

УДК 621.9

ЕНЕРГЕТИКА ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

М.В. Чашко (канд. техн. наук, с.н.с.), **С.М. Зінов'єв** (канд. техн. наук, доц.)

Н.А. Несторук (канд. техн. наук, доц.)

Індустріальний інститут ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

serhii.zinoviev@donntu.edu.ua, natasha.nestoruk@yandex.ua.

Робота присвячена передачі енергії імпульсами електричного струму вздовж провідної лінії від джерела до споживача. Проведено аналіз передач імпульсами від джерел постійного струму та джерел змінного струму та проведено порівняння з аналоговими передачами. Запропоновано технологію передачі енергії, накопиченої в магнітному полі лінії до резервуара. Ємність функціонує як колектор, локалізація енергії поблизу навантаження та утворення імпульсу струму. Ефективність передачі імпульсу може бути вищою, ніж аналогова передача. Для підтвердження аналітичних залежностей здійснюється гармонійний аналіз передачі імпульсної енергії: енергетичні параметри представлені гармонічними рядами, перевіряється правильність розширення послідовності та порівнюється ефективність імпульсних та аналогових передач. Зростання ефективності відбувається, зокрема, через відсутність циркуляції енергії магнітного поля лінії при передачі від джерела змінного струму.

Ключові слова: передача імпульсної енергії, накопичення в магнітному полі, імпульс струму, ефективність передачі імпульсу, гармонійний аналіз, струм, передана потужність, циркуляція енергії магнітного поля.

Вступ. Робота присвячена передачі енергії імпульсами електричного струму по провідній лінії від джерела до споживача (навантаження).

Актуальність роботи обумовлена можливістю підвищити ККД передачі електрики за допомогою імпульсної технології.

В даний час електрична енергія передається постійним і змінним струмом. При цьому мають місце втрати енергії в активному опорі проводів. При передачі змінним струмом втрати обумовлені ще і періодичною зміною магнітного поля самої лінії передачі.

Сучасна напівпровідникова техніка дозволяє організувати передачу так, щоб енергія магнітного поля лінії не поверталася в джерело, а надходила в навантаження, наприклад, при передачі енергії імпульсами, коли протягом періоду за передачею енергії слід пауза [1]. Така передача передбачає наявність гармонік струму, напруги та потужності. Якщо виходити з уявлення, що активна енергія переноситься тільки першою гармонікою, важко погодитися з можливістю підвищення ККД передаванням енергії імпульсами аби якої форми.

Мета роботи - довести гармонійним аналізом, що в імпульсній передачі підвищення ККД можливо внаслідок того, що енергія переноситься усіма гармоніками струму і напруги, а не тільки першою, на відміну від традиційної передачі змінним струмом.

Матеріали і результати дослідження.

Виконано аналіз передач імпульсами від джерел постійного і змінного струмів і зроблено порівняння з аналоговими передачами. Робота виконана в середовищі Matlab 6.5 - Simulink 5 [2].

Передача енергії від джерела постійного струму.

Якщо лінія має свою значну індуктивність, то в аналоговій передачі енергія, запасена в магнітному полі лінії, створює втрати, циркулюючи між лінією і джерелом.

Для таких умов запропонована технологія, яка передбачає передачу енергії, накопиченої в магнітному полі лінії, в ємність. Ємність виконує функції колектора, локалізації енергії поблизу навантаження і формування імпульсу струму. Схема представлена на рис. 1.

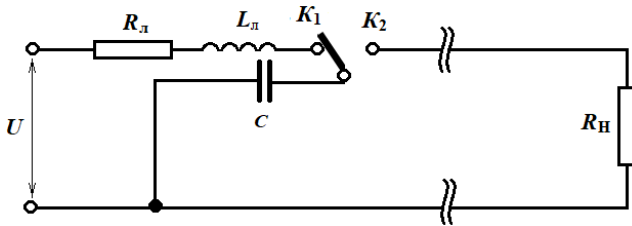


Рисунок 1 – Схема передачі енергії імпульсами по лінії з індуктивністю

Передача енергії від джерела U в навантаження R_H по лінії з опором R_L і індуктивністю L_L здійснюється за допомогою ключів K_1 та K_2 і ємності C .

Спочатку замикається K_1 , розімкнута K_2 , відбувається заряд ємності протягом тривалості імпульсу t_H . Коли струм знизиться до нуля, K_1 розмикається. У цей момент в ємність перейшла енергія джерела і енергія магнітного поля лінії. Потім замикається K_2 , енергія з ємності передається навантаженню R_H .

Енергія, яка передана в ємність,

$$W_C \approx 2CU^2. \quad (1)$$

Енергія, витрачена в лінії за час передачі,

$$w \approx 0,25R_L(U/\omega L_L)^2 \cdot T. \quad (2)$$

де $T = 2\pi\sqrt{LC}$

Відносна втрата енергії в лінії (до переданої в ємність і навантаження) виходить розподілом цього виразу на значення енергії з (1) :

$$w/W_C = t_H/4\tau_L, \quad (3)$$

де $t_H = \pi\sqrt{LC}$,

$\tau_L = L_L/R_L$ – електромагнітна стала часу лінії передачі.

ККД передачі у функції тривалості імпульсів

$$\eta_H = (1 + w/W_C)^{-1} = (1 + t_H/4\tau_L)^{-1} \quad (4)$$

У функції параметрів системи передачі (індуктивності і опору лінії, ємності)

$$\eta_H = (1 + \pi R_L/4\rho)^{-1}, \quad (4')$$

где $\rho = \sqrt{L_L/C}$ – хвильовий опір контуру.

У поняттях часових з (4) впливає, що ККД залежить від відносної (до постійної часу лінії) тривалості імпульсів: чим менше тривалість імпульсів, тим вище ККД.

У поняттях опорів з (4') слід, що ККД тим вище, чим менше відношення активного опору лінії до хвильового опору контуру L_L/C .

Отже, ККД можна змінювати, змінюючи значення ємності C і забезпечуючи тривалість включеного стану K_1 , необхідну для розмикання його при нульовому струмі. ККД імпульсної передачі може бути вище, ніж аналогової, причому тим вище, чим більше активний опір лінії. Якщо ККД аналогової передачі

$$\eta_A = R_H/(R_H + R_L) = (1 + R_L/R_H)^{-1}, \quad (5)$$

то відношення ККД імпульсної і аналогової передач з виразів (4) і (5)

$$\eta_H/\eta_A = (1 + R_L/R_H)/(1 + t_H/4\tau_L). \quad (6)$$

Оскільки тривалість імпульсів t_i є параметр керований, залежить від ємності і тривалості замкнутого стану K_1 , то можна вибрати значення цих параметрів такими, щоб відношення (6) було більш ніж 1. Тобто, ККД імпульсної передачі може бути більшим, ніж ККД аналогової.

Це обумовлено тим, що при імпульсній передачі протягом імпульсу в ємність передається більше енергії (енергія джерела плюс енергія магнітного поля лінії), ніж при аналогової передачі передається в навантаження (тільки енергія джерела) за той же час і при тих же втратах.

Для підтвердження аналітичних залежностей виконано гармонійний аналіз імпульсної передачі енергії: напруга, струм і передана потужність представлені гармонійним рядом, зворотним перетворенням перевірена коректність розкладання в ряд і виконано порівняння ККД імпульсної і аналогової передач.

На рис. 2 представлені осцилограми напруги на ємності u_C , струму в лінії I_L і миттєвої потужності, $p = u_C i_L$, переданої від джерела в ємність.

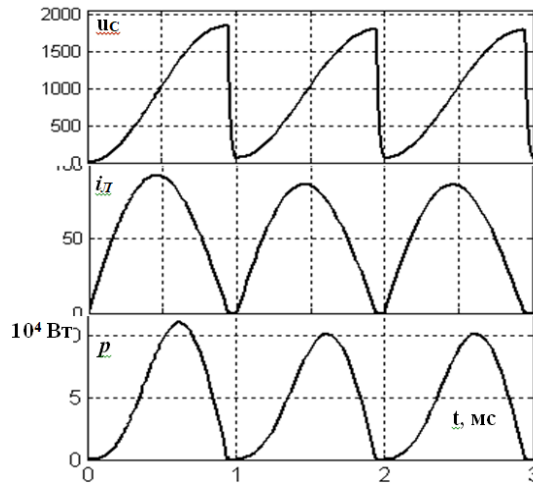
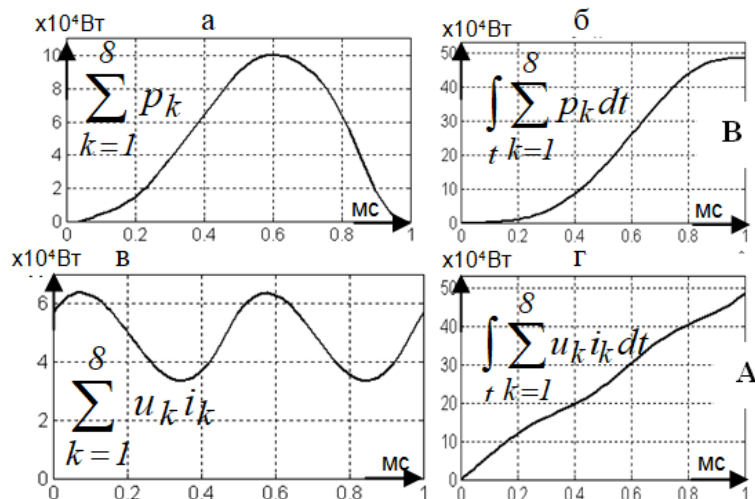


Рисунок 2 – Осцилограми миттєвих значень напруги, струму і потужності при передачі енергії від джерела постійного струму.

Осцилограми виконані при значеннях параметрів $U = 1000$ В, $T = 0,001$ с, $L = 0,003$ Гн, $R_{л} = 1$ Ом, $R_{н} = 0,5$ Ом.

Для перевірки адекватності розкладання виконано зворотне перетворення: напруга і струм кожної гармоніки перемножені, і всі результати перемноження підсумовані. Крім того, підсумовані гармоніки потужності. Результати зворотного перетворення представлені на рис. 3.



а - сума гармонік розкладання потужності, б - інтеграл цієї суми, в - сума творів однойменних гармонік струму і напруги, г - інтеграл цієї суми

Рисунок 3 – Перевірка коректності розкладання в гармонійний ряд потужності, переданої імпульсами від джерела постійного струму

З графіків випливає, що уявлення потужності розкладанням в гармонійний ряд адекватно для розкладання потужності як множення миттєвих значень струму і напруги. Якщо ж розкласти окремо струм і напругу, потім помножити гармоніки однакових частот і скласти ці множення, то миттєва потужність, отримана таким чином, неадекватна вихідної. Але інтеграли за період - кількість енергії, переданої в ємність, - однакові.

У цій схемі кількість енергії за період ≈ 50 Вт·с, відношення переданої в ємність енергії до вийде із джерела - ККД = 0,92. При передачі енергії аналоговим процесом при таких же опорах лінії і навантаження за 1 мс (період імпульсів в імпульсній передачі) передається енергії 220 Вт·с, ККД = 0,33. Отже, при прийнятих параметрах передачі ККД імпульсної передачі значимо більше, ніж аналогової.

Передача енергії від джерела змінного струму.

За вказаною технології може передаватися енергія від джерела змінного струму частотою 50 Гц. Осцилограма представлена на рис. 4.

Протягом періоду імпульсів зміна потужності, струму і напруги такі ж, як і при передачі енергії від джерела постійного струму, протягом періоду синусоїдальної напруги зміна цих величин відбувається 20 імпульсами.

Результати розкладання в гармонійний ряд представлені в таблиці 1.

Показані тільки гармоніки напруги, струму і потужності, значні за амплітудою.

Таблиця 1 – Результат розкладання напруги, тока і потужності імпульсної передачі в ряд гармоник

№ гармоніки	u_c		i_l		$p = u_c i_l$	
	Амплітуда, В	Фаза, град.	Амплітуда, А	Фаза, град.	Амплітуда, Вт	Фаза, град.
0	0,14	90	0,01	-90	24000	90
1	927	-7,5	8,7	82,4	4,40	-131
2	0,1	60	0,03	-95	24700	-94
18	0,5	8	0,06	130	11150	68
19	392	-68	70,3	22	12	76
20	0,27	-55	0,05	85	25800	-121
21	370	94	73	-175	25	-174
22	0,4	7	0,02	60	14500	47
39	146	-55	53	34	6	148
40	0,08	-90	0,04	103	3314	-43
41	146	107	56	-152	4	8

Для перевірки адекватності підсумовані гармоніки потужності 0, 2, 18, 20, 22, 40. Результати представлені на рис. 5. Порівняння вихідного розподілу потужності в часі (рис. 4) і синтезованого з гармонік (рис. 5) показує, що розкладання в ряд виконано коректно.

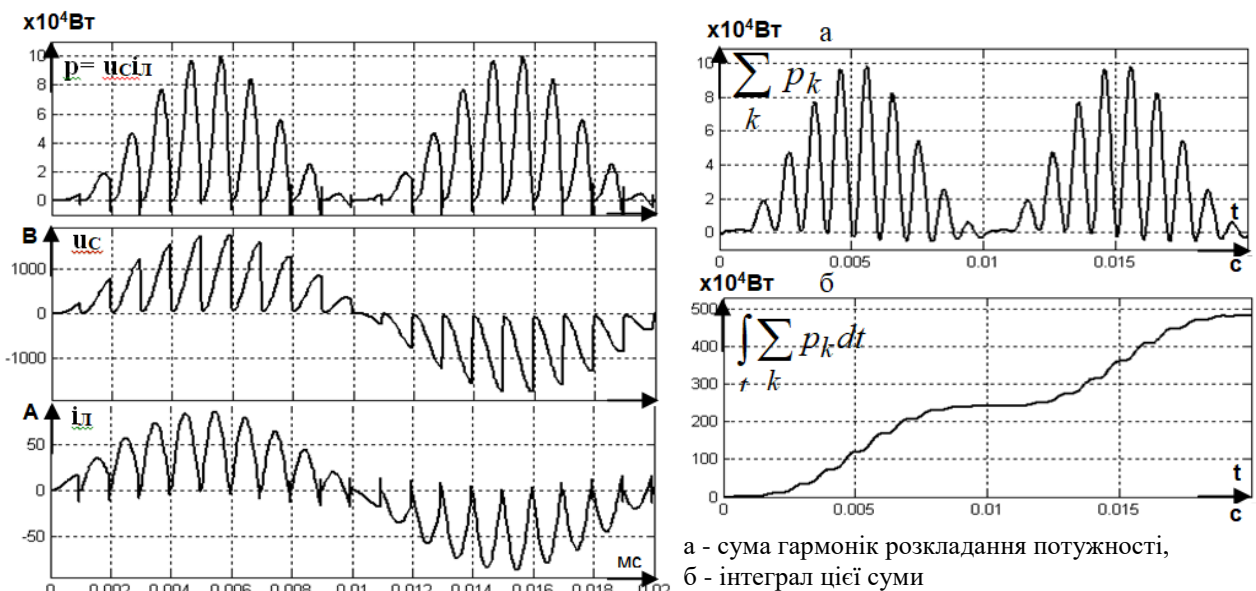


Рисунок 4 – Осцилограми миттєвих значень потужності, напруги і струму при передачі енергії від джерела змінного струму.

а - сума гармонік розкладання потужності,
б - інтеграл цієї суми
Рисунок 5 - Перевірка коректності розкладання в гармонійний ряд потужності, переданої імпульсами від джерела змінного струму.

Інтегруванням за період отримані значення потужності, переданої **и той**, яка вийшла з джерела. Кількість енергії за період ≈ 480 Вт·с, відношення переданої в ємність енергії до тої, яка вийшла із джерела – ККД = 0,92. При передачі енергії аналоговим процесом при таких же опорах лінії і навантаження за 20 мс (період напруги джерела) передається енергії ≈ 1600 Вт·с, ККД = 0,33.

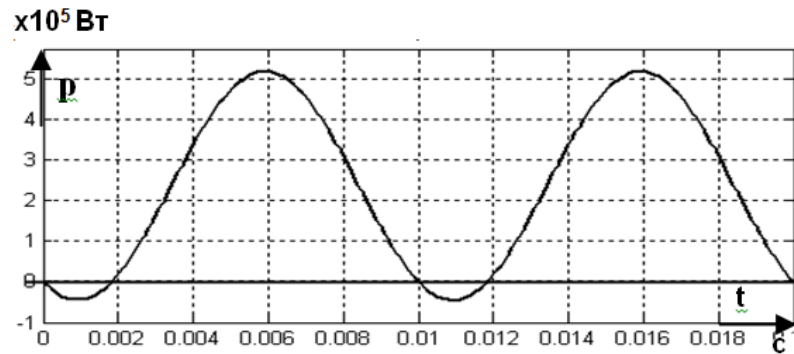


Рисунок 6 – Осцилограми миттєвих значень потужності при аналоговій передачі енергії від джерела змінного струму.

Збільшення ККД відбувається, зокрема, через відсутність циркуляції енергії магнітного поля лінії при передачі від джерела змінного струму. Для демонстрації цього твердження на рис. 6 представлена осцилограма миттєвої потужності аналоговій передачі 50 Гц.

Видно, що миттєва потужність негативна (енергія повертається по лінії в джерело) в проміжках часу 0...2 мс і 10...12 мс. При передачі імпульсної негативні значення миттєвої потужності практично відсутні, невеликі негативні піки енергетично незначущі, вони обумовлені тим, що допущення про сталість напруги джерела некоректно при швидкій зміні синусоїди на початку і кінці напівперіоду.

Висновки.

Передача енергії імпульсами підвищує ККД передачі в порівнянні з аналоговою передачею. Це положення відноситься до електропередачі і постійного і змінного 50 Гц струму.

Підвищення ККД відбувається за рахунок магнітної енергії лінії і завантаження, яка не циркулює по лінії, а проходить в ємність, розташовану поблизу завантаження.

У поняттях гармонійного аналізу підвищення ККД обумовлено тим, що при передачі імпульсами енергія активна не тільки першої гармоніки, а й вищих.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чашко М.В., Папина И.С. Передача электроэнергии импульсами. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету Вип. 2/2003 (19) с.
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.768 с.

REFERENCES

1. Chashko M.V, Paina I.S. (2003), "Transmission of electricity by pulses", *Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University*, no. 2/2003, pp. 19–23.
2. Djakonov V.P. (2004) MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Basics of application. SOLON-Press. Moscow, Russia: p.768.

Надійшла до редколегії 22.12.2017

М.В. ЧАШКО, С.Н. ЗИНОВЬЕВ, Н.А. НЕСТОРУК

Индустриальный институт Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет»

Энергетика импульсной электропередачи. Работа посвящена передаче энергии импульсами электрического тока вдоль проводящей линии от источника к потребителю. Производится анализ передач импульсами от источников постоянного и переменного тока и производится сравнение с аналоговыми передачами. Предложена технология, которая предусматривает передачу энергии, накопленной в магнитном поле линии, в резервуар. Емкость функционирует как коллектор, локализация энергии вблизи нагрузки и формирование импульса тока. Эффективность передачи импульсов может быть выше, чем аналоговая передача. Для подтверждения аналитических зависимостей выполняется гармонический анализ импульсной передачи энергии: энергетические параметры представлены гармоническим рядом, проверяется правильность расширения серии и сравнивается эффективность импульсной и аналоговой передач. Повышение эффективности происходит, в частности, из-за отсутствия циркуляции энергии магнитного поля линии во время передачи от источника переменного тока.

Ключевые слова: передача импульсной энергии, накопления в магнитном поле, импульс тока, эффективность передачи импульса, гармонический анализ, ток, передаваемая мощность, циркуляция энергии магнитного поля.

M.V. CHASHKO, S.N. ZINOVYEV, N.A. NESTORUK

Industrial Institute of the State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University"

Power of impulse transmission. The work is devoted to the transfer of energy by pulses of electric current along a conducting line from the source to the consumer. The analysis of the transmissions by pulses from DC and AC sources is made and comparison with analog transmissions is made. A technology is proposed that provides for the transfer of energy accumulated in the magnetic field of the line to the reservoir. The capacitance functions as a collector, the localization of energy near the load and the formation of a current pulse. The transmission efficiency of pulses can be higher than analog transmission. To confirm the analytical dependencies, a harmonic analysis of the impulse energy transfer is performed: the energy parameters are represented by a harmonic series, the series expansion is checked, and the efficiency of the pulse and analog transmissions is compared. The increase in efficiency occurs, in particular, due to the lack of circulation of the energy of the magnetic field of the line during transmission from an alternating current source.

Key words: transfer of pulsed energy, accumulation in a magnetic field, current pulse, pulse efficiency, harmonic analysis, current, transmitted power, magnetic field energy circulation.