

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ УСКОРЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА В ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ С ПОМОЩЬЮ АВМ

А. В. ЛООС, К. А. ХОРЬКОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ, В. В. ИВАШИН

(Представлена научным семинаром электромеханического факультета)

Аналитическое исследование схемы увеличения энергии и скорости ее передачи от ударного генератора в индуктивную нагрузку довольно затруднительно [1]. Эта трудность объясняется не только сложностью решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы в схеме, но и трудностью определения начальных условий для каждого этапа работы схемы, так как они определяются из результатов решения предыдущего этапа.

Поэтому исследования проводились на аналоговой вычислительной машине МНБ-1. Решение дифференциальных уравнений по этапам на аналоговой машине не представляет трудностей. Однако этот путь исследований не дает общей картины работы схемы и требует больших затрат времени, так как для решения уравнений, описывающих процессы на каждом этапе работы схемы, нужно определять начальные условия из результатов решения на предыдущем этапе. При этом неизбежны ошибки, вносимые при определении и задании начальных условий.

Для получения всей картины работы схемы была разработана математическая модель, переключения в которой производились автоматически при переходе от этапа к этапу специальным программным устройством. Применение программного устройства увеличило точность решения задачи, так как отпала необходимость определения начальных условий для последующего этапа из результатов решения на предыдущем этапе, сократило значительно время исследований, позволило наглядно проследить весь процесс работы схемы.

Переходный процесс на первом этапе работы схемы (замыкание К-1) описывается уравнением

$$E_m \sin \omega t = L_r \frac{di_2}{dt} + i_2 r_r + \frac{1}{C} \int i_c dt. \quad (1)$$

В момент перехода э. д. с. генератора через нулевое значение происходит замыкание К-2. Переходные процессы для второго этапа работы схемы описываются уравнениями (1) и (2)

$$0 = L_n \frac{di_n}{dt} + i_n r_n + \frac{1}{C} \int i_c dt. \quad (2)$$



При прохождении тока генератора через нулевое значение происходит размыкание К-1. Переходный процесс для третьего этапа ( $t_1 \div t_2$ ) описывается уравнением (2). При прохождении напряжения на емкостной батарее через нулевое значение происходит замыкание К-3. Переходный процесс на четвертом этапе ( $t_2 \div t_3$ ) описывается уравнениями (3) и (4)

$$L_H \frac{di_H}{dt} + i_H r_H + i_3 r_3 = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int i_c dt + i_3 r_3 = 0. \quad (4)$$

В начале следующей положительной полуволны э. д. с. генератора происходит замыкание К-1. Переходные процессы на пятом этапе ( $t_3 \div t_4$ ) работы схемы описываются уравнениями (1), (2), (3), (4). При достижении нулевого значения тока в коротке происходит размыкание К-3. Переходные процессы на этом этапе ( $t_4 \div t_5$ ) работы схемы описываются уравнениями (1) и (2). Далее этапы работы схемы повторяются.

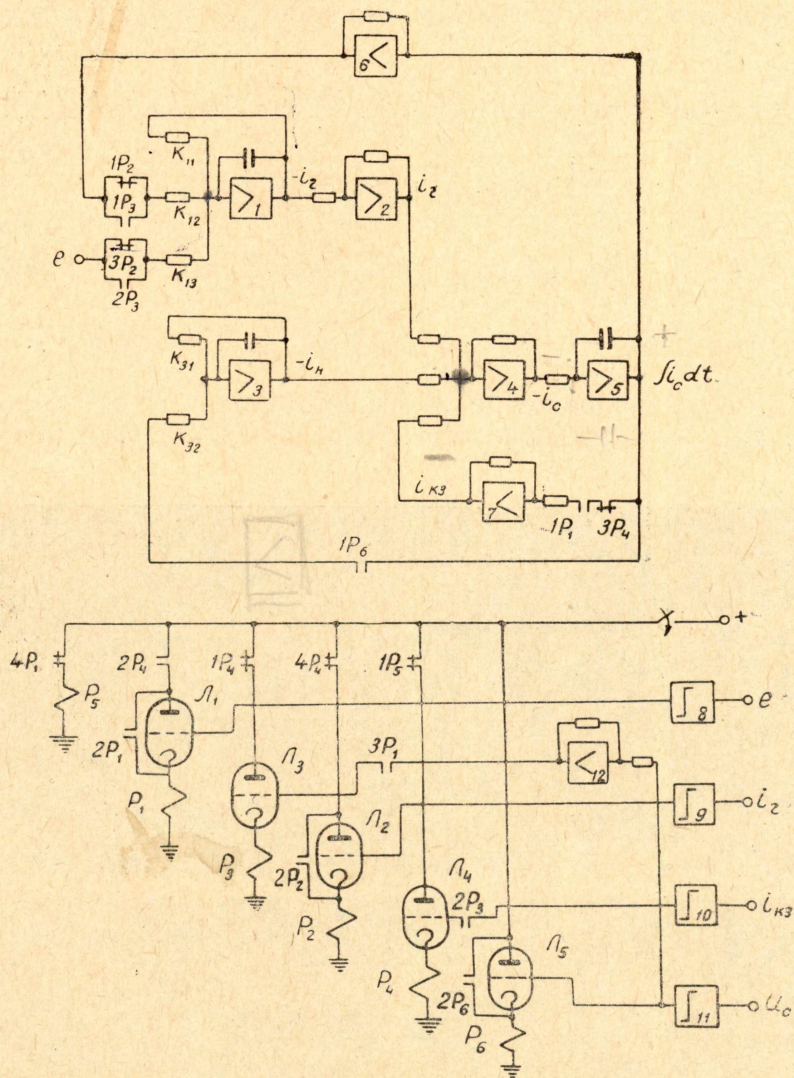


Рис. 1. Математическая модель схемы.

Математическая модель рассмотренной схемы представлена на рис. 1. Разработка математической модели производилась так, чтобы при помощи переключений можно было моделировать работу реальной



схемы накопления на каждом этапе. Переключения в математической модели при переходе от этапа производятся при помощи специального программного устройства, состоящего из реле  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ , ламп  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$  и усилителей постоянного тока 8, 9, 10, 11, в обратную связь которых включены диодные ограничители. При переходе через нуль входного сигнала на выходе блоков 8, 9, 10, 11 мгновенно меняется знак выходного напряжения. Это управляющее напряжение поступает на сетки ламп  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ . При положительном потенциале сетки лампы открываются (каждая в соответствующий момент), реле срабатывают и производят необходимые переключения в математической модели. После окончания одного цикла накопления необходимо привести схему программного устройства в исходное положение. Для этой цели служит реле  $P_5$ , контакты которого  $1P_5$  замыкают цепь питания реле  $P_4$ , которое, своими контактами  $1P_4, 2P_4, 4P_4$  подготавливает к работе реле  $P_1, P_2, P_3$ . Таким образом, программное устройство позволяет исследовать работу схемы для любого числа циклов.

Процессы в математической модели описываются системой уравнений:

$$pU_1 = -k_{11}U_1 - \frac{1}{p} k_{12}k_{61}k_{51}k_{41}k_{21}U_1 + \frac{1}{p} k_{12}k_{61}k_{51}k_{42}U_3 + \frac{1}{p} k_{12}k_{61}k_{51}k_{43}U_{10} - k_{13}U_9; \quad (5)$$

$$pU_3 = -k_{31}U_3 + \frac{1}{p} k_{21}k_{32}k_{51}k_{41}U_1 + \frac{1}{p} k_{43}k_{51}k_{32}U_{10} - \frac{1}{p} k_{32}k_{51}k_{42}U_3; \quad (6)$$

$$pU_{10} = k_{101}k_{51}k_{41}k_{21}U_1 + k_{101}k_{51}k_{43}U_{10} + k_{101}k_{51}k_{42}U_3. \quad (7)$$

Здесь

$U_1, U_9, U_3, U_{10}$  — напряжение на выходе блоков,

$k_{12}, k_{13}, k_{21}, \dots$  — коэффициенты передачи блоков, где первая цифра

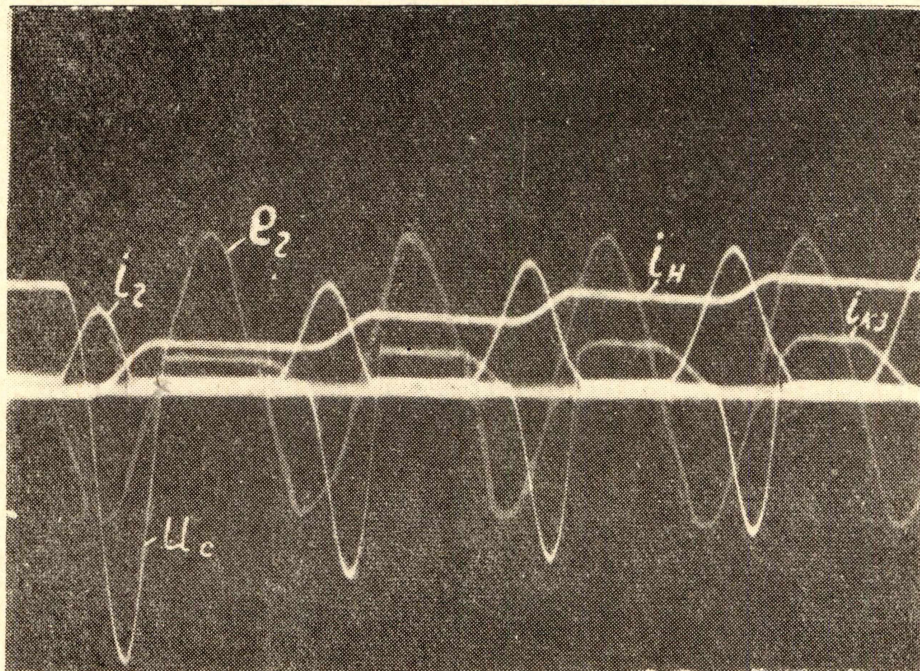


Рис. 2. Оциллограмма решения на АВМ.



обозначает номер блока, вторая — номер входа. Начальному заряду на емкостной батарее соответствует начальное условие на блоке 5. Из сравнения уравнений (1), (2), (3), (4) с уравнениями (5), (6), (7) получаем выражения для коэффициентов передачи блоков через параметры реальной схемы, масштаб времени  $M_t$ , масштаб тока  $M_i$  и масштаб э. д. с.  $M_E$ :

$$k_{11} = M_t \frac{r_\Gamma}{L_\Gamma}; \quad k_{12} = M_t^2 \frac{1}{L_\Gamma C}; \quad k_{31} = M_t \frac{r_H}{L_H};$$

$$k_{32} = M_t^2 \frac{1}{L_H C}; \quad k_{101} = \frac{M_t}{Cr_3}; \quad k_{13} = \frac{1}{L_\Gamma} \cdot \frac{M_E M_i}{M_t}.$$

Значения всех остальных коэффициентов передачи выбраны равными единице. Разработанная математическая модель позволяет исследовать работу схемы при различных параметрах и различных начальных напряжениях конденсаторной батареи. Исследования работы схемы были проведены с целью выяснения влияния отдельных параметров схемы на величину накапливаемой в нагрузке энергии и скорость ее накопления. На рис. 2 представлена осциллограмма решения для  $\frac{L_H}{L_\Gamma} = 5$ ;  $\nu^2 = 3,5$ ;  $U_{co} = 0,5 E_m$ ;  $\frac{r}{x} = 0,05$ .

### Результаты исследования работы схемы

Исследование работы схемы производилось при различных соотношениях между индуктивностями нагрузки и генератора и при постоянной частоте собственных колебаний контура  $L_\Gamma - C - L_H$ . Для оценки скорости нарастания тока в нагрузке до определенного уровня определялось число периодов э. д. с. генератора, при котором по каждой из рассмотренных схем ток в нагрузке достигал значения, равного  $0,9 I_{уд}$ . Известно, что наибольшее увеличение энергии, передаваемой от генератора к нагрузке, при применении вспомогательной конденсаторной батареи происходит при отношении  $\nu^2 = \frac{\omega_k^2}{\omega^2} \approx 3,5$  [2].

Здесь  $\omega_k$  — собственная частота колебаний контура  $L_\Gamma - C - L_H$ .

Величина отношения  $\frac{L_H}{L_\Gamma}$  изменялась в пределах  $1 \div 10$ , напряжение на емкости  $U_{co} = 0$  и  $U_{co} = 0,5 E_m$ . Результаты этих исследований представлены в табл. 1. В последней строке табл. 1 для сравнения показано также число положительных полупериодов э. д. с. при работе ударного генератора на нагрузку без вспомогательной емкости.

Максимальная энергия нагрузки и конденсаторной батареи вычислялась по формулам:

$$Q_H = 0,5 L_H I_{уд}^2, \quad Q_C = 0,5 C U_{max}^2,$$

$$C = \frac{L_H + L_\Gamma}{\omega_k^2 L_H L_\Gamma}.$$

### Исследование влияния предварительной зарядки конденсаторной батареи

Эти исследования были проведены для собственной частоты колебаний схемы  $\omega_k = \sqrt{3,5} \omega$ ,  $L_H = 5 L_\Gamma$ ,  $\frac{r}{x} = 0,05$ .

Результаты этих исследований представлены в табл. 2.



Таблица 1

$L_H/L_T$	1	2,5	5	7,5	10	$U_{co}/E_m$
$n$	2	4	7	9	12	
$Q_c/Q_H$ %	18	5,5	2,2	1,4	1,1	0
$P_H/P_c$	1,90	1,80	1,80	1,75	1,70	
$n$	2	3	5	7	9	
$Q_c/Q_H$ %	20	5,8	2,5	1,6	1,2	0,5
$P_H/P_c$	2,0	1,95	1,90	1,90	1,80	
$n$	4	8	14	20	25	

Примечание:  $n$  — число положительных полупериодов э.д.с.;  
 $Q_c$  — энергия, на которую должна быть рассчитана конденсаторная батарея;  
 $Q_H$  — энергия, которую можно передать нагрузке по рассматриваемой схеме;  
 $P_H$  — потери в нагрузке при работе без конденсаторной батареи;  
 $P_c$  — потери в нагрузке при работе с емкостью по рассматриваемой схеме.

Таблица 2

$U_{co}/E_m$	0	0,25	0,5	0,75	1
$n$	7	6	5	5	4
$Q_c/Q_H$ %	2,20	2,30	2,50	3,00	4,30
$P_H/P_c$	1,80	1,90	1,93	1,95	1,95

### Выводы

1. Применение вспомогательной конденсаторной батареи, рассчитанной на энергию, менее 5% от энергии, передаваемой в нагрузку (при  $L_H > 2L_T$ ), приводит к сокращению времени передачи энергии в 2÷2,5 раза. Одновременно уменьшается рассеяние энергии в активных сопротивлениях в 1,5÷2 раза.

2. Предварительная зарядка конденсаторной батареи еще больше увеличивает скорость передачи энергии в индуктивную нагрузку по сравнению со схемой без предварительной зарядки конденсаторной батареи.

3. Применение конденсаторной батареи, подключаемой параллельно нагрузке, облегчает условия работы коммутирующего устройства К-2 при снятии закоротки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лоос, К. А. Хорьков, Г. А. Сипайлов, В. В. Ивашин. Схема увеличения энергии и скорости ее передачи от ударного генератора в индуктивную нагрузку. Известия ТПИ, т. 139, 1965.

2. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. О совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи на индуктивную нагрузку. Известия ТПИ, т. 132, 1964. 1964.