

УДК 620.92

## **РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА КВАДРАТИЧНОГО НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ**

Дидух Д.Р., студент гр. СОД-19-1, V курс

Научный руководитель: Менакер К.В., к.т.н., доцент

Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Иркутский государственный университет путей  
сообщения», г. Чита

Неравномерное суточное и сезонное потребление, а в некоторых случаях и неравномерная генерация электрической энергии приводит к необходимости ее накопления в периоды наименьшей нагрузки (наибольшей генерации) и отдачи в наиболее нагруженные периоды времени. Дополнительно аккумулирование энергии решает задачи обеспечения резерва в случае отказа генерирующих систем или систем преобразования и передачи электроэнергии. Кроме того аккумулирование энергии вблизи локаций потребителей позволяет добиться уменьшения нагрузки в распределительных сетях.

Суммарная мощность накопителей энергии в мире на текущий момент превышает более 125 ГВт. На гидроаккумулирующие накопительные системы приходится 98 % суммарной мощности. Доля индуктивно-емкостных накопителей электрической энергии, электрохимических, инерционных, тепловых и воздушных аккумуляторов составляет около 2 %.

Несмотря на низкий суммарный процент мощности индуктивно-емкостные накопители играют огромную роль в повышении качества электрической энергии в энергосистемах нашей страны и всего мира.

В настоящее время находят применение только индуктивно-емкостные накопители пассивного типа. В накопителях этого типа происходит одностороннее преобразование электрической энергии от первичного источника в энергию электрического или магнитного поля.

Между тем возникает вопрос. А почему в индуктивно-емкостных накопителях не использовать способ активного накопления электрической энергии, заключающийся в том, что энергия, накопленная на реактивных элементах за предыдущий период времени синхронно складывается с энергией первичного источника для еще большего накопления электрической энергии в магнитном или электрическом поле [1-3]. Далее процесс повторяется. Близкая аналогия такого подхода сравнима с преумножением заработанных финансовых средств на банковских накопительных счетах в противоположность их хранению и обесцениванию под «подушкой».

Принципиальные схемы индуктивно-емкостного накопителя энергии на основе предложенного подхода представлены на рис. 1, 2.

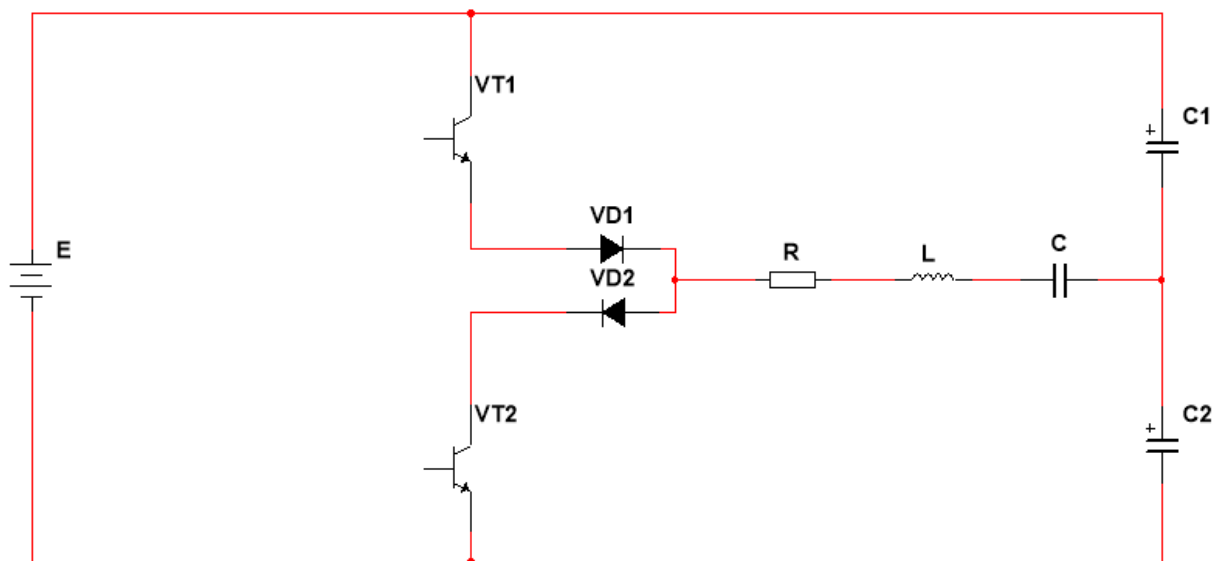


Рис.1 Реализация метода активного накопления энергии на основе полумостовой схемы

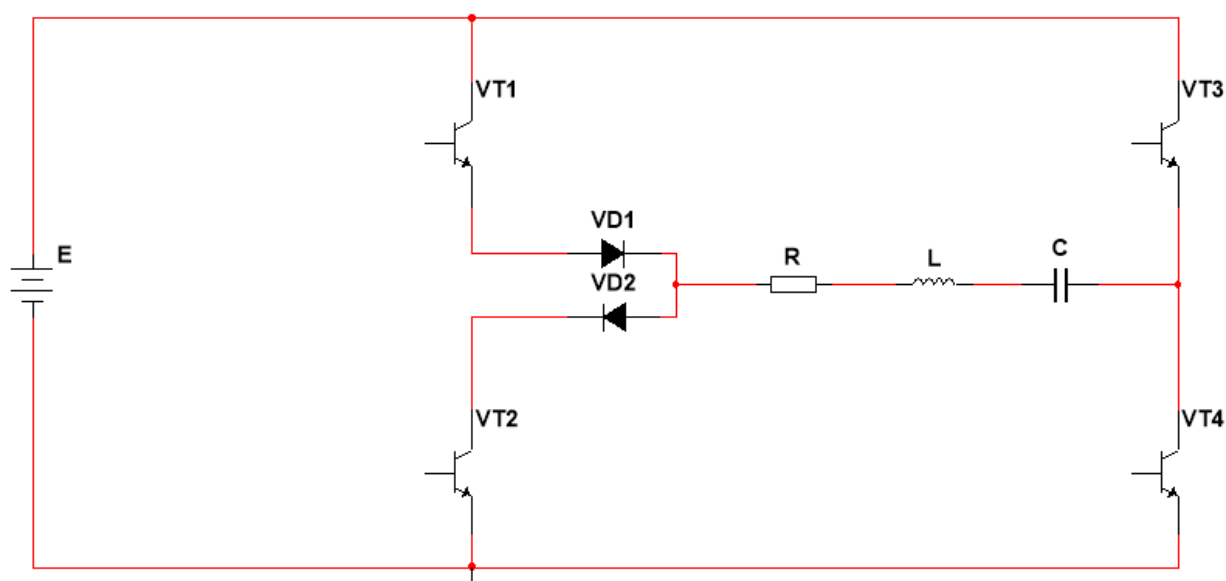


Рис.2 Реализация метода активного накопления энергии на основе мостовой схемы

Переходные процессы в устройстве активного накопления энергии проще объяснить на примере мостовой схемы. В момент первого одновременного открытия транзисторных ключей  $VT1$  и  $VT4$  происходит зарядка емкости  $C$  до напряжения  $E$  первичного источника. При отсутствии диода  $VD1$  оригинал функции тока анализируемой цепи при высокой добротности колебательного контура имеет вид затухающих периодических колебаний:

$$i_{11}(t) = \frac{E}{L} \cdot \frac{e^{-\delta \cdot t}}{\omega_{CB}} \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t) \quad (1)$$

где  $\delta = \frac{R}{2 \cdot L}$  – коэффициент затухания;

$\omega_{CB} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \delta^2}$  – частота свободных колебаний в цепи.

Напряжение на емкостном элементе зависит от закона изменения тока и тоже имеет вид затухающих колебаний:

$$u_{C11}(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt = u_C(0) + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \frac{E}{L} \cdot \frac{e^{-\delta \cdot t}}{\omega_{CB}} \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t) \cdot dt \quad (2)$$

где  $u_C(0) = 0$  – начальное напряжение емкостного элемента  $C$ .

Диод  $VD1$  исключает колебания в схеме, позволяя зарядиться емкости  $C$  при первом открытии транзисторных ключей  $VT1$  и  $VT4$  до напряжения  $E$  первичного источника.

Второй такт работы схемы связан с одновременным открытием транзисторов  $VT2$ ,  $VT3$  и сменой направления тока на емкостном и индуктивном элементе. При этом емкостной элемент  $C$  оказывается включенным согласно с первичным источником  $E$ . Ток в цепи емкостного и индуктивного элемента на втором такте работы схемы определяется суммой напряжений первичного источника и заряженной во время первого такта емкости  $C$ :

$$i_{22}(t) = \frac{E + u_{C11}(t)}{L} \cdot \frac{e^{-\delta \cdot t}}{\omega_{CB}} \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t) \quad (3)$$

Диод  $VD2$  в схеме пропускает одну полуволну и исключает дальнейшие колебания по аналогии с диодом  $VD1$ . Во время второго такта изменяется полярность напряжения на выводах емкостного элемента  $C$  увеличивается его значение на величину напряжения первичного источника  $E$ :

$$u_{C22}(t) = u_C(0) - \frac{E + u_{C11}(t)}{C \cdot L \cdot \omega_{CB}} \cdot \int_0^t e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_{CB} \cdot t) \cdot dt \quad (4)$$

Проведенный анализ показал, что выражения для тока и напряжения емкостного элемента для последующих тактов носят рекурсивный характер. На каждом такте происходит синхронное сложение напряжения емкостного элемента с напряжением первичного источника (рис. 3). Увеличение напряжения на емкости приводит к пропорциональному увеличению тока в цепи.

При частоте срабатывания транзисторов  $VT1$ - $VT4$ , совпадающей с частотой свободных колебаний колебательного контура, наблюдается оптимальный режим работы индуктивно-емкостного накопителя (рис. 4).

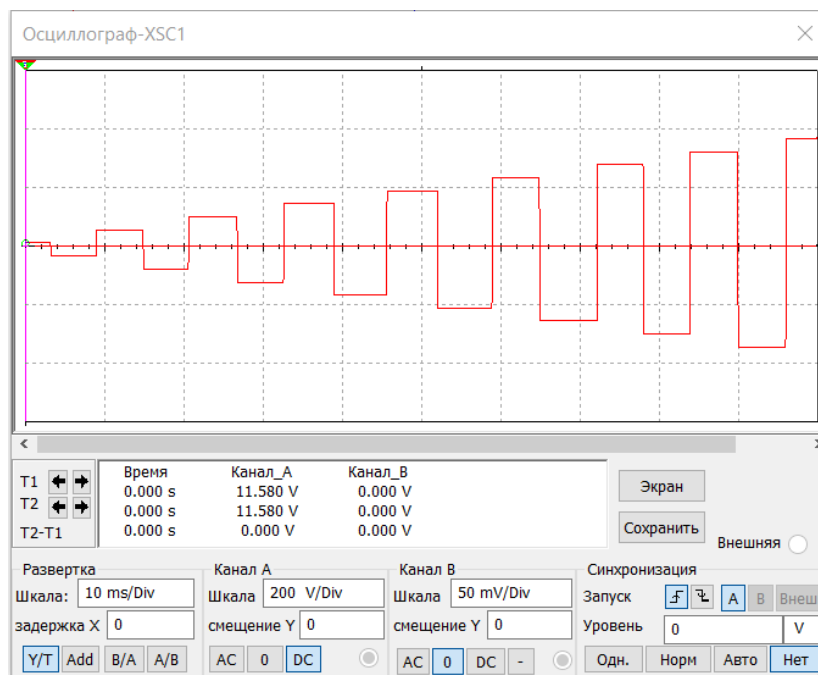


Рис.3 Осциллограмма изменения напряжения на емкостном элементе в зависимости от тактов работы транзисторных ключей

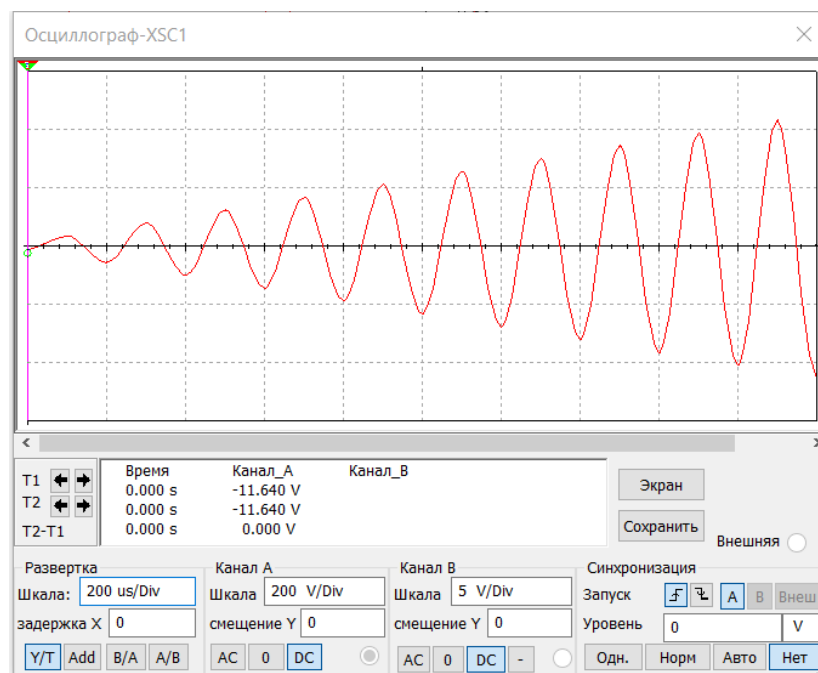


Рис.4 Осциллограмма изменения напряжения на емкостном элементе при совпадении частоты срабатывания транзисторных ключей с частотой свободных колебаний колебательного контура

Преимуществом рассмотренного метода квадратичного накопления электрической энергии в индуктивно-емкостных накопителях является его повышенная эффективность.

Энергия, затрачиваемая на зарядку емкостного элемента за  $n$  тактов

работы транзисторных ключей, в первом приближении, может быть определена как:

$$W_{1n} = \frac{E^2}{\omega_{св} \cdot L} \cdot n \cdot \frac{T_{св}}{2} \quad (5)$$

где  $T_{св}$  - период свободных колебаний.

Значение накопленной энергии на емкостном элементе на каждом  $i$ -ом такте определяется известным выражением:

$$W_{2n} = C \cdot U_{Ci}^2 / 2 \quad (6)$$

где  $U_{Ci}$  - амплитудные значения напряжения емкостного элемента, определенные с помощью рекурсивных выражений

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что скорость квадратичного изменения накопленной на емкостном элементе энергии за несколько десятков тактов работы транзисторных ключей превышает линейный рост потребленной от первичного источника энергии. Эффективность индуктивно-емкостного накопителя энергии, построенного на квадратичном методе, может достигать нескольких единиц.

### Список литературы:

1. Исследование режима автоколебаний короткозамкнутой длинной линии / К. В. Менакер, С. М. Куценко, М. В. Востриков, П. В. Савченко // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 69-76. – DOI 10.53891/00135860\_2023\_11\_69. – EDN UVDCEO.
2. Менакер, К. В. Создание ударного контура возбуждения импульсного резонансного преобразователя мощности / К. В. Менакер, А. С. Цветаева // Электротехника. – 2015. – № 5. – С. 36-40. – EDN TODIKF.
3. Menaker, K. V. Development of the impulse circuit of excitation of an impact resonant power converter / K. V. Menaker, A. S. Tsvetaeva // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, No. 5. – P. 270-274. – DOI 10.3103/S1068371215050053. – EDN UFAFAJ.