

Г.М. СТРУНКІН

## ДРОСЕЛЬ СНАББЕРУ ДЛЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ОБМЕЖУВАЧА НАПРУГИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

**Вступ.** Вирішення задачі обмеження напруги на тяговій підстанції при рекуперації рухомого складу міського електротранспорту потребує конструювання потужних перетворювачів типу чоппер. Розробка дроселів для снабберів силових перетворювачів завжди стискається з необхідністю врахування специфічних вимог, які потребують врахування електромагнітних процесів в них. Для потужного чоппера на тяговій підстанції серед таких вимог є потреба працювати в умовах великих постійних значень струмів та наявності вищих гармонік пульсацій струму, які вносять вклад при урахуванні скін-ефекту в провіднику. **Мета.** Мета статі – показати на прикладі практичного розрахунку снабберного дроселя силового перетворювача практичні підходи до розв’язання вищезначеної проблеми. **Методи.** Методи, що використовувались даній статі: гармонійний аналіз пульсацій струму дроселя, моделювання в програмі PSIM, метод фізичного експеримента в лабораторії, прямі вимірювання індуктивності L-метром. **Результати.** Розроблений дросель використано в серійній продукції ТОВ «Плутон ІС». Експлуатація дроселей виявила добру повторювальність конструкції та його функціональну закінченість. **Висновки.** При розрахунку дроселя снаббера потужного чоппера розрахунки його перетину потрібно проводити з урахуванням вкладу вищих гармонік пульсацій.

**Ключові слова:** снаббер, чоппер, дросель, гармоніки, скін-слой.

H.M. STRUNKIN

## SNABBER CHOKE FOR TRANSISTOR VOLTAGE LIMITER OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION SUBSTATION

**Introduction.** Solving the problem of limiting the voltage at the traction substation during the recovery of the rolling stock of urban electric transport requires the design of powerful chopper-type converters. The development of chokes for snubbers of power converters is always constrained by the need to take into account specific requirements that require consideration of electromagnetic processes in them. For a powerful chopper at a traction substation, among such requirements is the need to operate in conditions of large constant current values and the presence of higher harmonics of current ripples, which contribute to taking into account the skin effect in the conductor. **Purpose.** The purpose of the article is to show practical approaches to solving the above problem using the example of a practical calculation of a snubber choke of a power converter. **Methods.** Methods used in this article: harmonic analysis of inductor current pulsations, simulation in the PSIM program, physical experiment method in the laboratory, direct inductance measurements with an L-meter. **Methods.** Methods used in this work: harmonic analysis of inductor current ripples, simulation in the PSIM program, physical experiment method in the laboratory, direct inductance measurements with an L-meter. **Results.** The developed choke was used in serial production of Pluton IC LLC. Operation of the chokes revealed good repeatability of the design and its functional completeness. **Conclusions.** When calculating the snubber choke of a powerful chopper, calculations of its cross-section must be carried out taking into account the contribution of higher harmonics of pulsations.

**Keywords:** snubber, chopper, choke, harmonics, skin layer.

**Вступ.** Проектування снабберних ланцюгів у потужних перетворювачах є складним завданням, що поєднує глибокі теоретичні знання з інженерною інтуїцією та експериментальним підходом, про що наголошував професор S. Ven-Yaakov [1]. У межах розробки систем захисту для міського електротранспорту спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було створено транзисторний обмежувач перенапруг ОНТр на базі чоппера, що стабілізує напругу на шинах підстанції шляхом розсіювання рекуперованої енергії на резисторах [2]. Ключовим етапом проектування пристрою став вибір структури снаббера для формування безпечної траєкторії перемикання IGBT-модулів. Попри наявність багатьох описів стандартних схем у літературі [3, 4], їх пряме застосування ускладнюється неможливістю точно визначити індуктивність розгалуженої контактної мережі. Крім того, використання спрощених ємнісних снабберів обмежене конструктивними особливостями силових модулів (наприклад, виробництва Semikron [5]), що зумовлює необхідність індивідуального розрахунку параметрів для кожного конкретного випадку.

Використання складного снаббера дозволяє не враховувати значення індуктивності контактної мережі, натомість потребує розробки спеціального дроселя для обмеження швидкості наростання струму колектору силового транзистора. Однак стандартний розрахунок дроселя [6] стискається зі складною формою струму, який проходить через цей елемент. Розробнику потрібен практичний

алгоритм конструювання такого дроселя з урахуванням форми струму.

**Метою** даної роботи є розробка інженерної методики розрахунку дроселя снаббера для транзисторного перетворювача у складі обмежувача напруги тягової підстанції міського електротранспорту.

**Основна частина.** На рис. 1 наведено схему снаббера потужного чоппера, який використано в обмежувачі напруги тягової підстанції [7].

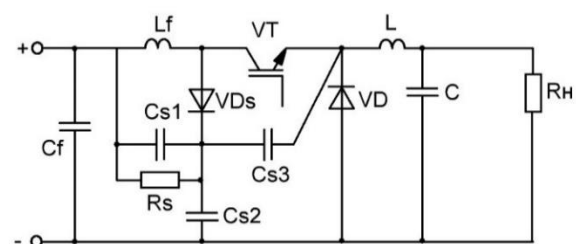


Рис. 1. Схема снаббера потужного чоппера

Основними елементами схеми є транзистор VT та діод VD, що утворюють імпульсний знижуючий перетворювач (чоппер або BUCK-converter) [7]. Параметри керування передбачають частоту комутації 1 кГц при максимальному коефіцієнті заповнення 0,8. Згладжування пульсацій забезпечується C-фільтром, а роль навантаження  $R_n$  виконують резистивні блоки серії БР6. Для обмеження швидкості наростання колекторного струму  $I_k$

© Стрункін Г.М., 2026

застосовано снаббер ввімкнення на базі дроселя  $L_f$ , який створює часову затримку ввімкнення транзистора щодо моменту відновлення запірних властивостей діода VD. Детальний опис роботи снаббера описано в роботі [7], тому сконцентруємось на розрахунку конструктивних параметрів індуктивності дроселя. Оскільки час обриву зворотного струму діода становить близько 0,25 мкс [5], розрахункова затримка ввімкнення транзистора має складати  $t_s = 0,5 - 1$  мкс [3]. Для струму амплітудою 150 А, яка обумовлена електромагнітними процесами в перетворювачі, необхідна індуктивність дорівнює:

$$L_f = U_k / \left( \frac{di}{dt} \right). \quad (1)$$

Обмежена швидкість наростання струму  $\frac{di}{dt}$  дорівнює відношенню амплітуди струму до часу затримки ввімкнення транзистора. Розрахунки показують, що потрібна індуктивність дроселя повинна складати 4 мкГн.

Таким чином, вихідними даними для розрахунку дроселя снабберу є його індуктивність 4 мкГн, робочий струм 150 А та частота пульсацій струму 1 кГц.

Через те, що дросель використовується у ланцюзі імпульсного струму з великою постійною складовою, було обрано повітряний варіант (без осердя). Враховуючи, що потрібна індуктивність невелика, можливо обмежитись використанням одношарової котушки. Для зручності розрахунок потрібної кількості витків проведено за допомогою онлайн-калькулятора [8], заснованого на методиці [9]. Результати розрахунку показано на скріншоті рис. 2.

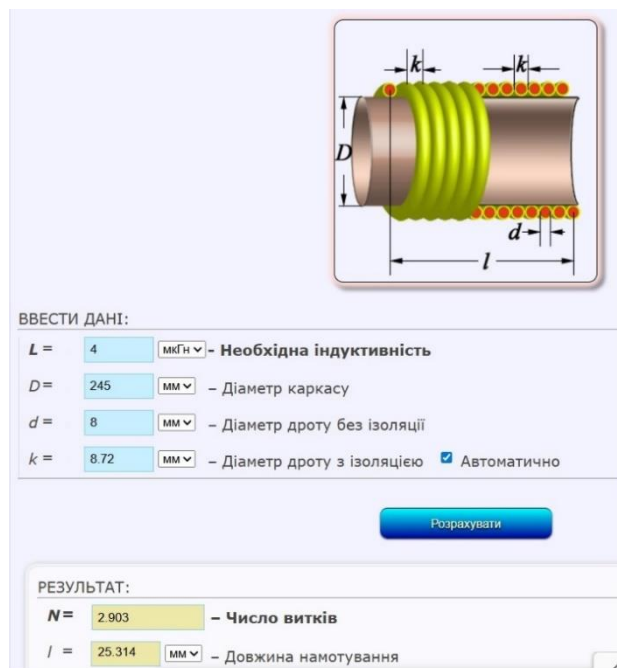


Рис. 2. Форма онлайн-калькулятора для розрахунку потрібної кількості витків дроселя

Діаметр дроселя обрано з міркувань максимально можливої величини, яка поміститься в шахту охолоджувача силового транзистора шириною 250 мм, що підвищить конвекцію повітря в дроселі та покращить його охолодження. Відповідно, для діаметру 245 мм було отримано значення 3 витка.

Для розрахунку перетину проводу, з якого буде виготовлено дросель, потрібно задатись щільністю струму в провіднику. Нестача досвіду розробки таких дроселей призвела до суттєвої помилки: стандартна методика розрахунку перетину через допустиму щільність струму для міді  $j = 3 \text{ А/мм}^2$  та враховуючи тільки пульсацію від першої гармоніки з частотою 1 кГц при випробуваннях призвела до суттєвого перегрівання дроселю. Розрахований перетин в  $50 \text{ мм}^2$  і обирання для конструювання гнучкого кабелю ВВГнг-50 виявилися хибним. Аналіз причин невдалого конструювання призвів до висновку, що в стандартній методиці розрахунку дроселя не було враховано скін-ефект для вищих гармонік (більше ніж 1 кГц) через складну форму струму дроселя (рис. 3, а). Гармонійний склад пульсацій струму, який отримано за допомогою моделювання у програмі PSIM, зображено на рис. 3, б.

Надалі було розраховано величину кожної гармоніки до десятої, та обчислено глибину «скін-слою»  $\delta$  в мм, яка відповідає частоті  $f$  за формулою [10] (для міді):

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{f}}. \quad (2)$$

Результати розрахунків зведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Глибина «скін-слою» кожної гармоніки струму

Гармоніка	Частота, Гц	Струм, А	Скін-слою, мм
0 (DC)	0	150	
1	1000	55,6	2,09
2	2000	44,9	1,48
3	3000	29,8	1,21
4	4000	13,6	1,04
6	6000	9,5	0,85
7	7000	12,9	0,79
8	8000	11,1	0,74
9	9000	5,9	0,69

Було вирішено виконати обмотку дроселя примітивним літцендратом – кілька кабелів ВВГнг сплести в «кошицю». Вважаючи, що для повного використання кабелю першою гармонікою 1 кГц потрібен діаметр, який дорівнює подвоєному значенню скін-слою, тобто 4 мм, було обрано кабель перетином  $16 \text{ мм}^2$ . А, відповідно, кількість кабелів повинна становити  $50/16 \approx 3$  штуки.

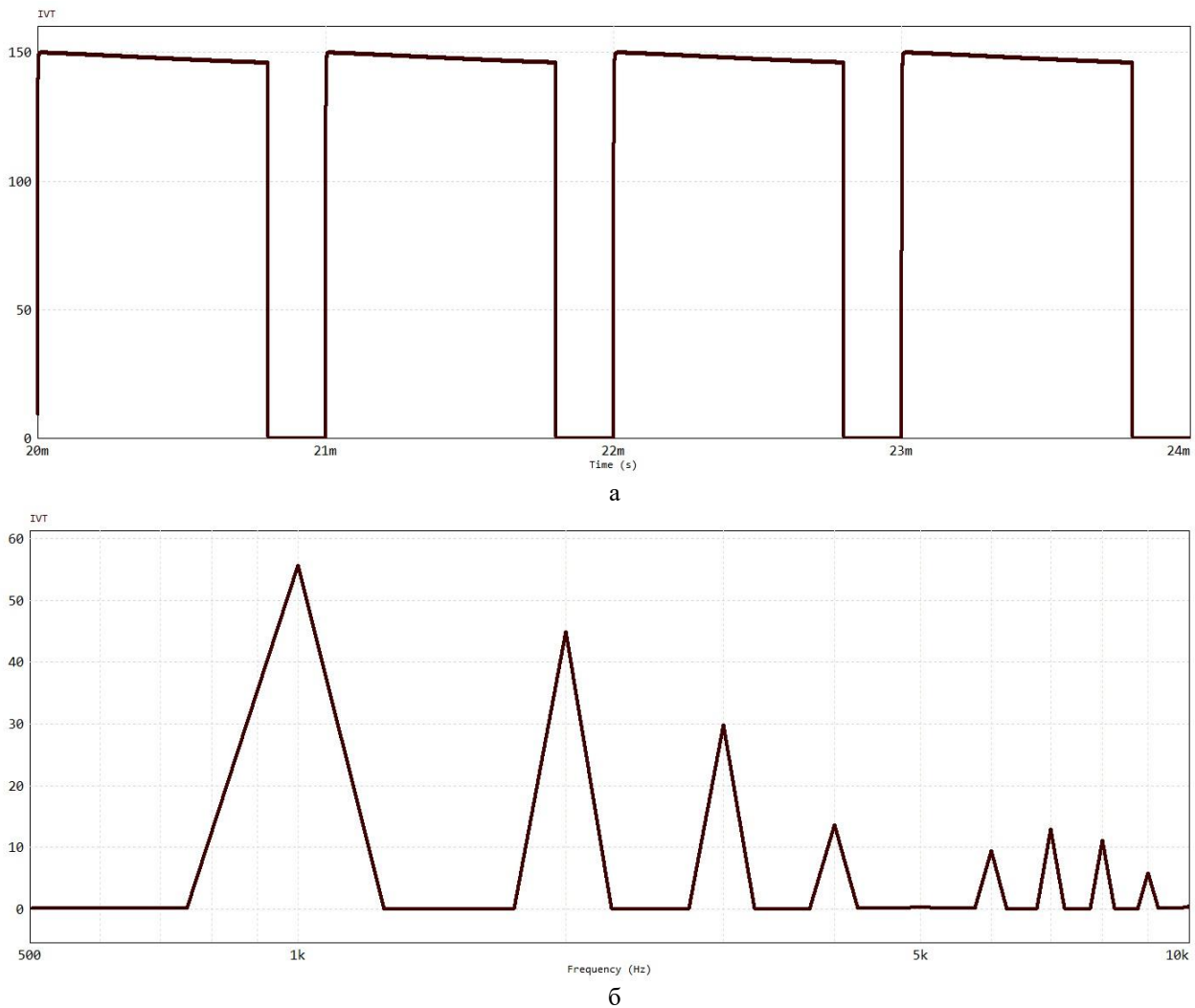


Рис. 3. Форма струму дроселя (а) та його гармонійний склад (б)

Випробування у лабораторії ТОВ «Плутон ІС» показали:

- дросель не перегрівається;
- індуктивність дроселя становить 4,7 мкГн замість потрібної 4 мкГн.

Відхилення реальної величини індуктивності від розрахунку обумовлене змінним діаметром «косиці» та індуктивністю виводів дроселя. Враховуючи, що індуктивність снаберного дроселя повинна мати значення, близьке до оптимізованого, було скорочено кількість витків з 3 до 2,5. Вимірювання L-метром індуктивності дроселя з такими параметрами і надало результат 3,9 мкГн. Було розроблено креслення дроселя (рис. 4) та запущено його у виробництво.

Край кожного кабелю ВВГнг-16 звільнявся від ізоляції, та всі три оголених провали було обтиснуто одним наконечником кабельним мідним силовим лудженням без ізоляції для кабелю 50 мм під болт М8. Витки фіксувалися за допомогою хомутів 200x4,8 для витримки форми дроселя.

Виготовлення дроселів для серії обмежувачів напруги ОНТр виявило добру повторювальність, відсутність зауважень та функціональну завершеність.

Таким чином, алгоритм розрахунку дроселя для снабера потужного чоппера наступний:

- розрахунок потрібного значення індуктивності, виходячи з допустимої швидкості наростання струму силового транзистора;
- обчислення значення струму через снаберний дросель, виходячи з аналізу електромагнітних процесів в перетворювачі;
- розрахунок допустимої швидкості наростання струму силового транзистора за його паспортними даними;
- отримання значення потрібної індуктивності снаберного дроселя за формулою (1);
- обчислення за допомогою онлайн-калькулятора [8] або за методикою [9] кількості витків дроселя;
- гармонійний аналіз пульсацій струму дроселя за результатами осцилографування струму або моделювання;
- розрахунок перетину провалу, виходячи з допустимої щільності струму;

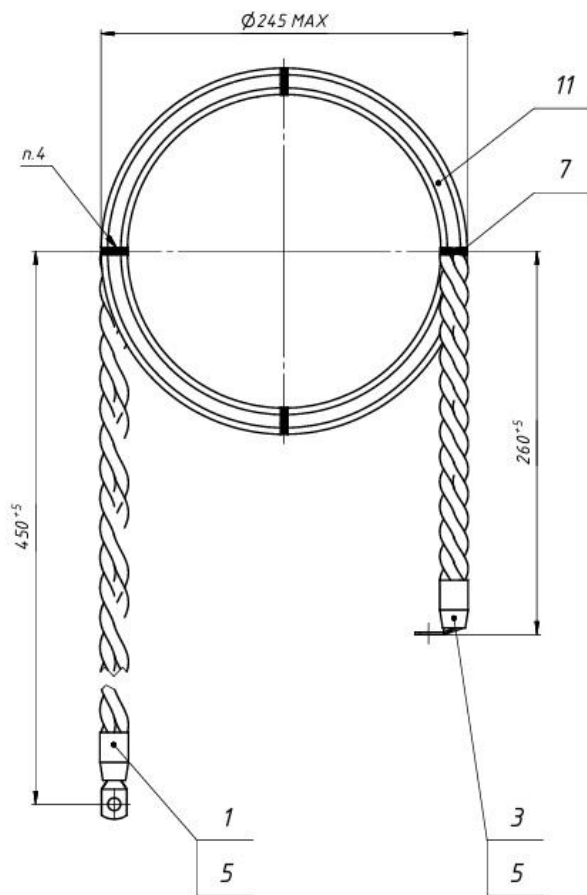


Рис. 4. Креслення дросельно снаббера

- обчислення глибини скін-слою по кожній гармоніці за формулою (2);
- розрахунок потрібного діаметру провoda, виходячи з подвійної глибини скін-слою першої (або найбільшої) гармоніки;
- розрахунок кількості кабелів для формування літцендрату;
- вимірювання індуктивності конструйованого дроселя та корегування кількості витків за потреби.

Таким чином, розроблена методика розрахунку дроселя снаббера для потужного чоппера тягової підстанції дозволила побудувати промисловий зразок із заданими технічними параметрами.

#### Список літератури

1. The Role of Intuition in Power Electronics: Contributions by S. Ben-Yaakov. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/role-intuition-power-electronics-contributions-shmuel-sam-amc0e/?trackingId=PvS5vZM6RxGqRVvn1bejPw%3D%3D> (accessed 10.03.2026).
2. Стрункін, Г. (2025). Обмежувач напруги для тягових підстанцій

- міського електротранспорту. Технічні науки та технології, (1 (39)), 307–314. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-307-314](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-307-314).
3. Barry W. Williams Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications, and Passive Components. 2006. – 1432p.
4. A. Rodrigues Vaz and F. Lessa Tofoli, "Practical design of a DC-DC buck converter using an RCD snubber," 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257240>.
5. <https://www.semikron-danfoss.com/products/p/skm400gar176d-21916970?tab=documents> (accessed 10.03.2026).
6. Чунихин А.А. Аппараты высокого напряжения: Учеб. пособие для вузов / А.А. Чунихин, М.А. Жаворонков. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 432с.
7. Стрункін Г.М. Досвід розробки снаббера для чоппера для тягової підстанції. // Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених [Електронний ресурс]. - Миколаїв: НУК, 2025. – 135 с., С.100-102.
8. <https://coil32.net/ru/calc/one-layer.html> (accessed 10.03.2026).
9. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. - 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. - 488с.
10. Steinmetz, C. P. (1916). Theory and calculation of alternating current phenomena (5th ed.). McGraw-Hill Book Company.

#### References (transliterated)

1. The Role of Intuition in Power Electronics: Contributions by S. Ben-Yaakov. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/role-intuition-power-electronics-contributions-shmuel-sam-amc0e/?trackingId=PvS5vZM6RxGqRVvn1bejPw%3D%3D> (accessed 10.03.2026).
2. Strunkin, G. (2025). Obmezhuвач napруги dlya tyagovyh pidstancij miskogo elektrottransportu. Tehnichni nauki ta tehnologiyi, (1 (39)), 307–314. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-307-314](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-307-314).
3. Barry W. Williams Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications, and Passive Components. 2006. 1432p.
4. A. Rodrigues Vaz and F. Lessa Tofoli, "Practical design of a DC-DC buck converter using an RCD snubber," 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257240>.
5. <https://www.semikron-danfoss.com/products/p/skm400gar176d-21916970?tab=documents> (accessed 10.03.2026).
6. Chuniyin A.A. Apparaty vysokogo napryazheniya: Ucheb. posobie dlya vuzov / A. A. Chuniyin, M.A. Zhavoronkov. - M.: Energoatomizdat, 1985. - 432s.
7. Strunkin G.M. Dosvid rozrobki snabbera dlya choppera dlya tyagovoyi pidstanciyi. Avtomatika ta elektrotehnika: Materiali Vseukrayinskoyi naukovy-technichnoyi konferenciyi studentiv, aspirantiv ta molodih vchenih [Elektronnij resurs]. Mikoalayiv: NUK, 2025. – 135 p., Pp.100-102.
8. <https://coil32.net/ru/calc/one-layer.html> (accessed 10.03.2026).
9. Kalantarov P.L., Cejtlin L.A. Raschet induktivnostej: Spra vochnaya kniga. - 3-e izd., pererab. i dop. L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1986. - 488s.
10. Steinmetz, C. P. (1916). Theory and calculation of alternating current phenomena (5th ed.). McGraw-Hill Book Company.

Надійшла (Received) 13.03.2026

Прийнята (Accepted) 14.04.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

**Стрункін Гліб Миколайович (Strunkin Hlib)** – магістр, інженер, відділ Приводу та перетворювачів ТОВ «Плутон ІС», м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>; e-mail: [strunkingleb@gmail.com](mailto:strunkingleb@gmail.com).