

УДК 621.314

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ КОМПРЕСІЙНИХ МАГНІТНО-НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИБОРІВ ДЛЯ ІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЛАЗЕРІВ

І.В.Волков<sup>1</sup>, член-кор. НАН України, В.І.Зозульов<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Д.О.Шолох<sup>3</sup>,  
<sup>1,2,3</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

*Розглянуто результати досліджень основних аспектів проблеми побудови компресійних магнітно-напівпровідникових генераторів та перетворювачів, отриманих під час виконання НДР «Доза-2». Викладено науково-технічні основи побудови компресійних пристроїв. Наведено низку запропонованих компресійних генераторів, перетворювачів та їхніх вузлів. Бібл. 7, табл. 1, рис. 9.*

**Ключові слова:** магнітно-напівпровідниковий генератор, компресійні пристрої, вузли магнітної компресії, дросель насичення.

**Вступ.** Компресійні пристрої (КП) – генератори та перетворювачі потужних імпульсів – базуються на вузлах компресії імпульсів (ВКІ), в яких створюється запас електричної енергії в ємнісних накопичувачах протягом порівняно великого відрізка часу та наступне звільнення цієї енергії за значно меншим відрізком часу. Найбільш перспективними для сучасних технологій вважаються генератори та перетворювачі імпульсів мікро- та наносекундної тривалості, амплітудою струму до 1 кА, напруги – до 30 кВ та частотою повторення до 40 кГц.

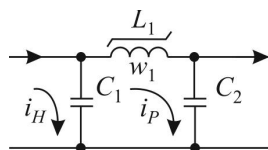


Рис. 1

Елементарна ланка ВКІ (а її може бути до 4–5) складається з двох конденсаторів та ключа, що їх з'єднує і здійснює перемикання з режиму накопичування енергії на режим розряду (рис. 1). Такі ключі можуть бути 3-х типів: напівпровідниковими, магнітно-напівпровідниковими та суто магнітними. На рис. 1 зображено саме магнітний ключ (М-ключ) – комутаційний дросель КД з прямокутною петлею гістерезиса осердя (відзначимо, що функцію М-ключа може виконувати і комутаційний трансформатор КТ).

На відміну від лінійних індуктивних елементів силової електроніки КД і КТ мають два режими роботи – намагнічування та насичення, причому обидва режими обумовлюють полярні вимоги до КД та КТ з точки зору досягнення кращих показників роботи. Так, наприклад, для режиму намагнічування число витків КД доцільно вибирати, виходячи з вимоги  $w = w_m \textcircled{R} w_m^{\max}$ , а у режимі насичення, навпаки –  $w = w_s \textcircled{R} w_s^{\min}$ .

Що стосується ВКІ, то їхній устрій та функції залежать як від вибору типу ключа, так і місця встановлення ВКІ в структурі генератора чи перетворювача, а також їхнього поланкового призначення. Багатоваріантність і багатофункційність ВКІ та згадані полярні вимоги до КД (КТ) є складними передумовами при побудові ефективних магнітно-напівпровідникових генераторів та перетворювачів (МНГ і МНП). Їхньому якісному проектуванню заважають також і недостатність знань за даною проблемою, а саме: майже не висвітлені в літературі МНГ, які формують із різнополярних імпульсів двотактні однополярні; не виявлені однополярні МНГ, в яких при перемагнічуванні трансформатора зарядними імпульсами створюється високонадійний режим роботи ключів; недостатньо інформації щодо: різнополярних МНГ, парно-різнополярних МНГ, МНГ із перезарядними вузлами та універсальних МНГ; зовсім відсутні відомості щодо МНП імпульсів. Потребують дослідження шляхи мінімізації тривалості компресійних імпульсів, структурної оптимізації МНГ (МНП), узгодження з навантаженнями, особливо з низькоомною та/або індуктивною складовою.

Виходячи із наведених особливостей ВКІ та браку знань за даною проблемою, було поставлено задачу створення науково-технічних основ побудови ефективних МНГ і МНП у цілому, обов'яз-

ково підкріпивши їх низкою запропонованих компресійних пристроїв, які відповідають положенням цих основ.

**Основні положення і рекомендації щодо побудови ефективних компресійних пристроїв.**

Обґрунтування доцільних схемо-технічних рішень і засобів оптимізації ефективних компресійних пристроїв як результат проведених досліджень і чисельних експериментів пропонується у вигляді таких основних положень.

**Положення 1.** Збільшення коефіцієнта компресії імпульсів у структурних вузлах компресійних пристроїв є основною умовою досягнення найкращих показників ефективності КП.

Загальний коефіцієнт компресії імпульсів у часі  $K_{K\Sigma}$  для всього КП є добуток

$$K_{K\Sigma} = \prod_{i=1}^n K_{Ki} ,$$

де  $K_{Ki}$  – коефіцієнт компресії імпульсів  $i$ -го вузла з загального числа всіх  $n$  вузлів пристрою визначається як

$$K_{Ki} = \tau_{Hi} / \tau_{Pi} , \tag{1}$$

а  $\tau_{Hi}$ ,  $\tau_{Pi}$  – тривалості відповідно накопичувального та розрядного імпульсів  $i$ -го ВКІ.

Вочевидь, за умов  $K_{Ki} \otimes K_{Ki}^{\max}$  кількість ВКІ в структурі КП зменшується, а тому покращуються і масогабаритні показники. Для обрання шляхів досягнення цієї умови проаналізуємо схему ВКІ (рис. 1), де  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – відповідно індуктивність комутаційного дроселя, ємність накопичувального конденсатора та конденсатора навантаження, та наведемо співвідношення, необхідні для подальшого розрахунку:

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{U_m \tau_H}{\Delta B_S S_1} \quad (2-1); & L_{1(s)} &= \frac{\mu_0 \mu_{(s)} S_1 w_1^2}{l_{cp}} \quad (2-2); & I_m w_1 &= H_m l_{cp} \quad (2-3); \\ \tau_p &= p \sqrt{L_{1s} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}} \quad (1-4); & U_m &= I_m \sqrt{\frac{L_{S1}}{C_1}} \quad (2-5); & W_{C1} &= \frac{C_1 U_m^2}{2} \quad (2-6); \end{aligned} \tag{2}$$

де  $\tau_H$ ,  $\tau_p$  – час накопичування енергії  $W_{C1}$  на конденсаторі  $C_1$  і її розряду на конденсатор  $C_2$  через індуктивність  $L_{S1}$  насиченого дроселя  $L_1$ ;  $\Delta B_S$  – прирощення індукції намагніченості (насичення) осердя дроселя  $L_1$ ;  $U_m$ ,  $I_m$  – відповідно максимальні напруга на конденсаторі  $C_1$  та струм через дросель  $L_1$ ;  $S$ ,  $l_{cp}$  – площа поперечного перетину та довжина середньої лінії осердя дроселя  $L_1$ ;  $L_{1(s)}$  або  $L_1$ ,  $L_{S1}$  – індуктивності дроселя  $L_1$  у стані намагнічування та насичення;  $w$  – кількість витків дроселя  $L_1$ ;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму в системі СІ;  $\mu_{(s)}$  або  $\mu$ ,  $\mu_s$  – відносні магнітні проникності дроселя  $L_1$  у стані намагнічування та насичення;  $H_m$  – напруженість магнітного поля в осерді дроселя  $L_1$ .

Із співвідношень (1), (2) одержимо вираз для коефіцієнта компресії в залежності від величин  $\Delta B_S$ ,  $H_m$ ,  $\mu_s$ , які вибираються при побудові ВКІ за методикою, наведеною в [1],

$$K_K = \frac{\sqrt{2}}{\pi \cdot \mu_0} \cdot \frac{\Delta B_S}{\mu_s H_m} . \tag{3}$$

За підсумками аналізу виразу (3), систематизації проведених досліджень та публікацій нижче сформульовані наступні правила щодо досягнення умови  $K_K \otimes K_{Kn}^{\max}$ .

*Перше.* Слід застосовувати магнітні матеріали з найбільшим значенням  $\Delta B_S$ , якщо це дозволяють їхні частотні обмеження. В одноконтурних КП створювати умови перемагнічування осердь індуктивних елементів (ІЕ) за найбільшою петлею гістерезису.

*Друге.* Значення добутку величин  $\mu_s \cdot H_m$  вибрати мінімальним, виходячи із залежності  $\mu = f(H)$ . Орієнтовно значення  $H_m$  вибирається за перегином кривої  $\mu = f(H)$ , коли значення  $\mu$  вже далі майже не зменшується. Лише потім має визначатися кількість витків  $w_1$  за виразом (2).

*Третє.* Слід застосовувати НП-ключі з найменшим часом їхнього відновлення, а для М-ключів створювати можливе перекриття в часі суміжних імпульсів струму. Це дає можливість зменшити значення  $\tau_H$  в (1), (2) та відповідно кількість витків  $w_1$ .

*Четверте.* В першому або/чи другому ВКІ застосовувати НП-ключ, якщо його комутаційні можливості сприяють умовам  $K_K \otimes K_{Kn}^{\max}$  та вибраним критеріям оптимізації КП.

*П'яте.* Застосовувати в однотактних однополярних МНГ перезарядні вузли (рис. 4, а), якщо їхнє введення сприяє розширенню функцій МНГ або дає в конкретних умовах вигоду згідно з прийнятими критеріями оптимізації МНГ в цілому.

*Шосте.* В однотактних однополярних МНГ застосовувати зустрічне підмагнічування індуктивних елементів (ІЕ), в тому числі за допомогою зарядних імпульсів та створювати на передтрансформаторних конденсаторах ненульові початкові умови.

*Сьоме.* Застосовувати, де дозволяє навантаження, різнополярні КП або двотактні однополярні МНГ (рис. 5, а).

Із (3) видно, що проблема  $K_K \otimes K_K^{\max}$  зводиться до умов  $m_{\text{зал}} \otimes m_{\text{зал}}^{\min}$ , тобто залишкове значення  $m_{\text{зал}} \otimes m_{\text{зал}}^{\min}$ . Типові експериментальні дані по цих величинах, як приклад для порівняння, наведено в таблиці.

Магнітний матеріал	$\mu$	$\mu_{\text{зал}}$			Коефіцієнти		
		$\mu_S$	$\mu_{K3}$	$\mu_K$	$K_S$	$K_{K3}$	$K_K$
Ферит НМ 2000	2025	25	30	5,2	81	67,5	390
АМС ММ-11Н	12400	6,1	4,5	4,3	2030	2755	2884

Примітки: 1. Параметри  $\mu_S$ ,  $\mu_{K3}$ ,  $\mu_K$  – відповідно при: насиченому осерді; режимі КЗ у керуючій обмотці; при проходженні струму компенсації в керуючій обмотці. 2.  $K_S$ ,  $K_{K3}$ ,  $K_K$  – коефіцієнти мінімізації індуктивності ІЕ відповідно при режимах насичення, КЗ та компенсації.

**Положення 2.** Цільове розширення функцій структурних вузлів компресійних пристроїв суттєво сприяє ефективності їхньої роботи. Позитивний вплив додання вузлам крім основної функції ще й додатково проілюструємо декількома прикладами.

1. Різнополярні МНГ перетворюються у двотактні однополярні (на виході) МНГ, якщо в передкінцевій ланці ВКІ встановити вузол *однополяризації* імпульсів (ВОІ). Цей вузол може бути виконаний як «L-випрямляч» імпульсів на несиметричних (з обмотками підмагнічування тощо) комутаційних дроселях, включених за мостовою схемою «L-випрямлення» (вентильний аналог – міст Греца), схема якого у складі МНГ показана на рис. 5, а. ВОІ може бути також виконаний на двох несиметричних комутаційних трансформаторах, які працюють по чергово в лінійному режимі та режимі насичення [1].

2. Різнополярні МНГ перетворюються у двотактні однополярні (після імпульсного трансформатора  $T_i$ ), якщо в первинному колі  $T_i$  структури МНГ встановити два однотактних однополярних МНГ – відповідно прямих та інверсних імпульсів [6].

3. Компресійні імпульси від ВКІ( $w_1$ ) передаються трансформатором  $T_i$  на високовольтну сторону до ВКІ( $w_2$ ) без помітного зменшення коефіцієнта  $K_K$ , якщо між ВКІ( $w_1$ ) та  $w_1(T_i)$  встановити різнофункційний передтрансформаторно-узгоджувальний вузол ВКІ( $T_i$ ), як це показано у складі МНГ-1, рис. 2, а.

4. Компресійні імпульси від ВКІ( $n-1$ ) передаються із більшими коефіцієнтами  $K_K$  та крутизою їхнього фронту в навантаження, що має індуктивну складову, якщо між ВКІ( $n-1$ ) та навантаженням встановити різнофункційний кінцево-узгоджувальний ВКІ( $n$ ), як це показано у складі МНГ-1, рис. 2, а.

5. Застосування зарядно-стабілізуючого вузла в МНГ сприяє зменшенню комутаційного дроселя першого ВКІ(1) та забезпечує необхідну стабільність вихідних імпульсів МНГ щодо вхідної напруги. Схема цього вузла у складі МНГ-1 показана на рис. 2, а.

6. Застосування інверсних ВКІ в однотактних МНГ створює умови для перемагнічування імпульсного трансформатора зарядним струмом накопичувального вузла. Схема цього вузла у складі МНГ-2 показана на рис. 3, а.

7. Застосування перезарядних ВКІ на вході однотактних МНГ сприяє зменшенню комутаційних дроселів у первинному колі імпульсного трансформатора та створює умови для їхнього перемагнічування. Схема цього вузла у складі МНГ-4 показана на рис. 4, а.

8. Застосування перезарядних ВКІ на виході однотактних МНГ створює умови для формування найбільш сприятливих для певних навантажень імпульсів, наприклад, асиметричних для імпульсних лазерів. Схема такого ВКІ відповідає принципам побудови перезарядно-розмагнічувального вузла ПРВ (рис. 4, а), але із застосуванням тільки пасивних елементів.

**Положення 3.** Мінімізація сумарного об'єму індуктивних елементів та конденсаторів компресійних пристроїв визначається, в основному, місцем установки імпульсного трансформатора в структурі КП, яке напряму пов'язане з тривалістю його робочих імпульсів.

Для підтвердження цього положення знайдемо співвідношення об'ємів осердь  $V_T$  імпульсного трансформатора  $T_i$  і комутаційних дроселів  $V_L$ . З виразів (2), (3), враховуючи, що струм  $I_m$  через насичений дросель  $L_1$  є також струмом через первинну обмотку трансформатора  $T_i$ , маємо

$$V_T = \frac{\rho \sqrt{2} W_{C1}}{DB_T H_m^T}, \quad V_L = m_0 m_3 W_{C1} \frac{K_K}{K_K} \frac{\rho}{DB_S} \frac{H_m^2}{H_m^L} = \frac{\rho \sqrt{2} W_{C1}}{DB_S H_m^L} \frac{H_m^2}{H_m^L} \quad (4,5)$$

Якщо врахувати, що  $W_{C1}^T \gg W_{C1}^L$ ,  $DB_S^L \gg 0,5 DB_T$ ,  $H_m^L / H_m^T \gg (10 \dots 20)$ , то:

$$V_T / V_L = (5 \dots 10) / K_K. \quad (6)$$

З іншого боку встановлено, що за умов рівності накопичувальної енергії конденсаторами  $C_{(I)}$ ,  $C_{(II)}$  в первинному та вторинному колі  $T_i$ , їхнє відношення щодо об'єму орієнтовно таке:  $K_{CV} = V_{C(I)} / V_{C(II)} \gg (1,5 \dots 2,5)$ . Відношення ж об'ємів дроселів  $L_{(II)}$ ,  $L_{(I)}$ , які опрацьовують однакові за тривалістю імпульси, зворотнє:  $V_{L(II)} / V_{L(I)} \gg (2 \dots 3)$ . Таким чином, місце встановлення трансформатора  $T_i$  в структурі КП, яке передумовлює тривалість його трансформованих імпульсів  $t_i$ , залежить від декількох протилежних вимог і вирішальним чином впливає на сумарний об'єм силових елементів КП. Додамо, що чисельними експериментами доведено, що оптимальна тривалість імпульсів для трансформаторів з використанням аморфної сталі складає (1..2) мкс, а феритів – (0,5...2) мкс.

**Положення 4.** Місце встановлення типу ключів (напівпровідникових, магнітно-напівпровідникових та магнітних) у структурі компресійних пристроїв визначається їхніми оптимальними можливостями щодо формування компресійних імпульсів у визначеному місці структури КП, виходячи з їхніх необхідних: тривалості, рівнів струму та напруги, а також із прийнятих показників оптимізації КП. Це твердження виходить із того, що НП-ключі мають обмеження «зверху» ( $U_i^{\max}, I_i^{\max}, F_{II}^{\max}$  чи  $\tau_i^{\min}$ ), а М-ключі – обмеження «знизу» ( $F_{II}^{\min}$  чи  $\tau_i^{\max}$ , недоцільність комутації при  $U_i^{\min}, I_i^{\min}$ ). Зважаючи на ці обмеження, найбільш вигідно використовувати: у формуванні тактових імпульсів – НП-ключі чи МП-ключі, в перших ВКІ – МП-ключі, М-ключі та на високовольтній стороні – як правило, М-ключі. Додатковою особливістю ключів запропонованих МНГ та МНП є те, що НП-ключам створюються надійні режими роботи за рахунок, в першу чергу, незастосування їх на високовольтній стороні  $T_i$  та функціонування при  $t_i > (5 \dots 7)$  мкс.

**Положення 5.** Запропоновані складові М- та МП-ключі забезпечують найбільш економічне керування компресійними пристроями та сприяють розширенню різновидів структур КП. Типові схеми таких ключів показані на рис. 7.

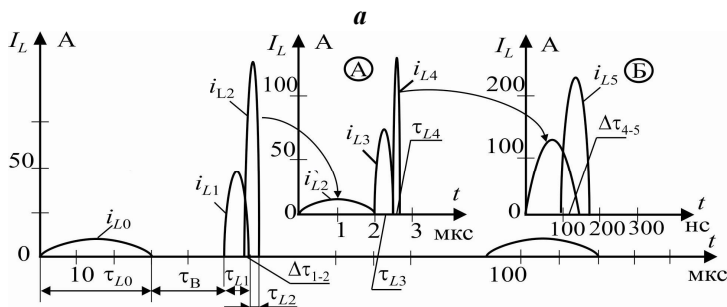
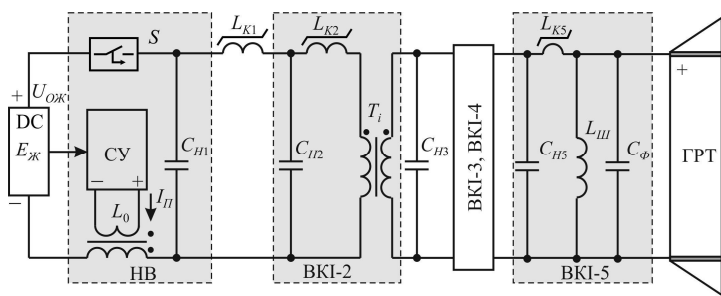
**Положення 6.** Для деяких структур компресійних пристроїв більш перспективним, ніж використання конденсаторних накопичувачів, є застосування індуктивних накопичувачів.

Відомо, що індуктивні накопичувачі більш енергоємні, але їхнє поширення стримується складністю комутації (обриву) струму. Експериментально встановлено, що за умов наявності лінійного дроселя в накопичувальному вузлі та введенню додаткового вузла «L-обриву», використання індуктивного накопичувача буде більш доцільним. Приклад відповідних схем показано на рис. 8 та рис. 9.

**Положення 7.** Крайці результати при побудові ефективних компресійних пристроїв слід очікувати при наданні переваги поліструктурності для КП та їхніх вузлів. Практика побудови компресійних та інших пристроїв силової електроніки показала, що здебільшого найкращий (оптимальний) вузол, пристрій тощо можна побудувати за допомогою не менш, ніж 2-х розподілених структур. Причому ці структури (наприклад, з різними ключами, різними станами ІЕ, з різними функціями тощо) повинні бути та стадії їхнього синтезу взаємно і в цілому адаптовані одна до одної, виходячи із визначеного показника ефективності, щоб одержати більш позитивний результат у порівнянні з одноструктурними традиційними рішенням.

**Компресійні пристрої та їхні вузли, які побудовані на науково-технічних засадах положень 1–7.**

**1. Магнітно-напівпровідниковий генератор одноктактних прямих імпульсів (МНГ-1).** Схема генератора показана на рис. 2, а, опис її наведений в [1,3], а на рис. 2, б – епюри імпульсів струмів у дроселях. Накопичувальний вузол НВ ( $S, L_0, C_{H1}$ ) генератора, крім своєї основної функції, стабілізує амплітуду напруги на конденсаторі  $C_{H1}$  за допомогою струму  $I_{II}$ , який, будучи керованим у колі зворотного зв'язку від напруги  $U_{OЖ}$ , змінює магнітний стан дроселя  $L_0$  таким чином, щоб компенсувати відхилення напруги  $U_{OЖ}$ . Це також сприяє зменшенню габаритів дроселя  $L_1$  та дає можливість застосовувати нестабілізоване джерело живлення



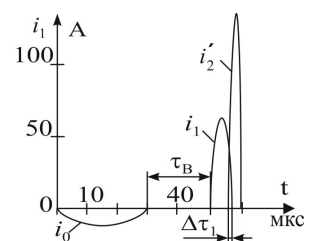
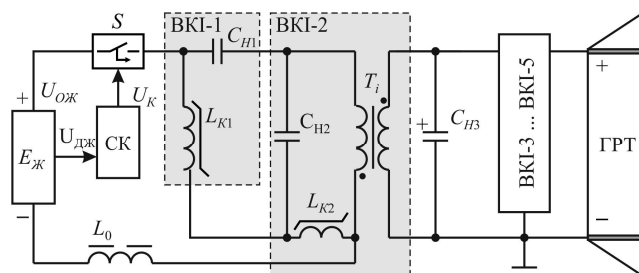
**Рис. 2**

вузол застосовується у всіх запропонованих генераторах.

ВКІ-5 призначено для ефективної передачі імпульсної енергії від МНГ у навантаження, що має індуктивну складову, певну нестабільність та потребує збільшеної крутизни фронту, наприклад, у газорозрядну трубку (ГРТ) лазера на парах міді (ЛПМ). Дроселю  $L_{K5}$  задається режим, коли суміжні струми  $i_{L4}$  та  $i_{L5}$  мають перекриватися в часі  $\Delta\tau_{4-5} \approx (0,3...0,5)\tau_4$ . Це дозволяє зменшити кількість витків  $L_{K5}$  у (1,5...2) рази і таким чином досягти нерівності  $L_{S5} \ll L_{ГРТ}$  при  $L_{S4}$  і  $L_{ГРТ}$ . Конденсатор  $C_{\Phi}$  вибирається таким, щоб крутизна фронту імпульсу збудження ГРТ була максимально можливою. Дросель  $L_{III}$  призначений для замикання міжімпульсних струмів при намагнічуванні комутаційних дроселів та флуктуаціях навантаження. Для забезпечення стійкої роботи МНГ його індуктивність  $L_{III} \ll L_{S5}$ .

Таким чином, ВКІ-5, окрім своєї основної компресійної функції, виконує функції узгодження МНГ з ГРТ, забезпечення необхідного фронту імпульсів і стійкого режиму їхньої генерації. Тобто, він також є багатофункційним і застосовується в інших запропонованих МНГ. Завдяки МНГ-1 одержано імпульси тривалістю  $\approx(80...90)$  нс, амплітудою  $\approx(220...250)$  А, від яких ГРТ типу KULON LT-1,5Сu видала потужність лазерного випромінювання на (15...20)% більше, ніж при її тестуванні зі стендовим тиратронним генератором.

**2. Магнітно-напівпровідниковий генератор однотактних однополярних інверсних імпульсів (МНГ-2).** Схема цього генератора показана на рис. 3, а, на рис. 3, б показано епюри імпульсів струмів у дроселях  $L_0, L_1, L_2$ , опис схеми дано в [1,5]; генератор має такі самі характеристики та особливості, що і МНГ-1. Виключенням є те, що осердя трансформатора  $T_i$  перемагнічується практично за симетричною петлею гістерезиса зарядними імпульсами конденсатора  $C_{H1}$ . ВКІ-1 виконує функції: компресії



**Рис. 3, а, б**

Еж. Даний НВ – найпростіший приклад багатофункційного вузла, який є більш ефективним, ніж традиційний.

Дросель  $L_{K2}$  вузла компресії імпульсів ВКІ-2 вводиться у режим насичення, коли струми  $i_{L1}, i_{L2}$  перекриваються в часі з тривалістю  $\Delta t_{1-2} \gg (0,3...0,5)t_{L1}$ , що дозволяє досягти нерівності  $L_{S2} < L_{ST}$  при  $L_{ST} < L_{S1}$ , де  $L_{S1}, L_{S2}$  – відповідно індуктивності насичення дроселів  $L_{K1}, L_{K2}$ ;  $L_{ST}$  – індуктивність розсіювання трансформатора  $T_i$ . Це дає можливість узгодити індуктивності  $L_{S1}$  і  $L_{ST}$ , забезпечивши при цьому згаданий вигідний режим трансформатора  $T_i$  при  $t_i^T \gg (1,8...2,0)$  мкс. За допомогою ВКІ-2 створюються також ненульові початкові умови на конденсаторах  $C_{H1}, C_{H2}$ , що сприяє зменшенню їхньої ємності, а у міжімпульсній паузі – перемагнічуванню  $L_{K1}, L_{K2}, T_i$ . Тобто ВКІ-2, окрім своєї основної функції – компресії імпульсів, виконує також ще три згадані функції. Такий універсальний багатофункційний

сії імпульсів, їхньої інверсії щодо зарядного імпульсу  $C_{H1}$  та сприяє перемагнічуванню  $T_i$ , тобто також є багатофункційним вузлом з притаманними таким вузлам перевагами.

Вузли ВКІ-1, ВКІ-2 доцільно також використовувати в запропонованих двоключових МНГ одноктактних однополярних інверсних імпульсів (МПГ-3), розглянутих у [4].

**3. Магнітно-напівпровідниковий генератор одноктактних однополярних інверсних імпульсів з перезарядно-розмагнічувальним вузлом (МНГ-4).** Схема цього генератора показана на рис. 4, а, на рис. 4, б показано епюри імпульсів струмів у дроселях  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ ,  $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$ , а опис схеми дано в [1]. Схема МНГ-4 в цілому має такі самі характеристики, що і схема МНГ-1. Особливістю є те, що: 1) завдяки перезарядно-розмагнічувальному вузлу (ПРВ) під час заряду конденсатора  $C_{H1}$  дросель  $L_{K1}$  блокується діодом VD, що дає змогу виключити вплив часу ( $t_{L01} + Dt_1$ ) на кількість витків  $L_{K1}$  згідно з виразом (2-1) у формулі (2); 2) при перезаряді конденсатора  $C_{H1}$  (струмом  $i_{L02}$  через  $L_{02}$ , відкритий  $S_2$ ,  $L_{K2}$ ,  $w_1$  трансформатора  $T_i$ ) всі ІЕ одночасно перемагнічуються струмом  $i_{C1}^{\mu}$  (через  $L_{K1}$ ,  $Z_{\mu}$ , відкритий  $S_2$ ,  $L_{K2}$ ,  $w_1$ ) практично по повній ( $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$ ) і симетричній ( $T_i$ ) петлі гістерезису. В експериментах, наприклад, кількість витків найбільшого дроселя  $L_{K1}$  зменшилася більше ніж вдвічі, а також помітно зменшилися габарити  $L_{K2}$  і  $T_i$ . Це ще раз підкреслює справедливність тези про ефективність багатофункційних вузлів (а саме таким є ПРВ) при застосуванні в МНГ.

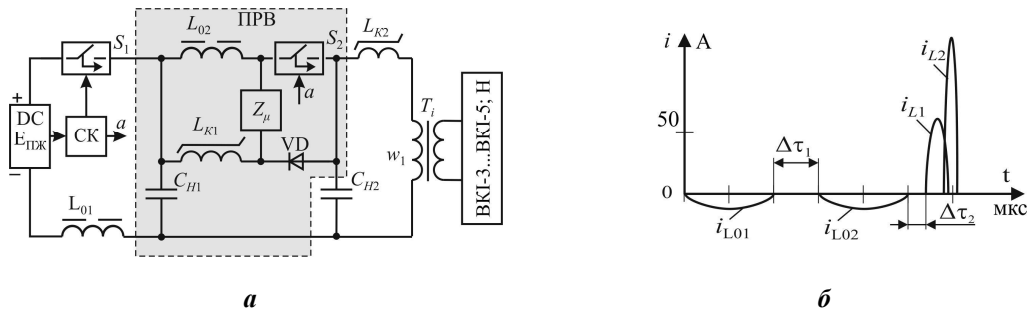


Рис. 4

**4. Магнітно-напівпровідниковий генератор з дросельним вузлом формування двоктактних однополярних імпульсів (МНГ-5).** Схема цього генератора показана на рис. 5, а, на рис. 5, б показано епюри струму в дроселях  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$ , опис схеми дано в [1,7]. Дросельний вузол однополяризації імпульсів (ВОІ), який формує двоктактні однополярні імпульси струму  $i_4^1, i_5^1$ , виконано на елементах  $L_4 (L_4', L_4'')$ ,  $L_5 (L_5', L_5'')$ ,  $C_4$ . Підмагнічування струмом  $I_{\Pi}$  вибрано так, що при струмі  $i_3^1$  насичується дросель  $L_4$  і через його складові  $L_4', L_4''$  формується струм  $i_4^1$ . При струмі  $i_4^U$  насичується дросель  $L_5$  і через його складові  $L_5', L_5''$  формується струм  $i_5^1$ . Тобто, у ВОІ в одному процесі відбувається однополяризація вхідних різнополярних імпульсів струму  $i_3 (i_3^1, i_3^U)$  і їхня компресія, внаслідок чого формуються двоктактні однополярні та ущільнені імпульси  $i_4^1, i_5^1$ . При  $Q \geq (20...50)$  струми  $i_4^{(-)}, i_5^{(-)}$  мають значення не більше (2,0...3,0)% від струмів  $I_4^m, I_5^m$ . ВОІ, окрім компресії та однополяризації імпульсів, здатний при керуванні струмом  $I_{\Pi}$ , змінювати амплітуду, полярність струмів  $I_4^m, I_5^m$ , а також створювати цуги імпульсів. Як видно, застосування ВОІ суттєво розширює функції МНГ-5 і є більш ефективним, ніж застосування напівпровідникових ключів.

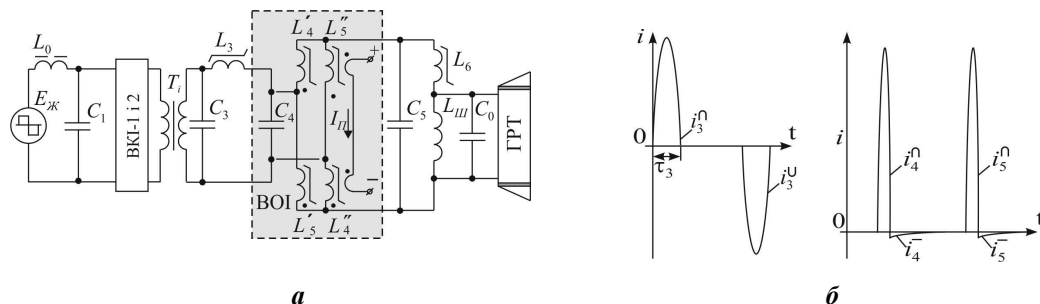


Рис. 5

Дросельний ВОІ може бути також виконаний у вигляді двох спарених трансформаторів, які по чергово працюють у лінійному та ключовому режимах, як це описано в [1]. Тут додається ще одна функція – гальванічна розв'язка МНГ із навантаженням.

У дросельному ВОІ, замінивши його складові  $L'_5$  та  $L''_4$  на конденсатори, як це описано в [1], можна сформувати ущільнені парно-різнополярні імпульси (суцільні напівсинусоїди  $i_4^{\cap}, i_5^{\cup}$  – пауза –  $i_5^{\cap}, i_4^{\cup}$ ), які доцільно використовувати в деяких імпульсних технологіях.

Використання однополяризації імпульсів є доцільним у випадках, якщо його можливо реалізувати в первинному колі різнополярного МНГ за допомогою відповідних частин МНГ прямих (рис. 2, а) та інверсних (рис. 3, а) імпульсів, як це описано в [6].

**5. Компресійні магнітно-напівпровідникові перетворювачі.** Такі пристрої слід розглядати як альтернативу традиційним суто транзисторним та тиристорним перетворювачам, які мають ті чи інші переваги в конкретних ситуаціях. Можливості побудови різноманітних компресійних МПО – аналогів традиційних суто напівпровідникових – ілюструють наведені нижче приклади.

**Магнітно-напівпровідникові однополяризатори імпульсів (МПО).** Основні схеми МПО показано на рис. 6, де стрілка « $\curvearrowright$ » вказує напрямок включення ІЕ при надходженні «+» – імпульсу на початок « $\bullet$ » обмотки. Ці схеми описані в звіті по НДР. Напівпровідниковий прилад V в схемах рис. 6, а-е може бути як діодом, так і транзистором. В останньому випадку МПО можливо додатково використовувати як **стабілізатори** чи/і **модулятори** імпульсів. Наведені схеми ілюструють також можливість створення на базі МПО **біполяризаторів**, **інверторів** та **конверторів** імпульсів.

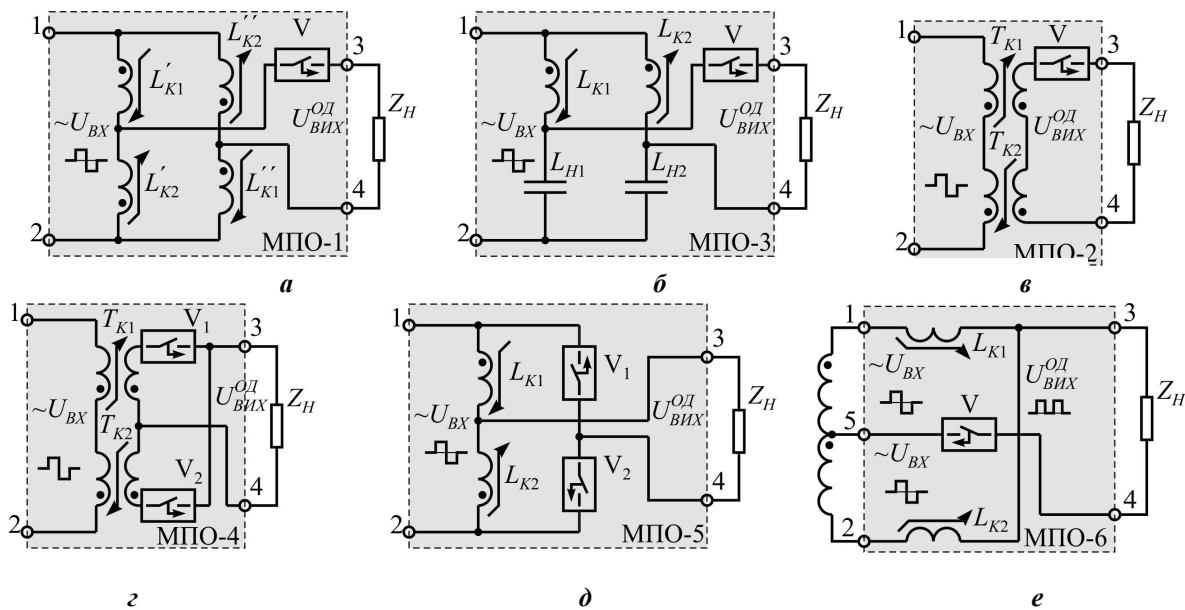


Рис. 6

**6. Складові, сполучені та спарені магнітні та магнітно-напівпровідникові ключі.** Характерні схеми цих ключів наведені на рис. 7. Складові ключі (рис. 7, а-д, е, ж) мають у колах їхнього керування менш потужні М-ключі чи МН-ключі (на зразок транзистора Дарлінгтона); сполучені ключі (рис. 6, е) мають в одному колі з'єднані різні типи ключів); спарені ключі (рис. 6, з) мають ознакою одну об'єднану схему керування двома М-ключами. Всі ці ключі побудовані на базі положень 1, 2, 4, 7; принцип їхньої дії заснований на створенні в обмотках керування  $w_Y$  силових М-ключів режиму короткого замикання допоміжними ключами того чи іншого типу.

**7. Вхідний вузол компресії імпульсів із індуктивним накопичувачем.** Схема цього вузла (ВКІ-1) з індуктивним накопичувачем (НВ-Л) показана на рис. 8. Ключ V комутує струм накопичення  $i_{L0}$  та розрядний струм  $i_{LK}$ . Тобто НВ-Л є вузлом багатофункційним, тому має зазначені вище переваги. Для полегшення роботи ключа V у момент обриву струму  $i_{L0}$  (при  $i_{LK} \approx 0$ ) доцільним є використання допо-

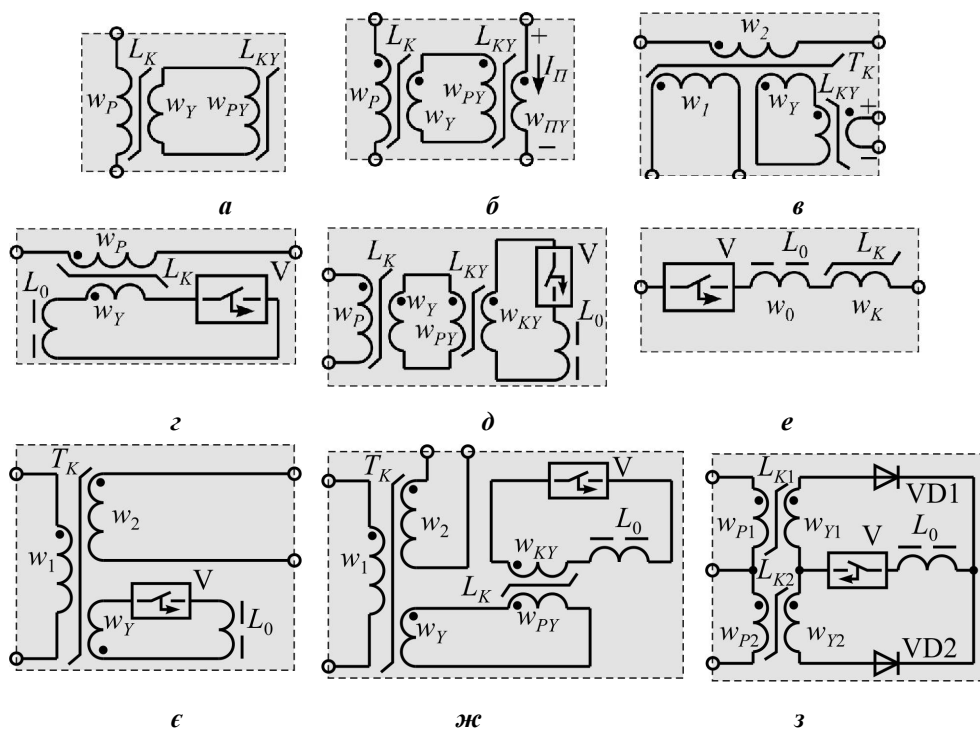


Рис. 7

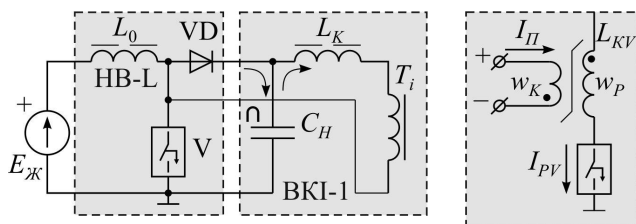


Рис. 8

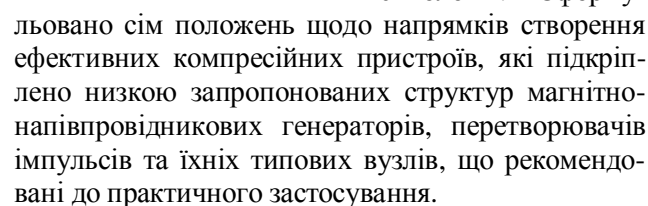


Рис. 9

міжного дроселя  $L_{KV}$  (рис. 9), який перебуває в насиченому стані при  $i_{L_0} \approx I_{L_0}^m$  і виходить із насичення при  $i_{L_0} > I_{L_0}^m$ .

### Висновки.

Виконані в рамках НДР «Доза-2» аналітичні та експериментальні дослідження є, на наш погляд, достатньою базою для вирішення проблеми створення конкурентноспроможних компресійних магнітно-напівпровідникових генераторів та перетворювачів потужних імпульсів для сучасних технологій. Сформу-

льовано сім положень щодо напрямків створення ефективних компресійних пристроїв, які підкріплено низкою запропонованих структур магнітно-напівпровідникових генераторів, перетворювачів імпульсів та їхніх типових вузлів, що рекомендовані до практичного застосування.

1. Волков И.В., Зозулев В.И., Шолох Д.А. Магнитно-полупроводниковые генераторы с разнофункциональными узлами магнитной компрессии импульсов // Техн. электродинамика. Тем. выпуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2010. – Ч.1. – С. 93–100.

Volkov I.V., Zozulev V.I., Sholokh D.O. Magnetic semiconductor generators with multifunctional nodes of the magnetic pulse compression // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2010. –Vol.1. – P. 93–100. (Rus.)

2. Зозулев В.И. Основные подходы к анализу и оптимальному построению компрессионных магнитно-полупроводниковых генераторов // Техн. электродинамика. Тем. выпуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч.3. – С. 77–81.

Zozulev V.I. Basic approaches to analysis and optimal construction of compression magnetic semiconductor generators // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2006. –Vol. 3. – P. 77–81. (Rus.)

3. Патент №40523, Україна, МПК НО3 К7/00. Магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних наносекундних імпульсів / Волков І.В., Гапченко Л.М., Зозульов В.І., Шиманський О.Л. // Промислова власність. – 2009. – № 7.

Patent №40523, Ukraine, IPC НО3 К7/00. Magnetic semiconductor generator of unipolar nanosecond pulses / Volkov I.V., Hapchenko L.M., Zozulev V.I., Shymanskyi O.L. // Promyslova vlasnist. – 2009. – №7. (Ukr.)

4. Патент №41501, Україна, МПК НО3 К7/00. Двоключовий магнітно-напівпровідниковий генератор однополярних інверсних імпульсів / Волков І.В., Гапченко Л.М., Зозульов В.І., Шолох Д.О. // Промислова власність. – 2009. – № 10.

Patent №41501, Ukraine, IPC НО3 К7/00. Two keys magnetic semiconductor generator of unipolar inverse pulses / Volkov I.V., Hapchenko L.M., Zozulev V.I., Sholokh D.O. // Promyslova vlasnist. – 2009. – №10. (Ukr.)



5. Патент №44910, Україна, МПК НОЗ К7/00. Магнітно-напівпровідниковий генератор прямих та інверсних однополярних імпульсів / Волков І.В., Гапченко Л.М., Зозульов В.І., Шолох Д.О. // Промислова власність. – 2009. – № 20.

Patent №44910, Ukraine, IPC НОЗ К7/00. Magnetic semiconductor generator of direct and inverse unipolar pulses / Volkov I.V., Napchenko L.M., Zozulev V.I., Sholokh D.O. // Promyslova vlasnist. – 2009. – №20. (Ukr.)

6. Патент №46235, Україна, МПК НОЗ К7/00. Магнітно-напівпровідниковий генератор двотактних однополярних імпульсів / Волков І.В., Гапченко Л.М., Зозульов В.І., Шолох Д.О. // Промислова власність. – 2009. – № 23.

Patent №46235, Ukraine, IPC НОЗ К7/00. Magnetic semiconductor generator of push-pull unipolar pulses / Volkov I.V., Napchenko L.M., Zozulev V.I., Sholokh D.O. // Promyslova vlasnist. – 2009. – №23. (Ukr.)

7. Патент №51753, Україна, МПК НОЗ К7/00. Магнітно-напівпровідниковий генератор з дросельним вузлом формування двотактних однополярних імпульсів / Волков І.В., Зозульов В.І., Шиманський О.Л., Шолох Д.О. // Промислова власність. – 2010. – № 14.

Patent №51753, Ukraine, IPC НОЗ К7/00. Magnetic semiconductor generator with reactor nod of forming of push-pull unipolar pulses // Volkov I.V., Zozulev V.I., Shymanskyi O.L., Sholokh D.O. // Promyslova vlasnist. – 2010. – №14. (Ukr.)

УДК.621.314

**И.В.Волков<sup>1</sup>, член-корр. НАН Украины, В.И.Зозулев<sup>2</sup>, канд.техн.наук, Д.О.Шолох<sup>3</sup>,**  
<sup>1,2,3</sup> – **Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

**Принципы построения компрессионных магнитно-полупроводниковых устройств для импульсных технологий и лазеров.**

*Рассмотрены результаты исследований основных аспектов проблемы построения компрессионных магнитно-полупроводниковых генераторов и преобразователей, полученных во время выполнения НИР «Доза-2». Изложены научно-технические основы построения компрессионных устройств. Приведен ряд предложенных компрессионных генераторов, преобразователей и их узлов. Библ. 7, табл. 1, рис. 9.*

**Ключевые слова:** магнитно-полупроводниковый генератор, компрессионные устройства, узлы магнитной компрессии, дросель насыщения.

**I.V.Volkov<sup>1</sup>, V.I.Zozulev<sup>2</sup>, D.O.Sholokh<sup>3</sup>,**  
<sup>1,2,3</sup> – **Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**Peremogy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine.**

**Foundations of constructing compression magnetic semiconductor devices for both electropulse technology and pulsed lasers.**

*The results of major studies aspects of the both compression magnetic semiconductor generators and converters construction is considered (the main results of “Dose-2” project). Scientific and technical basis for compression devices development was showed. Practical application of compression generators, converters and their details was described. References 7, tables 1, figures 9.*

**Keywords:** magnetic semiconductor generators, compression devices, blocks of magnetic compression, saturation reactor.

Надійшла 16.02.2011

Received 16.02.2011