

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.10

УДК 62-83:681.513.5

Толстой В.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0004-3005-6467, e-mail: vic_t@ukr.net

Садовой О.В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Tolstoi Viktor, Postgraduate Student

Sadovoi Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor Electrotechnical and electromechanical department

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ З РІЗНИМИ ТИПАМИ КОВЗНОГО РЕЖИМУ

У статті проведено порівняльний аналіз систем керування електроприводами, що базуються на різних типах ковзного режиму (класичний, вищого порядку, динамічний інтегральний та інші). Проаналізовано ключові проблеми класичного SMC при його реалізації в цифрових мікропроцесорних і FPGA-структурах, зокрема ефект вібрації (chattering), який спричиняє прискорене зношування компонентів і проблеми електромагнітної сумісності (EMC) та змінну частоту перемикавання, неприйнятну для промислових систем. Визначено чинники, що впливають на якість керування, серед яких ефекти дискретизації, часові затримки та обмеження обчислювальних ресурсів. Доведено доцільність застосування SMC вищого порядку (HOSMC), зокрема алгоритму Super-Twisting Control (STC), для ефективного усунення вібрації, а також Dynamic Integral SMC — для забезпечення фіксованої частоти широтно-імпульсної модуляції (PWM). Наведено узагальнену характеристику сучасних напрямів розвитку цифрових методів керування, включаючи гібридні підходи та робастні спостерігачі (STSMO). Обґрунтовано необхідність створення єдиної теоретико-методологічної бази для подальших досліджень, оптимізації та практичного впровадження в системах з високою динамікою, таких як електромобілі та багатофазні електроприводи.

Ключові слова: мікропроцесорна система; електропривод; ковзний режим; SMC вищого порядку; вібрація; фіксована частота; робастність; методологія дослідження.

The paper presents the comparative analysis of control systems for electric drives operating with different sliding mode types. The key challenges of classical SMC implementation in digital microprocessor and FPGA structures are analyzed, specifically the chattering phenomenon, which causes accelerated component wear and electromagnetic compatibility (EMC) issues, and the variable switching frequency, which is unsuitable for industrial power electronics. Factors affecting control performance, such as discretization effects, time delays, and computational limitations, are identified. The application of Higher Order SMC (HOSMC), particularly the Super-Twisting Control (STC) algorithm, is justified for effective chattering suppression, while Dynamic Integral SMC ensures a fixed PWM switching frequency. The paper outlines current trends in digital control, including hybrid approaches and robust observers (STSMO), and emphasizes the need to develop a unified theoretical and methodological framework for further research, optimization, and practical implementation in high-dynamic systems such as electric vehicles and multiphase drives.

Keywords: microprocessor system; electric drive; sliding mode; Higher Order SMC; chattering; fixed switching frequency; robustness; research methodology.

Постановка проблеми

Сучасні електроприводи (PMSM, багатофазні машини, приводи електромобілів та інші) функціонують як сильно нелінійні системи в умовах значної невизначеності параметрів та зовнішніх збурень (коливання напруги, динаміка навантаження, шум вимірювань) [1, 2]. Ці системи вимагають забезпечення високої продуктивності та робастності для підтримки бажаної шви-

дкості обертання й моменту, незважаючи на збурення, що є особливо критичним для високодинамічних об'єктів керування, як-от керування ковзанням в електромобілях [3].

Керування в ковзному режимі (SMC) є привабливим через свою внутрішню нечутливість до збурень та простоту практичного синтезу і налаштування [2]. Проте, його традиційна форма має два критичні недоліки, що ускладнюють мікропроцесорну (цифрову) реалізацію:

1. Вібрація (Chattering): Високочастотне коливання, яке призводить до збільшення енергетичних втрат, швидкого зносу комутаційних елементів та проблем електромагнітної сумісності (ЕМС) [2, 4].
2. Змінна частота перемикання: Частота перемикання класичного SMC не фіксована і залежить від динаміки системи, що є неприйнятним для промислових перетворювачів, які потребують фіксованої частоти PWM для оптимального розподілу теплових втрат [5].

У реальній цифровій системі відбувається наступне:

1. Вихід контролера (u): Класичний SMC намагається видати бінарний сигнал (+VDC, або -VDC).
2. Зв'язок із PWM: Мікроконтролер приймає цей бінарний сигнал і перетворює його на коефіцієнт заповнення (duty cycle, D) для генератора PWM.

Змінна частота перемикання (для керування): на відміну від Model Predictive Control (MPC) або PID, де коефіцієнт D обчислюється, у класичному SMC керуючий сигнал u є змінною, яка постійно перемикається, намагаючись змусити s прямувати до нуля. Це призводить до того, що частота, з якою сигнал керування намагається змінити стан системи, є змінною і не пов'язана з несучою частотою PWM.

Таким чином, існує проблема розробки та обґрунтування вдосконалених дискретно-часових методів SMC (HOSMC та Dynamic Integral SMC), які вирішують ці проблеми, зберігаючи ключову робастність для мікропроцесорних платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх наукових праць демонструє активний розвиток SMC, спрямований на його адаптацію до цифрової ери та вимог силової електроніки.

1. SMC вищого порядку та робастне спостереження.

Метод SMC вищого порядку (HOSMC), зокрема Super-Twisting Control (STC), підтвердив свою ефективність у вирішенні проблеми тремтіння [4].

- HOSMC для спостерігачів: Техніка STC застосовується для розробки Super-Twisting Sliding-Mode Observer (STSMO), що дозволяє досягти кінцевого часу збіжності помилки спостереження (рис. 1). Це критично важливо для безсенсорного керування PMSM-приводами, де STSMO-MRA-SC забезпечує високоякісну оцінку швидкості [6]. Аналогічно, у системах динамічного позиціонування (DP systems) HOSMO використовується для одночасної оцінки швидкості та фільтрації хвилювих збурень [4].

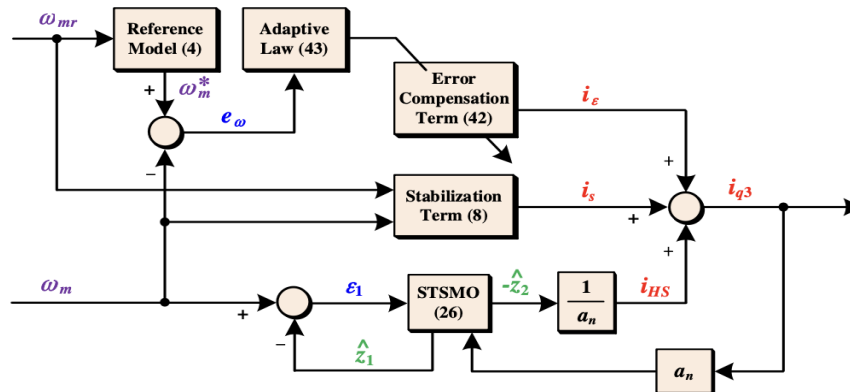


Рис. 1. Блочна схема для STSMO-MRA-SC

- Гібридний ISMC: у PMSM сервосистемах застосовується Improved SMC (ISMC), який поєднує безсингулярний термінальний ковзний режим (CNTSM) з Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC). Цей гібридний підхід (рис. 2) використовує LADRC для оцінки та компенсації сумарного збурення, забезпечуючи високу швидкість реакції та підвищену робастність [7].
- NRLSMC (рис. 3): це вдосконалений варіант SMC, де стандартна функція знаку, яка викликає тремтіння (chattering), замінюється нелінійним законом досягнення (Non-linear Reaching Law).

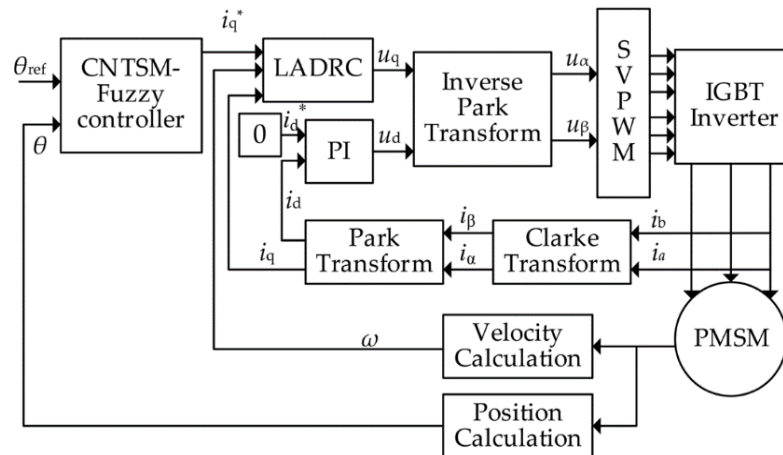


Рис. 2. Блочна схема гібридного ISMC для PMSM

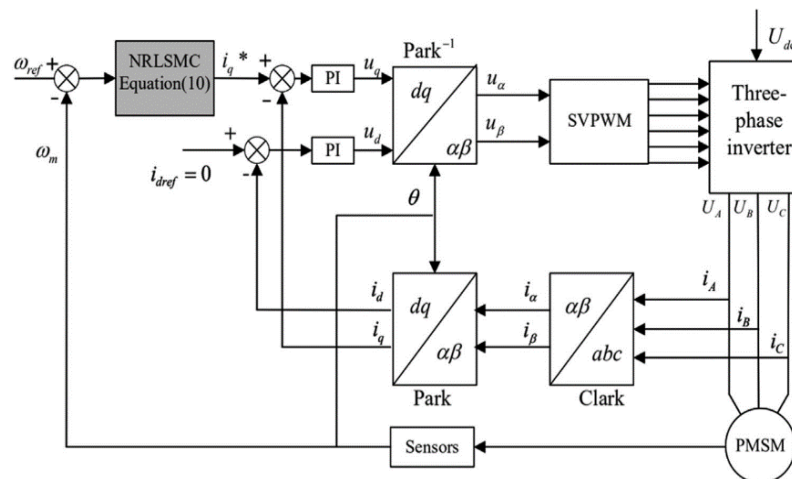


Рис. 3. Блочна схема вдосконаленого NRLSMC

2. Адаптація до вимог мікропроцесорної реалізації.

- Dynamic Integral SMC (DISMC): Для забезпечення фіксованої частоти перемикання, необхідної для промислових перетворювачів та вирішення проблем EMC, запропоновано динамічний інтегральний SMC (рис. 4). Експериментальні дані підтверджують, що DISMC забезпечує відмінну ефективність та робастність щодо змін навантажень та вхідних напруг у силовій електроніці [5].
- Вплив частоти: Дослідження впливу частоти перемикання на SMC для PMSM підтверджують, що вища частота, в межах апаратних обмежень, призводить до кращої якості керування та меншої амплітуди тремтіння [8].

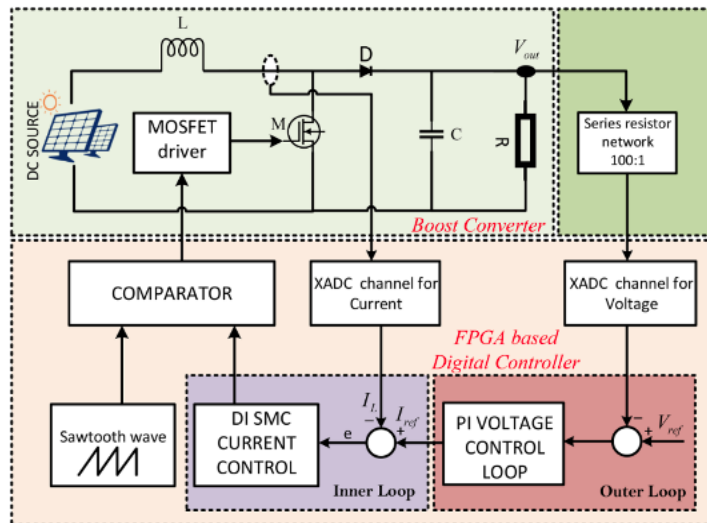


Рис. 4. Блочна схема з використанням динамічного інтегрального контролера режиму ковзання

3. Дослідження цифрової реалізації та прикладні аспекти.

- FPGA та мікроконтролери:
- FPGA (ПЛІС) є оптимальними для реалізації складних, високошвидкісних SMC-алгоритмів, оскільки дозволяють паралельну обробку та мінімізацію часу циклу керування [9]. Це особливо актуально для HiL-тестування SMC-спостерігачів DFIG-генераторів вітрових турбін [10].
- Мікроконтролери є ефективною платформою для робастних систем з меншими вимогами до швидкості, таких як приводи з рекуперацією ковзної енергії асинхронних двигунів (SERD), забезпечуючи високу точність керування та стійкість до збурень [11, 12, 13].
- Транспортні системи: У керуванні ковзанням електромобілів (Electric Formula Student) дискретно-часовий SMC демонструє значну перевагу над традиційним PID-керуванням у робастності до змінних умов тертя, що підкреслює необхідність робастного контролю в EV [3].
- Багатофазні машини: SMC (рис. 5) є однією з двох основних технік (поруч з MPC, рис. 6) для робастного струмового керування багатофазними індукційними машинами, пропонує меншу обчислювальну складність порівняно з MPC [14].

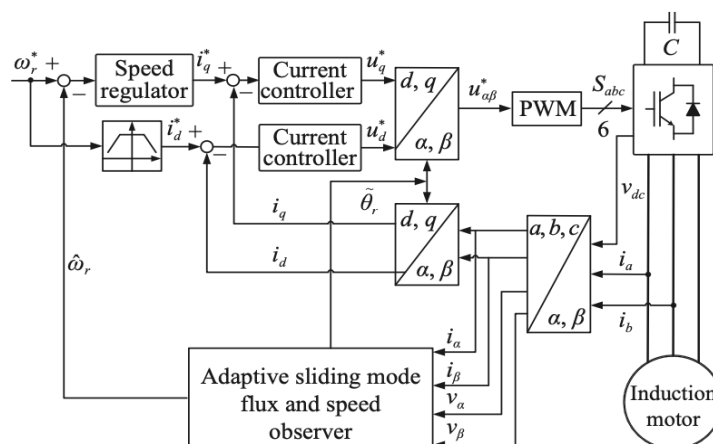


Рис. 5. Блочна схема для безсенсорного керування контролера швидкості

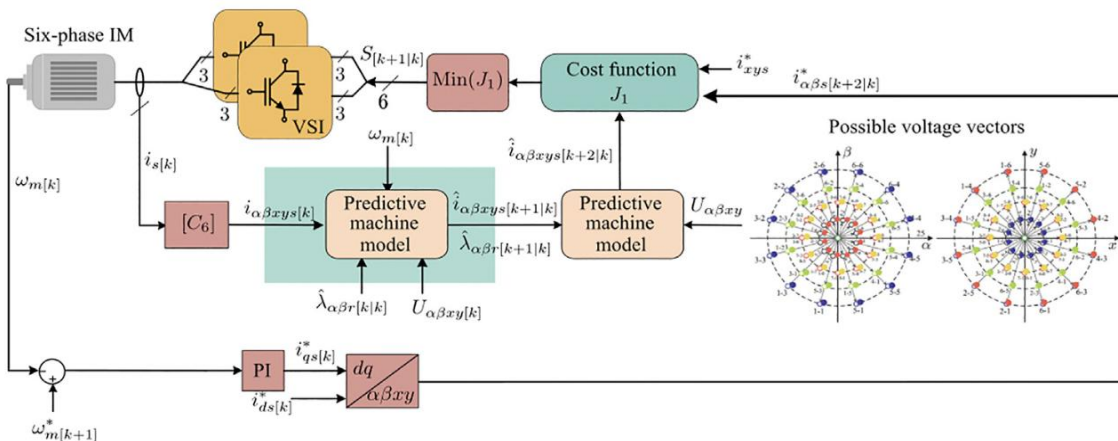


Рис. 6. Класична схема MPC для асиметричної шестифазної ІМ

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка теоретико-методологічних засад та обґрунтування застосування вдосконалених дискретно-часових алгоритмів керування в ковзному режимі (SMC), які здатні ефективно функціонувати в умовах невизначеності на мікропроцесорних платформах для керування сучасними електроприводами та силовими перетворювачами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати вибір SMC вищого порядку (HOSMC) як ключового методу для усунення тремтіння у цифрових реалізаціях.
2. Проаналізувати підхід для фіксації частоти перемикання SMC, адаптуючи методи Dynamic Integral SMC до мікропроцесорних систем.
3. Провести порівняльний аналіз вимог до обчислювальної потужності та швидкості між різними SMC-алгоритмами та відповідними цифровими платформами (FPGA та мікроконтролери).
4. Розробити методику інтеграції SMC з робастними спостерігачами (STSMO) для забезпечення безсенсорного керування у приводах (PMSM, DFIG).

Виклад основного матеріалу

1. Подолання вібрації за допомогою HOSMC.

Класичний SMC генерує сигнал перемикання u на основі досягнення поверхні ковзання $\sigma(x) = 0$. Через дискретність часу та апаратні затримки відбувається тремтіння [2]. HOSMC, зокрема STC (Super-Twisting Control), вирішує цю проблему, змушуючи неперервну динаміку σ переходити в ковзний режим на вищій похідній, генеруючи квазінеперервний керувальний сигнал u :

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\lambda \cdot \text{sign}(\sigma) \\ u = u_{eq} - \alpha \cdot \sqrt{|\sigma|} \cdot \text{sign}(\sigma) + u_1 \\ u_1 = -\beta \cdot \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (1)$$

де u_{eq} — еквівалентне керування; λ, α, β — коефіцієнти, що забезпечують кінцевий час збіжності.

Це дозволяє перенести перемикання на похідну керуючої змінної, що робить керуючий вплив на систему значно більш гладким, усуваючи високочастотні коливання та зменшуючи втрати [4]. Цей принцип є основою для STSMO, де σ є помилкою спостереження.

2. Фіксація частоти перемикання (Dynamic Integral SMC).

Для промислової реалізації критично важливим є використання фіксованої частоти перемикання f_{pwm} , яка визначається апаратною ШІМ. Класичний SMC, базуючись на гістерезисі, має змінну частоту.

Dynamic Integral SMC (DISMC) вирішує цю проблему шляхом інтеграції динаміки перемикання в керуючий закон, що забезпечує прямий зв'язок з циклом роботи цифрового контролера [5]. Для силових перетворювачів, де x — це, наприклад, напруга виходу, DISMC вводить

додатковий інтегральний член у поверхню ковзання S або модифікує керуючий закон u , що дозволяє системі працювати синхронно з фіксованою частотою контролера. Це значно покращує ЕМС та оптимізує тепловий режим силових ключів [5, 15].

3. Оптимізація цифрової реалізації.

Вибір мікропроцесорної платформи залежить від:

- обчислювальної складності та вимог алгоритму, дані наведені у табл. 1;
- швидкості, аналіз представлений у табл. 2.

Таблиця 1. Вибір рекомендованої платформи в залежності від алгоритму та вимог

Алгоритм / Система	Ключові вимоги	Рекомендована платформа	Обґрунтування (за літературою)
HOSMC (STC), STSMO	Висока швидкість циклу, паралельні обчислення	FPGA	Забезпечує паралельну обробку керуючих законів, мінімізуючи час циклу. Критично для НІЛ-тестування DFIG-генераторів та високошвидкісних конвертерів [9, 10].
Класичний SMC, DISMC	Робастність, проста реалізація, низька вартість	Мікроконтролери	Ефективні для робастних систем з меншими вимогами до швидкості обертання (SERD-приводи). Забезпечують високу точність керування та стійкість до шуму [11, 12].
SMC для Slip Control EV	Робастність до зміни тертя, дискретний час	Мікроконтролери / DSP	Забезпечує кращу робастність, ніж PID, використовуючи дискретно-часовий SMC з обчислювально-ефективним спостерігачем Лунбергера [3].

Таблиця 2. Порівняння DSP з мікроконтролерами (MCU) та FPGA:

Параметр	DSP	Мікроконтролер (MCU)	FPGA
Приклади	Texas Instruments (TMS320F), Analog Devices (ADSP)	STM32, Microchip (PIC)	Xilinx, Intel (Altera)
Швидкість обчислень	Висока. Оптимізований для математики.	Середня. Виконує послідовно.	Найвища. Виконання паралельне (апаратне).
Типове застосування	Складні системи керування, комунікації, аудіо/відео обробка.	Прості та середні системи керування, інтерфейси.	Найкритичніші та швидкі цикли (High-Order SMC).
SMC-алгоритм	HOSMC, FOC, STSMO, DISMC.	Класичний SMC (з ШІМ-корекцією), прості observers.	HOSMC з мінімальною затримкою, дуже висока частота.

4. Застосування в електроприводах.

Ефективність SMC підтверджується в різних типах електроприводів:

- PMSM: Для підвищення робастності швидкості використовується гібридний ISMC (CNTSM+LADRC), що компенсує збурення, та STSMO для безсенсорного керування [6, 7].
- Багатофазні машини: SMC забезпечує високу якість струмового керування з меншою обчислювальною складністю порівняно з MPC, що є важливим фактором для мікропроцесорної реалізації [14].
- Асинхронні двигуни: SMC з використанням принципу еквівалентного керування успішно застосовується для керування ІМ, які живляться від багатоімпульсних джерел напруги (VSC), забезпечуючи надійну роботу [16].

Висновки

Проведений порівняльний аналіз сучасних методів реалізації ковзного режиму підтверджує, що вдосконалений SMC є оптимальним робастним інструментом для керування електроприводами, що функціонують в умовах невизначеності на мікропроцесорних платформах.

1. Проблема вібрації вирішується переходом до HOSMC (Super-Twisting Control), який генерує гладкий керуючий сигнал.
2. Проблема робастного спостереження стану розв'язується шляхом інтеграції STSMO для високоякісної оцінки швидкості та збурень. Це критично важливо для безсенсорного керування сфстемами з високою динамікою, такими як приводи PMSM та DFIG-генератори.
3. Проблема змінної частоти долається за допомогою Dynamic Integral SMC, що дозволяє забезпечити фіксовану частоту ШІМ, критичну для силових перетворювачів та промислових стандартів.
4. Оптимізація реалізації визначається вимогами до швидкості: FPGA є кращою платформою для високошвидкісних HOSMC, тоді як мікроконтролери є ефективним і надійним рішенням для SERD-приводів та SMC у транспортних системах.
5. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на розробці дискретно-часових еквівалентів HOSMC та DISMC для оптимізації їхньої продуктивності та стабільності при роботі з обмеженою швидкістю обробки сучасних мікроконтролерів.

Список використаної літератури

1. Riaz, M., Yasin, A. R., Uppal, A. A., & Yasin, A. A novel dynamic integral sliding mode control for power electronic converters. *Science Progress*. 2021. Т. 104(4). С. 1–16. DOI: 10.1177/00368504211044848
2. Zou, X., Ding, H., & Li, J. Sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy sliding mode controller and fuzzy sliding mode observer. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2023. Т. 18(3). С. 2355–2369. DOI: 10.1007/s42835-022-01352-4
3. Alföldi, Á., Fényes, D., & Gáspár, P. Design and Implementation of a Slip Control for Electric Formula Student Vehicle Using Sliding Mode Control. In S. T. E. F. P. Gáspár (Ed.), *Vehicle System Dynamics: Volume 1*. 2024. С. 699–707. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-64536-1_53
4. Ianagui, A. S. S., & Tannuri, E. A. High Order Sliding Mode Control and Observation for DP Systems. *IFAC PapersOnLine*. 2018. Т. 51(29). С. 110–115. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.127
5. Rodas, J., Gonzalez-Prieto, I., Kali, Y., Saad, M., & Doval-Gandoy, J. Recent Advances in Model Predictive and Sliding Mode Current Control Techniques of Multiphase Induction Machines. *Frontiers in Energy Research*. 2021. Т. 9, С. 729034. DOI: 10.3389/fenrg.2021.729034
6. Lu, H., Yang, D., & Su, Z. Improved sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system. *IET Power Electronics*. 2023. Т. 16(13). С. 169–177. DOI: 10.1049/pel2.12372
7. Pourseif, T., & Mohajeri, M. Design of robust control for a motor in electric vehicles. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2019. Т. 10(2). С. 223–234. DOI: 10.1049/iet-est.2018.5084
8. Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2022. Т. 9(3). С. 392–406. DOI: 10.1109/JAS.2021.1004380
9. Huerta-Moro, S., Tavizón-Aldama, J. D., & Tlelo-Cuautle, E. FPGA Implementation of Sliding Mode Control and Proportional-Integral-Derivative Controllers for a DC–DC Buck Converter. *Technologies*. 2024. Т. 12(10). С. 184. DOI: 10.3390/technologies12100184
10. El Alami, H., Bossoufi, B., Motahhir, S., Alkhamash, E. H., Masud, M., Karim, M., Taoussi, M., Bouderbala, M., Lamnadi, M., & El Mahfoud, M. FPGA in the Loop Implementation for Observer Sliding Mode Control of DFIG-Generators for Wind Turbines. *Electronics*. 2022. Т. 11(1). С. 116. DOI: 10.3390/electronics11010116
11. Ianagui, A. S. S., & Tannuri, E. A. High Order Sliding Mode Control and Observation for DP Systems. *IFAC PapersOnLine*. 2018. Т. 51(29). С. 110–115. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.127

12. Eskander, M. N., Arafa, O. A., Abdel Hakiem, M. M., & El Hakiem, S. Microprocessor-Based Control of Slip Energy Recovery Induction Motor. *ResearchGate Publication*. 2001. December. URL: <https://www.researchgate.net/publication/312033434>
13. Dodke, R., Bhad, S., Lahudkar, U., Karpate, M., Vyawahare, N., Bhajikhaye, D., & Titarmare, P. Microprocessor Based Slip Power Recovery in Induction Motor. *IJARIE*. 2017. T. 3(2).
14. Silva, J. F. A. Sliding mode control of multilevel power converters. *Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control—EPE-PEMC*. 2000.
15. Tan, S., & Ma, J. Study on influence of switching frequency on sliding mode control performance of permanent magnet synchronous motor. *IET Power Electronics*. 2022. T. 15(13). C. 2345–2353. DOI: 10.1049/pe12.12353
16. Castañeda, C. E., Valderrabano-Gonzalez, A., Gabbar, H. A., & Morfín, O. A. Sliding Mode with Equivalent Control for Induction Motor Drive Based on Multi-Pulse VSC. *Energies*. 2023. T. 16(13). C. 4866. DOI: 10.3390/en16134866
17. Spiazzi, G., Mattavelli, P., & Rossetto, L. Performance optimization of Cuk converters by sliding-mode control. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1995. T. 10(3). C. 302–309. DOI: 10.1109/7.385966

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS WITH VARIOUS SLIDING MODE TYPES

Abstract

This paper presents a comparative analysis of different SMC strategies, including classical SMC, High-Order SMC based on Super-Twisting algorithm and Dynamic integral SMC. Modern drives, such as Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM), multiphase machines, and electric vehicle powertrains, are inherently non-linear systems subject to significant parameter uncertainty and external disturbances, making SMC an ideal robust control solution.

The study analyzes the implementation of classical SMC algorithms within digital micro-processor and FPGA structures, identifying two critical challenges that impede industrial adoption: the detrimental chattering phenomenon and the unacceptable variable switching frequency which complicates thermal management, increases power losses, and causes issues with electro-magnetic compatibility (EMC).

The core of the research lies in substantiating and analyzing advanced discrete-time SMC algorithms designed to overcome these limitations while maintaining the system's intrinsic robustness. To effectively eliminate chattering and generate a quasi-continuous control signal, the article focuses on Higher Order SMC (HOSMC), specifically the Super-Twisting Control (STC), which is also fundamental for developing Robust Sliding Mode Observers (STSMO) for sensorless control (e.g., in PMSM and DFIG-generators). Furthermore, the paper substantiates the use of Dynamic Integral SMC (DISMC) to ensure a fixed PWM switching frequency, a prerequisite for synchronous operation with industrial power electronic converters (e.g., DC-DC converters).

The methodology includes a comparative analysis of hardware platforms, concluding that FPGA is necessary for the parallel processing and high-speed cycles demanded by HOSMC, while standard microcontrollers remain suitable for cost-effective, robust applications (e.g., Slip Energy Recovery Drives and EV slip control with Luenberger observers). The results contribute a unified theoretical and methodological framework for designing and optimizing robust control systems for high-performance applications like multiphase machines and electric vehicles, thereby enhancing system stability and operational quality in the face of discretization effects and computational constraints.

References

- [1] Riaz, M., Yasin, A. R., Uppal, A. A., & Yasin, A. (2021). A novel dynamic integral sliding mode control for power electronic converters. *Science Progress*, 104(4), 1–16. DOI: 10.1177/00368504211044848
- [2] Zou, X., Ding, H., & Li, J. (2023). Sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy sliding mode controller and fuzzy sliding mode observer. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(3), 2355–2369. DOI: 10.1007/s42835-022-01352-4

- [3] Alföldi, Á., Fényes, D., & Gáspár, P. (2024). Design and Implementation of a Slip Control for Electric Formula Student Vehicle Using Sliding Mode Control. In S. T. E. F. P. Gáspár (Ed.), *Vehicle System Dynamics: Volume 1* (pp. 699–707). Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-64536-1_53
- [4] Ianagui, A. S. S., & Tannuri, E. A. (2018). High Order Sliding Mode Control and Observation for DP Systems. *IFAC PapersOnLine*, 51(29), 110–115. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.127
- [5] Rodas, J., Gonzalez-Prieto, I., Kali, Y., Saad, M., & Doval-Gandoy, J. (2021). Recent Advances in Model Predictive and Sliding Mode Current Control Techniques of Multiphase Induction Machines. *Frontiers in Energy Research*, 9, 729034. DOI: 10.3389/fenrg.2021.729034
- [6] Lu, H., Yang, D., & Su, Z. (2023). Improved sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system. *IET Power Electronics*, 16(13), 169–177. DOI: 10.1049/pel2.12372
- [7] Pourseif, T., & Mohajeri, M. (2019). Design of robust control for a motor in electric vehicles. *IET Electrical Systems in Transportation*, 10(2), 223–234. DOI: 10.1049/iet-est.2018.5084
- [8] Wu, L., Liu, J., Vazquez, S., & Mazumder, S. K. (2022). Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 9(3), 392–406. DOI: 10.1109/JAS.2021.1004380
- [9] Huerta-Moro, S., Tavizón-Aldama, J. D., & Tlelo-Cuautle, E. (2024). FPGA Implementation of Sliding Mode Control and Proportional-Integral-Derivative Controllers for a DC–DC Buck Converter. *Technologies*, 12(10), 184. DOI: 10.3390/technologies12100184
- [10] El Alami, H., Bossoufi, B., Motahhir, S., Alkhamash, E. H., Masud, M., Karim, M., Taoussi, M., Bouderbala, M., Lamnadi, M., & El Mahfoud, M. (2022). FPGA in the Loop Implementation for Observer Sliding Mode Control of DFIG-Generators for Wind Turbines. *Electronics*, 11(1), 116. DOI: 10.3390/electronics11010116
- [11] Ianagui, A. S. S., & Tannuri, E. A. (2018). High Order Sliding Mode Control and Observation for DP Systems. *IFAC PapersOnLine*, 51(29), 110–115. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.11.127
- [12] Eskander, M. N., Arafa, O. A., Abdel Hakiem, M. M., & El Hakiem, S. (2001). Microprocessor-Based Control of Slip Energy Recovery Induction Motor. *ResearchGate Publication*, December. URL: <https://www.researchgate.net/publication/312033434>
- [13] Dodke, R., Bhad, S., Lahudkar, U., Karpate, M., Vyawahare, N., Bhajikhaye, D., & Titarmare, P. (2017). Microprocessor Based Slip Power Recovery in Induction Motor. *IJARIE*, 3(2).
- [14] Silva, J. F. A. (2000). Sliding mode control of multilevel power converters. *Proceedings of the 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control—EPE-PEMC 2000*.
- [15] Tan, S., & Ma, J. (2022). Study on influence of switching frequency on sliding mode control performance of permanent magnet synchronous motor. *IET Power Electronics*, 15(13), 2345–2353. DOI: 10.1049/pel2.12353
- [16] Castañeda, C. E., Valderrabano-Gonzalez, A., Gabbar, H. A., & Morfín, O. A. (2023). Sliding Mode with Equivalent Control for Induction Motor Drive Based on Multi-Pulse VSC. *Energies*, 16(13), 4866. DOI: 10.3390/en16134866
- [17] Spiazzi, G., Mattavelli, P., & Rossetto, L. (1995). Performance optimization of Cuk converters by sliding-mode control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10(3), 302–309. DOI: 10.1109/7.385966

Надійшла до редколегії 06.12.2025

Прийнята після рецензування 09.12.2025

Опублікована 26.03.2026