

М.М. Татур, Ц. Чэнь  
**УНИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТОРМОЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

---

*Татур М.М., Чэнь Ц.* Унификация средств инженерной поддержки на примере модельно-ориентированного проектирования системы управления торможением мобильной платформы.

**Аннотация.** В работе представлена модель и результаты моделирования торможения мобильной платформы для использования в качестве инструментального средства при разработке и отладке алгоритмов интеллектуального управления торможением мобильных роботов. В ходе исследования формализована математическая модель динамики торможения платформы и представлена в виде трех составляющих: модель объекта управления и внешней среды, модель движения и алгоритма управления торможением. Посредством настроек модель эмулирует различные параметры и состояния, как объекта управления, так и внешней среды, связывает ключевые параметры движения: расстояние до препятствия, скорость платформы и степень активации системы торможения. В целом модель представляет собой унифицированный цифровой двойник системы торможения колесной платформы, который, посредством настроек, может быть приближен к реальным техническим характеристикам и условиям эксплуатации, позволяя тестировать алгоритмы управления в условиях отсутствия априорной информации об объекте управления и внешней среде. Для демонстрации возможностей инструментального средства использован алгоритм нечеткого контроллера с различными вариантами настроек функций принадлежности и правил продукций. Результаты моделирования позволяют осуществлять сравнительный качественный анализ плавности и рисков процесса торможения, количественный анализ алгоритмов управления, выявлять уровень устойчивости алгоритмов к различным условиям внешней среды и техническим ограничениям объекта моделирования. Разработанный аппарат модельно-ориентированного проектирования алгоритмов управления торможением позволяет повысить эффективность разработки и первичной валидации алгоритмов в условиях отсутствия конкретных количественных зависимостей параметров в области исследования, сокращая потребность в дорогостоящих натурных испытаниях на ранних этапах разработки.

**Ключевые слова:** мобильная платформа, параметры движения, управление торможением, интеллектуальное управление, нечеткий контроллер, моделирование систем управления.

---

**1. Введение.** Традиционный подход к разработке алгоритмов управления сложными динамическими системами начинается со всестороннего, максимально детализированного исследования объекта управления и условий внешней среды. Исходя из полученных сведений, составляются требования к системе управления и разрабатываются алгоритмы управления. Затем алгоритмы моделируются и дорабатываются с учетом результатов моделирования. Такой этап верхнего уровня разработки называют

модельно-ориентированным проектированием (МОП), за которым следуют этапы более низких уровней, таких как разработка аппаратного и программного обеспечения, разработка конструкторской и технологической документации. Не подлежит сомнению, что подход МОП позволяет на ранних стадиях разработки исследовать (апробировать) концепцию, функциональную, математическую и алгоритмическую часть будущего изделия, тем самым избежать или исправить возможные фатальные ошибки проектирования, которые могли бы свести на нет все этапы разработки нижних уровней. Поэтому, правомерно считать, что МОП позволяет сократить суммарное время и стоимость проектирования, повысить качество создаваемых изделий: «...Так, при отработке аппаратуры на стадии изготовления опытного образца и проведения стыковочных работ обнаружаются значительные временные ресурсы, связанные с обнаружением ошибок ... введенных в аппаратную часть изделия. Как правило, эта работа осуществляется вручную, поиск ошибок (*проектирования авт.*) может длиться весьма значительное время. Не редки случаи, когда ошибки обнаруживаются только в процессе натурных испытаний, когда исправить уже ничего нельзя» [1]. В этой связи, приведем V-образную модель проектирования, которая стала почти классикой системотехники и применима как для программных, аппаратных, так и программно-аппаратных средств (Рис. 1). Как следует из рисунка, процесс проектирования рассматривается нисходящим, по мере детализации разработки, и – восходящим, по мере тестирования соответствия ожидаемых и полученных результатов, причем число уровней разработки – условно, и в простейшем случае, представлено как «верхний» и «нижний» уровни. При очевидной популярности V-образной модели возникает правомерный вопрос: «Каким образом осуществлять тестирование на верхних уровнях проектирования, если разработка не детализирована, не реализована и не выполнено тестирование нижних уровней»? (На рисунке 1 этот случай отмечен красной стрелкой, причем его нельзя рассматривать как интеграционное тестирование, поскольку «интегрировать, соединять» еще нечего).

В настоящей работе будет продемонстрировано, как V-образная модель может быть дополнена этапом МОП на верхнем (алгоритмическом) уровне разработки на примере задачи автоматического управления торможением.

Разработка эффективных и надежных систем управления движением является критически важной задачей для мобильных роботизированных платформ. В современной парадигме системы

автоматического управления такими платформами рассматриваются как сложные многоуровневые иерархические комплексы, проектирование которых требует строгой стратификации архитектуры [2]. В рамках данной архитектуры ключевой составляющей управления продольной динамикой движения является управление процессом торможения. Плавное и предсказуемое замедление минимизирует износ компонентов тормозной системы, повышает комфорт (если робот взаимодействует с людьми) и обеспечивает остановку в заданной точке без перерегулирования и риска столкновения. Проблема автоматического управления торможением является актуальной для широкого круга транспортных средств, различающихся физическими принципами действия и конструкциями тормозных систем (автомобили с двигателем внутреннего сгорания или электромобили с рекуперацией энергии, железнодорожный [3] или водный транспорт), условиями внешней среды движения (состояние покрытия дороги, влияние сопротивления воздуха или водного течения), кроме того, на торможение платформы оказывают влияние масса, габариты и конструкция платформы, возможные уклоны и повороты, техническое состояние системы торможения и т.д. Наглядным примером применения МОП в задаче разработки алгоритмов торможения являются результаты исследований, представленные в [4].

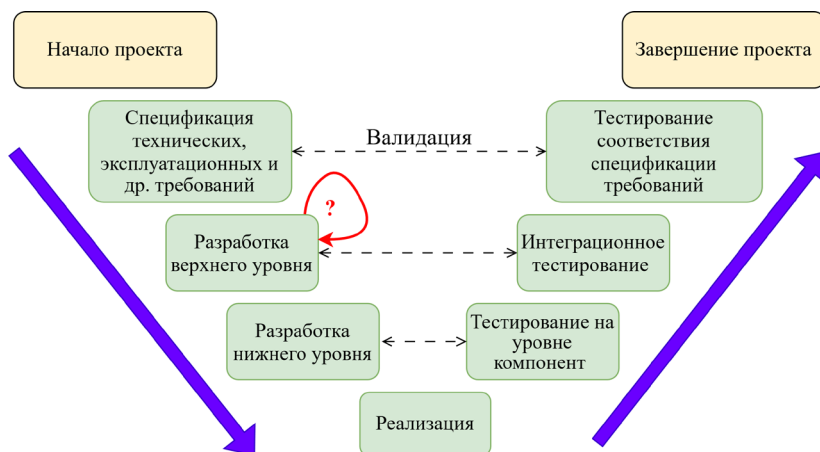


Рис. 1. V-образная модель проектирования и тестирования программно-аппаратных средств

Очень часто алгоритмы и математические модели с реальными параметрами являются конфиденциальной информацией компаний –

производителей, и, как правило, недоступны сторонним разработчикам. Также, при создании инновационных продуктов разработчики сталкиваются с проблемой отсутствия необходимой информационной базы и априорного опыта для МОП. Так, например, алгоритмы автоматического торможения, помимо скорости и расстояния до планируемой остановки, должны учитывать все вышеуказанные условия и физические параметры, которые имеют вполне объяснимые, но сложные взаимосвязности. На начальных этапах проектирования систем управления большинство таких зависимостей неизвестны, и разработчику приходится опираться на собственную интуицию и аналоги, если таковые имеются. Поэтому, возникает необходимость в создании дополнительных специализированных средств разработки и тестирования алгоритмов встроенных систем управления. Такой инструментарий должен позволять разработчику симулировать динамику торможения абстрактной платформы, учитывая возможные параметры (и их взаимосвязи), как объекта управления, так и внешней среды.

**2. Постановка задачи на разработку модели торможения.** Для простоты изложения рассмотрим случай прямолинейного движения колесной платформы [5, 6] (Рис. 2). Пусть платформа движется со скоростью  $v(t)$  и в каждый момент времени  $t$  имеется техническая возможность измерения расстояния до препятствия  $S(t)$ . Торможение осуществляется под действием алгоритма управления торможением, реализующим функцию:

$$F(t) = f(v(t), S(t)), \quad (1)$$

который должен обеспечивать плавную остановку платформы на безопасном расстоянии от препятствия.

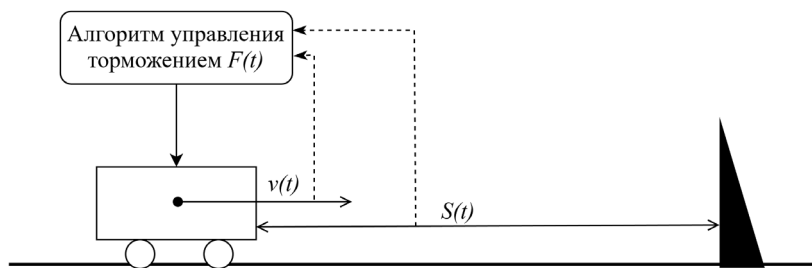


Рис.2. Постановки задачи. Схема движения колесной платформы

Также на затормаживание платформы влияют внутренние и внешние факторы, такие как масса платформы, сцепление колес с поверхностью дороги, уклон, аэродинамическое сопротивление и т.д. На ранних этапах проектирования зависимости параметров движения от этих факторов, как правило, неизвестны и могут учитываться лишь приблизительно. Поскольку проведение полноценных натуральных испытаний связаны с высокой стоимостью и сложностью проведения, использование имитационного моделирования в рамках подхода МОП является наиболее рациональным решением при разработке интеллектуальных систем управления [4]. С учетом сделанных замечаний, общая модель (цифровой двойник) системы управления торможением будет выглядеть, как представлено на рисунке 3.

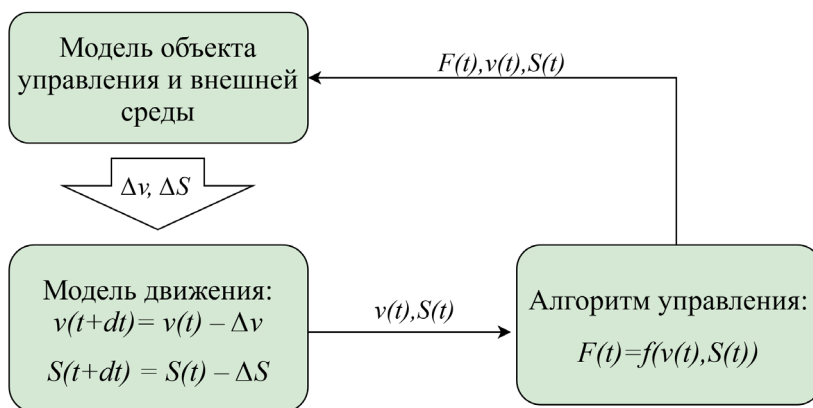


Рис. 3. Общая модель системы управления торможением платформы (цифровой двойник)

В настоящей работе понятие цифрового двойника трактуется в соответствии с ГОСТ Р 57700.37-2021 [6], в котором изложены общие принципы построения компьютерных моделей и оценки их адекватности моделируемым изделиям и явлениям. Согласно данному стандарту, цифровые модели разрабатываются и применяются на всех стадиях жизненного цикла изделия. На ранних этапах модельно-ориентированного проектирования (левая ветвь V-образной модели), когда физический объект еще не существует, предложенная разработка выступает в роли инструментальной цифровой модели именно для этапа верхнеуровневого проектирования. Ее функциональное наполнение определяется исключительно текущими задачами, а полная физическая валидация объективно заменяется

верификацией алгоритмов в виртуальной среде. Дополнительно отметим, что в области мобильной робототехники активно исследуются цифровые двойники [8], в том числе с функциями проверки и валидации поведения автономных платформ в условиях неопределённости [9]. В предлагаемом подходе цифровой двойник представлен в виде трех блоков: «Модель движения», «Алгоритм управления» и «Модель объекта управления и внешней среды». Такой подход является достаточно универсальным при построении систем моделирования и позволяет независимо эмулировать (задавать) как параметры объекта управления, так и условия внешней среды [10]. При моделировании движения текущее расстояние  $S(t + dt)$  не измеряется, а рассчитывается по формуле:

$$S(t + dt) = S(t) - \Delta S = S(t) - v(t)dt, \quad (2)$$

где  $\Delta S$  – расстояние, пройденное платформой со скоростью  $v(t)$  за время  $dt$ .

Аналогично, в модели движения рассчитывается скорость на следующем шаге моделирования  $v(t + dt)$  по формуле:

$$v(t + dt) = v(t) - \Delta v, \quad (3)$$

где  $\Delta v$  – изменение скорости за время  $dt$ .

В настоящей работе предстоит формализовать модель объекта управления и внешней среды и продемонстрировать поведение цифрового двойника в различных версиях алгоритмов управления  $F(t)$ . В качестве тестируемого алгоритма управления в исследовании выбран нечеткий контроллер, который позволяет легко манипулировать внутренними параметрами, влияющими на качество и эффективность управления. В целом, управление должно обеспечивать:

- безопасную остановку до препятствия/цели (при условии  $S(t) > 0$  при  $v(t) = 0$ );
- плавность торможения;
- достижение цели за разумное время без перерегулирования.

### 3. Разработка модели объекта управления и внешней среды.

Будем полагать, что  $F(t)$  – безразмерная величина в диапазоне  $[0,1]$ , пропорциональная силе активации тормозной системы. Тогда, в идеализированном случае, когда влияние факторов объекта управления и внешней среды не учитываются:

$$\Delta v = F(t)a_{max}dt, \quad (4)$$

где  $a_{max}$  – максимально возможное замедление, тогда:

$$v(t + dt) = v(t) - F(t) a_{max}dt, \quad (5)$$

при  $F(t) = 0$ , торможение (замедление) отсутствуют; при  $F(t) = 1$ , обеспечивается максимальное торможение платформы.

Как указывалось выше, на процесс торможения оказывает влияние целый ряд факторов, обусловленных как параметрами самой платформы, так и внешней среды. Далее, будем поочередно формализовать наиболее значимые факторы и пояснять порядок их включения в модель цифрового двойника.

### 3.1. Эмулирование влияния массы на процесс торможения.

Очевидным фактором, влияющим на торможение, ввиду закона инерции, является масса платформы. В простейшем случае если полагать массу платформы постоянной, а зависимость торможения от массы линейной, тогда:

$$\Delta v = k_1 F(t) a_{max} dt, \quad (6)$$

где  $k_1$  – коэффициент в диапазоне  $[0,1]$  обратно пропорционален массе платформы:

- при  $k_1 = 0$ , инерция бесконечна;
- при  $k_1 = 1$ , инерция отсутствует.

**3.2. Эмулирование влияния сцепления колес платформы с дорогой.** Аналогично, очевидным фактором, влияющим на торможение ввиду силы трения, является сцепление колес с поверхностью дороги. Если полагать в простейшем случае, что сила трения – величина постоянная, а зависимость торможения от трения – линейной, тогда:

$$\Delta v = k_2 F(t) a_{max} dt, \quad (7)$$

где  $k_2$  – коэффициент в диапазоне  $[0,1]$  и пропорционален величине сцепления колес с дорогой:

- при  $k_2 = 0$  – сцепление колес с дорогой отсутствует;
- при  $k_2 = 1$  – полное сцепление колес с дорогой.

Например, при моделировании ситуации, когда в момент времени торможения  $t_1$  платформа выезжает на участок скользкой

дороги сцепление с дорогой резко падает (пусть до 0,1), и возобновляется в момент времени  $t_2$ . Такой случай представлен в формуле (8) и иллюстрирован на рисунке 4.

$$k_2 = \begin{cases} 1, & t < t_1 \\ 0.1, & t_1 \leq t \leq t_2. \\ 1, & t > t_2 \end{cases} \quad (8)$$

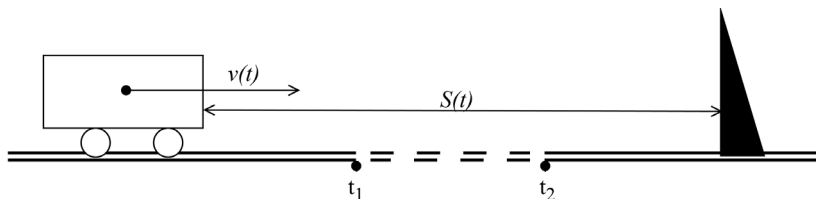


Рис. 4. Схема движения колесной платформы в условиях участка скользкой дороги

При переходе от абстрактного к более реалистичному описанию эффекта сцепления может быть использована зависимость «скольжение-коэффициент сцепления» из эмпирической модели Расејка («Magic Formula»), широко применяемой в транспортной динамике и инженерных пакетах моделирования [11, 12]. Это позволит трактовать коэффициент  $k_2$  не как константу, а как функцию, связывающую скорость и относительное проскальзывание колес при моделировании участков скользкого покрытия.

### 3.3. Эмулирование ограничения активации торможения.

Ярким примером данного фактора является процесс торможения обычного автомобиля, при котором существует объективное ограничение замедления, независимо от силы нажатия на педаль тормоза. Применительно к нашей модели, замедление происходит при активации тормозной системы только в некоторых определенных рамках  $[0, k_{max}]$ ,  $0 < k_{max} < 1$ . Тогда:

$$\Delta v = \begin{cases} F(t)a_{max}dt, & F(t) < k_{max} \\ k_{max}a_{max}dt, & F(t) \geq k_{max} \end{cases} \quad (9)$$

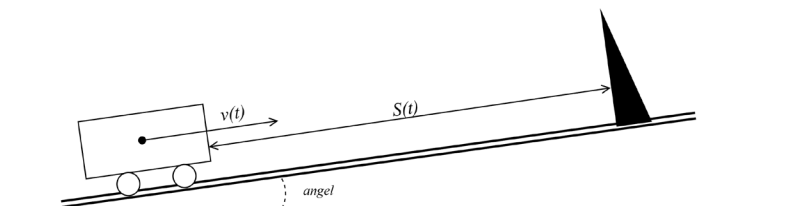
**3.4. Эмулирование уклона дороги.** На платформу, движущуюся под уклоном, действует постоянная внешняя сила, которая, в зависимости от направления уклона (вверх/низ) усиливает либо ослабляет процесс торможения (Рис. 5). Будем полагать, что

безразмерная величина  $F_{hill}$  пропорциональна этой силе и зависит как от угла уклона  $angle$ , так и массы платформы –  $mass$ . Тогда:

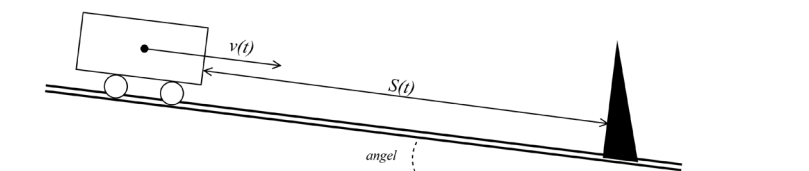
$$\Delta v = (F(t) \pm F_{hill})a_{max}dt, \quad (10)$$

где  $F_{hill} = f_1(angle, mass)$ .

Учёт уклона дороги, изменения нормальной нагрузки и их влияние на торможение детально изложены в классическом учебнике по динамике автомобиля [13]. Данные зависимости, при необходимости, могут быть применены для более реалистичного расчета компоненты  $F_{hill}$  в модели.



а) случай подъема



б) случай спуска

Рис. 5. Схема движения колесной платформы в условиях уклона

**3.5. Эмулирование подвижного препятствия.** Предыдущие условия моделирования объекта управления и внешней среды рассматривались для случая с неподвижным препятствием. В общем случае, препятствие может быть подвижным с различными вариантами движения: по ходу и навстречу движущейся платформе (Рис. 6). Тогда, за модельное время  $dt$  препятствие может сместиться на расстояние  $\Delta S_{ob}$  при постоянной скорости  $v_{ob}$ :

$$S(t + dt) = S(t) - \Delta S \pm \Delta S_{ob}, \quad (11)$$

где  $\Delta S_{ob} = |v_{ob}|dt$ .

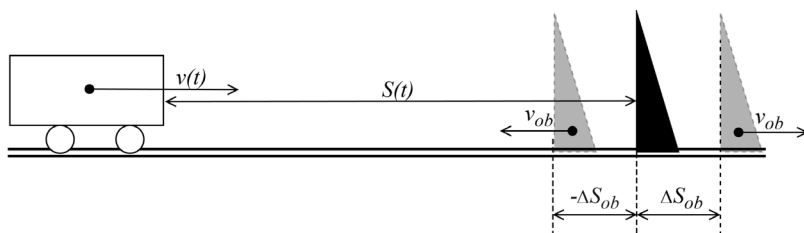


Рис. 6. Схема движения колесной платформы в условиях подвижного препятствия

**3.6. Эмулирование задержки времени срабатывания системы торможения.** Предыдущие условия моделирования объекта управления рассматривались в предположении, что замедление осуществляется мгновенно под действием  $F(t)$ . Однако, все датчики и исполнительные устройства (электронные, и тем более электромеханические) систем управления имеют объективное время срабатывания при отработке управляющих сигналов. Этот временной лаг  $\tau$ , от момента выработки команды  $F(t)$  до отработки в модели движения способен существенно влиять на работу системы. Поэтому, временную задержку  $\tau$ , также необходимо учитывать при моделировании. Подходы к анализу и компенсации запаздываний в транспортных системах управления (включая оценку устойчивости) подробно рассматриваются в работе [14], а для линейно-управляемых тормозных систем (EBS) представлены инженерные методы коррекции давления и повышения быстродействия [15].

**3.7. Общие рекомендации по моделированию объекта управления и внешней среды.** В настоящем разделе изложен один из возможных способов раздельного описания влияния широкой гаммы факторов объекта управления и внешней среды на процесс торможения.

Общая блок-схема алгоритма моделирования этих факторов показана на рисунке 7. Алгоритм начинается с формирования управляющего воздействия  $F(t) = f(v(t), S(t))$ . Далее, пошагово проверяются условия, определяющие влияние различных факторов:

- массы на процесс торможения (коэффициент  $k_1$ );
- потеря сцепления с дорогой (коэффициент  $k_2$ );
- ограничение активации тормозной системы ( $k_{max}$ );
- уклон дороги ( $F_{hill}$ );
- появление подвижного препятствия ( $v_{ob}$ );

– наличие временной задержки в системе ( $\tau$ ).

Наряду с моделированием отдельных факторов, представляет интерес исследование совокупности факторов в комплексе, а также в различных временных сценариях.

В зависимости от каждого условия в модель вносятся корректирующие коэффициенты или дополнительные слагаемые. После этого вычисляется приращение скорости  $\Delta v$ , обновляются значения скорости и расстояния, и проверяется выполнение критериев остановки платформы ( $v(t) \leq 0$  или  $S(t) \leq 0$ ). Процесс моделирования повторяется с дискретным шагом  $dt$  и завершается согласно критериям остановки либо по истечении времени моделирования  $t_{end}$ . Однако, следует внимательно и осмотрительно сочетать предложенные формализмы, чтобы не нарушить адекватность цифрового двойника реальному объекту моделирования. Также это замечание относится к функционалу  $f_1$  (п. 2.4), которые не могут быть раскрыты в общем виде, но могут быть корректно приближены к объекту исследования.

Таким образом, блок-схема наглядно демонстрирует модульный принцип построения модели, при котором каждый фактор внешней среды или объекта может быть принят в расчёт, что обеспечивает гибкость методики и возможность её адаптации под различные сценарии движения.

В настоящем разделе 3 приведены наиболее очевидные, но не все, факторы объекта управления и внешней среды, влияющие на торможение. Так, например, по аналогии можно формализовать факторы, связанные с аэродинамическим сопротивлением, ошибками датчиков, определяющих расстояние до препятствия и текущую скорость платформы и др. При рассмотрении процессов торможения транспортных средств в других сферах (железнодорожный, воздушный, водный, подводный) будут актуальны иные наборы факторов, но принцип формализации модели остается прежним.

Ниже приведены результаты отдельного моделирования рассмотренных факторов на тестовых алгоритмах управления торможением колесной платформы.

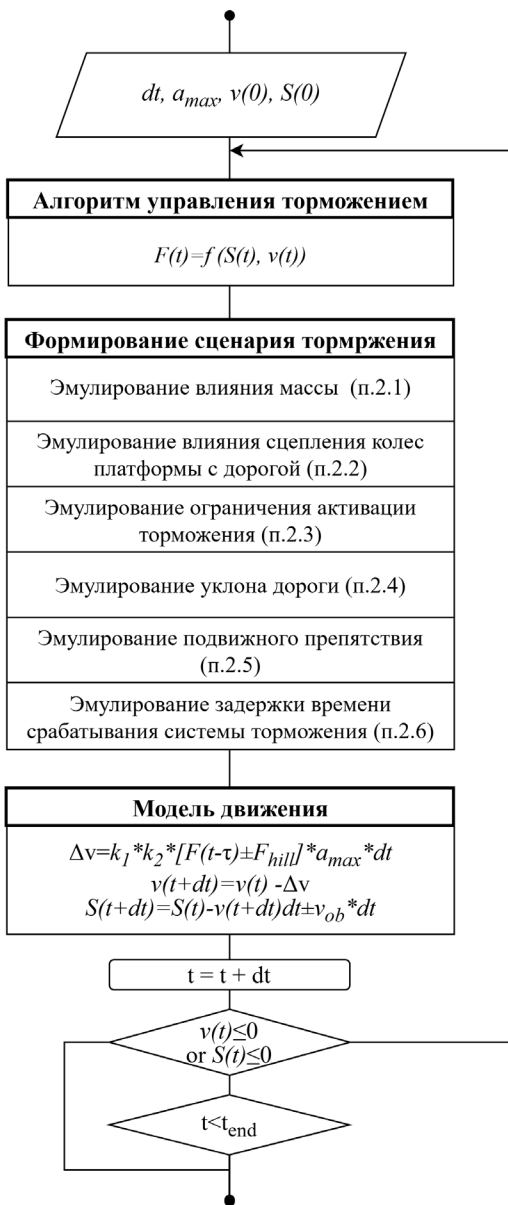


Рис. 7. Общая блок-схема алгоритма моделирования

**4. Моделирование цифрового двойника с использованием нечеткого вывода в качестве алгоритма управления торможением.** Нечёткая логика широко применяется в системах интеллектуального принятия решений и позволяет эффективно управлять динамическими системами при наличии неопределённости параметров модели и неточностей измерений [16 – 19]. В данной работе использовались алгоритмы нечеткого вывода Мамдани для преобразования входных данных  $S(t)$  и  $v(t)$  в параметр  $F(t)$  (1), активирующий систему торможения. Дефаззификация выполнялась методом центра тяжести. Применимость нечеткого управления к задачам торможения подтверждена в ряде примеров: с датчиками расстояния в системах продвинутой помощи водителю (Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)) [20], модифицированные правила вывода Мамдани для задач антиблокировочной системы тормозов (Anti-lock Braking System (ABS)) [21], а также в учебно-прикладных реализациях систем торможения [22]. Применение нечетких регуляторов для управления объектами с неопределенностью и изменяемыми внешними условиями подробно рассмотрено в [23].

Для постановки экспериментов были выбраны два варианта настроек нечеткого контроллера (C1 и C2), отличающиеся параметрами функций принадлежности переменной  $v(t)$  и правилами нечеткого вывода. Параметры треугольных функций принадлежности приведены в таблице 1. Правила нечеткого вывода «Если-ТО» приведены в таблице 2.

Далее приведены результаты моделирования процесса торможения мобильной платформы в различных условиях в соответствии с методологией, изложенной в разделе 2. В качестве исходных данных для моделирования выбраны следующие параметры:

- начальное расстояние до препятствия  $S(0) = 150$  м;
- начальная скорость в вариантах  $v(0) = 15, 20, 25$  м/с;
- максимально возможное замедление  $a_{max} = 5$  м/с<sup>2</sup>;
- шаг моделирования (модельное время)  $dt = 0,1$  с.

Эксперименты проводились для двух версий настроек нечеткого контроллера. Рассчитывались и анализировались временные зависимости  $S(t)$ ,  $v(t)$ ,  $F(t)$ .

Таблица 1. Лингвистические термы вариантов C1 и C2

Code	v(t)			S(t)			F(t)		
	Setting	C1	C2	Setting	C1	C2	Setting	C1	C2
1	Slow	0, 0, 2	0, 0, 5	Near	0, 0, 10		Small	0, 0, 0.1	
2	M-slow	0, 3, 6	0, 5, 10	M-near	5, 10, 40		M-small	0, 0.1, 0.3	
3	Medium	4, 8, 15	5, 10, 15	Medium	10, 40, 90		Medium	0.1, 0.3, 0.5	
4	M-fast	10, 18, 25	10, 15, 25	M-far	40, 90, 140		M-large	0.5, 0.7, 1	
5	Fast	18, 25, 25	15, 25, 25	Far	90, 150, 150		Large	0.7, 1, 1	

Таблице 2. Нечёткие правила для вариантов настроек C1 и C2.

No.	IF v(t)	AND S(t)	THEN F(t)	
	C1, C2	C1, C2	C1	C2
1	1	1	2	1
2	1	2	2	1
3	1	3	2	1
4	1	4	1	1
5	1	5	1	1
6	2	1	4	2
7	2	2	4	2
8	2	3	3	2
9	2	4	2	1
10	2	5	1	1
11	3	1	5	3
12	3	2	5	3
13	3	3	5	3
14	3	4	4	4
15	3	5	2	3
16	4	1	5	4
17	4	2	5	4
18	4	3	5	5
19	4	4	4	4
20	4	5	2	2
21	5	1	5	4
22	5	2	4	4
23	5	3	5	3
24	5	4	3	2
25	5	5	2	1

**4.1. Моделирование движения платформы в идеальных условиях торможения.** В идеальных условиях (без учета влияния факторов объекта управления и внешней среды) процесс торможения платформы определяется исключительно алгоритмом контроллера и предустановленным параметром  $a_{max}$ . Моделирование проводилось с различными вариантами начальной скорости для двух версий настроек алгоритма нечеткого вывода  $F(t) = f(v(t), S(t))$ . Результаты представлены на рисунке 8.

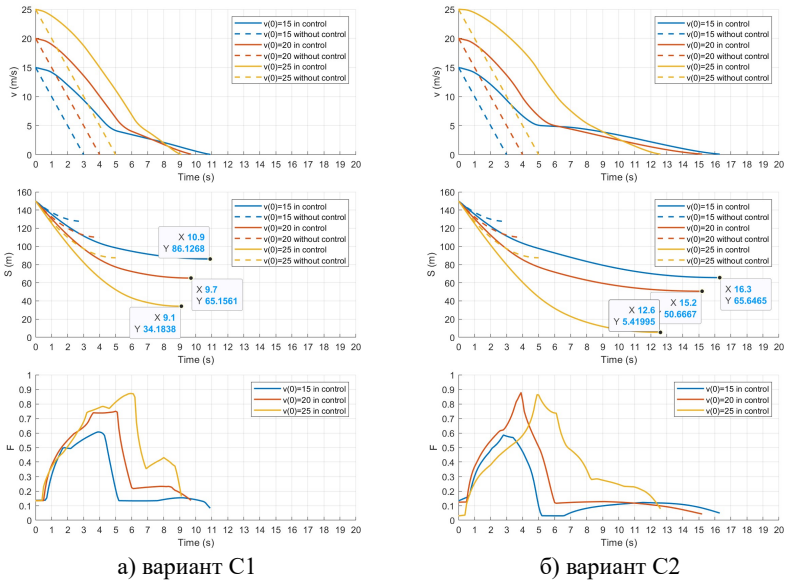
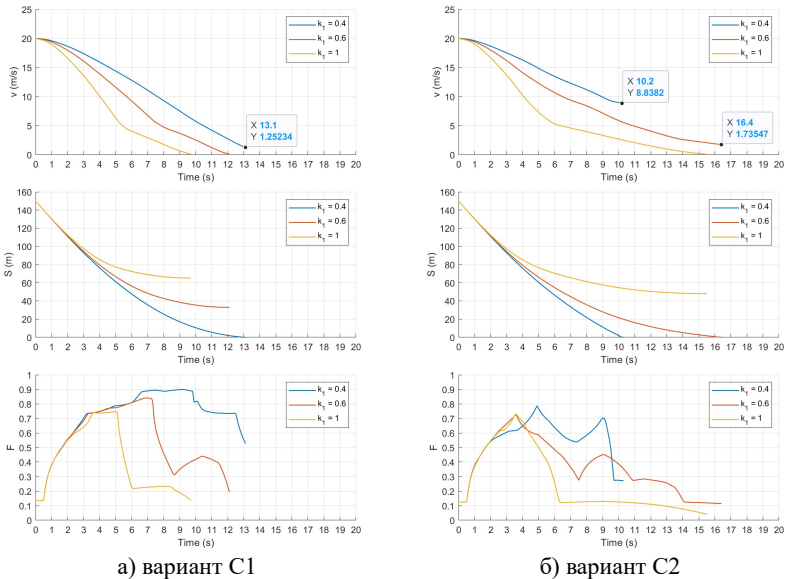


Рис. 8. Результаты моделирования в идеальных условиях

Пунктирной линией для сравнения показан результат торможения платформы, без участия алгоритма управления, при заданном максимально возможном замедлении  $a_{max} = 5$ . Из графиков зависимостей  $S(t)$  и  $v(t)$  видно, что в идеальных условиях оба варианта алгоритма обеспечивают остановку платформы при любых вариантах начальной скорости, при этом процесс торможения – относительно плавный как на начальном, так и на конечном участках. По кривым  $S(t)$  можно судить о расстоянии между остановившейся платформы и препятствием, а значит и о рисках столкновения. По кривым  $F(t)$  можно заметить различия в формировании управляющего сигнала в зависимости от исходных данных.

Далее будем поэтапно усложнять условия торможения путем учета влияния факторов как объекта управления, так и внешней среды.

**4.2. Результаты моделирования влияния массы на процесс торможения.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 20$  м/с. Для анализа влияния массы платформы заданы следующие значения:  $k_1 = 1$  (соответствует идеальным условиям, т.е. без учета массы),  $k_1 = 0.6$  (умеренное влияние массы) и  $k_1 = 0.4$  (значительное влияние массы). Результаты моделирования представлены на рисунке 9.



а) вариант С1  
 б) вариант С2  
 Рис. 9. Результаты моделирования в условиях влияния массы

Из графиков  $F(t)$  видно, что при «увеличении массы» контроллер активирует усиление торможения: возрастает как само значение  $F(t)$ , так и продолжительность его действия. При  $k_1 = 0.6$  контроллер версии С1 обеспечивает остановку платформы, тогда как вариант С2 оказывается неэффективным (столкновение произойдет в момент  $16,4$  с. при скорости  $1,73$  м/с.). При дальнейшем «увеличении влияния массы» ( $k_1 = 0,4$ ) даже контроллер версии С1 не способен обеспечить остановку (столкновение происходит в момент  $13,1$  с. при скорости  $1,25$  м/с.).

Таким образом, модель позволяет исследовать влияние инерции платформы на эффективность алгоритмов управления торможением, тем самым позволяет подбирать подходящие настройки параметров контроллеров, или разрабатывать алгоритмы управления в целом.

**4.3. Результаты моделирования сцепления колес платформы с дорогой на процесс торможения.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 20$  м/с. Полагалось, что на начальном и завершающем этапах торможения платформа имеет полное сцепление с дорогой, т.е.  $k_2 = 1$ . Для моделирования участка пониженного сцепления задавался коэффициент  $k_2 = 0.1$ , применяемый в различных временных

интервалах  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно, 2-4 с и 2-5 с. Результаты моделирования приведены на рисунке 10.

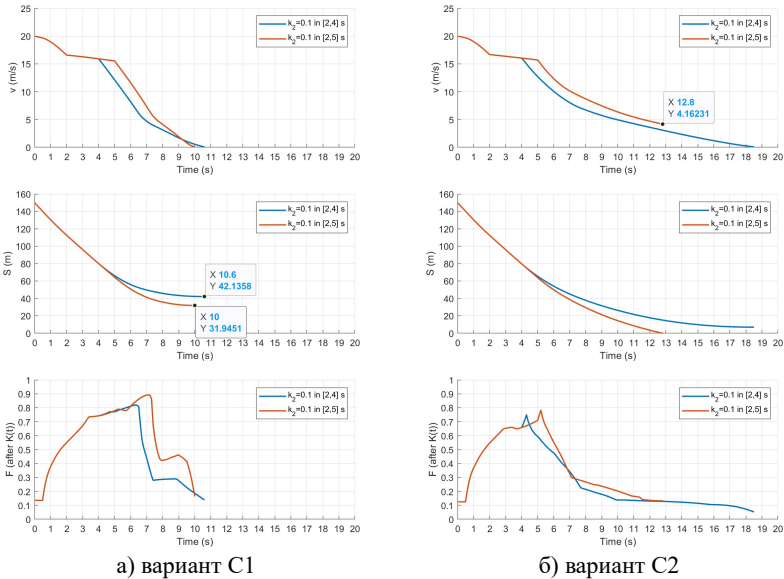


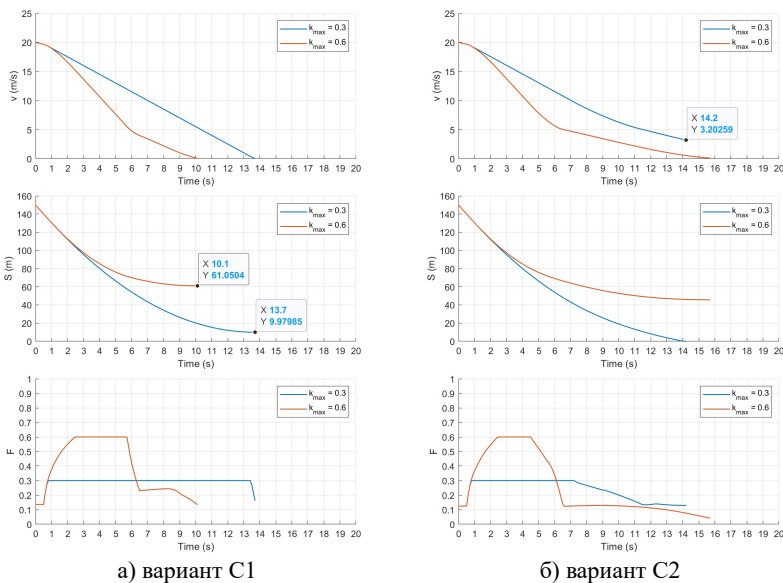
Рис. 10. Результаты моделирования в условиях скользкой дороги

Из графиков  $v(t)$  видно, что в интервалах 2-4с и 2-5с скорость платформы практически не изменяется, что симулирует слабое воздействие тормозной системы на замедление из-за потери сцепления колес платформы с дорогой. После восстановления сцепления алгоритм резко увеличивает выходной параметр  $F(t)$ , стремясь компенсировать потерю времени на эффективное торможение. Сравнивая варианты С1 и С2, можно заметить, что контроллер варианта С1 более успешно обеспечивает торможение в обоих случаях. Контроллер варианта С2 справляется с задачей остановки платформы только при кратковременной потере сцепления (2-4 с), но не обеспечивает остановку при более длительной потере (2-5 с), столкновение произойдет в момент 12.8с при скорости 4.16 м/с).

Таким образом, модель показывает, как уровень сцепления платформы с дорогой влияет на результативность алгоритмов управления торможением, и помогает оценить их устойчивость к факторам как объекта управления, так и внешней среды. (Замечание.

Коэффициент  $k_2$  характеризует факторы, как объекта управления, так и внешней среды в комплексе).

**4.4. Результаты моделирования ограничения активации системы торможения.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 20 \text{ м/с}$ . Для моделирования ограничений максимальной активации системы торможения заданы различные пороги: ( $k_{max} = 0.6$  и  $k_{max} = 0.3$ ). Результаты моделирования приведены на рисунке 11.



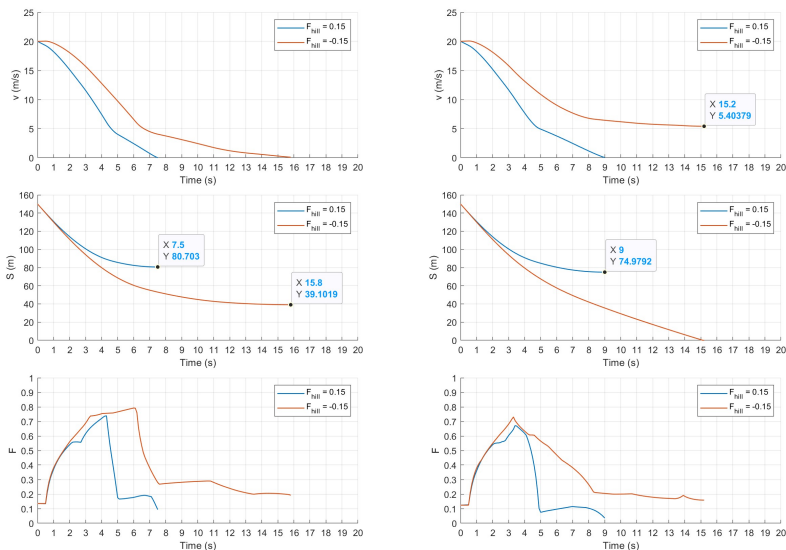
а) вариант С1  
б) вариант С2  
Рис. 11. Результаты моделирования в условии ограничения степени активации системы

Из графиков  $F(t)$  видно, что величина  $k_{max}$  напрямую влияет на процесс торможения. При  $k_{max} = 0.6$  оба контроллера обеспечивают остановку платформы. Однако при  $k_{max} = 0.3$  контроллер варианта С2 не способен выполнить остановку платформы (столкновение произойдет в момент 14,2 с. при скорости 3,2 м/с.).

Модель корректно учитывает «насыщение» исполнительного механизма торможения и позволяет количественно оценить влияние данного ограничения на эффективность алгоритмов – расстояние, точность и время остановки.

**4.5. Результаты моделирования в условия уклона дороги.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 20 \text{ м/с}$ .

При моделировании торможения в условиях уклона дороги, параметр  $F_{hill}$  не рассчитывался как функция угла и массы (см. п.2.4), а был принят «как уже рассчитанный» и константой:  $F_{hill} = 0.15$ . Результаты моделирования представлены на рисунке 12.



а) вариант С1

б) вариант С2

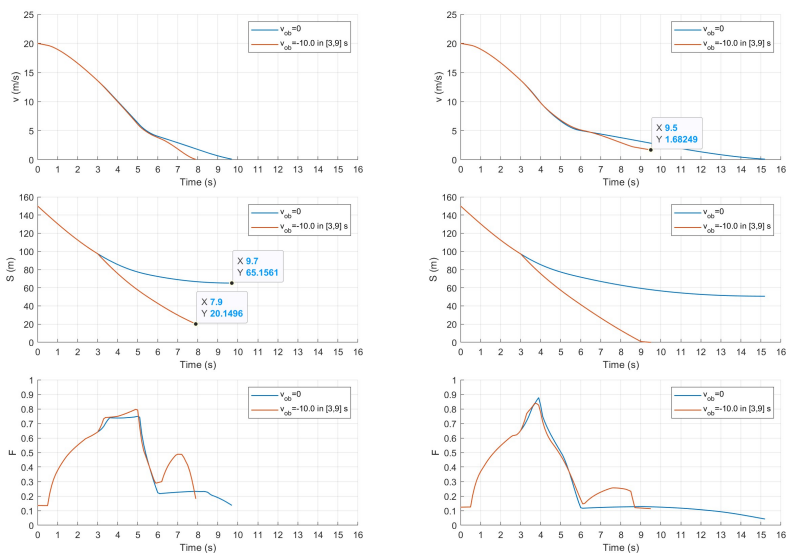
Рис. 12. Результаты в условии уклона дороги

Из графиков  $F(t)$  видно, что при движении платформы на спуске контроллер увеличивает активацию торможения, компенсируя уклон, и соответственно, вычитаемое  $F_{hill}$ . В этих условиях контроллер варианта С1 обеспечивает безопасную остановку, тогда как вариант С2 оказывается недостаточно эффективным (столкновение произойдет в момент 15,2 с. при скорости 5,4 м/с.). В условиях подъема уклон способствует дополнительному замедлению, алгоритм суммирует  $F_{hill}$ , и соответственно снижает значение  $F(t)$ . В этом случае оба контроллера справляются с задачей остановки платформы.

Таким образом, модель демонстрирует адекватный учет внешних факторов (уклоны дороги) и позволяет проектировать сценарии моделирования для различных условий движения.

**4.6. Результаты моделирования в условии подвижного препятствия.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 20$  м/с. В эксперименте моделировалось движение препятствия навстречу

платформе, начиная с момента 3 с в течение 6 с, т.е. в интервал времени 3-9 с. Скорость движения препятствия установлена как  $v_{ob} = 10 \text{ м/с}$ . Для сопоставления результатов моделирования приведен аналогичный результат эксперимента в идеальных условиях из п.3.1, при котором препятствие оставалось неподвижным. Результаты моделирования показаны на рисунке 13.



а) вариант С1

б) вариант С2

Рис. 13. Результаты в условии подвижного препятствия

Из графиков  $S(t)$  видно, что в моменты 3с на кривой появляется выраженный излом, обусловленный началом движения препятствия навстречу платформе, что приводит к ускоренному сокращению дистанции. На графиках  $F(t)$  фиксируется резкое повышение активации торможения в момент 3 с, что свидетельствует о корректном реагировании алгоритма на опасную ситуацию и увеличение тормозного воздействия. Анализ кривых  $v(t)$  показывает, что контроллер варианта С1 успешно останавливает платформу, в то время как контроллер варианта С2 недостаточно компенсирует встречное движение препятствия. При таком условии не достигается полной остановки платформы (момент столкновения: 9,5 с, скорость 1,68 м/с).

Таким образом, модель позволяет эффективно имитировать динамические изменения внешней среды и оценивать способность

алгоритмов к адаптации и оперативному реагированию на непредвиденные ситуации.

**4.7. Результаты моделирования в условии задержки времени срабатывания системы торможения.** Начальная скорость платформы принята  $v(0) = 25\text{ м/с}$ . Моделирование выполнялось для двух заданных значений временной задержки срабатывания тормозной системы:  $\tau = 0.5\text{ с}$  и  $\tau = 1\text{ с}$ . Результаты представлены на рисунке 14.

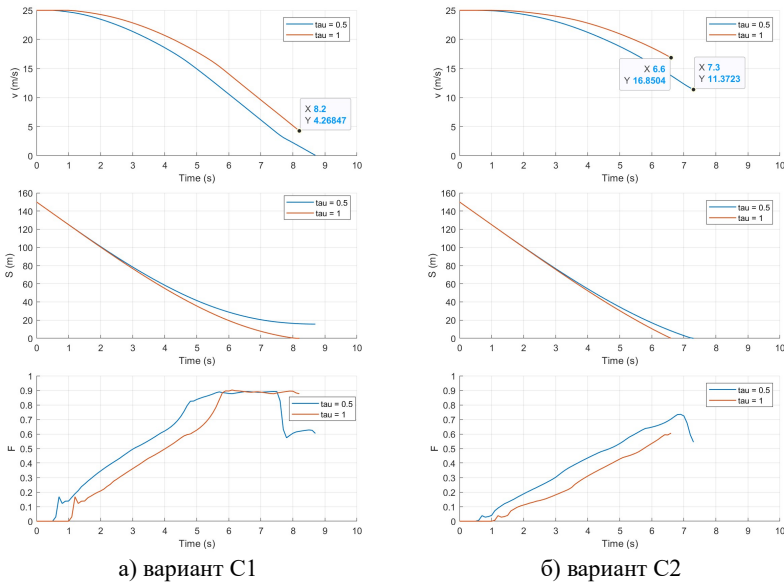


Рис. 14. Результаты в условии задержки времени срабатывания системы

Из графиков  $F(t)$  видно, что задержка приводит к резкому возрастанию и «осцилляциям» параметра активации, особенно на начальной стадии торможения, когда скорость велика, а исполнительный механизм не успевает своевременно реагировать. Эффекта перерегулирования на графиках  $v(t)$  не наблюдается из-за особенности алгоритма нечеткого вывода, в части дефазсификации по центру тяжести. В целом, контроллер варианта С1 обеспечивает остановку платформы при  $\tau = 0.5\text{ с}$ , однако при  $\tau = 1\text{ с}$  также теряет эффективность. Из рисунка 14(б) следует, что контроллер варианта С2 не справляется с задачей в обоих вариантах значений задержки.

Модель адекватно имитирует запаздывание, характерное для реальных систем управления, и позволяет оценить робастность алгоритмов по отношению к временным задержкам. Инструмент выявляет критические значения  $\tau$ , при которых безопасность системы оказывается под угрозой.

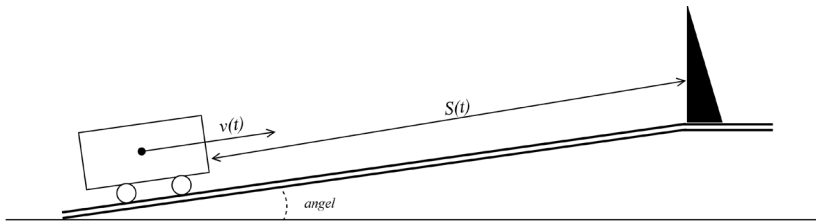
**4.8. Результаты моделирования в условиях комбинации факторов объекта управления и внешней среды.** В предыдущих разделах (п. 3.2-3.7) влияние различных внутренних и внешних факторов на процесс торможения рассматривалось изолированно. Однако в реальных условиях эксплуатации мобильная платформа, как правило, подвергается одновременному воздействию нескольких факторов.

Для демонстрации возможностей разработанной модели по имитации сложных сценариев при совместном воздействии возмущающих факторов рассмотрим комбинацию двух параметров: изменения массы платформы ( $k_1$ ) и влияния уклона дороги ( $F_{hill}$ ). В качестве показательного примера выбраны два сценария движения платформы с начальной скоростью  $v(0) = 20 \text{ м/с}$  (Рис. 15):

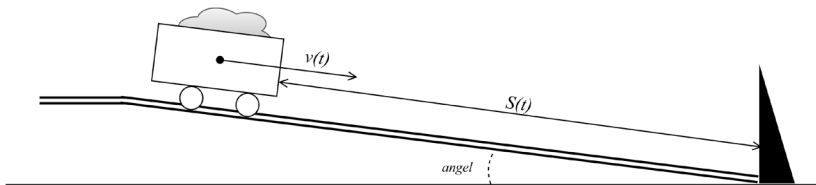
– сценарий А: торможение «пустой» платформы на подъеме. В данном случае инерция платформы относительно мала (зададим коэффициент массы  $k_1 = 0.8$ ), а уклон дороги способствует дополнительному естественному замедлению (согласно п. 3.4 алгоритм суммирует  $F_{hill} = 0.15$ ). Такие условия являются наиболее благоприятными для остановки платформы.

– сценарий Б: торможение «тяжело гружёной» платформы на спуске. Инерция платформы значительна (примем  $k_1 = 0.6$ ), а продольная компонента силы тяжести на спуске существенно противодействует торможению (вычитаемое значение  $F_{hill} = 0.15$ ). Это наиболее неблагоприятный режим, требующий максимальной эффективности алгоритма управления.

Результаты моделирования для обоих сценариев представлены на рисунке 16.

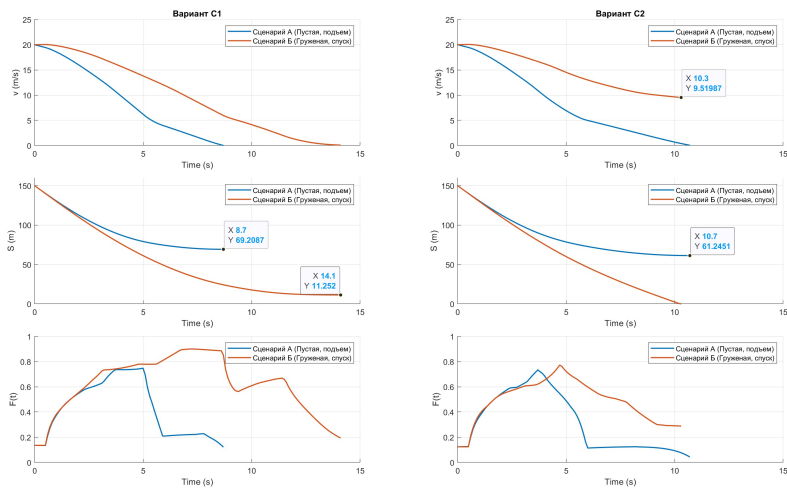


а) сценарий А, пустая на подъеме



б) сценарий Б, груженная на спуске

Рис. 15. Схема движения платформы в условиях комбинации факторов



а) вариант C1

б) вариант C2

Рис. 16. Результаты в условии комбинации факторов

В сценарии А оба контроллера (C1 и C2) успешно выполняют задачу торможения. Это естественно объясняется тем, что сочетание малой массы платформы и движения на подъеме создает благоприятные условия для замедления и позволяет алгоритмам управления обеспечить плавную остановку платформы

за минимальное время. В сценарии Б ситуация существенно усложняется. При движении по спуску инерционные и гравитационные воздействия значительно возрастают, что требует от алгоритма управления быстрой и адаптивной реакции. Контроллер С1 за счет более гибкого регулирования способен обеспечить завершение процесса торможения. На графике  $F(t)$  отчетливо видно, что примерно на 9-й секунде происходит повторное увеличение управляющего воздействия и формируется второй максимум функции  $F(t)$ , что позволяет компенсировать неблагоприятные условия движения. Контроллер С2 в данном сценарии не обеспечивает завершение торможения. В результате происходит столкновение с препятствием (момент столкновения:  $10,3 \text{ с}$ ; скорость платформы:  $9,5 \text{ м/с}$ ).

Вывод по разделу. Полученные результаты подтверждают, что предложенная среда моделирования корректно воспроизводит комбинированное воздействие различных факторов. Это позволяет уже на ранних этапах модельно-ориентированного проектирования (МОП) оценивать робастность разрабатываемых алгоритмов управления в неблагоприятных сценариях без необходимости проведения полного перебора всех возможных комбинаций внешних условий.

**5. Заключение.** В данной работе предложена абстрактная модель торможения, которая может настраиваться (адаптироваться) за счет формальных параметров и тем самым симулировать как внутренние факторы объекта моделирования, так и факторы внешней среды. В целом, предложен цифровой двойник, который предназначен для разработки и верификации алгоритмов управления торможением мобильных платформ на ранних этапах проектирования без необходимости проведения натурных испытаний.

Проведённые эксперименты в различных модельных ситуациях показали, что предустановленные параметры алгоритмов управления существенно влияют на процесс торможения и могут быть скорректированы по результатам моделирования.

В настоящей работе не ставилась и не решалась задача моделирования сложных сценариев торможения, в которых одновременно учитывался ряд факторов, как объекта управления, так и внешней среды, в том числе на неопределенно продолжительном интервале времени движения. (Авторы полагают решение данной задачи тривиальной, с учетом полученных результатов). Также в работе не стояла задача оптимизации алгоритмов управления, т.е. разработки максимально эффективных алгоритмов при заданных критериях.

Разработанная модель представляет собой унифицированное средство инженерной поддержки при модельно-ориентированном

проектировании систем торможения. Она обеспечивает гибкость в постановке экспериментов, ускоряет цикл разработки и может быть развита для поддержки более сложных моделей движения. В частности, базовая расчетная схема в виде материальной точки может быть расширена за счет учета реальных габаритов платформы, поперечной динамики (включая эффекты заноса) и руления, а также за счет дополнительных моделируемых факторов и интеграции с внешними программными средствами моделирования (Gazebo, RViz и др.).

### Литература

1. Деменков Н.П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. №11. С. 66–69.
2. Чикрин Д.Е., Кокунин П.А., Пашин Д.М., Галиуллин И.Г., Тимершин Б.А. Основные принципы построения архитектур информационных систем беспилотных транспортных средств // Известия Самарского научного центра РАН. 2024. Т. 26. №4. С. 131–142.
3. Майоров Б.Г. Применение гармонических полуволн для автоматизации управления высокоскоростными поездами // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. №6. С. 1387–1414.
4. Швец Д.А., Хитриков С.В., Колесникович А.Н., Шмелёв А.В. Применение модельно-ориентированного проектирования при разработке и тестировании интеллектуальных систем автомобиля // Актуальные вопросы машиноведения. 2023. Т. 12. С. 151–156.
5. Татур М.М., Игнатюк Н.С., Конилов А.Д. Методика модельно-ориентированного проектирования алгоритмов управления мобильными роботами // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22. №1. С. 91–99.
6. Ким Т.Ю., Прокопович Г.А., Лобатый А.А. Форсированное управление движением мобильного робота // Информатика. 2022. Т. 19. №3. С. 86–100. DOI: 10.37661/1816-0301-2022-19-3-86-100.
7. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. // М.: Стандартинформ. 2021.
8. Mazumder A., et al. Towards next generation digital twin in robotics: Trends, scopes, challenges, and future // Heliyon. 2023. vol. 9. no. 2. e13359 p.
9. Betzer J.S., Boudjadar J., Frasheri M., Talasila P. Digital Twin Enabled Runtime Verification for Autonomous Mobile Robots under Uncertainty // Proceedings of the 28th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). 2024. pp. 10–17. DOI: 10.1109/DS-RT62209.2024.00012.
10. Лобанов П.Г., Сытник С.А., Шальто А.А. Построение автопилота для упрощенной модели вертолета с помощью генетического алгоритма // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. №8. С. 79–88.
11. Tire-Road Interaction (Magic Formula) // MathWorks. 2025. URL: [https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/tireroadinteractionmagicformula.html#mw\\_f96135f3-6f80-4fb3-ae09-5dea2bf3124f](https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/tireroadinteractionmagicformula.html#mw_f96135f3-6f80-4fb3-ae09-5dea2bf3124f) (дата обращения: 10.01.2026).
12. Kogbara R.B., et al. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements // Construction and Building Materials. 2016. vol. 114. pp. 602–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.
13. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control / 2nd ed // Boston: Springer Science & Business Media. 2012. 498 p.

14. Ji G., et al. Time-delay compensation control and stability analysis of vehicle semi-active suspension systems // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. vol. 228. 112414 p. DOI: 10.1016/j.ymsp.2025.112414.
15. Chen F., et al. Design and Experimental Research on a New Integrated EBS with High Response Speed // *World Electric Vehicle Journal*. 2025. vol. 16. no. 8. 446 p. DOI: 10.3390/wevj16080446.
16. Ayas M.S., Altas I.H., Sahin E. An optimized fuzzy logic controller for a parallel mechanism rehabilitation robot // *Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2015. pp. 1–6. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2015.7338038.
17. Nikshi W.M., Bedillion M.D., Hoover R.C. Parking Control of Mixed Conventional/Braking Actuation Mobile Robots Using Fuzzy Logic Control // *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*. 2016. DOI: 10.1115/IMECE2016-65331.
18. Andani M.T., et al. Fuzzy-Based Sliding Mode Control and Sliding Mode Control of a Spherical Robot // *Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. pp. 2534–2539. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591640.
19. Chen C.-H., et al. Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots // *Mathematical Problems in Engineering*. 2017. pp. 1–12. DOI: 10.1155/2017/8984713.
20. Shaout A., Castaneda-Trejo L. Fuzzy Logic Control for Adaptive Braking Systems in Proximity Sensor Applications // *Electronics*. 2025. vol. 14. no. 14. 2858 p. DOI: 10.3390/electronics14142858.
21. Qasem G.A.A., et al. Enhancing Anti-Lock Braking System Performance Using Fuzzy Logic Control Under Variable Friction Conditions // *Symmetry*. 2025. vol. 17. no. 10. 1692 p. DOI: 10.3390/sym17101692.
22. Rizianiza I., Djafar A. Design car braking system using Mamdani Fuzzy Logic Control // *Proceedings of the 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. 2017. pp. 129–133. DOI: 10.3390/electronics14142858 10.1109/ICEVT.2017.8323547.
23. Zhartybayeva M.G., Tatur M.M., Shaverdo M.M., Isakov K. T. Methods of reducing the computational complexity of fuzzy inference algorithms for implementation on a microcontroller with limited computational resources // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2019. vol. 7. no. 1. pp. 65–78. DOI: 10.32523/2306-6172-2019-7-1-65-78.

**Татур Михаил Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, профессор, кафедра электронных вычислительных машин, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР). Область научных интересов: мобильная робототехника, интеллектуальный анализ данных. Число научных публикаций — 180. tatur@bsuir.by; ул. Платонова, 39, 220013, Минск, Беларусь; п.т.: +375(17)293-8564.

**Чэнь Цзинэ** — аспирант, кафедра электронных вычислительных машин, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР). Область научных интересов: математическое моделирование, мобильные роботы, алгоритмы управления. Число научных публикаций — 5. ts.chen@bsuir.by; ул. Платонова, 39, 220013, Минск, Беларусь; п.т.: +375(29)847-2460.

**Поддержка исследований.** Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований: проект F25П М-021 «Модельно-ориентированное проектирование интеллектуальной системы управления беспилотным транспортным средством», Работа поддержана государственной программой научных исследований: проект «Методология построения цифровых двойников беспилотных мобильных платформ как инструментальных средств проектирования перспективных транспортных средств».

M. TATUR, J. CHEN  
**UNIFICATION OF ENGINEERING SUPPORT TOOLS: A  
CASE STUDY OF MODEL-BASED DESIGN FOR A MOBILE  
PLATFORM BRAKING CONTROL SYSTEM**

---

*Tatur M., Chen J. Unification of Engineering Support Tools: a Case Study of Model-Based Design for a Mobile Platform Braking Control System.*

---

**Abstract.** This paper presents a model and simulation results of the braking process of a mobile platform intended for use as an instrumental tool in the development and tuning of intelligent braking control algorithms for mobile robots. In the course of the study, a mathematical model of the platform braking dynamics is formalized and represented as three components: a model of the control object and the external environment, a motion model, and the braking control algorithm itself. Through parameter tuning, the model emulates various parameters and states of both the control object and the external environment, and links the key motion parameters, namely the distance to an obstacle, the platform velocity, and the degree of activation of the braking system. Overall, the proposed model represents a unified digital twin of the braking system of a wheeled platform that, through parameter adjustment, can be approximated to real technical characteristics and operating conditions, thereby enabling testing of control algorithms under conditions of absence of a priori information about the control object and the external environment. To demonstrate the capabilities of the proposed instrumental tool, a fuzzy controller algorithm with various configurations of membership functions and production rules is employed. The simulation results enable comparative qualitative analysis of braking smoothness and risk, quantitative analysis of control algorithms, and assessment of the robustness of algorithms with respect to different environmental conditions and technical constraints of the modeled object. The developed model-based design framework for braking control algorithms improves the efficiency of algorithm development and primary validation in the absence of explicit quantitative parameter dependencies in the research domain, while reducing the need for costly full-scale experimental testing at early stages of development.

**Keywords:** mobile platform, motion parameters, braking control, intelligent control, fuzzy controller, control system modeling.

---

### References

1. Demenkov N.P. [Model-oriented design of control systems]. Promyshlennyye ASU i kontrollery – Industrial automated control systems and controllers. 2008. no. 11. pp. 66–69. (In Russ.).
2. Chikrin D.E., Kokunin P.A., Pashin D.M., Galiullin I.G., Timershin B.A. [The basic principles of building architectures of information systems of unmanned vehicles]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS. 2024. vol. 26. no. 4. pp. 131–142. (In Russ.).
3. Mayorov B.G. [Application of Harmonic Half-Waves for Automation of High-Speed Trains Control]. Informatika i avtomatizatsiya – Informatics and Automation. 2023. vol. 22. no. 6. pp. 1387–1414. (In Russ.).
4. Shvets D.A., Khitrikov S.V., Kolesnikov A.N., Shmelev A.V. [Application of model-based design in the development and testing of intelligent vehicle systems]. Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya – Current issues of machine science. 2023. vol. 12. pp. 151–156. (In Russ.).

5. Tatur M.M., Ignatyuk N.S., Konikov A.D. [Methodology of model-oriented design of algorithms for controlling mobile robots]. Doklady BGUIR – Reports of the BSUIR. 2024. vol. 22. no. 1. pp. 91–99. (In Russ.).
6. Kim T.Yu., Prokopovich G.A., Lobaty A.A. [Accelerated motion control of a mobile robot]. Informatika – Informatika. 2022. vol. 19. no. 3. pp. 86–100. DOI: 10.37661/1816-0301-2022-19-3-86-100. (In Russ.).
7. GOST R 57700.37-2021. [Kompyuternyye modeli i modelirovaniye. Tsifrovyye dvoyniki izdeliy. Obshchiye polozeniya]. M.: Standartinform. 2021. (In Russ.).
8. Mazumder A., et al. Towards next generation digital twin in robotics: Trends, scopes, challenges, and future // Heliyon. 2023. vol. 9. no. 2. e13359 p.
9. Betzer J.S., Boudjadar J., Frasheri M., Talasila P. Digital Twin Enabled Runtime Verification for Autonomous Mobile Robots under Uncertainty // Proceedings of the 28th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). 2024. pp. 10–17. DOI: 10.1109/DS-RT62209.2024.00012.
10. Lobanov P.G., Sytnik S.A., Shalyto A.A. [Building an autopilot for a simplified helicopter model using a genetic algorithm]. Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2008. no. 8. pp. 79–88. (In Russ.).
11. Tire-Road Interaction (Magic Formula). MathWorks. 2025. Available at: [https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/tireroadinteractionmagicformula.html#mw\\_f96135f3-6f80-4fb3-ae09-5dea2bf3124f](https://www.mathworks.com/help/sdl/ref/tireroadinteractionmagicformula.html#mw_f96135f3-6f80-4fb3-ae09-5dea2bf3124f) (accessed 10.01.2026).
12. Kogbara R.B., et al. A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements // Construction and Building Materials. 2016. vol. 114. pp. 602–617. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002.
13. Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control / 2nd ed // Boston: Springer Science & Business Media. 2012. 498 p.
14. Ji G., et al. Time-delay compensation control and stability analysis of vehicle semi-active suspension systems // Mechanical Systems and Signal Processing. 2025. vol. 228. 112414 p. DOI: 10.1016/j.ymsp.2025.112414.
15. Chen F., et al. Design and Experimental Research on a New Integrated EBS with High Response Speed // World Electric Vehicle Journal. 2025. vol. 16. no. 8. 446 p. DOI: 10.3390/wevj16080446.
16. Ayas M.S., Altas I.H., Sahin E. An optimized fuzzy logic controller for a parallel mechanism rehabilitation robot // Proceedings of the International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). 2015. pp. 1–6. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2015.7338038.
17. Nikshi W.M., Bedillion M.D., Hoover R.C. Parking Control of Mixed Conventional/Braking Actuation Mobile Robots Using Fuzzy Logic Control // Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE). 2016. DOI: 10.1115/IMECE2016-65331.
18. Andani M.T., et al. Fuzzy-Based Sliding Mode Control and Sliding Mode Control of a Spherical Robot // Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. pp. 2534–2539. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591640.
19. Chen C.-H., et al. Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots // Mathematical Problems in Engineering. 2017. pp. 1–12. DOI: 10.1155/2017/8984713.
20. Shaout A., Castaneda-Trejo L. Fuzzy Logic Control for Adaptive Braking Systems in Proximity Sensor Applications // Electronics. 2025. vol. 14. no. 14. 2858 p. DOI: 10.3390/electronics14142858.
21. Qasem G.A.A., et al. Enhancing Anti-Lock Braking System Performance Using Fuzzy Logic Control Under Variable Friction Conditions // Symmetry. 2025. vol. 17. no. 10. 1692 p. DOI: 10.3390/sym17101692.
22. Rizianiza I., Djafar A. Design car braking system using Mamdani Fuzzy Logic Control // Proceedings of the 4th International Conference on Electric Vehicular

- Technology (ICEVT). 2017. pp. 129–133. DOI: 10.3390/electronics14142858 10.1109/ICEVT.2017.8323547.
23. Zhartybayeva M.G., Tatur M.M., Shaverdo M.M., Iskakov K. T. Methods of reducing the computational complexity of fuzzy inference algorithms for implementation on a microcontroller with limited computational resources // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2019. vol. 7. no. 1. pp. 65–78. DOI: 10.32523/2306-6172-2019-7-1-65-78.

**Tatur Mikhail** — Ph.D., Dr. Sci., Professor, Department of Electronic Computing Machines, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR). Research interests: mobile robotics, intelligent data analysis. The number of publications — 180. tatur@bsuir.by; 39, Platonova St., 220013, Minsk, Belarus; office phone: +375(17)293-8564.

**Chen Jike** — Graduate student, Department of Electronic Computing Machines, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR). Research interests: mathematical modeling, mobile robots, and control algorithms. The number of publications — 5. ts.chen@bsuir.by; 39, Platonova St., 220013, Minsk, Belarus; office phone: +375(29)847-2460.

**Acknowledgements.** the State Program of Scientific Research under the project “Methodology for the Development of Digital Twins of Unmanned Mobile Platforms as Instrumental Tools for the Design of Advanced Vehicles”, Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research under Project F25II M-021 “Model-Based Design of an Intelligent Control System for an Unmanned Vehicle”.