

В. М. ИВАНОВ, зав.отделом, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»

ТРАНСФОРМАТОР С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭНЕРГИИ

Рассмотрена схема импульсного трансформатора используемого в качестве индуктивного накопителя энергии. Проанализирован режим работы трансформатора, рассчитаны параметры импульса напряжения на нагрузке, к.п.д. запасания энергии.

Ключевые слова: индуктивный накопитель энергии, импульсный трансформатор, форма импульса, импульс высокого напряжения.

Введение. В последнее время в народном хозяйстве все больше используются высоковольтные импульсные технологии. Так в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» созданы установки в которых высоковольтные импульсные технологии используются для обработки пищевых продуктов, обработки сточных вод и вредных газовых выбросов промышленных предприятий, для получения озона [1]. Данные технологии не возможны без применения генераторов импульсов высокого напряжения. Одним из основных элементов таких генераторов является трансформатор. Индуктивные накопители многократно превосходят емкостные накопители по запасаемой удельной энергии, что резко уменьшает их сравнительные габариты, вес и стоимость. Для получения высоковольтных импульсов с помощью индуктивных накопителей энергии не нужны источники питания высоких напряжений.

Целью данной работы является обоснование преимуществ работы импульсных трансформаторов (ИТ) как ключевого элемента высоковольтных источников питания в технологических установках в качестве индуктивного накопителя энергии.

Работа трансформатора с индуктивным накопителем энергии происходит следующим образом: при подаче импульса управления на коммутирующий элемент происходит его открывание и протекание нарастающего тока через первичную обмотку ИТ от источника напряжения. При быстром закрытии коммутирующего ключа на индуктивном элементе происходит резкое (быстрое) нарастание напряжения. В результате чего на вторичной обмотке ИТ формируется импульс высокого напряжения.

Упрощенная электрическая схема трансформатора с индуктивным накоплением показана на рис. 1, где L_3 – накопительная индуктивность, R_3 – сопротивление, учитывающее сопротивление коммутирующего ключа и потери в катушке L_3 ; E – источник напряжения.

Ток, протекающий через индуктивность L_3 , медленно изменяется по за-

кону

$$i_3 = \frac{E}{R_3} (1 - e^{-t/\tau_3}), \quad (1)$$

где $T_3 = L_3/R_3$ – постоянная времени заряда.

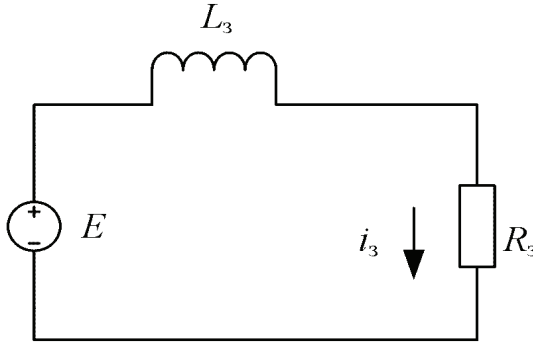


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема трансформатора с индуктивным накоплением

С увеличением сопротивления R_3 , сила тока медленнее достигает установившегося значения E/R_3 . При малом значении R_3 ток i_3 в течение времени $t \ll T_3$ определяется

$$i_3 \cong \frac{E}{L_3} t. \quad (2)$$

При $t < 0,5 T_3$ погрешность использования формулы не превышает 10 %.

При протекании тока i_3 в индуктивности L_3 в ней запасается энергия $L_3 i_3^2/2$. При достижении нужного значения энергии ключ разрывается и в катушке индуцируется э.д.с. e , имеющая значительно большее напряжение чем напряжение источника. Запасенная энергия выделяется в нагрузке, создавая на ней импульс высокого напряжения.

Энергия W_1 , запасаемая в индуктивности L_3 ,

$$W_1 = \frac{1}{2} L_3 I_3^2 = \frac{1}{2} L_3 \frac{E^2}{R_3^2} (1 - e^{-\tau_3})^2, \quad (3)$$

где $\tau_3 = t_3/T_3$ – отношение длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда.

Энергия W_2 , выделяемая в сопротивлении:

$$W_2 = \int_0^{\tau_3} R_3 I_3^2 dt = \int_0^{\tau_3} \frac{E^2}{R_3} (1 - e^{-t/\tau_3})^2 dt = T_3 \frac{E^2}{R_3} \left(\tau_3 - \frac{3}{2} + 2e^{-\tau_3} - \frac{1}{2}e^{-2\tau_3} \right), \quad (4)$$

Полная энергия

$$W_1 + W_2 = T_3 \frac{E^2}{R_3} (\tau_3 - 1 + e^{-\tau_3}). \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия запасаения энергии

$$\eta_3 = \frac{W_1}{W_1 + W_2} = \frac{1}{2} \frac{1 - 2e^{-\tau_3} + e^{-2\tau_3}}{\tau_3 - 1 + e^{-\tau_3}} \quad (6)$$

зависит только от $\tau_3 = t_3/T_3$.

При длительном времени протекания тока заряда, то есть $\tau_3 \rightarrow \infty$, $\eta_3 = 0$, так как через время $t = 3T_3$ энергия, которая запасается, достигает максимального значения $L_3 E^2 / (2R_3^2)$ и дальнейшее протекание тока, создает только потери сопротивлению R_3 . При $\tau_3 \rightarrow 0$ к.п.д. является наибольшим.

Для времени $\tau_3 \ll T_3$ из разложения выражения (6) в ряд следует:

$$\eta_3 \cong \frac{1 - \tau_3}{1 - \frac{1}{3}\tau_3} \cong 1 - \frac{2}{3}\tau_3. \quad (7)$$

График зависимости к.п.д. от отношения длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда представлен на рис. 2.

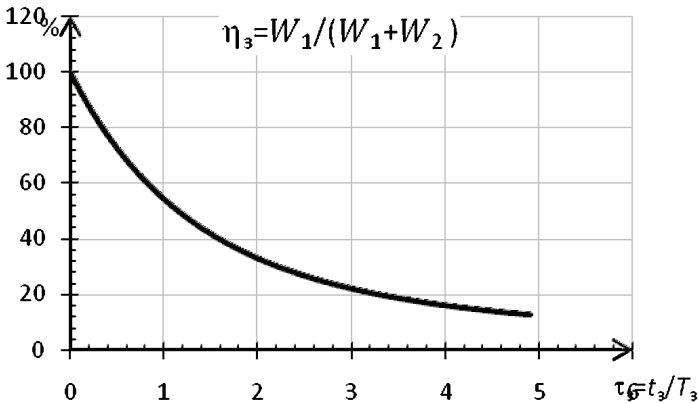


Рисунок 2 – Зависимость к.п.д. запасаения энергии от отношения длительности времени запасаения энергии к постоянной времени заряда

Из графика видно, что при времени заряда t , индуктивного накопителя равном $3T_3$, к.п.д. запасаения энергии очень мал и составляет примерно 25 %. Более выгодным является режим заряда с малой длительностью времени заряда t_3 ($\approx 0,2 T_3$), что составляет примерно 87 %. При этом зарядной ток составляет $i_3 \cong \frac{E}{L_3} t_3 = \frac{E}{L_3} 0,2 T_3 = 0,2 \frac{E}{R_3}$, 20 % максимального значения, а запасенная энергия только 5% максимального значения.

Целесообразно применять такой режим работы для устройств в которых важным является получение импульса высокого напряжения, а энергетические характеристики являются второстепенными. Также целесообразно применять режим заряда близким к максимальному. При времени заряда t_3 близ-

ком к времени T_3 зарядный ток составляет $\approx 63\%$, при этом к.п.д. 54% .

Для установок с емкостным накопителем, к.п.д. запасаения энергии растет с увеличением запасаемой энергии, а в установках с индуктивным накопителем – наоборот.

В данном варианте использования трансформатора с индуктивным накопителем энергии на нагрузке формируется импульс напряжения превосходящий исходное напряжение источника питания от 5 до ~ 15 раз. При использовании трансформатора с емкостным накопителем величина импульса напряжения не превышает исходное напряжение на накопительном конденсаторе с учетом коэффициента трансформации, а иногда составляет только половину этого напряжения.

Эквивалентная схема разрядной цепи трансформатора с индуктивным накоплением энергии представлена на рис. 3. Проектирование и расчет импульсных трансформаторов подробно описан в [2]. Рассчитаем параметры импульса для трансформатора с индуктивным накоплением энергии.

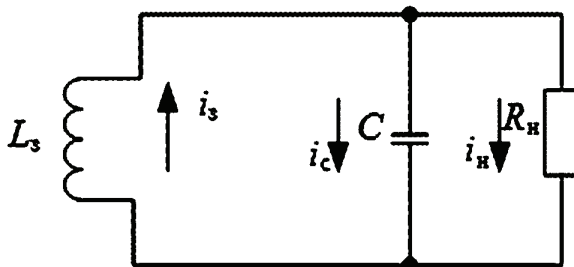


Рисунок 3 – Упрощенная эквивалентная схема разрядной цепи

Для быстрых процессов, протекающих в рассматриваемой цепи, накопительную индуктивность L_3 можно считать равной бесконечно большой величине. Объединим паразитные емкости обмотки C_L и емкость нагрузки C_H в одну эквивалентную емкость $C = C_L + C_H$ (рис. 3).

Пусть в момент $t = 0$ записания ключа величина тока, протекавшего через индуктивность $L_3(0)$ равна $i_3 = I_{ам}$.

Протекающий через индуктивность ток, не может измениться мгновенно, значит в первый момент после размыкания ключа, ток I_3 потечет через емкость C . При отсутствии емкости на сопротивлении нагрузки напряжение возросло бы до максимального значения $U_{нм} = I_{ам} R_H$. Из-за наличия емкости C фронт импульса напряжения имеет конечную крутизну. Максимально возможный коэффициент трансформации напряжения импульса будет для случая, когда емкость $C = 0$

$$k_{\gamma} = \frac{U_{нм}}{E} = \frac{I_{ам} R_H}{E}, \quad (8)$$

Составим операторные уравнения для процессов в импульсной цепи при условии, что $u_L \gg u_{сн}$:

$$i_3 = i_H + i_C = \frac{\overline{u_H}}{R_H} + pC\overline{u_H}. \quad (9)$$

$$\overline{u_L} + \overline{u_H} = 0; \overline{u_L} = pL_3(i_3 - i_3(0)) = pL_3\left(\frac{\overline{u_H}}{R_H} + pC\overline{u_H} - I_{am}\right). \quad (10)$$

Отсюда:

$$\overline{u_H} = \frac{I_{am}}{C} \frac{p}{p^2 + 2ap + \omega_0^2} = \frac{M(p)}{N(p)}. \quad (11)$$

где $2a = 1/(R_H C)$; $\omega_0^2 = 1/(L_3 C)$.

Воспользовавшись теоремой разложения, получим:

$$u_H(t) = u_H = \frac{I_{am}}{C} \left(\frac{e^{p_1 t}}{2(p_1 + a)} + \frac{e^{p_2 t}}{2(p_2 + a)} \right), \quad (12)$$

где p_1, p_2 корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2}.$$

Для большинства случаев емкость настолько мала, что постоянная вре-

мени $T_L = \frac{L_3}{R_H} \gg 2R_H C = 2T_C$

При $a > 2\omega_0$ можно принять:

$$p_1 = -a + \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong -a + \left(a - \frac{\omega_0^2}{2a}\right) = -\frac{R_H}{L_3} = -\frac{1}{T_L}; \quad (13)$$

$$p_2 = -a - \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong -2a = -\frac{1}{R_H C} = -\frac{1}{T_C}; \quad (14)$$

$$p_{1,2} + a = \pm \sqrt{a^2 - \omega_0^2} \cong \pm 2a = \pm \frac{1}{R_H C}. \quad (15)$$

С учетом этих значений получим:

$$u_H = I_{am} R_H (e^{-t/T_L} - e^{-t/T_C}) = u_{H1} - u_{H2}, \quad (16)$$

Следовательно форма импульса напряжения на нагрузке определяется разностью двух экспонент. Из которых первая экспонента определяет длительность t_H импульса, а вторая определяет длительность t_ϕ фронта импульса. Приближенно амплитуду импульса напряжения, длительности фронта и импульса можно оценить простыми формулами:

$$U_{Hm} \cong 0,9 I_{am} R_H; t_\phi \cong 3R_H C; t_H \cong 3L_3/R_H. \quad (17)$$

Вывод. Целесообразно применять такой режим работы для устройств в которых важным является получение импульса высокого напряжения, а энергетические характеристики являются второстепенными. Также целесообразно применять режим заряда близким к максимальному. Получены простые формулы для параметров генерируемого импульса.

Список литературы: 1. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М. Генераторы высоковольтных импульсов с частотой следования до 50000 импульсов в секунду // Приборы и

техника експеримента (г. Москва). – 2011. – № 4. – С. 92-101. **2.** Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов / Вдовин С. С. – Л.: Энергия, 1971.

Bibliography (transliterated): 1. Bojko N.I., Borcov A.V., Evdoshenko L.S., Ivano vV.M. Generatory vysokovol'nyh impul'sov schastotoj sledovaniya do 50000 impul'sovvsekindu Pribory i tehnika jeksperimenta (g.Moskva). – 2011. – №4. – 92-101. **2.** Vdovin S. S. Proektirovani eimpul'snyh transformatorov Vdovin S. S. L. :Jenergija, 1971.

Надійшла (received) 03.04.2014

УДК 621.319.53

Трансформатор з індуктивним накопичувачем енергії / В. М. Іванов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 55-60. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто схему імпульсного трансформатора, що використовується як індуктивний накопичувач енергії. Проаналізовано режим роботи трансформатора, розраховані параметри імпульсу напруги на навантаженні, к.к.д. запасання енергії.

Ключові слова: індуктивний накопичувач енергії, імпульсний трансформатор, форма імпульсу, імпульс високої напруги.

УДК 621.319.53

Трансформатор с индуктивным накоплением энергии / В. М. Иванов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21 (1064). – С. 55-60. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрена схема импульсного трансформатора используемого в качестве индуктивного накопителя энергии. Проанализирован режим работы трансформатора, рассчитаны параметры импульса напряжения на нагрузке, к.п.д. запасания энергии.

Ключевые слова: индуктивный накопитель энергии, импульсный трансформатор, форма импульса, импульс высокого напряжения.

Transformer with an inductive energy storage / VM Ivanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 55-60. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.

The scheme of the pulse transformer is used as an inductive energy storage. Analyzed the operation of the transformer, pulse parameters calculated load voltage, efficiency energy storage.

Keywords: inductive energy storage, pulse transformer, pulse shape, a high voltage pulse.