

УДК 621.3.015.3

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Чашко М.В., к.т.н., доц., Гусаров А.А., к.т.н., доц.
 Донецкий национальный технический университет
 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58
 E-mail: mark@pautina.dn.ua

Представлені енергетичні параметри передачі енергії імпульсами електричного струму по провідній лінії.
Ключові слова: імпульсна передача, гармонійний аналіз.

The power parameters of energy transmission by the electric current pulses in a conducting line are represented.
Key words: pulse transmission, harmonic analysis.

Введение. Работа посвящена передаче энергии импульсами электрического тока по проводящей линии от источника к потребителю (нагрузке).

Актуальность работы обусловлена возможностью повысить КПД передачи энергии применением импульсной технологии.

Анализ предыдущих исследований. В настоящее время электрическая энергия передается постоянным и переменным током. При этом имеют место потери энергии в активном сопротивлении проводов. При передаче переменным током потери обусловлены еще и циркуляцией энергии магнитного поля самой линии передачи.

Современная полупроводниковая техника позволяет организовать передачу так, чтобы энергия магнитного поля линии не возвращалась в источник, а поступала в нагрузку, например, при передаче энергии импульсами, когда в течение периода за передачей энергии следует пауза [1]. Такая передача предполагает наличие гармоник тока, напряжения и мощности. Если исходить из представления, что активная энергия переносится только первой гармоникой, трудно согласиться с возможностью повышения КПД импульсностью передачи.

Цель работы. Доказательство гармоническим анализом того, что в импульсной передаче повышение КПД возможно вследствие того, что энергия переносится всеми гармониками тока и напряжения, а не только первой, в отличие от традиционной передачи переменным током.

Материал и результаты исследования. Выполнен анализ передач импульсами от источников постоянного и переменного токов и сделано сравнение с аналоговыми передачами. Работа выполнена в среде Matlab 6.5 – Simulink 5 [2].

Передача энергии от источника постоянного тока. Если линия обладает собственной значимой индуктивностью, то в аналоговой передаче энергия, запасенная в магнитном поле линии, создает потери, циркулируя между линией и источником.

Для таких условий предложена технология, предусматривающая передачу энергии, накопленной в магнитном поле линии, в емкость. Емкость выполняет функции коллектора, локализации энергии вблизи нагрузки и формирования импульса тока.

Схема представлена на рис. 1.

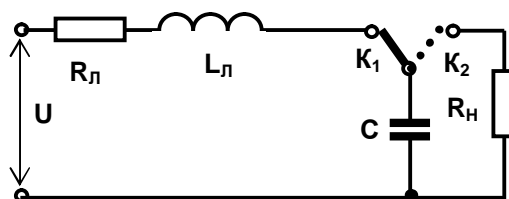


Рисунок 1 – Схема передачи энергии импульсами по линии с индуктивностью

Передача энергии от источника U в нагрузку R_H по линии с сопротивлением R_L и индуктивностью L_L осуществляется посредством ключей K_1, K_2 и емкости C .

Сначала замыкается K_1 , разомкнут K_2 , происходит заряд емкости в течение длительности импульса t_H . Когда ток снизится до нуля, K_1 размыкается. В этот момент в емкость перешла энергия источника и энергия магнитного поля линии. Затем замыкается K_2 , энергия из емкости передается нагрузке R_H .

Энергия, переданная в емкость:

$$W_C \approx 2CU^2. \tag{1}$$

Энергия, израсходованная в линии за время передачи:

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

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Относительный расход энергии в линии (к переданной в емкость) получается делением этого выражения на значение энергии из (1):

$$w / W_C = t_H / 4\tau_L, \tag{3}$$

где $t_H = \pi\sqrt{LC}$; $\tau_L = L_L / R_L$ – электромагнитная постоянная времени линии передачи.

КПД передачи в функции длительности импульсов:

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

В функции параметров системы передачи (индуктивности и сопротивления линии, емкости)

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

где $\rho = \sqrt{L_L / C}$ – волновое сопротивление контура.

В понятиях временных из (4) следует, что КПД зависит от относительной (к постоянной времени линии) длительности импульсов: чем меньше длительность импульсов, тем выше КПД.

В понятиях сопротивлений из (4') следует, что КПД тем выше, чем меньше отношение активного сопротивления линии к волновому сопротивлению контура $L_{\text{ЛС}}$.

Следовательно, КПД можно изменять, изменяя значение емкости C и обеспечивая длительность включенного состояния K_1 , необходимую для размыкания его при нулевом токе. КПД импульсной передачи может быть выше, чем аналоговой, причем тем выше, чем больше активное сопротивление линии. Если КПД аналоговой передачи

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

то отношение КПД импульсной и аналоговой передач из выражений (4) и (5)

$$\eta_{\text{И}} / \eta_{\text{А}} = (1 + R_L / R_H) / (1 + t_{\text{И}} / 4\tau_L). \quad (6)$$

Поскольку длительность импульсов $t_{\text{И}}$ есть параметр управляемый, зависящий от емкости и длительности замкнутого состояния K_1 , то можно выбрать значения этих параметров такими, чтобы отношение (6) было большим 1. То есть, КПД импульсной передачи может быть большим, чем КПД аналоговой.

Это обусловлено тем, что при импульсной передаче в течение импульса в емкость передается больше энергии (энергия источника плюс энергия магнитного поля линии), чем при аналоговой передаче передается в нагрузку (только энергия источника) за то же время и при тех же потерях.

Для подтверждения аналитических зависимостей выполнен гармонический анализ импульсной передачи энергии: напряжение, ток и переданная мощность представляются гармоническим рядом, обратным преобразованием проверена корректность разложения в ряд и выполнено сравнение КПД импульсной и аналоговой передач.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения на емкости u_C , тока в линии i_L и мгновенной мощности, $p = u_C i_L$, переданной от источника в емкость.

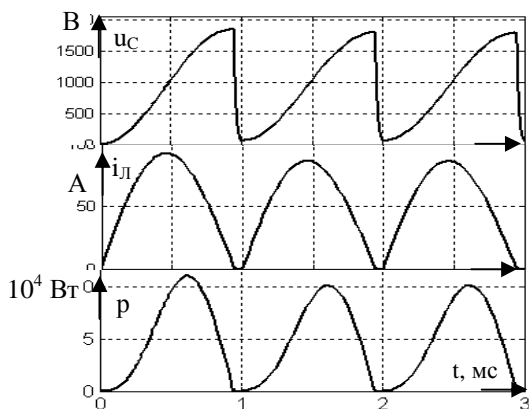


Рисунок 2 – Осциллограммы мгновенных значений напряжения, тока и мощности при передаче энергии от источника

Осциллограммы выполнены при значениях параметров $U=1000$ В, $T=0,001$ с, $L=0,003$ Гн, $R_L=1$ Ом, $R_H=0,5$ Ом.

Для проверки адекватности разложения выпол-

нено обратное преобразование: напряжение и ток каждой гармоники перемножены, и все результаты перемножения суммированы. Кроме того, суммированы гармоники мощности.

Результаты обратного преобразования представлены на рис. 3.

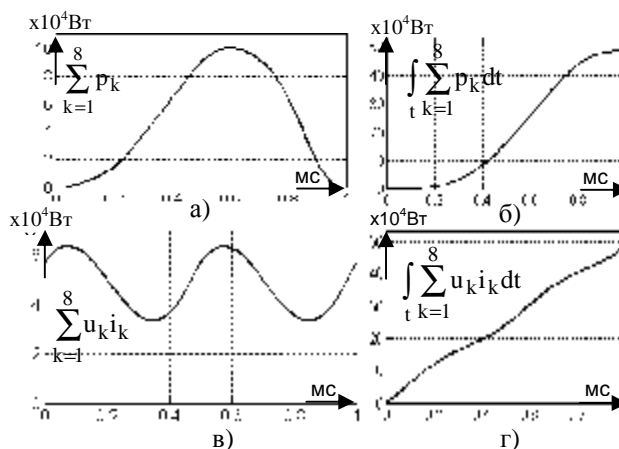


Рисунок 3 – Проверка корректности разложения в гармонический ряд мощности, передаваемой импульсами от источника постоянного тока:
а) – сумма гармоник разложения мощности;
б) – интеграл этой суммы; в) – сумма произведений одноименных гармоник тока и напряжения;
г) – интеграл этой суммы

Из графиков следует, что представление мощности разложением в гармонический ряд адекватно для разложения мощности как произведения мгновенных значений тока и напряжения. Если же раскладывать отдельно ток и напряжение, затем перемножать гармоники одинаковых частот и складывать эти произведения, то мгновенная мощность, полученная таким образом, неадекватна исходной. Но интегралы за период – количество энергии, переданной в емкость, – одинаковы.

В этой схеме количество энергии за период ≈ 50 Вт·с, отношение переданной в емкость энергии к вышедшей от источника – КПД = 0,92. При передаче энергии аналоговым процессом при таких же сопротивлениях линии и нагрузки за 1 мс (период импульсов в импульсной передаче) передается энергии 220 Вт·с, КПД = 0,33. Следовательно, при принятых параметрах передачи КПД импульсной передачи значимо больше, чем аналоговой.

Передача энергии от источника переменного тока.

По указанной технологии может передаваться энергия от источника переменного тока частотой 50 Гц. Осциллограмма представлена на рис. 4.

В течение периода импульсов изменение мощности, тока и напряжения такие же, как и при передаче энергии от источника постоянного тока, в течение периода синусоидального напряжения изменение этих величин происходит 20 импульсами.

Результаты разложения в гармонический ряд представлены в табл. 1. Показаны только гармоники напряжения, тока и мощности, значимые по амплитуде.

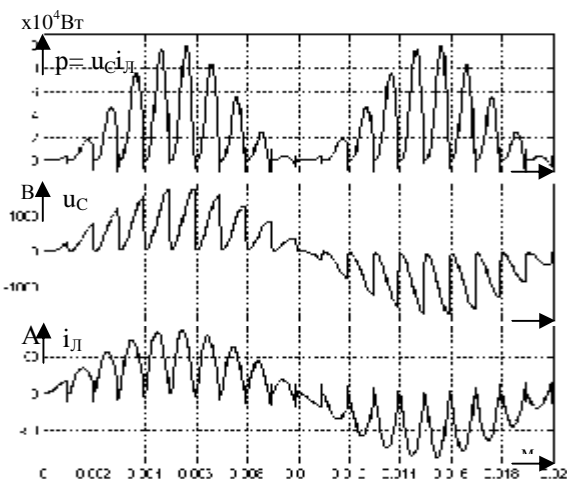


Рисунок 4 – Осциллограммы мгновенных значений мощности, напряжения и тока при передаче энергии от источника переменного тока

Таблица 1 – Результат разложения напряжения, тока и мощности импульсной передачи в ряд гармоник

№ гармоник	u_c		i_L		$p = u_c i_L$	
	Амплитуда, В	Фаза, град	Амплитуда, А	Фаза, град	Амплитуда, 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 проверки адекватности суммированы гармоники мощности 0, 2, 18, 20, 22, 40. Результаты представлены на рис 5. Сравнение исходного распределения мощности во времени (рис. 4) и синтезированного из гармоник (рис. 5), показывает, что разложение в ряд выполнено корректно.

Интегрированием за период получены значения мощности, переданной и вышедшей от источника. Количество энергии за период ≈ 480 Вт·с, отношение переданной в емкость энергии к вышедшей от источника – КПД = 0,92. При передаче энергии аналоговым процессом при таких же сопротивлениях линии и нагрузки за 20 мс (период напряжения источника) передается энергии ≈ 1600 Вт·с, КПД = 0,33.

Увеличение КПД происходит, в частности, из-за отсутствия циркуляции энергии магнитного поля линии при передаче от источника переменного тока. Для демонстрации этого утверждения на рис. 6 представлена осциллограмма мгновенной мощности аналоговой передачи 50 Гц.

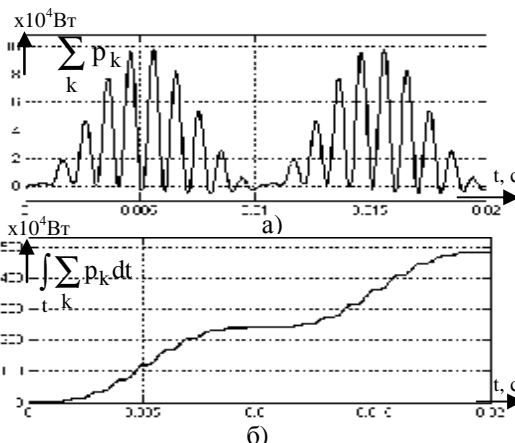


Рисунок 5 – Проверка корректности разложения в гармонический ряд мощности, передаваемой импульсами от источника переменного тока

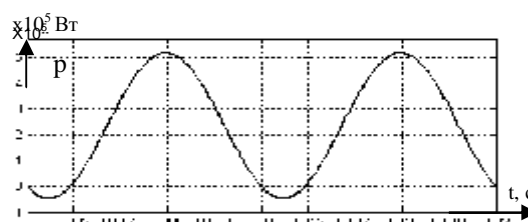


Рисунок 6 – Осциллограммы мгновенных значений мощности при аналоговой передаче энергии от источника переменного тока

Видно, что мгновенная мощность отрицательна (энергия возвращается по линии в источник) в промежутках времени $0 \div 2$ мс и $10 \div 12$ мс. При передаче импульсной отрицательные значения мгновенной мощности практически отсутствуют, небольшие отрицательные пики энергетически незначимы, они обусловлены тем, что допущение о постоянстве напряжения источника некорректно при быстром изменении синусоиды в начале и конце полупериода.

Выводы.

1. Передача энергии импульсами повышает КПД передачи по сравнению с аналоговой передачей. Это положение относится к электропередачам и постоянного и переменного 50 Гц тока.

2. В понятиях гармонического анализа повышение КПД обусловлено тем, что при передаче импульсами энергия активна не только первой гармоники, но и высших.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Чашко М.В., Папина И.С. Передача электроэнергии импульсами // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 2/2003. – С. 19-23.
 2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 768 с.

Стаття надійшла 14.04.2007 р.
 Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
 Родькіним Д.Й.