

DOI 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17. – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 2 (80). – С. 7-17.

7. NovAtel OEMStar [internet]. – URL: <http://www.gnssplus.ru/gnss-receivers/boards/38-novatel-oemstar.html> (дата обращения: 23.05.2024). – Текст: электронный.

8. Guo, J., Li, X., Li, Z. *et al.* (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19, 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.

References

1. Andreev K. P. Vnedrenie sistemy tochnogo zemledeliya / K. P. Andreev, N. V. Anikin, N. V. Byshov [i dr.] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2019. – No. 2 (42). – S. 74-80.

2. Yakushev V.P., Yakushev V.V., Blokhina S.Yu., Blokhin Yu.I., Matveenko D.A. Rol distantsionnogo zondirovaniya zemli v tochnom zemledelii // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. – 2023. – T. 93. – No. 10. – С. 955-969. DOI: 10.31857/S0869587323100110.

3. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya / pod red. A. I. Petrova, V. I. Kharisova. –

lzd-e 3-e, pererab. – Moskva: Radiotekhnika, 2005. – 688 s.

4. Lakhtina, N.Yu. Tekhnicheskoe obespechenie telematicheskikh sistem. Sistemy opredeleniya mestopolozheniya i identifikatsii transportnykh sredstv: metodicheskoe posobie / N.Yu. Lakhtina, K.G. Manushakyan. – Moskva: MADI, 2017. – 68 s.

5. Tyapkin, V. N. Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podvizhnykh sredstv s ispolzovaniem sputnikovoy radionavigatsionnoy sistemy GLONASS: monografiya / V. N. Tyapkin, E. N. Garin. – Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012. – 260 s.

6. Voevoda A.A., Troshina G.V. Modelirovanie filtra Kalmana s obnovlennoy posledovatelnostyu v srede Simulink // Sbornik nauchnykh trudov NGTU. 2015. No. 2 (80). S. 7–17. DOI: 10.17212/2307-6879-2015-2-7-17.

7. NovAtel OEMStar [internet]. Rezhim dostupa: <http://www.gnssplus.ru/gnss-receivers/boards/38-novatel-oemstar.html> (data obrashcheniya: 23.05.2024).

8. Guo, J., Li, X., Li, Z. *et al.* (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19, 895–911. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8>.



УДК 621.316.7

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-258-4-89-97

А.С. Угловский

A.S. Uglovskiy

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПРОГНОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПИТАНИЕМ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКЕ

ARCHITECTURE OF A PREDICTIVE POWER MANAGEMENT SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT UNDER STOCHASTIC PULSE LOAD

Ключевые слова: автономный мобильный робот, электроимпульсная прополка, система управления энергопитанием, стохастическая импульсная нагрузка, прогнозное управление, адаптивное демпфирование, энергетическая устойчивость, шина постоянного тока.

Рассматривается проблема обеспечения энергетической устойчивости автономных мобильных роботов, оснащённых электроимпульсными рабочими органами, функционирующих в условиях стохастически распределённой импульсной нагрузки. Предложена оригинальная архитектура системы перерас-

пределения энергии, основанная на концепции единой шины постоянного тока с упреждающим цифровым управлением тяговыми электроприводами. Разработан математический аппарат, включающий стохастическую модель импульсной нагрузки, критерий энергетической живучести системы и закон адаптивного демпфирования тяговой мощности. Выявлено, что стохастическая генерация высоковольтных разрядов (мощностью до 5 кВт) при ограниченной емкости источника питания приводит к возникновению режима нагрузки постоянной мощности, которая вызывает критические просадки напряжения в звене постоянного тока, ускоренную деградацию литий-

ионных аккумуляторных батарей и аварийные остановки системы защиты. Составлены дифференциальные уравнения состояния шины постоянного тока и коррекции задания угловой скорости тяговых электродвигателей. В качестве объекта анализа рассматривается бортовая сеть постоянного тока номинальным напряжением 48 В. Предложен метод прогнозного управления энергопитанием автономного робота, использующий закон адаптивного демпфирования тяги. Проведен сравнительный анализ двух режимов: жесткого подключения нагрузки и режима с активной стабилизацией. Установлено, что применение разработанного алгоритма позволяет снизить максимальную просадку напряжения с 12,42 до 4,56 В (увеличение устойчивости в 3 раза) и уменьшить пиковый ток потребления от аккумуляторной батареи с 114,6 А до 76,3 А (снижение на 33%). При этом выявлено незначительное увеличение динамической ошибки курсовой устойчивости (с 0,5 до 1,2 см), которое не оказывает критического влияния на качество выполнения агротехнических операций.

Keywords: *autonomous mobile robot, electrical weed control, power management system, stochastic pulsed load, predictive control, adaptive damping, energy stability, DC bus.*

The issue of ensuring the energy stability of autonomous mobile robots equipped with electric pulse actua-

tors operating under stochastically distributed pulse loads is discussed. A unique architecture for an energy redistribution system is proposed based on the concept of a single DC bus with predictive digital control of traction electric drives. A mathematical framework was developed including a stochastic pulse load model, a system energy survivability criterion, and a law for adaptive traction power damping. It was found that the stochastic generation of high-voltage discharges (up to 5 kW) with limited power supply capacity led to a constant-power load mode which caused critical voltage sags in the DC link, accelerated degradation of lithium-ion batteries, and emergency shutdowns of the protection system. Differential equations were derived for the DC bus state equation and for the traction motor angular velocity correction. The research target was an on-board DC network with a nominal voltage of 48 V. A method for predictive power supply management of an autonomous robot was proposed using the adaptive traction damping law. A comparative analysis of two modes was made: a hard-wired load and an active stabilization mode. It was found that the application of the developed algorithm reduced the maximum voltage drop from 12.42 V to 4.56 V (a 3-fold increase in stability) and decreased the peak current consumption from the battery from 114.6 A to 76.3 A (a 33% reduction). A slight increase in the dynamic directional stability error (from 0.5 cm to 1.2 cm) was also detected which did not critically affect the quality of agricultural operations.

Угловский Артем Сергеевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Ярославский ГАУ, г. Ярославль, Российская Федерация, e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru, SPIN: 3717-5731, ORCID: 0000-0002-5678-4786.

Uglovskiy Artem Sergeevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Yaroslavl State Agricultural University, Yaroslavl, Russian Federation, e-mail: a.uglovskii@yarcx.ru, SPIN: 3717-5731, ORCID: 0000-0002-5678-4786.

Введение

Развитие автономных мобильных роботов для сельскохозяйственного применения сопровождается усложнением энергетических режимов их работы [1]. Особую категорию составляют робототехнические системы, использующие электроимпульсные рабочие органы, предназначенные для точечной обработки растительности. Такие устройства формируют высоковольтные импульсы с амплитудой в диапазоне 5-15 кВ и длительностью в десятки миллисекунд [2], что приводит к возникновению кратковременных, но экстремально высоких энергетических нагрузок на бортовую систему электропитания.

Для автономных роботов, ограниченных по массе и объёму энергетических накопителей, подобные режимы создают противоречие между требованиями к энергетической устойчивости и мобильности. Традиционные инженерные ре-

шения, основанные на жёстком разделении контуров питания (выделенные аккумуляторные батареи для импульсных нагрузок), неизбежно приводят к увеличению массы системы на 30-40%, снижая её эксплуатационную эффективность [3].

Целью исследования является повышение энергетической устойчивости и эксплуатационного ресурса автономных мобильных роботов с электроимпульсными рабочими органами за счет разработки архитектуры прогнозного перераспределения мощности в единой шине постоянного тока.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ влияния стохастической импульсной нагрузки большой мощности (до 5 кВт) на динамическую устойчивость низковольтных бортовых сетей постоянного тока (48 В) и выявить условия возникновения не-

устойчивости типа «нагрузка постоянной мощности»;

2) разработать математическую модель энергосистемы робота, учитывающую стохастический характер распределения объектов обработки (сорной растительности) и динамику переходных процессов в литий-ионных накопителях.

В данной работе предлагается альтернативный системный подход, в рамках которого тяговый электропривод рассматривается не только как исполнительный механизм движения, но и как активный элемент энергетического баланса, способный временно снижать собственное потребление мощности для компенсации импульсных возмущений. Ключевой особенностью предлагаемой архитектуры является прогнозный характер управления, учитывающий стохастическую природу импульсной нагрузки.

Объекты и методы

Разработанная система прогнозного управления энергосистемой автономного робота [4] реализована по иерархическому принципу и основана на концепции единой шины постоянного тока с распределённым управлением энергетическими потоками. Архитектура объединяет вычислительные, силовые и измерительные подсистемы в единую киберфизическую структуру, обеспечивающую упреждающее реагирование на стохастическую импульсную нагрузку.

Общая структурная схема системы перераспределения энергии с контуром упреждающего ограничения тяговой мощности представлена на рисунке 1.

Архитектура системы построена по двухуровневой схеме управления:

1) верхний уровень реализует функции стратегического и прогнозного планирования энергетических режимов;

2) нижний уровень обеспечивает высокоскоростную реализацию алгоритмов стабилизации напряжения и защиты в реальном времени.

Ключевым принципом является отказ от жёсткого разделения источников питания тяговой и импульсной подсистем и использование тягового электропривода в качестве управляемого потребителя, участвующего в стабилизации энергетического баланса.

Верхний уровень управления реализуется на базе одноплатного вычислительного модуля (RaspberryPi/Jetson) и выполняет функции прогнозного энергетического планирования.

На данном уровне осуществляется:

1) анализ карты поля и пространственного распределения сорной растительности;

2) оценка параметра плотности засорённости λ , используемого в стохастической модели импульсной нагрузки;

3) вычисление допустимых энергетических режимов движения робота.

Результатом работы верхнего уровня является передача на нижний уровень скорректированных уставок скорости и разрешений на формирование высоковольтных импульсов.

Разработанный алгоритм прогнозного управления реализован в виде встроенного программного обеспечения нижнего уровня системы управления и выполняется на микроконтроллерах семейства STM32 в реальном времени.

Алгоритм использует аппаратное прерывание, синхронизированное с моментом запуска высоковольтного импульсного генератора, что обеспечивает время реакции порядка десятков миллисекунд. Входными данными для алгоритма являются измерения напряжения шины постоянного тока (DC-Link) и тока аккумуляторной батареи, получаемые с использованием встроенных АЦП микроконтроллера и аналоговых датчиков тока. Основными функциями нижнего уровня являются:

1) измерение напряжения шины постоянного тока U_{ac} и его производной;

2) контроль тока аккумуляторной батареи и высоковольтного преобразователя;

3) реализация закона адаптивного демпфирования тяговой мощности;

4) аппаратная синхронизация с моментом формирования высоковольтного импульса.

Особенностью реализации является использование аппаратного прерывания по фронту запуска высоковольтного генератора, что позволяет активировать контур ограничения тягового тока с временем реакции порядка 20 мс. Такое быстрое действие существенно превышает возможности стандартных программных защит системы управления батареи и обеспечивает упреждающее ограничение нагрузки.

Нижний уровень управления функционирует в масштабе миллисекунд, обеспечивая реакцию системы на динамические энергетические возмущения.

Силовая часть системы включает:

- 1) аккумуляторную батарею Li-Ion номинальным напряжением 48 В;
- 2) шину постоянного тока (DC-Link);
- 3) тяговый инвертор и BLDC-двигатель;
- 4) высоковольтный импульсный генератор (5-15 кВ).

Научная новизна работы заключается в развитии архитектурных и алгоритмических подходов к управлению энергопитанием автономных мобильных роботов, функционирующих в условиях стохастической импульсной нагрузки, и выражается в следующем:

1) предложена архитектура системы энергопитания автономного мобильного робота с единой шиной постоянного тока, в которой тяговый электропривод рассматривается как управляемый элемент энергетического баланса, участвующий в стабилизации напряжения при возникновении импульсных возмущений;

2) разработан прогнозный алгоритм ограничения тяговой мощности, синхронизированный с моментом формирования высоковольтного импульса и реализующий упреждающее перераспределение энергетических потоков в бортовой сети постоянного тока;

3) введён критерий энергетической живучести, позволяющий количественно оценивать возможность формирования высокоэнергетических импульсов с учётом текущего состояния источника питания и динамики напряжения звена постоянного тока.

Архитектура системы управления реализована по иерархическому принципу (рис. 1). Верхний уровень осуществляет анализ априорной информации о поле обработки, включая оценку плотности растительности и допустимых энергетических режимов движения. На основе этих данных формируется стратегическое ограничение скорости.

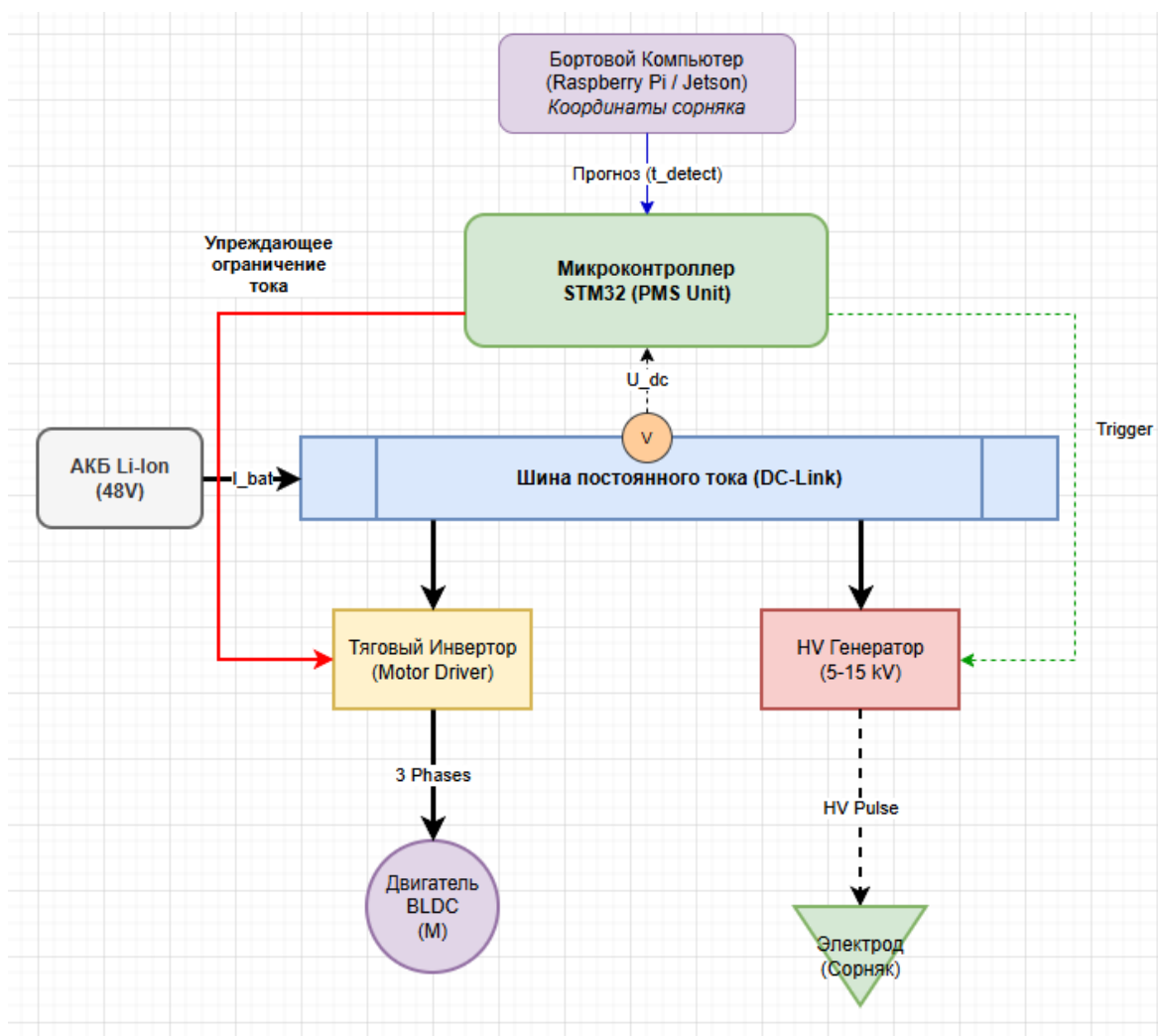


Рис. 1. Структурная схема системы перераспределения энергии с контуром упреждающего ограничения тяги

Нижний уровень реализует быстродействующие контуры управления и защиты, функционирующие на базе микроконтроллеров реального времени. Ключевым элементом является аппаратное прерывание, синхронизированное с фронтом высоковольтного импульса, что обеспечивает время реакции порядка десятков миллисекунд.

Для экспериментальной верификации предложенных алгоритмов прогнозного управления был разработан и изготовлен прототип автономного мобильного робота (рис. 2), предназна-

ченный для электроимпульсной прополки в полевых условиях.

Для формального описания процессов в системе электропитания автономного робота вводится энергетическое фазовое пространство, координатами которого являются напряжение звена постоянного тока U_{dc} и остаточная энергоемкость источника Q_{rem} . Такое представление позволяет анализировать динамику системы не только во временной, но и в энергетической области, что принципиально важно при наличии кратковременных импульсных нагрузок.

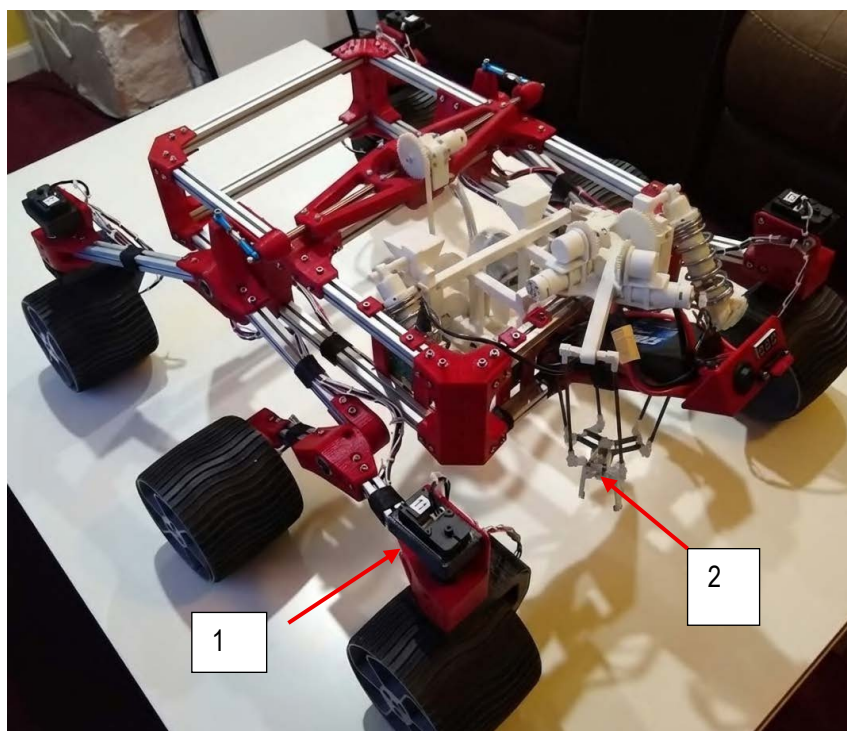


Рис. 2. Экспериментальный образец агробота:

1 – тяговые электроприводы (6 шт.); 2 – электроимпульсный рабочий орган (дельта-манипулятор)

Для описания динамики напряжения звена постоянного тока автономного робота вводится эквивалентная ёмкость C_{eq} , объединяющая ёмкости входных фильтров инверторов и вспомогательных накопителей. В отличие от классических моделей в рассматриваемой системе присутствует импульсная нагрузка со случайным моментом возникновения [5, 6].

Дифференциальное уравнение состояния шины постоянного тока имеет вид:

$$C_{eq} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{U_{ocv} - U_{dc}}{R_{int}(SOC, T)} - \sum_{i=1}^N P_{motor_i}(U_{dc}, \omega) \cdot \eta_{inv}^{-1} - \underbrace{\Psi_{weed}(t)}_{\text{импульсная возмущающая функция}} \cdot \frac{U_{HV}^2(t)}{R_{arc}(t)} \cdot k_{conv}, \quad (1)$$

где U_{dc} – мгновенное напряжение звена постоянного тока;

U_{ocv} – напряжение холостого хода аккумуляторной батареи;

$R_{int}(SOC, T)$ – внутреннее сопротивление аккумулятора, зависящее от степени заряда и температуры;

P_{motor_i} – механическая мощность i -того тягового электропривода;

η_{inv} – КПД силового инвертора;

$\Psi_{weed}(t)$ – бинарная стохастическая функция, принимающая значения 0 (отсутствие импульса) или 1 (пробой), распределённая по закону Пуассона с параметром плотности засорённости λ ;

$R_{arc}(t)$ – динамическое сопротивление дуги пробоя растительной ткани, изменяющееся в диапазоне от 10 кОм до 100 Ом;

k_{conv} – коэффициент передачи высоковольтного преобразователя.

Введённая возмущающая функция отражает физическую природу электроимпульсного процесса и позволяет моделировать не только величину, но и форму потребляемой мощности.

Авторы [7] исследуют электропроводные свойства сорных растений, что позволило в модели задать диапазон динамического сопротивления дуги пробоя $R_{arc}(t)$ – от 10 кОм до 100 Ом.

Для оценки способности системы электропитания выдерживать одиночный импульс без нарушения устойчивости вводится безразмерный критерий энергетической живучести ξ_{stab} , вычисляемый в реальном времени микроконтроллером системы управления:

$$\xi_{stab} = \frac{C_{eq} \cdot (U_{dc}^2 - U_{min}^2)}{2 \cdot E_{pulse}^{req} \cdot (1 + \delta_{aging})}, \quad (2)$$

где U_{min} – минимально допустимое напряжение шины постоянного тока;

E_{pulse}^{req} – требуемая энергия одного высоковольтного импульса;

δ_{aging} – коэффициент деградации аккумулятора, связанный с его состоянием здоровья.

На основе критерия энергетической живучести (2) формируется ограничение средней допустимой скорости движения, обеспечивающее выполнение условия

$$\xi_{stab} \geq 1 \quad (3)$$

на заданном участке траектории. Таким образом, верхний уровень управления реализует медленный контур адаптации, работающий в масштабе секунд и метров пути.

Физический смысл критерия (2) заключается в сравнении энергии, запасённой в ёмкости DC-Link, с энергией, необходимой для формирования импульса с учётом ухудшения параметров аккумулятора. При выполнении условия $\xi_{stab} < 1$ система управления запрещает фор-

мирование импульса и переводит силовую часть в защитный режим.

Для компенсации ожидаемой просадки напряжения предлагается внедрение перекрёстной связи между энергетическим и кинематическим контурами управления. Коррекция задания угловой скорости тяговых электродвигателей осуществляется по закону:

$$\omega_{ref}^*(t) = \omega_{ref} \cdot \left[1 + \tanh \left(\alpha \cdot \frac{\partial U_{dc}}{\partial t} + \beta \cdot \frac{I_{HV}}{I_{bat}^{max}} \right) \right], \quad (4)$$

где ω_{ref} – номинальное задание скорости;

I_{HV} – ток высоковольтного преобразователя;

I_{bat}^{max} – допустимый максимальный ток аккумулятора;

α, β – настраиваемые коэффициенты чувствительности.

Нелинейная функция выбрана для исключения резких скачков момента привода.

Использование производной напряжения $\frac{\partial U_{dc}}{\partial t}$ обеспечивает упреждающую реакцию системы, позволяя ограничить потребление тяговых приводов до достижения критических значений напряжения, то есть быстрее, чем срабатывают стандартные защиты системы управления батареи.

Режим нагрузки постоянной мощности провоцирует лавинообразное падение напряжения, так как при просадке U_{dc} ток потребления растёт, чтобы сохранить мощность.

Результаты и их обсуждение

График на рисунке 3 показывает адаптивное снижение задания скорости тяговых двигателей в момент высоковольтного разряда. Глубина модуляции скорости определяется текущей жесткостью бортовой сети (производной напряжения). Данный маневр позволяет ограничить суммарное энергопотребление робота в пределах допустимых токов разряда АКБ без остановки движения платформы

Параметрический синтез регулятора (определение численных значений коэффициентов α, β выполнялся методом численного моделирования в программной среде вычислений на базе библиотек SciPy и NumPy. Значение весового коэффициента β (чувствительность к току нагрузки) выбрано исходя из ограничений кинематики мобильной платформы: критерием выступало сохранение тягового усилия, достаточного для движения на подъеме без риска опро-

кидывания или скатывания. Значение коэффициента α (чувствительность к производной напряжения) оптимизировано с использованием алгоритмов минимизации по интегральному кри-

терию качества переходного процесса. Целевой функцией выступала минимизация квадратичной ошибки отклонения напряжения при воздействии стохастической импульсной нагрузки».

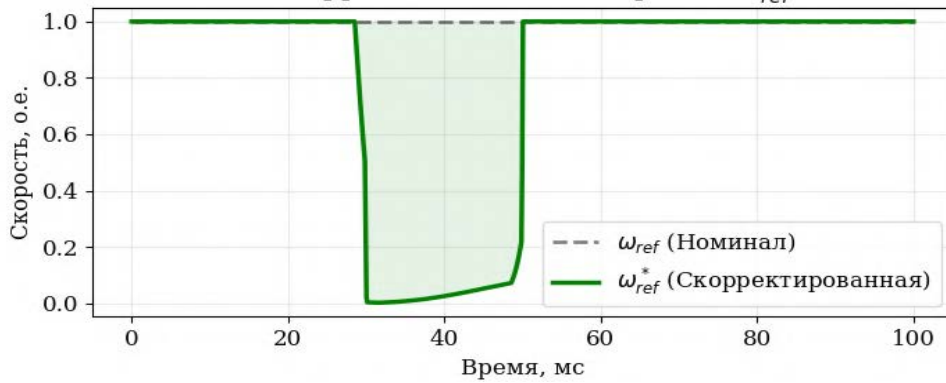


Рис. 3. Формируемая траектория задания скорости тягового привода $\omega_{ref}^*(t)$, ограничивающая потребление мощности

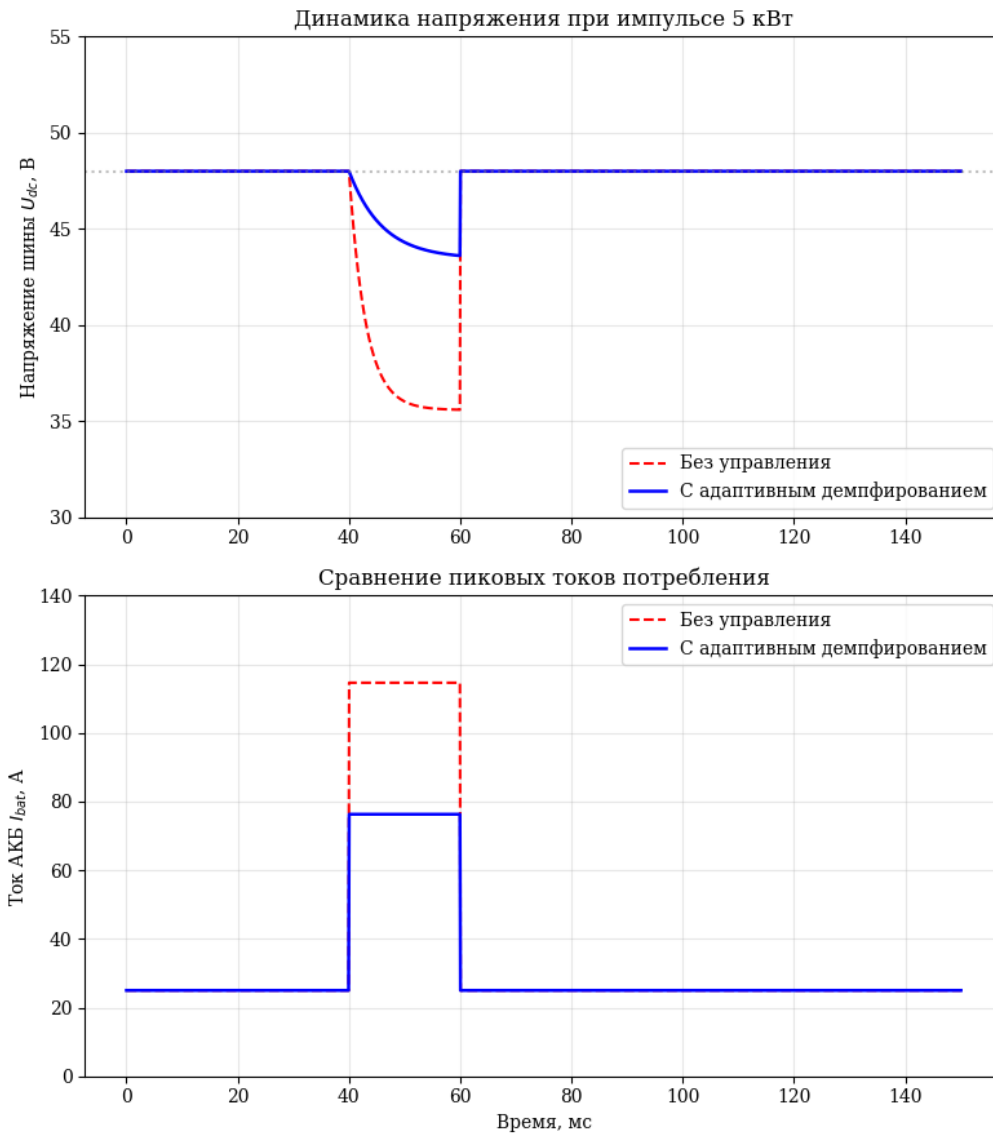


Рис. 4. Результаты численного моделирования переходных процессов в шине постоянного тока: сравнение режима жесткого подключения нагрузки и алгоритма прогнозного адаптивного демпфирования

Математическая модель тягового электропривода была дополнена объектом HighVoltageLoad, имитирующим стохастическую импульсную нагрузку мощностью до 5 кВт с длительностью импульса 20 мс. Численное моделирование (рис. 4) показало, что внедрение контура прогнозного управления снижает амплитуду просадки напряжения в 2,7 раза (с 12,4 до 4,6 В) и ограничивает пиковые токи разряда АКБ на 33%, предотвращая аварийные отключения системы при работе импульсного оборудования. Увеличение пикового тока аккумулятора до 114,6 А по сравнению с оценкой P/U связано с неидеальностью силовых преобразователей, наличием внутренних сопротивлений аккумулятора и конденсаторной динамикой звена постоянного тока в момент импульса.

Моменты возникновения импульсов задавались как реализация пуассоновского случайного процесса, что соответствует реальному распределению сорной растительности на поле.

В качестве объекта анализа рассматривалась бортовая сеть постоянного тока номинальным напряжением 48 В. Сравнение проводилось для двух режимов работы системы:

1) без применения алгоритма прогнозного управления (жёсткое подключение импульсной нагрузки, режим *без управления*);

2) с использованием закона адаптивного демпфирования тяги, определяемого формулой (4).

Анализ данных, представленных в таблице, показывает, что внедрение адаптивного демпфирования тяговой мощности позволяет существенно снизить динамическую просадку напряжения в звене постоянного тока даже при высокоэнергетических импульсах. При этом наблюдаемое кратковременное снижение скорости движения приводит лишь к незначительному увеличению отклонения траектории, которое не оказывает критического влияния на точность навигации.

Таблица

Результаты сравнительного анализа параметров бортовой сети при импульсной нагрузке

Параметр	Без управления	С алгоритмом адаптивного демпфирования (формула (4))	Эффект
Максимальная просадка напряжения ΔU	12,42 В	4,56 В	Снижение в ~3 раза
Пиковый ток аккумулятора I_{bat}	114,6 А	76,3 А	Снижение на 33%
Отклонение курса робота	0,5 см	1,2 см	Незначительное ухудшение

Таким образом, в системе реализуется согласованное перераспределение мощности между тяговыми электроприводами и импульсной нагрузкой, при котором кратковременное снижение тягового задания позволяет предотвратить критическую просадку напряжения в звене постоянного тока. Данный режим обеспечивает устойчивое электропитание бортового вычислительного комплекса, навигационных сенсоров и систем машинного зрения.

Заключение

Предложен системный подход к управлению энергопитанием автономных мобильных роботов, функционирующих в условиях стохастической импульсной нагрузки. Разработанная архитектура и математический аппарат позволяют рассматривать тяговый электропривод как активный элемент энергетической стабилизации.

Введение критерия энергетической живучести и закона адаптивного демпфирования обес-

печивает устойчивую работу системы без применения тяжёлых и дорогостоящих буферных накопителей энергии. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенного подхода для создания энергоэффективных автономных робототехнических комплексов нового поколения.

Введён критерий энергетической живучести



, обеспечивающий количественную оценку возможности формирования высокоэнергетического импульса без нарушения устойчивости бортовой сети и позволяющий учитывать деградацию аккумуляторной батареи при снижении её состояния здоровья ниже 80%.

Разработан и реализован закон адаптивного демпфирования тяговой мощности, основанный на использовании производной напряжения шины постоянного тока и относительного тока импульсной нагрузки, обеспечивающий упреждающее ограничение тяговых электроприводов с временем реакции порядка 20 мс.

По результатам имитационного моделирования установлено, что применение разработанного закона управления позволяет снизить максимальную просадку напряжения в бортовой сети 48 В с 12,42 до 4,56 В, что соответствует увеличению устойчивости системы электропитания более чем в три раза. Показано, что пиковый ток аккумуляторной батареи при импульсной нагрузке снижается с 114,6 до 76,3 А, что уменьшает тепловую и электрохимическую нагрузку на источник питания и способствует увеличению его ресурса.

Библиографический список

1. Siegwart, R., Nourbakhsh, I.R., Scaramuzza, D. (2011) Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, Cambridge.
2. Vigneault, C., Benoît, D. (2001). Electrical Weed Control: Theory and Applications. DOI: 10.1007/978-3-662-04584-8_12.
3. Kuperman, A., Aharon, I. (2011). Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 981-992. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.010.
4. Угловский, А. С. Автоматизированная система уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и механизма обратной связи / А. С. Угловский, Н. Ю. Семеренко. – DOI 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119. – Текст: непосредственный // *АгроЭкоИнженерия*. – 2025. – № 1 (122). – С. 104-120. – EDNBOAOTK.
5. Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C., Williamson, G. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 55. 1112-1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.
6. Adaikkappan, M., Nageswari, S., Palanisamy, R., et al. (2025). Real-Time Parameter Identification and State of Charge Estimation of Electric Vehicle Batteries. *Engineering Reports*. 7. DOI: 10.1002/eng2.70346.
7. Юдаев И. В. Электропроводные свойства сорных растений – объектов высоковольтного импульсного воздействия / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус. – Текст: электронный // *Электронная обработка материалов*. – 2020. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektroprovodnye-svoystva-sornyh-rasteniy-obektov-vysokovoltного-impulsного-vozdeystviya> (дата обращения: 02.02.2026).
8. Marx, D., Magne, P., Nahid-Mobarakeh, B., et al. (2012). Large Signal Stability Analysis Tools in DC Power Systems With Constant Power Loads and Variable Power Loads—A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 27. 1773-1787. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2170202.

References

1. Siegwart, R., Nourbakhsh, I.R., Scaramuzza, D. (2011) Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, Cambridge.
2. Vigneault, C., Benoît, D. (2001). Electrical Weed Control: Theory and Applications. DOI: 10.1007/978-3-662-04584-8_12.
3. Kuperman, A., Aharon, I. (2011). Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 981-992. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.010.
4. Uglovskiy, A. S. Avtomatizirovannaya sistema unichtozheniya sornykh rasteniy s ispolzovaniem vysokovoltного razryada i mekhanizma obratnoy svyazi / A. S. Uglovskiy, N. Yu. Semerenko // *AgroEkolzheneriya*. – 2025. – No. 1 (122). – S. 104-120. – DOI: 10.24412/2713-2641-2025-1122-104-119.
5. Emadi, A., Khaligh, A., Rivetta, C., Williamson, G. (2006). Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 55. 1112-1125. DOI: 10.1109/TVT.2006.877483.
6. Adaikkappan, M., Nageswari, S., Palanisamy, R., et al. (2025). Real-Time Parameter Identification and State of Charge Estimation of Electric Vehicle Batteries. *Engineering Reports*. 7. DOI: 10.1002/eng2.70346.
7. Yudaev I. V., Daus Yu. V. Elektroprovodnye svoystva sornykh rasteniy – obektov vysokovoltного impulsного vozdeystviya // *Elektronnaya obrabotka materialov*. – 2020. – No. 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektroprovodnye-svoystva-sornyh-rasteniy-obektov-vysokovoltного-impulsного-vozdeystviya> (data obrashcheniya: 02.02.2026).
8. Marx, D., Magne, P., Nahid-Mobarakeh, B., et al. (2012). Large Signal Stability Analysis Tools in DC Power Systems With Constant Power Loads and Variable Power Loads—A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 27. 1773-1787. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2170202.

