

ХОМЮК ДЕНИС

Національний університет «Львівська Політехніка»

<https://orcid.org/0009-0001-5599-5426>e-mail: denys.s.khomiuk@lpnu.ua**САМОТИЙ ВОЛОДИМИР**

Національний університет «Львівська Політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2344-2576>e-mail: volodymyr.v.samotyy@lpnu.ua

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТИРИСТОРНИХ МОДУЛЯТОРІВ СИГНАЛІВ

У статті розглядаються сучасні методи аналізу перехідних процесів у тиристорних модуляторах сигналів, що є ключовими елементами в системах керування потужністю. Проаналізовано три основні підходи: математичне моделювання, програмну симуляцію та експериментальні дослідження. Особливу увагу приділяється фізичним, квазіфізичним і поведінковим моделям, що використовуються для опису динаміки тиристорів, а також можливостям програмного забезпечення, включаючи загальнозастосовувані симулятори (MATLAB/Simulink, SPICE) і спеціалізовані TCAD-інструменти. Розглянуто методи експериментального визначення динамічних характеристик тиристорів та засоби перевірки моделей. Порівняльний аналіз виявляє переваги і недоліки кожного з підходів, підкреслюючи доцільність їх комбінованого застосування.

Ключові слова: тиристорний модулятор сигналів, перехідний процес.

KHOMIUK DENYS, SAMOTYY VOLODYMYR

Lviv Polytechnic National University

METHODS FOR ANALYZING TRANSIENT PROCESSES IN THYRISTOR SIGNAL MODULATORS

This paper presents a comprehensive analysis of methods for investigating transient processes in thyristor signal modulators—critical components in power control systems used across various industrial and energy applications. The study focuses on three principal approaches: mathematical modeling, software-based simulation, and experimental analysis. It emphasizes the role of physical models based on semiconductor physics, quasi-physical models that combine theoretical and empirical elements, and behavioral models that approximate device characteristics through mathematical functions. Each modeling approach is examined in terms of its accuracy, computational complexity, and applicability to different levels of analysis—from device-level physics to system-level behavior.

The paper provides an in-depth review of general-purpose simulators like MATLAB/Simulink and SPICE, as well as specialized tools such as TCAD simulators and electrothermal platforms like TwisterSim and ST PowerStudio. These tools are crucial for studying the dynamic behavior of thyristors, including switching delays, thermal effects, and recovery characteristics. Additionally, the work outlines the importance of experimental validation, describing techniques for measuring key parameters such as turn-on and turn-off times, voltage and current rise rates (dv/dt , di/dt), and holding and latching currents. Such measurements support the calibration and verification of numerical models.

A comparative analysis highlights the strengths and limitations of each method. Mathematical modeling offers deep insights into internal device physics but requires detailed structural data. Software simulation enables the study of complex circuits under various operating conditions with lower cost and risk. Experimental methods yield the most reliable data but involve high equipment costs and practical limitations. The paper concludes by identifying promising research directions, including the development of real-time modeling techniques, multiphysics simulations, and control strategies for thyristor-based FACTS devices in smart grids.

Keywords: thyristor signal modulator, transient processes.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 20.05.2025

Актуальність проблематики та аналітичний огляд літератури

Тиристори є ключовими напівпровідниковими приладами, що використовуються для керування потужними електричними колами в різноманітних застосуваннях, включаючи системи передачі електроенергії та керування електродвигунами [1, 2]. У контексті тиристорних модуляторів сигналів, аналіз перехідних процесів, що виникають під час їхнього ввімкнення та вимкнення, а також в інших режимах роботи, є надзвичайно важливим для забезпечення надійності та ефективності.

Останні дослідження в галузі аналізу перехідних процесів включають розробку та застосування різноманітних математичних моделей. Фізичні моделі, що базуються на принципах фізики напівпровідників та теорії керування зарядом, використовуються для детального аналізу внутрішньої поведінки приладів під час перехідних процесів [3, 4]. Ці моделі враховують процеси інжекції, дифузії та рекомбінації носіїв заряду, що є ключовими для розуміння динаміки тиристорів. Квазіфізичні моделі поєднують фізичні аспекти з емпіричними або поведінковими описами, забезпечуючи баланс між точністю та обчислювальною ефективністю [5]. Тенденція в математичному моделюванні спрямована на використання більш фізично обґрунтованих підходів, особливо для новітніх типів тиристорів, таких як SiC GTO [6], що дає можливість точніше відтворювати складну перехідну поведінку. Однак квазіфізичні моделі залишаються цінними для моделювання системного рівня, де важлива швидкість обчислень.

Програмна симуляція стала незамінним інструментом для аналізу перехідних процесів у тиристорних модуляторах. Загально цільові симулятори, такі як MATLAB/Simulink та PLECS, широко використовуються для моделювання схем на основі тиристорів та аналізу їхніх перехідних характеристик [7, 8]. Симулятори схем, такі як SPICE, використовуються для аналізу перехідних процесів та розробки моделей тиристорів для цих платформ [9]. З'являються також електротермічні симулятори, що забезпечують комплексний аналіз, враховуючи як електричні, так і теплові аспекти [10]. Розвиток програмної симуляції надає різноманітні інструменти, що відповідають різним рівням деталізації та потребам застосування, від фізики приладів до поведінки системного рівня. Зростаюча увага до електротермічних ефектів свідчить про важливість теплового керування в застосуваннях тиристорів.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: порівняння аналітичних, програмних та експериментальних методів дослідження перехідних процесів у тиристорних модуляторах сигналів. Робота спрямована на опис основних характеристик, переваг і недоліків цих методів, зокрема математичного моделювання та програмної симуляції. Також аналізуються тенденції розвитку підходів до аналізу та визначаються перспективи подальших досліджень у цій сфері.

Методи математичного моделювання

Фізичні моделі

Фізичні моделі тиристорів ґрунтуються на фундаментальних принципах фізики напівпровідників і детально описують внутрішні процеси, що відбуваються в приладі під час перехідних режимів. Одним з важливих класів фізичних моделей є моделі з контролем заряду, які враховують динаміку інжекції, дифузії та рекомбінації носіїв заряду у різних шарах напівпровідникової структури тиристора. Такі моделі часто базуються на розв'язанні диференціальних рівнянь, що описують транспорт носіїв заряду під впливом електричних полів та інших факторів. Наприклад, у роботі [3] представлено фізичну модель SiC GTO тиристора, засновану на теорії керування зарядом, яка дає можливість ідентифікувати домінуючі фактори, що впливають на динамічний процес ввімкнення. Рівняння, що використовуються в фізичних моделях, часто є модифікаціями класичних рівнянь Шоклі для врахування високочастотних та імпульсних ефектів.

Незважаючи на високий рівень деталізації, параметризація фізичних моделей є складним завданням, оскільки вимагає точних знань про внутрішню структуру тиристора, включаючи геометричні розміри окремих шарів, рівень легування та характеристики матеріалів. Ці дані часто не є загальнодоступними в технічній документації виробників, що обмежує практичне застосування таких моделей для широкого кола.

Квазіфізичні та поведінкові моделі

Квазіфізичні та поведінкові моделі є компромісом між точністю фізичних моделей та обчислювальною ефективністю, необхідною для моделювання складних схем. Квазіфізичні моделі поєднують елементи, що базуються на фізичних принципах, з емпіричними або поведінковими описами окремих характеристик тиристора. Наприклад, модель, описана в [11], використовує поведінкову модель ключа для представлення процесу ввімкнення та фізичну модель діода для опису характеристик у провідному стані та зворотного відновлення. Такий підхід дає можливість уникнути проблем зі збіжністю симуляцій, характерних для моделей з від'ємним опором.

Поведінкові моделі, навпаки, повністю базуються на математичних функціях, які апроксимують вольт-амперні характеристики та перехідні процеси тиристора. Ці моделі можуть бути досить простими, але при цьому забезпечувати прийнятну точність для певних застосувань. Перевагами квазіфізичних та поведінкових моделей є їхня обчислювальна ефективність та простота використання в симуляторах схем. Однак їхнім недоліком є обмежена точність у відтворенні складних фізичних явищ, особливо в екстремальних режимах роботи.

Моделі на основі еквівалентних схем

Моделі на основі еквівалентних схем представляють тиристор у вигляді комбінації ідеальних та неідеальних компонентів, таких як резистори, індуктори, ємності та керовані джерела, або ж представлення тиристора у вигляді ідеального ключа. Ці моделі часто використовуються в симуляторах схем, таких як SPICE, завдяки їхній простоті та здатності відтворювати основні перехідні характеристики тиристорів. Наприклад, у роботі [12] представлена емпірична модель тиристора, де перехідні процеси ввімкнення описуються за допомогою часозалежного опору. Модель включає десять констант, значення яких визначаються шляхом оптимізації на основі експериментальних вимірювань.

Моделі на основі еквівалентних схем можуть також включати елементи, що описують динамічні ефекти, такі як час затримки ввімкнення та вимкнення, а також зворотне відновлення. Завдяки балансу між простотою та здатністю враховувати ключові перехідні процеси, моделі на основі еквівалентних схем широко використовуються для аналізу поведінки тиристорних модуляторів у різноманітних електричних колах.

Методи програмної симуляції

Загальноцільові симулятори

Загальноцільові симулятори, такі як MATLAB/Simulink, є потужними інструментами для моделювання та аналізу тиристорних модуляторів. Simulink надає бібліотеки електричних

компонентів, включаючи моделі тиристорів різної складності, що дає можливість користувачам створювати схеми та досліджувати їхню поведінку в часовій та частотній областях. Наприклад, у роботі [13] MATLAB/Simulink використовується для моделювання та аналізу системи передачі з тиристорним послідовним компенсатором (TCSC) з метою розробки алгоритму виявлення несправностей під час коливань потужності.

SPICE та його численні варіанти, такі як PSpice, також широко застосовуються для моделювання схем з тиристорами та дослідження перехідних процесів. SPICE є потужним симулятором схем, що дає можливість аналізувати нелінійні характеристики напівпровідникових приладів та їхню динамічну поведінку. Ці симулятори надають користувачам гнучкість та широкий набір інструментів для аналізу, що робить їх придатними як для моделювання системного рівня, так і для детального аналізу окремих ланцюгів з тиристорами.

Спеціалізовані симулятори для силової електроніки

Для більш глибокого аналізу фізики напівпровідникових приладів, включаючи тиристори, використовуються спеціалізовані TCAD (Technology Computer-Aided Design) симулятори. Ці інструменти дають можливість моделювати поведінку тиристорів на рівні зонної структури та окремих комірок, враховуючи складні фізичні процеси, такі як транспорт носіїв заряду та тепловиділення. Наприклад, у роботі [3] TCAD симуляція використовується для аналізу динамічного процесу увімкнення SiC GTO тиристора, включаючи багатоклітинні ефекти. Електротермічні симулятори, такі як TwisterSim та ST PowerStudio, дають можливість враховувати теплові ефекти, що є важливими при аналізі перехідних процесів у потужних тиристорах. Ці симулятори можуть прогнозувати температуру кристала та корпусу тиристора, а також аналізувати вплив теплових режимів на його електричні характеристики. Онлайн-симулятори, такі як AC Switches Simulator від STMicroelectronics та SemiSel від Semikron Danfoss, надають зручні засоби для швидкого підбору та аналізу тиристорів у конкретних застосуваннях, дозволяючи оцінювати їхні ключові параметри та теплові режими роботи.

Симуляція FACTS пристроїв

Моделювання та аналіз перехідних процесів у системах передачі змінного струму з гнучкими зв'язками (FACTS), що включають тиристорні пристрої, такі як тиристорні контрольовані послідовні компенсатори (TCSC), вимагає використання спеціалізованих симуляторів, таких як PSCAD/EMTDC та RTDS [13]. PSCAD/EMTDC є потужним інструментом для моделювання та симуляції електромеханічних та електромагнітних перехідних процесів у енергетичних системах, включаючи детальні моделі TCSC, що враховують як безперервну динаміку, так і дискретну комутацію тиристорів.

Симуляція в реальному часі (RTDS) використовується для тестування систем керування пристроями FACTS перед їхнім впровадженням у реальну енергетичну систему [14]. RTDS дає можливість моделювати поведінку енергетичної системи в реальному часі та взаємодіяти з реальними контролерами, що є важливим для валідації алгоритмів керування та захисту.

Експериментальні методи дослідження

Вимірювання електричних параметрів

Експериментальні дослідження відіграють важливу роль у характеристиці перехідних процесів у тиристорних модуляторах. Для вимірювання струму та напруги на тиристорі під час перехідних процесів використовуються сучасні вимірювальні прилади, такі як високошвидкісні осцилографи, струмові пробники та високовольні диференціальні пробники. Особлива увага приділяється вимірюванню швидкості наростання струму $\frac{di}{dt}$ та напруги $\frac{du}{dt}$, оскільки ці параметри є критичними для оцінки динамічних характеристик тиристорів та їхньої надійності. Також проводяться вимірювання часу увімкнення та вимкнення тиристора, що є важливими для визначення його придатності для конкретних застосувань.

Експериментальне визначення параметрів тиристора

Експериментальне визначення ключових параметрів тиристора є важливим етапом для розробки та перевірки його моделей. До таких параметрів належать напруга $U_{\text{вм}}$ та струм увімкнення $i_{\text{вм}}$, напруга у провідному стані $U_{\text{пров}}$, струм утримання $i_{\text{утр}}$ та струм фіксації $i_{\text{фікс}}$. Розробляються спеціальні схеми для експериментального дослідження характеристик увімкнення та вимкнення тиристора, а отримані результати порівнюються з даними, наведеними в технічній документації виробників.

Порівняльний аналіз методів

Різні методи аналізу перехідних процесів у тиристорних модуляторах мають свої унікальні характеристики, переваги та недоліки, що визначають їхню придатність для конкретних завдань дослідження. Математичне моделювання забезпечує глибоке розуміння фізичних процесів, але може бути складним у реалізації та параметризації. Програмна симуляція є потужним інструментом для аналізу складних схем та різних режимів роботи, але її точність залежить від адекватності використовуваних моделей. Експериментальні дослідження надають найбільш достовірні дані про поведінку реальних приладів, але можуть бути дорогими та забирати багато часу.

Вибір конкретного методу аналізу залежить від цілей дослідження, доступних ресурсів та необхідного рівня деталізації. У багатьох випадках найбільш ефективним підходом є комбіноване використання різних методів, що дає можливість отримати всебічне та достовірне розуміння

перехідних процесів у тиристорних модуляторах. Прикладом комбінованого методу є моделювання в реальному часі та тестування Hardware-in-the-Loop (HIL) [15]. У таблиці 1 наведений порівняльний аналіз методів аналізу перехідних процесів тиристорних модуляторів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів аналізу перехідних процесів тиристорних модуляторів

Метод аналізу	Основні характеристики	Переваги	Недоліки	Типові області застосування
Математичне моделювання	Опис поведінки тиристора за допомогою математичних рівнянь, що базуються на фізичних принципах або емпіричних даних.	Глибоке розуміння фізичних процесів, можливість прогнозування поведінки в широкому діапазоні умов.	Може бути складним у реалізації та параметризації, точність залежить від адекватності моделі.	Детальний аналіз внутрішніх процесів у приладі.
Програмна симуляція	Моделювання електричних схем з тиристорами за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.	Можливість дослідження складних схем та різних режимів роботи, відносна безпека та низька вартість порівняно з експериментами.	Точність залежить від адекватності моделі, може вимагати значних обчислювальних ресурсів, проблеми зі збіжністю симуляцій.	Аналіз поведінки тиристорних модуляторів на системному та схемотехнічному рівнях, проектування та оптимізація схем.
Експериментальні дослідження	Фізичні вимірювання електричних та теплових параметрів тиристора в реальних умовах.	Отримання достовірних даних про поведінку реальних приладів, перевірка математичних моделей та результатів симуляції.	Висока вартість обладнання, складність проведення експериментів з високими напругами та струмами, часові обмеження та потенційні ризики.	Характеристика нових типів тиристорів, перевірка моделей, дослідження поведінки в умовах, близьких до експлуатаційних.

Висновки

Аналітичні, програмні та експериментальні методи є взаємодоповнюючими інструментами для аналізу перехідних процесів у тиристорних модуляторах сигналів. Аналітичні методи забезпечують фундаментальне розуміння та дають можливість отримати первинні оцінки, особливо для простих систем. Програмні методи, завдяки можливості моделювання складних нелінійних систем, є необхідними для детального аналізу та перевірки результатів.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку більш точних та обчислювально ефективних моделей тиристорних модуляторів сигналів, особливо з застосуванням нових типів тиристорів, таких як SiC-тиристори. Вдосконалення методів мультифізичного моделювання, що враховують взаємодію електричних, теплових та електромагнітних процесів, також є перспективним напрямком. Розвиток методів моделювання в реальному часі та тестування HIL відкриває нові можливості для проектування та перевірки тиристорно-керованих систем. Поглиблене дослідження перехідної стабільності систем з тиристорними пристроями FACTS та розробка нових стратегій керування для підвищення надійності та ефективності також залишаються важливими напрямками досліджень.

References

1. Jamhoria, S., & Srivastava, L. (2014). Applications of thyristor controlled series compensator in power system: An overview. In *2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPSCICON.2014.6887516>
2. Gupta, R., Lamba, R., & Padhee, S. (2012). *Thyristor Based Speed Control Techniques of DC Motor: A Comparative Analysis*. International Journal of Scientific and Research Publications, 2(6), 1–6.
3. Liu, H., Wang, J., Liang, S., Yu, H., Deng, G., Wang, Y., & Shen, J. (2022). Modeling and analysis of SiC GTO thyristor's dynamic turn-on transient. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 69(11), 1–8. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3208218>

4. Liu, C., Xing, P., Zhang, S., Chen, W., Sun, R., Xu, X., Xia, Y., Xin, Y., Shi, Y. J., Li, Z., & Zhang, B. (2023). Study on transient turn-on characteristics of pulse power thyristor-type devices under ultrahigh di/dt condition. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 70(2), 640–646. <https://doi.org/10.1109/TED.2022.3232320>
5. Quintero, R., Cerdeira, A., & Ortiz-Conde, A. (2002). Quasi-three-dimensional SPICE-based simulation of the transient behavior, including plasma spread, of thyristors and over-voltage protectors. *Microelectronics Reliability*, 42(1), 67–76. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(01\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(01)00131-7)
6. Zhang, Q., Agarwal, A., Capell, C., Cheng, L., O'Loughlin, M., Burk, A., Palmour, J., Temple, V., Ogunniyi, A., O'Brien, H., & Scozzie, C. J. (2011). SiC super GTO thyristor technology development: Present status and future perspective. In *2011 IEEE Pulsed Power Conference* (pp. 1530–1535). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PPC.2011.6191677>
7. Vikas, M., & Singh, B. K. (2013). Dynamic modeling of six pulse rectifier using MATLAB. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2(7), 259–263.
8. Asadi, F., & Eguchi, K. (2019). *Simulation of power electronics converters using PLECS®*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-02253-7>
9. Zekry, A., Sayah, T., & Soliman, F. (2014). SPICE model of thyristors with amplifying gate and emitter-shorts. *IET Power Electronics*, 7(3), 541–549. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0158>
10. Parisi, C., Raciti, A., & Sciacca, A. (2019). Improving Energy Efficiency in Industrial Drives Using SiC MOSFETs. In *PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1-5). VDE.
11. Wong, K. Y., Lauritzen, P. O., Venkata, S. S., Sundaram, A., & Adapa, R. (1996). An SCR-GTO model designed for a basic level of model performance. In *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference* (Vol. 3, pp. 1517–1523). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IAS.1996.559268>
12. Walls, M., Fierro, A., Dickens, J., Mankowski, J., & Neuber, A. (2016). A variable resistance thyristor-type switch modeling technique. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(1), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2597858>
13. Akolkar, S., & Jariwala, H. (2023). A novel methodology for fault sensing in presence of power swing for transmission line with thyristor controlled series compensator. *Advanced Engineering Forum*, 50, 59–72. <https://doi.org/10.4028/p-AE5sF2>
14. Vuorenpää, P., Järventausta, P., & Lavapuro, J. (2008). Dynamic modeling of thyristor controlled series capacitor in PSCAD and RTDS environments. In *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, NORPIE/2008* (pp. 6). Espoo, Finland.
15. Bacic, M. (2005). On hardware-in-the-loop simulation. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 3194–3198). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582653>