

УДК 550.834; 621.373

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА В ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ИСТОЧНИКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Пустынников Сергей Владимирович¹,
pustynnikov@tpu.ru

Хан Вей²,
whan@jlu.edu.cn

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Цзилиньский университет,
КНР, 130012, г. Чанчунь, пр. Чанцзина, 2699.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых источников мощных импульсов тока для работы на электрогидравлический излучатель, который может применяться для возбуждения сейсмических волн в невзрывной сейсморазведке.

Цель: провести расчетные и экспериментальные исследования работы модели индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения импульсов тока в активной нагрузке; изучить влияние индуктивной связи катушек на амплитуду и крутизну импульсов тока.

Объекты: лабораторная модель индуктивно-импульсного генератора, имеющего индуктивно связанные катушки индуктивности для увеличения мощности и крутизны импульса тока в линейной активной нагрузке.

Методы: метод переменных состояния для расчета уравнений переходного процесса в цепи после коммутации, составленных по законам Кирхгофа, применение обобщенных законов коммутации для расчета начальных значений токов в катушках индуктивностей и в нагрузке.

Результаты. Разработана схема индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения мощных импульсов тока в активной нагрузке. Генератор содержит индуктивно-связанные катушки, что позволяет увеличить запасаемую энергию и мощность получаемых импульсов. С помощью метода переменных состояния получена математическая модель работы схемы на линейную активную нагрузку. Проведены расчетные и экспериментальные исследования лабораторной модели схемы. Экспериментальные значения токов в катушках индуктивностей и в нагрузке примерно совпали с расчетными значениями. Длительность полученных импульсов тока в нагрузке и крутизна переднего фронта импульсов тока делают перспективным применение индуктивно-импульсного генератора в сейсморазведке в качестве источника импульсов тока в электрогидравлическом излучателе при работе на взрывающуюся проволочку.

Ключевые слова:

Генератор, импульс тока, математическая модель, катушка индуктивности, коэффициент связи, осциллограмма, сейсморазведка.

Введение

В настоящее время для питания электрофизических установок применяются источники мощных импульсов тока, например [1–4]:

- 1) электростатические (конденсаторы);
- 2) индуктивные накопители;
- 3) инерционные – ударные генераторы, униполярные генераторы;
- 4) электрохимические – аккумуляторные батареи;
- 5) МГД генераторы.

Импульсная энергетическая система состоит из устройств, позволяющих медленно в течение длительного времени запасать энергию, и устройства, позволяющего высвободить её в нагрузку в виде мощного импульсного разряда.

Все применения таких генераторов можно разделить на следующие области:

- 1) электромагнитные ускорители пучков заряженных частиц;
- 2) импульсные лазеры с электрической накачкой;
- 3) опыты по термоядерному синтезу;

- 4) мощные радары;
- 5) мощные микроволны;
- 6) импульсные источники излучения;
- 7) генерация ударных волн;
- 8) обработка и формовка материалов;
- 9) исследования по физике высоких плотностей энергии;
- 10) сейсморазведка с помощью электрогидравлических источников сейсмических колебаний.

При сейсморазведке на акваториях применение взрывов запрещено в целях сохранения фауны, поэтому возбуждение упругих волн производится электроискровыми источниками, газовзрывными установками, пневматическими излучателями, при помощи вибрационных источников [5]. В отличие от взрывов при таком возбуждении волн амплитуда и давление на фронте ударной волны меньше, что оказывается безопасным для фауны [6].

Невзрывная сейсморазведка позволяет упростить производство работ, обеспечить безопасное их проведение для обслуживающего персонала и окружающей среды. К таким методам относится

возбуждение сейсмических волн с помощью электрического разряда в воде, вызывающего импульсное преобразование электрической энергии в энергию упругой волны давления [7–11]. При низком напряжении источника для пробоя межэлектродного промежутка применяют его шунтирование взрывающимися проволочками [12, 13]. Для быстрого взрыва проволочки и возникновения электрогидравлического удара необходимо обеспечить малую длительность и большую крутизну переднего фронта импульса тока [14, 15].

В качестве источника импульсов тока для возбуждения сейсмических колебаний обычно применяют конденсаторные батареи, ударные генераторы. В таблице приведены сравнительные характеристики различных типов первичных накопителей электроэнергии [16].

Таблица. Сравнительные характеристики различных типов первичных накопителей электроэнергии

Table. Comparative descriptions of different types of primary energy stores

Тип накопителя Type of energy store	Плотность энергии, Дж/дм ³ Density of electromagnetic energy, J/dm ³	Предельная энергия, Дж Maximum energy, J	Длительность импульса вывода энергии, с Pulsewidth of energy, s	Удельная мощность импульса, Вт/дм ³ Pulse output power, W/dm ³
Конденсаторы Capacitors	$(0,5-3) \cdot 10^2$	10^7	10^{-6}	$(1-5) \cdot 10^8$
Индуктивные накопители Inductive energy store	10^5	10^8	10^{-1}	$(1-10) \cdot 10^5$
Ударные генераторы Impulse generator	$(1-4) \cdot 10^4$	10^8	10^{-4}	$(3-10) \cdot 10^4$
Аккумуляторы Accumulator battery	$(1-5) \cdot 10^5$	10^8	10^{-3}	$(3-10) \cdot 10^2$

В условиях массогабаритных ограничений, накладываемых требованиями автономности и транспортабельности, энергия конденсаторной батареи относительно невысока и составляет от 5 до 20 кДж при напряжении от 30 до 70 кВ. К недостаткам таких установок следует отнести наличие высокого напряжения, снижающего безопасность работ, и высокочастотный спектр возбуждаемых волн давления, обуславливающий низкий сейсмический КПД [14].

Увеличить энергоемкость и повысить акустический КПД можно, применяя в качестве накопителя энергии электромашинный импульсный (ударный) генератор. Впервые исследования применения ударного генератора для возбуждения сейсмических колебаний были выполнены в Томском политехническом университете [17]. Инициирование канала разряда осуществляется предварительным разрядом высоковольтной конденсаторной батареи или при низком напряжении – взрывающимися проволочками. Амплитуда импульса давления определяется величиной тока в момент взрыва

проводника. Установлено, что максимальный гидродинамический эффект достигается в момент, близкий к максимуму тока короткого замыкания ударного генератора [13, 14]. Длительность импульса тока в нагрузке по результатам эксперимента составляла порядка $t_{\text{имп}} \approx 10$ мс, при этом ток короткого замыкания во взрывающейся проволочке до её взрыва имеет синусоидальный передний фронт, что снижает эффективность работы ударного генератора.

Плотность энергии магнитного поля, запасаемой в индуктивных накопителях, на три порядка выше, чем плотность энергии электрического поля, запасаемая в конденсаторах, и на порядок выше, чем в ударных генераторах [16]. Разработанные в настоящее время индуктивные накопители с обычными катушками имеют запасаемую энергию порядка 10^8 Дж и используются в качестве источников импульсных токов для питания мощных ускорителей, импульсной зарядке конденсаторов и формирующих линий. Однако длительность импульса вывода энергии в активную нагрузку из индуктивного накопителя составляет $t_{\text{имп}} \approx 100$ мс, т. е. на порядок больше, чем в ударных генераторах и на пять порядков больше, чем у конденсаторных батарей, что не позволяет формировать импульсы тока большой мощности. Кроме того, передний фронт импульсов тока в активной нагрузке имеет форму экспоненты с невысокой крутизной, что делает их неперспективными для применения в качестве источника в электрогидравлических технологиях, и в частности в сейсморазведке.

Основное внимание в статье уделяется исследованию индуктивно-импульсного генератора, в котором импульс тока при передаче энергии в нагрузку формируется при помощи обобщенных законов коммутации и в котором запасенная энергия увеличивается при помощи индуктивной связи катушек индуктивности [18]. В активной нагрузке формируется импульс тока, имеющий крутой передний фронт и длительность, соизмеримую с длительностью импульсов от ударного генератора, что делает индуктивно-импульсный генератор перспективным в качестве источника импульса тока в сейсморазведке при работе на взрывающуюся проволочку.

Постановка задачи

На рис. 1 представлена схема индуктивно-импульсного генератора, использующего обобщенные законы коммутации для получения импульсов тока в нагрузке. До размыкания ключа K энергия постоянного источника ЭДС E запасается в катушках индуктивности $R_1, L_1, R_2, L_2, R_3, L_3$. Индуктивности L_3 и L_4 имеют индуктивную связь M_{34} и включены согласно, что позволяет запастись дополнительной энергией взаимной индуктивности. Индуктивности L_1 и L_2 имеют встречное включение благодаря трансформаторной связи M_{12} . До размыкания коммутатора K в момент времени t_0 – источник ЭДС E создает в последовательно включенных

катушках индуктивности R_4, L_4 и R_1, L_1 и в параллельно включенной им катушке R_3, L_3 постоянные токи $i_1(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_4}$ и $i_3(0_-) = \frac{E}{R_3}$ (рис. 2). Ток в нагрузке $i_2(0_-) = 0$.

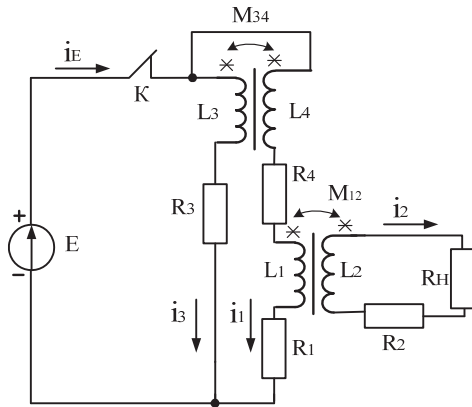


Рис. 1. Схема индуктивно-импульсного генератора

Fig. 1. Scheme of inductance-capacitance oscillator

В момент времени $t=0_+$, после размыкания коммутатора K , катушки R_1, L_1 , R_4, L_4 и R_3, L_3 оказываются включенными последовательно и встречно, в них возникает общий ток $i(0_+)$. В соответствии с обобщенным законом коммутации, исходя из принципа непрерывности суммарного потокосцепления [19, 20]:

$$\psi(0_-) = \psi(0_+),$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} &(L_3 i_3(0_-) + M_{34} i_1(0_-)) - (L_4 i_1(0_-) + M_{34} i_3(0_-)) - \\ &- (L_1 i_1(0_-) - M_{12} i_2(0_-)) = \\ &= i(0_+)(L_1 + L_3 + L_4 - M_{34}) + M_{12} i_2(0_+) \\ &L_2 i_2(0_-) - M_{12} i_1(0_-) = L_2 i_2(0_+) + M_{12} i(0_+) \end{aligned} \right\}.$$

Учитывая, что до коммутации $i_2(0_-) = 0$, величина общего тока $i(0_+)$ в момент времени $t=0_+$ составит:

$$i(0_+) = \frac{(L_3 - M_{34}) i_3(0_-) - i_1(0_-) \left(L_1 - M_{34} + L_4 - \frac{M_{12}^2}{L_2} \right)}{L_1 + L_3 + L_4 - M_{34} - \frac{M_{12}^2}{L_2}},$$

в нагрузке возникает скачок тока:

$$i_2(0_+) = \frac{-M_{12} i(0_+) - M_{12} i_1(0_-)}{L_2}.$$

Токи в катушках индуктивности в момент коммутации t_{0+} изменяются скачком (рис. 2). При условии, что $\frac{L_3 - M_{34}}{R_3} \geq \frac{L_1 + L_4 - M_{34}}{R_1 + R_4}$, в катушке

R_3, L_3 возникает скачок тока $\Delta i_3 = i_3(0_-) - i(0_+)$ и ток i_3 не изменяет своего направления, а в первичной обмотке импульсного трансформатора R_1, L_1 ска-

чок тока составит $\Delta i_1 = i_1(0_-) - (-i(0_+))$ и ток i_1 изменит своё направление на противоположное. Таким образом, скачок тока Δi_1 индуцирует в нагрузке импульс тока i_2 , имеющий крутой передний фронт, малую длительность и большую мощность (рис. 3).

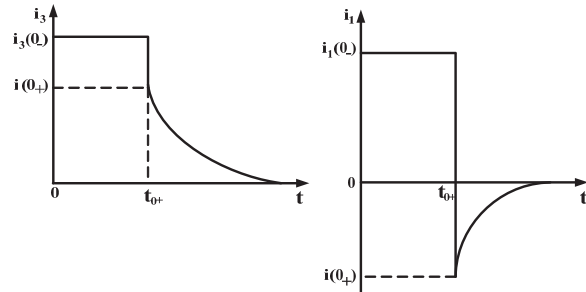


Рис. 2. Токи в катушках R_3, L_3 , R_1, L_1 и R_4, L_4

Fig. 2. Currents in inductive coils R_3, L_3 , R_1, L_1 and R_4, L_4

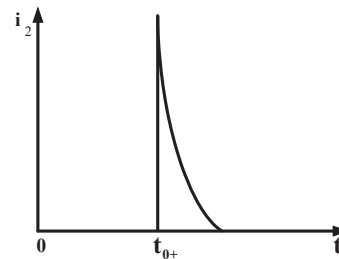


Рис. 3. Ток в нагрузке

Fig. 3. Load current

Задачей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование работы лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора и изучение влияния взаимной индуктивности M_{34} на величину импульса тока в линейной активной нагрузке.

Теория

Были проведены теоретические исследования работы лабораторной модели размыкателя индуктивно-импульсного генератора. Для устранения условия некорректной коммутации размыкание коммутатора эквивалентно подключению в цепь с током i_1 дополнительного сопротивления R_d , имеющего достаточно большую величину, такую, что после размыкания K ток, протекающий через ЭДС E , $i_E \approx 0$.

С момента времени $t=0_+$ переходный процесс описывается системой уравнений, составленной по законам Кирхгофа для мгновенных значений [19]:

$$\left. \begin{aligned} &i_1(R_1 + R_4 + R_d) + (L_1 + L_4) \frac{di_1}{dt} - \\ &- M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{34} \frac{di_3}{dt} + i_3 R_d = E \\ &i_2(R_2 + R_H) + L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt} = 0 \\ &L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{34} \frac{di_1}{dt} + i_3(R_3 + R_d) + i_1 R_d = E \end{aligned} \right\}.$$

Взаимная индуктивность равна $M_{12} = K_{12}\sqrt{L_1L_2}$,

а $M_{34} = K_{34}\sqrt{L_3L_4}$, где $K_{12} \leq 1$, $K_{34} \leq 1$ – коэффициенты связи обмоток.

Полученная система дифференциальных уравнений решается при помощи метода переменных состояния в пакете программ MathCad, согласно которому в матричной форме дифференциальные уравнения переменных состояния записываются в виде [21]:

$$(dx/dt) = (A)(x) + (B)(V),$$

где (x) – матрица-столбец переменных состояния; (A) – матрица состояния; (V) – матрица-столбец источников энергии; (B) – матрица коэффициентов при источниках; (dx/dt) – матрица-столбец первых производных по времени от переменных состояния.

Расчетные и экспериментальные исследования

Работа схемы лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора (рис. 4) была рассчитана для конкретных значений параметров элементов, показанных на рис. 1:

$$\begin{aligned} E &= 10 \text{ В}, R_1 = 0,6 \text{ Ом}, L_1 = 0,00675 \text{ Гн}, \\ R_2 &= 1,8 \text{ Ом}, L_2 = 0,00675 \text{ Гн}, R_3 = 5,8 \text{ Ом}, \\ L_3 &= 0,0694 \text{ Гн}, R_4 = 1,6 \text{ Ом}, L_4 = 0,0068 \text{ Гн}, \\ K_{12} &= 0,6, K_{34} = 0,5, M_{12} = 0,00405 \text{ Гн}, \\ M_{34} &= 0,01 \text{ Гн}, R_{\text{ш}} = 1 \text{ Ом}, R_d = 10000 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

При этом $R_2 = R_2^1 + R_{\text{ш}}$, $R_3 = R_3^1 + R_{\text{ш}}$, $R_4 = R_4^1 + R_{\text{ш}}$, где R_2^1, R_3^1, R_4^1 – активные сопротивления катушек индуктивностей; $R_{\text{ш}} = 1 \text{ Ом}$ – сопротивление токоизмерительного шунта. В качестве коммутатора K применялся тумблер ТП1–2, предназначенный для ручной коммутации низковольтных электрических цепей малой мощности, не требующих частотного переключения.

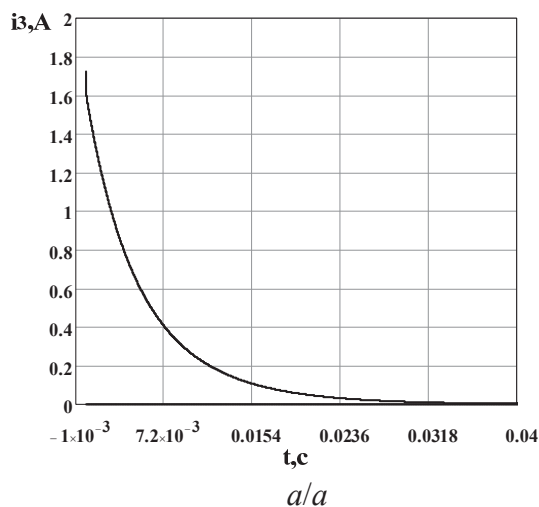


Рис. 5. Ток в катушке R_3, L_3 при $K_{34}=0,5$

Fig. 5. Current in the inductance coil R_3, L_3 at $K_{34}=0,5$

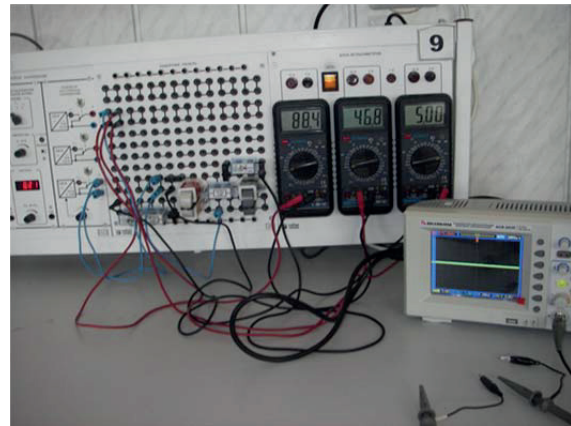


Рис. 4. Лабораторная модель индуктивно-импульсного генератора

Fig. 4. Laboratory model of inductive pulse generator

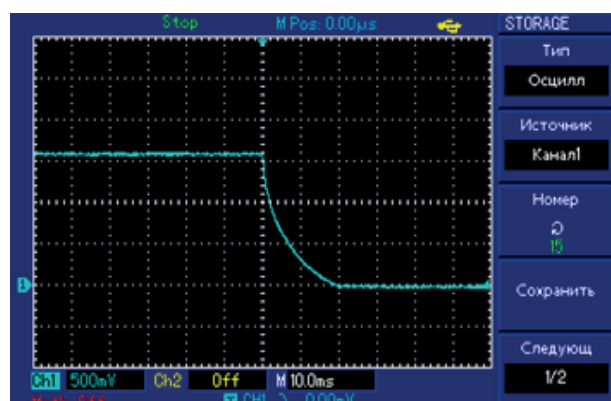
Установившиеся значения токов до размыкания коммутатора K $i_1(0_-) = 4,545 \text{ А}$, $i_3(0_-) = 1,724 \text{ А}$, $i_4(0_-) = 0 \text{ А}$.

На рис. 5, а, б показаны результаты математического моделирования и осциллограммы тока i_3 в катушке индуктивности R_3, L_3 .

Общий ток, возникающий в катушках R_1, L_1 и R_3, L_3 при размыкании коммутатора K , по результатам расчета составляет $i(0_+) = 1,59 \text{ А}$, по результатам эксперимента $-i(0_+) \approx 1,3-1,4 \text{ А}$.

По результатам моделирования в катушке R_3, L_3 возникает скачок тока $\Delta i_3 = i_3(0_-) - i(0_+) = 0,137 \text{ А}$, причем ток i_3 не меняет своего направления. По результатам эксперимента скачок тока составил $\Delta i_3 = 0,2 \text{ А}$. Расчетная длительность кривой тока переходного процесса составляет $\Delta t_3 = 25 \text{ мс}$, экспериментальная – $\Delta t_3 \approx 18-19 \text{ мс}$.

На рис. 6, а, б показан расчетный и экспериментальный импульсы тока i_1 в катушке индуктивности R_1, L_1 . По результатам моделирования в катушке возникает скачок тока $\Delta i_1 = i_1(0_-) - i(0_+) = 6,135 \text{ А}$,



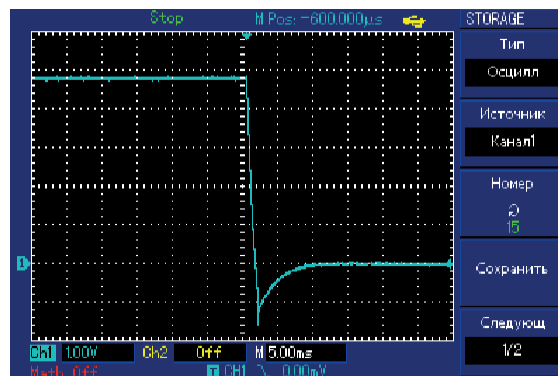
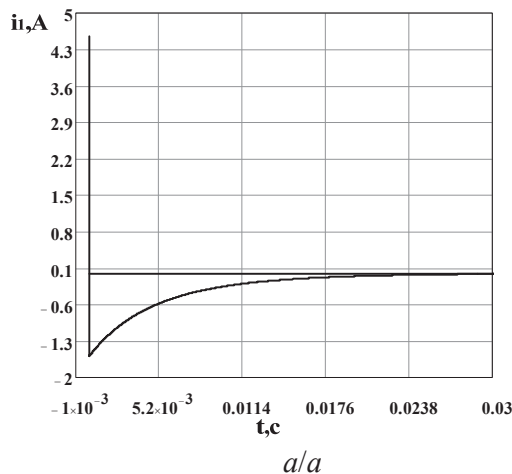


Рис. 6. Ток в катушке R_1, L_1 при $K_{34}=0,5$

Fig. 6. Current in the inductance coil R_1, L_1 at $K_{34}=0,5$

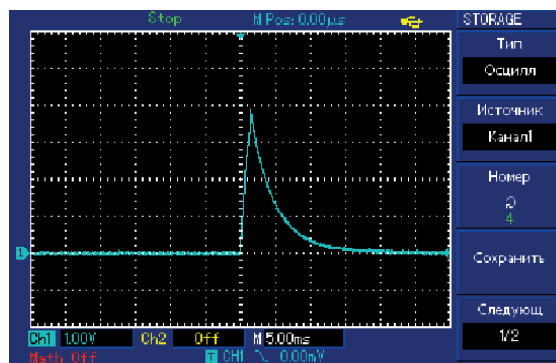
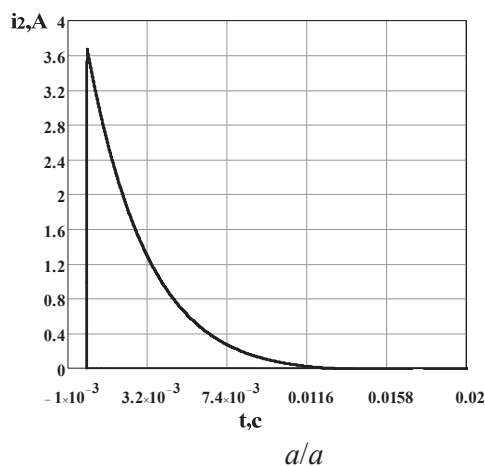


Рис. 7. Ток в нагрузке $R_H=10$ Ом при $K_{34}=0,5$

Fig. 7. Load current $R_H=10$ Ohm at $K_{34}=0,5$

причем ток i_1 меняет направление на противоположное. Экспериментальный скачок тока $\Delta i_1 \approx 6-6,3$ А, что примерно совпадает с расчетным значением. Расчетная длительность импульса тока $\Delta t_1 = 18$ мс, экспериментальная $\Delta t_1 \approx 12-15$ мс.

На рис. 7, а, б показан расчетный и экспериментальный импульс тока в нагрузке $R_H=10$ Ом. Расчетное значение тока $i_2(0_+)=3,7$ А, при длительности импульса $t_{\text{имп}} \approx 12$ мс, экспериментальное значение $-i_2(0_+) \approx 3,8$ А, при длительности импульса $t_{\text{имп}} \approx 15$ мс, что примерно совпадает с расчетным значением. Амплитудная мощность импульса тока в нагрузке по результатам расчета равна $P_m = i_2^2(0_+)R_H = 14$ Вт. В расчетном импульсе ток после коммутации мгновенно нарастает до максимального значения, а в экспериментальном импульсе тока крутизна переднего фронта составляет $di/dt \approx 3166$ А/с, что связано с перемagnetиванием ферромагнитного сердечника.

Таким образом, длительность импульса тока в низкоомной нагрузке $R_H=10$ Ом составляет $t_{\text{имп}} \approx 15$ мс, что на порядок меньше, чем длитель-

ность импульса вывода энергии из индуктивных накопителей $t_{\text{имп}} \approx 100$ мс, а крутизна переднего фронта импульса $di/dt \approx 3166$ А/с соизмерима с крутизной импульса тока от конденсаторной батареи, что может обеспечить максимально быстрый взрыв проволоочки и быстрый ввод энергии в канал разряда электрогидравлического излучателя в реальном устройстве.

Преимуществом индуктивно-импульсного генератора (рис. 1) является наличие индуктивной связи между катушками индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 , что позволяет запастись дополнительной электромагнитную энергию и увеличить импульс тока в нагрузке. Были произведены расчеты величины импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$, запасаемой в катушках индуктивности $R_1, L_1, R_3, L_3, R_4, L_4$, электромагнитной энергии W до коммутации и амплитудной мощности импульса тока в нагрузке $P_m = i_2^2(0_+)R_H$ в зависимости от коэффициента связи K_{34} при неизменном коэффициенте связи $K_{12}=0,6$ (рис. 8, а-в). Расчет электромагнитной энергии W производился по формуле:

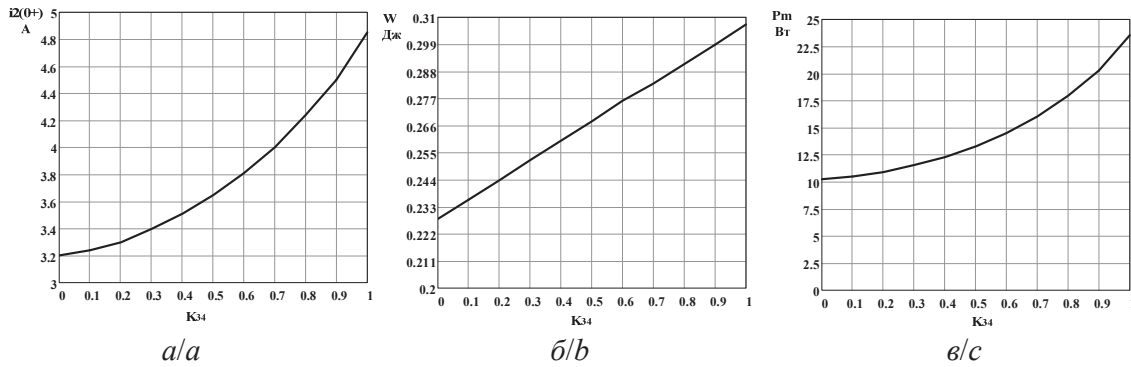


Рис. 8. Зависимости $i_2(0_+)$, W , P_m от K_{34}

Fig. 8. Charts $i_2(0_+)$, W , P_m from K_{34}

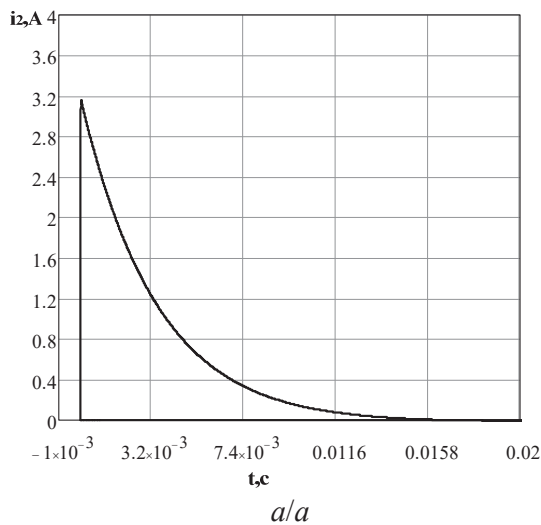
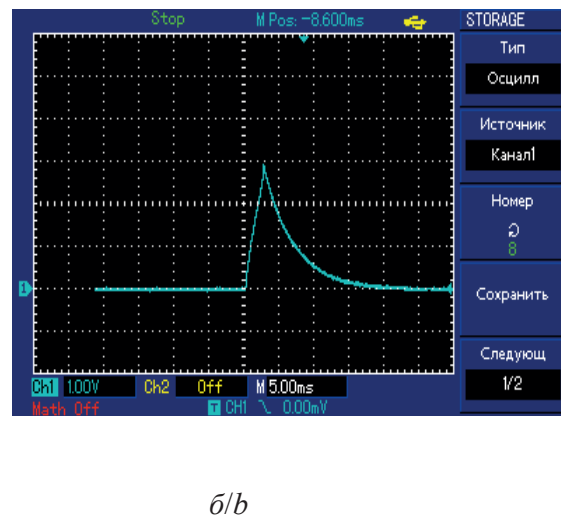


Рис. 9. Ток в нагрузке $R_H=10$ Ом при $K_{34}=0$

Fig. 9. Terminal current $R_H=10$ Ом at $K_{34}=0$



$$W = 0,5((L_1 + L_4)i_1^2(0_-) + L_3i_3^2(0_-) + M_{34}i_1(0_-)i_3(0_-)).$$

При увеличении коэффициента связи K_{34} от 0 до 1 запасенная электромагнитная энергия W возрастает в 1,34 раза, вследствие чего величина импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$ возрастает в 1,51 раза, а амплитудная мощность импульса тока в нагрузке P_m – в 2,3 раза.

На рис. 9, а, б приведены расчетный и экспериментальный импульс тока в нагрузке i_2 при отсутствии индуктивной связи $K_{34}=0$ катушек индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 .

Расчетное значение тока $i_2(0_+)=3,1$ А при длительности импульса $t_{имп} \approx 15$ мс, экспериментальное значение $i_2(0_+) \approx 3$ А при длительности импульса $t_{имп} \approx 18$ мс, что примерно совпадает с расчетным значением. Амплитудная мощность импульса тока в нагрузке по результатам расчета равна $P_m=10,5$ Вт, что в 1,33 раза меньше, чем для импульса на рис. 6, б. Крутизна переднего фронта экспериментального импульса тока $di/dt \approx 1000$ А/с, что в 3,16 раз ниже, чем для импульса на рис. 6, б. Следовательно, наличие индуктивной связи между катушками индуктивности R_3, L_3 и R_4, L_4 приво-

дит к существенному увеличению амплитудной мощности и крутизны переднего фронта импульса тока в нагрузке.

Выводы

1. Предложена схема индуктивно-импульсного генератора импульсов тока, позволяющая увеличить амплитуду и мощность импульсов тока в нагрузке с помощью индуктивной связи.
2. Разработана математическая модель работы схемы индуктивно-импульсного генератора на линейную активную нагрузку с применением метода переменных состояния.
3. Проведены сравнительные расчетные и экспериментальные исследования лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора при работе на линейную активную нагрузку. Экспериментальные значения токов в катушках индуктивностей и в нагрузке примерно совпали с расчетными значениями.
4. По результатам исследований работы индуктивно-импульсного генератора на линейную активную нагрузку $R_H=10$ Ом при неизменном коэффициенте связи $K_{12}=0,6$ и при увеличении

коэффициента связи K_{34} от 0 до 1 запасенная электромагнитная энергия W возрастает в 1,34 раза, вследствие чего величина импульса тока в нагрузке $i_2(0_+)$ возрастает в 1,51 раза, а амплитудная мощность импульса тока в нагрузке P_m – в 2,3 раза.

5. Исследования лабораторной модели индуктивно-импульсного генератора показали, что длительность импульса тока в низкоомной нагрузке $R_H=10$ Ом при коэффициентах индуктивной связи $K_{12}=0,6$, $K_{34}=0,5$ составляет $t_{имп} \approx 15$ мс, что на порядок меньше, чем длительность импульса вывода энергии из индуктивных накопителей $t_{имп} \approx 100$ мс, а крутизна переднего фронта импульса $di/dt \approx 3166$ А/с соизмерима с

крутизной импульса тока от конденсаторной батареи. Это позволит обеспечить максимально быстрый взрыв проволоки и быстрый ввод энергии в канал разряда электрогидравлического излучателя в реальном устройстве. Кроме того, длительность импульса тока в нагрузке соизмерима с длительностью импульса тока от ударного генератора, $t_{имп} \approx 12-15$ мс, что позволяет сформировать низкочастотный импульс возбуждаемых волн давления, обуславливающий высокий сейсмический КПД, что делает индуктивно-импульсный генератор перспективным для применения в качестве источника импульса тока в сейсморазведке при работе на взрывающуюся проволоку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McNab I.R. Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – V. 42. – № 5. – P. 1118–1127.
2. Fair H.D. The Past, Present and Future of Electromagnetics Launch Technology and the IEEE International EML Symposia // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41. – № 5. – P. 1024–1027.
3. Underwater Electrical Wire Explosion and its Applications / Ya. Krasik, A. Grinenko, A. Sayapin, S. Efimov, A. Fedotov, V. Gurovich, V. Oreshkin // Transactions on Plasma Science. – 2008. – V. 36. – № 2. – P. 423–434.
4. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 98 с.
5. Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS): Proc. of the International Conference. – Tomsk, 1–4 December, 2015 <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414854> (дата обращения 10.02.2018).
6. Методическое пособие по оценке размера вреда водным биоресурсам при сейсморазведке и электроразведке / В.Н. Семёнов, Ю.И. Зуенко, И.А. Атаманова, О.Н. Мухаметова, Г.С. Зеленихина, Б.В. Архипов, А.Б. Корниенко. – М.: Изд-во ВНИРО, 2016. – 86 с.
7. Lu Zhu, Zheng-Hao He, Zhi-Wen Gao, Fa-Li Tan, Jen-Shih Chang. Research on the influence of conductivity to pulsed arc electrohydraulic discharge in water // Journal of Electrostatics. – 2014. – V. 72 (1). – P. 53–58.
8. Оценка возможностей лабораторных измерений упругих свойств неконсолидированных осадков с использованием электроискрового источника упругих волн и пьезоэлектрических приемников давления / М.Л. Владов, С.С. Бричева, В.А. Стручков, М.Ю. Токарев // Технология сейсморазведки. – 2016. – № 3. – С. 114–121.
9. Buckingham M.J., Richardson M.D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments // IEEE Journal of oceanic engineering. – 2002. – V. 27. – P. 429–453.
10. Wojtowicz Jo., Wojtowicz H., Wajs W. Simulation of electrohydrodynamic phenomenon using computational intelligence methods // Computeria Computer Science. – 2015. – V. 60. – P. 188–196.
11. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / под ред. А.В. Калинина. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 193 с.
12. Иницирование канала разряда в воде электрическим взрывом алюминиевой фольги / М.В. Сильников, С.И. Кривошеев, К.С. Кулаков, С.Л. Кулаков // Известия Российской Академии Наук, Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 36–39.
13. Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. Электрогидравлический источник волн давления для малоглубинной сейсморазведки // Механизация строительства. – 2015. – № 5. – С. 45–48.
14. Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. Применение электромашиного генератора для сейсморазведки // Геофизика. – 2015. – № 1. – С. 82–86.
15. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1986. – 252 с.
16. Соковнин С.Ю. Мощная импульсная техника. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 65 с.
17. О применении электрических машин для электрогидравлического метода сейсморазведки / Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков, Б.А. Франковский, Ю.Г. Шмигирилов // Силовые импульсные системы. – Новосибирск: Институт горного дела, СОАН СССР, 1973. – С. 66–70.
18. Индуктивно-импульсный генератор: пат. Рос. Федерация № 156007; заявл. 24.02.2015; опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30. – 2 с.
19. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 286 с.
20. Pustynnikov S.V. Application of generalized switching laws for increasing current pulse value // Russian Electrical Engineering. – 2016. – V. 87. – № 1. – P. 35–40. URL: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371216010077> (дата обращения 10.02.2018).
21. Tubbs St.P. Mathcad for Electrical Engineers and Technologists: Mathcad Tutorial with Practical Electrical Examples. – United States: Published by Stephen, 2009. – 108 p.

Поступила 13.02.2018 г.

Информация об авторах

Пустынников С.В., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хан В., кандидат технических наук, профессор института Физики, заместитель директора международного центра «Наука будущего» Цилинского университета.

UDC 550.834; 621.373

POSSIBILITY OF APPLICATION OF INDUCTANCE-CAPACITANCE OSCILLATOR IN ELECTRO-HYDRAULIC SOURCE OF SEISMIC VIBRATIONS

Sergey V. Pustynnikov¹,

pustynnikov@tpu.ru

Wei Han²,

whan@jlu.edu.cn

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Jilin University,
Qianin Street 2699, Changchun, 130012, P.R. China.

The relevance of the research is caused by the need to develop new sources of powerful current pulses for creation of seismic waves in non-explosive seismic exploration.

The aim of the research is to carry out estimated and pilot investigations of operation of inductance-capacitance oscillator model using the generalized laws of switching for receiving current pulses in the resistive load.

Objects: laboratory model of the inductance-capacitance oscillator with inductively connected inductance coils for increasing current pulse power and steepness in linear active loading.

Methods: method of state-space variables for calculating the equations of transient phenomenon in a circuit after switching which are worked out under Kirchhoff's laws, application of the generalized laws of switching for calculating the starting values of currents in the inductance coils and in load resistance.

Results. The authors have designed the diagram of the inductance-capacitance oscillator which uses the generalized laws of switching for receiving power current pulses in the resistive load. The oscillator contains the inductive and connected coils that allow increasing the reserved energy and power of the received pulses. Using the method of state-space variables, the mathematical model of operation of the diagram on the linear resistive load was obtained. The authors performed the estimation and pilot researches of the diagram laboratory model. The experimental values of currents in inductance coils and in loading coincided approximately with the calculated ones. Duration of the received current pulses in loading and steepness of the forward front of current pulses make perspective the application of the inductance-capacitance oscillator in seismic exploration, as a source of seismic waves at explosion of a delay.

Key words:

Generator, current pulse, mathematical model, inductance coil, coefficient of connection, oscillogram, seismic exploration.

REFERENCES

- McNab I.R. Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges. *Trans. on Plasma Science*, 2014, vol. 42, no. 5, pp. 1118–1127.
- Fair H.D. The Past, Present and Future of Electromagnetics Launch Technology and the IEEE International EML Symposia. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2013, vol. 41, no. 5, pp. 1024–1027.
- Krasik Ya.E., Grinenko A., Sayapin A., Efimov S., Fedotov A., Gurovich V.Z., Oreshkin V.I. Underwater Electrical Wire Explosion and its Applications. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2008, vol. 36, no. 2, pp. 423–434.
- Pichugina M.T. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulse energy]. Tomsk, TPU Publ. house, 2005. 98 p.
- Aristov A.V., Aristova L.I., Ekkert I.A. The control system of electric vibrating motor under the potential phase modulation. *Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Proc. of the International Conference*. Tomsk, 1–4 December, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414854> (accessed 10 February 2018).
- Semenov V.N., Zuenko Yu.I., Atamanova I.A., Mukhametova O.N., Zelenichina G.S., Arkhipov B.V., Kornienko A.B. *Metodicheskoe posobie po otsenke razmera vreda vodnym bioresursam pri seismorazvedke i elektrorazvedke* [Guidelines on assessment of damage to water bioresources in seismic exploration and electrical prospecting]. Moscow, VNIRO Publ., 2016. 86 p.
- Lu Zhu, Zheng-Hao He, Zhi-Wen Gao, Fa-Li Tan, Jen-Shih Chang. Research on the influence of conductivity to pulsed arc electrohydraulic discharge in water. *Journal of Electrostatics*, 2014, vol. 72 (1), pp. 53–58.
- Vladov M.L., Bricheva S.S., Struchkov V.A., Tokarev M.Ju. Assessment of the advantages of the elastic waves source spark coupled with piezoelectric pressure receivers in laboratory measurements of the unconsolidated deposits elastic properties. *Seismic technology journal*, 2016, no. 3, pp. 114–121. In Rus.
- Buckingham M.J., Richardson M.D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 2002, vol. 27, pp. 429–453.
- Wojtowicz Jo., Wojtowicz H., Wajs W. Simulation of electrohydrodynamic phenomenon using computational intelligence methods. *Computeria Computer Science*, 2015, vol. 60, pp. 188–196.
- Kalinin A.V. *Elektroiskrovoy istochnik uprugikh voln dlya tszeley nazemnoy seysmorazvedki* [The spark source of elastic waves for land seismic works]. Moscow, MGU Publ., 1989. 193 p.
- Silnikov M.V., Krevosheev S.I., Kulakov K.S., Kulakov S.L. Initiation of the discharge channel in water by electrical explosion of aluminum foil. *News of Russian Academy of Sciences, Energy Publ.*, 2013, no. 3, pp. 36–39. In Rus.
- Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. Electro-hudraulic pressure waves for shallow seismic. *Mechanization of building*, 2015, no. 5, pp.45–48. In Rus.
- Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. Application of an electric machine generator for seismic. *Geophysics*, 2015, no. 1, pp. 82–86. In Rus.
- Yutkin L.A. *Elektrogidravlichesky effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 252 p.

16. Sokovnin S.Yu. *Moshchnaya impulsnaya energetika* [Powerful pulse energy]. Ekaterinburg, GOU-VPO UGTU-UPI Publ., 2008. 65 p.
17. Sipaylov G.A., Khorkov K.A., Frankovskiy B.A., Shmigirilo Yu.G. O primeneni elektricheskikh mashin dlya elektrogidravlicheskogo metoda seysmorazvedki [On application of electrical machines for electrohydraulic seismic survey method]. *Silovye impulsnyye sistemy* [Power impulse systems]. Novosibirsk, Institute of mining, SOAN SSSR, 2008. pp. 66–70.
18. Pustynnikov S.V. *Induktivno-impulsny generator* [Inductive generator of impulses of current]. Patent RF, no. 156007, 2015.
19. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of the theory of circuits]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 286 p.
20. Pustynnikov S.V. Application of generalized switching laws for increasing current pulse value. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 1, pp. 35–40. Available at: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371216010077> (accessed 10 February 2018).
21. Tubbs St.P. *Mathcad for Electrical Engineers and Technologists: Mathcad Tutorial with Practical Electrical Examples*. United States, Stephen Publ., 2009. 108 p.

Received: 13 February 2018.

Information about the authors

Sergey V. Pustynnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Wei Han, Cand. Sc., professor, Executive Deputy Director of International Center of Future Science, Jilin University.