. 7. Поведение системы при неоткалиброванном датчике угла

Как видно из графиков, система маятника не может прийти к устойчивому положению и требует коррекции. Управляющий модуль, получающий неправильное

значение угла, вынуждает каретку компенсировать отклонение.

Активируем агента controlAlpha и протестируем отработку отказа (рис. 8):

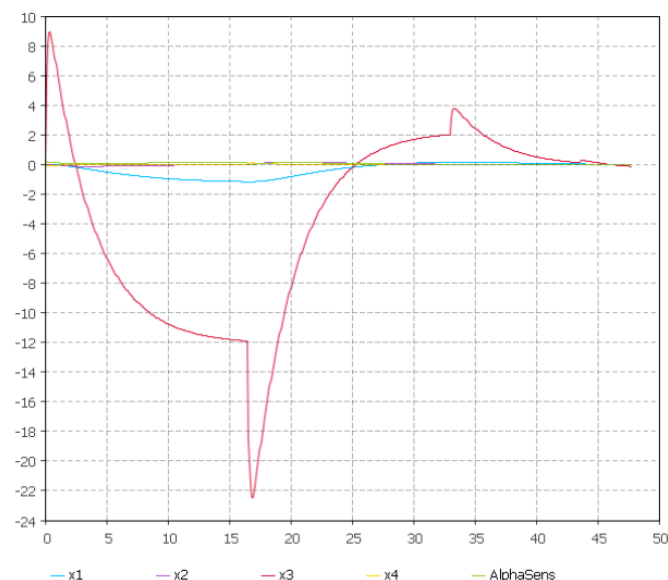


Рис. 8. Поведение подсистемы маятника при коррекции отказа

Диагностирующий агент два раза скорректировал калибровку датчика угла: сначала на значение -11.751 градусов, затем на значение -9.928. Точность опознанной ошибки и возвращение маятника в состояние, близкое к идеальному, доказывает эффективность отработки неисправности агентами.

После анализа поведений агентов controlAlpha и correctAlpha, можно сделать заключение о том, что данными агентами могут обрабатываться такие внешние воздействия, как стабильный небольшой боковой ветер или магнитное воздействие, стабильно отклоняющее маятник на небольшой угол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Колесников Ал.А., Кондратьев И.В., Синергетическое управление механической системой «Перевернутый маятник на тележке»: Линейное преобразование координат, 2011. 13 с.
- [2] Мезенцев К.Н. «Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1», 2011. 108 с.
- [3] Rozalia Lakner, Erzsebet Nemeth; Katalin M. Hangos, and Ian T. Cameron, Multiagent realization of prediction-based diagnosis and loss prevention, 2006. 11с.