

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СХЕМЫ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ
ГЕНЕРАТОРА УДАРНОЙ МОЩНОСТИ И КОНДЕНСАТОРНОЙ
БАТАРЕИ**

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

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Аналитическое исследование совместной работы ударного генератора с конденсаторной батареей на индуктивную нагрузку показало, что применение вспомогательной емкости приводит к значительному увеличению энергии, отдаваемой генератором в нагрузку [1]. Однако в связи с громоздкостью формул, описывающих процессы при совместной работе, анализ схемы в [1] производился при пренебрежении активными сопротивлениями генератора и нагрузки и при допущении равенства их индуктивностей.

Известно, что величины активных и индуктивных сопротивлений генератора и нагрузки, величина емкости, а также величина и знак начального напряжения емкости в сильной степени влияют на характер переходного процесса. Поэтому представляет большой интерес исследование влияния отдельных параметров на величину тока нагрузки с целью определения оптимальных параметров схемы.

Использование методов и средств математического моделирования позволяет получить решение данного вопроса, сокращая при этом до минимума требуемую затрату времени. Сущность моделирования заключается в замене реальной схемы её математической моделью, воспроизводящей работу реальной схемы. Процессы, происходящие в математической модели, можно наблюдать, регистрировать, проверять их соответствие результатам теоретического анализа. Наряду с этим при математическом моделировании удаётся сравнительно просто изменять параметры отдельных элементов схемы и выяснить влияние этих изменений на качество работы схемы в целом.

Исследование работы схемы проводилось на аналоговой вычислительной машине МНБ-1. Аналоговые вычислительные машины характеризуются тем, что каждой переменной в реальной системе ставится в соответствие определенная переменная машинная величина. В качестве оригинала служит математическое описание процессов в исследуемой схеме, а аналоговая машина реализует заданные математические соотношения.

В данной работе на базе созданной математической модели схемы совместной работы ударного генератора с конденсаторной батареей проведены исследования влияния отдельных параметров схемы на характер переходного процесса, в частности, на величину энергии, передаваемой в нагрузку.

Математическая модель схемы

Схема увеличения энергии, получаемой от ударного генератора с помощью конденсаторной батареи, представлена на рис. 1.

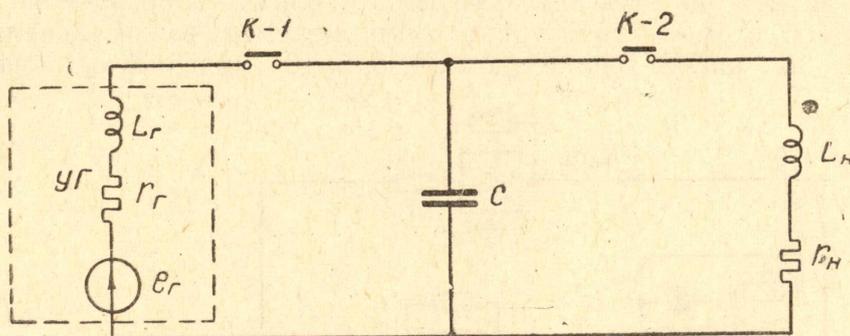


Рис. 1. Схема совместной работы ударного генератора (УГ) и конденсаторной батареи. Здесь r_r, r_n, L_r, L_n — активные и индуктивные сопротивления генератора и нагрузки, К-1, К-2 — коммутирующие устройства.

В исходном состоянии аппараты К-1 и К-2 разомкнуты, конденсаторная батарея заряжена до напряжения U_{co} , генератор работает на холостом ходу. В момент прохождения э. д. с. генератора через нулевое значение ($e_r = 0$) и при направлении увеличения e_r , согласно с U_{co} , происходит замыкание К-1. Происходящие при этом процессы описываются уравнением

$$E_m \sin(\omega t + \psi_0) = L_r \frac{di_r}{dt} + r_r i_r + \frac{1}{c} \int i_c dt. \quad (1)$$

В момент прохождения напряжения на ёмкости через нулевое значение происходит замыкание К-2. Переходные процессы для этого этапа работы схемы описываются уравнениями (1) и (2)

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

В момент первого прохождения тока генератора через нулевое значение происходит отключение генератора размыканием К-1. Переходный процесс в схеме для этого этапа описывается уравнением (2). Затем происходит размыкание К-2 в момент прохождения тока нагрузки через нулевое значение.

Используя известные математические методы, в принципе возможно получить выражения для токов и напряжений для всего цикла работы исследуемой схемы. Но такой путь решения связан с большими трудностями, которые объясняются изменениями в схеме, происходящими за время цикла. Поэтому аналитическое исследование схемы практически доступно только по этапам работы схемы. Однако исследование по этапам не даёт общей картины изменения токов и напряжений. Электронная модель исследуемой схемы позволяет преодолеть эти трудности, а также даёт возможность провести исследования для большого числа вариантов.

Решение уравнений переходных процессов по этапам на аналоговой машине не представляет трудностей. Однако при этом возрастает трудоемкость решения задачи и становятся неизбежными ошибки, вносимые определением и подстановкой начальных условий. Поэтому жела-

тельно было найти пути решения задачи в целом без разделения на этапы. С этой целью нами была создана вспомогательная схема, автоматически производящая переключения в математической модели от этапа к этапу, что позволило исследовать сразу весь процесс работы схемы, так как при этом была создана полная электронная модель исследуемой схемы. Структурная схема математической модели представлена на рис. 2. Блоки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10 моделируют дифферен-

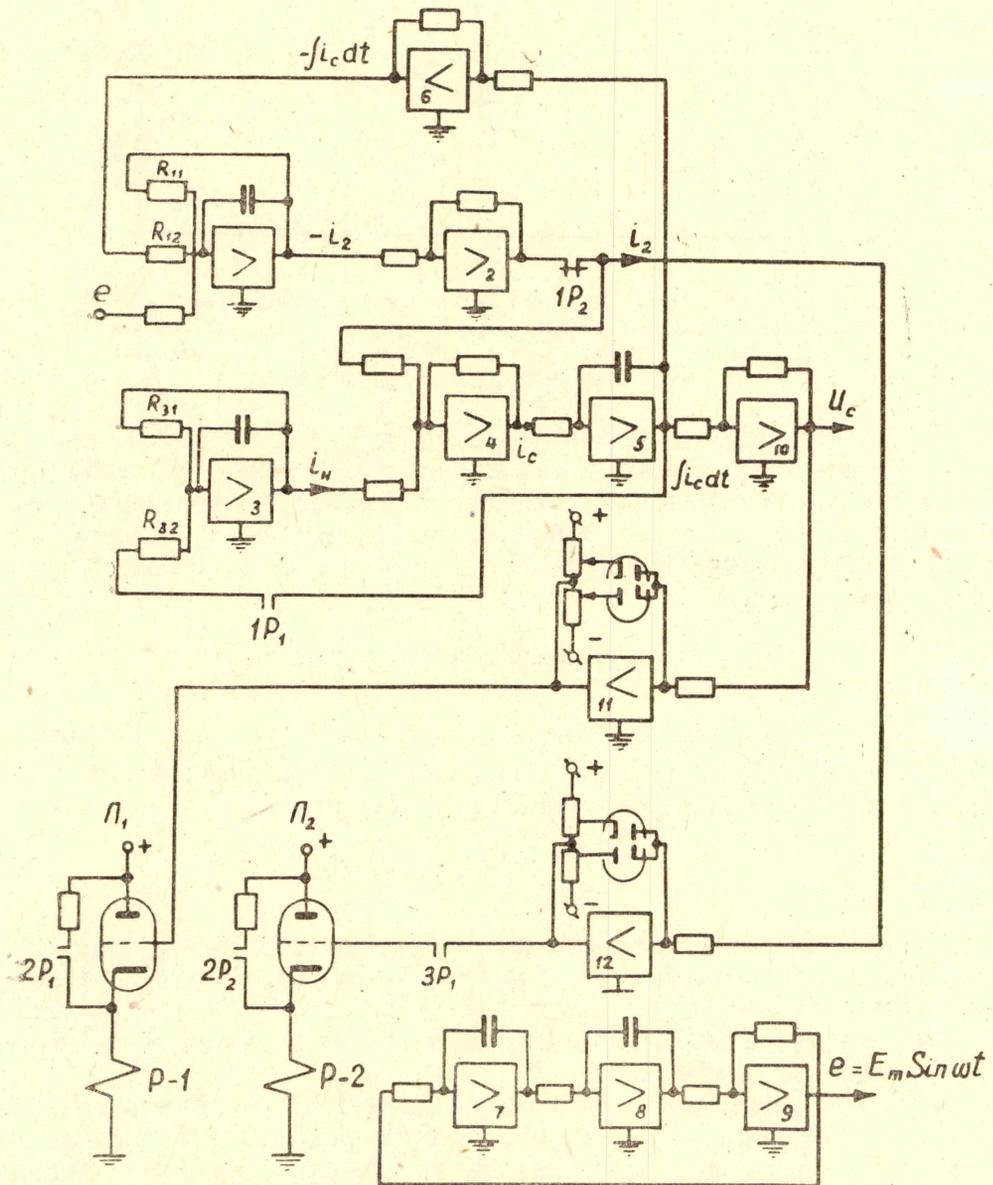


Рис. 2. Структурная схема математической модели совместной работы УГ и конденсаторной батареи.

циальные уравнения (1) и (2). Разомкнутому контакту $1P_1$ и замкнутому $1P_2$ соответствует математическая модель уравнения (1). Замкнутым $1P_1$ и $1P_2$ соответствует математическая модель уравнений (1) и (2). Замкнутому $1P_1$ и разомкнутому $1P_2$ соответствует математическая модель уравнения (2).

Э. д. с. синусоидального вида получается от специального генератора (блоки 7, 8, 9). Необходимые переключения в математической

модели происходят в функции от напряжения на конденсаторной батарее и тока генератора. Управление работой схемы осуществляется автоматически и собрано на блоках 11, 12 и лампах Л₁ и Л₂. Управление работой реле осуществляется с помощью блоков 11 и 12, имеющих диодные ограничители в цепи обратной связи. При нулевом значении входного сигнала на выходе этих блоков образуется скачок напряжения (релейная характеристика). Это управляющее напряжение подается на сетки Л₁ и Л₂. Под действием этого сигнала лампы открываются (каждая в соответствующий момент), по обмоткам реле течет ток, реле срабатывают и производят необходимые переключения в схеме математической модели. Процессы в математической модели описываются уравнениями:

$$pU_1 = -k_{11}U_1 - \frac{1}{p}k_{12}k_{61}k_{51}k_{41}k_{21}U_1 + \frac{1}{p}k_{12}k_{61}k_{51}k_{42}U_3 - k_{13}U_0, \quad (3)$$

$$pU_3 = -k_{31}U_3 + \frac{1}{p}k_{21}k_{32}k_{51}k_{41}U_1 - \frac{1}{p}k_{32}k_{51}k_{42}U_3. \quad (4)$$

Здесь

U_1, U_3, U_0 — напряжение на выходе блоков;

k_{11}, k_{12}, \dots — коэффициенты передачи блоков, где первая цифра обозначает номер блока, вторая — номер входа.

Начальному заряду конденсаторной батареи на математической модели соответствует начальное условие на блоке 5. Сравнивая уравнения (1), (2) и (3), (4), выражаем коэффициенты передач блоков через параметры реальной схемы. Изменениям параметров реальной схемы соответствует на модели изменение только четырех коэффициентов ($k_{11}, k_{12}, k_{31}, k_{32}$), находящихся в следующей зависимости от параметров реальной схемы:

$$\begin{aligned} k_{11} &= 0,016 \frac{r_{\Gamma}}{L_{\Gamma}}, \\ k_{12} &= 0,0000256 \frac{1}{L_{\Gamma}c}, \\ k_{31} &= 0,016 \frac{r_{\Pi}}{L_{\Pi}}, \\ k_{32} &= 0,0000256 \frac{1}{L_{\Pi}c}. \end{aligned} \quad (5)$$

Исследования работы схемы были проведены с целью выяснения влияния отдельных параметров схемы на величину энергии, отдаваемой в нагрузку ударным генератором при совместной работе с конденсаторной батареей.

Результаты исследований работы схемы

1. Исследование влияния активного сопротивления обмоток статора и нагрузки на величину тока, протекающего через нагрузку.

Исследования проводились для схемы с собственной частотой колебаний $\omega_k = \sqrt{3,5}\omega$ при предварительном заряде емкости $U_{co} = 0,5E_m$ для отношений активного сопротивления к реактивному $\frac{r}{x} = 0; 0,01;$

0,02; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

r/x	0	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20
$\frac{I_H \text{ при } r \neq 0}{I_H \text{ при } r = 0}$	0	0,99	0,96	0,92	0,86	0,82	0,76

Как следует из табл. 1, величина тока в нагрузке с увеличением активного сопротивления уменьшается. Для ударных генераторов отношение $\frac{r}{x}$ имеет в среднем величину порядка 0,05, в этом случае

коэффициент затухания $k_3 = \frac{i(r)}{i(r=0)}$ будет равен $\sim 0,92$.

При работе схемы на индуктивную нагрузку, не содержащую стального сердечника, коэффициент затухания из-за увеличения отношения $\frac{r}{x}$ будет еще меньше.

В среднем можно считать, что пренебрежение активным сопротивлением вносит в результаты расчета величины тока погрешность порядка 10%. Так как энергия пропорциональна квадрату тока, то пренебрежение активным сопротивлением вносит в результаты расчета величины энергии ошибку порядка 20%. Зависимость, характеризующая влияние активного сопротивления на величину передаваемой в нагрузку энергии, представлена на рис. 3, а. Из полученных данных следует, что при совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи на индуктивную нагрузку не следует пренебрегать активным сопротивлением.

2. Исследование влияния собственной частоты схемы на величину передаваемой в нагрузку энергии. Исследования проводились для следующих значений отношения квадратов собственной частоты контура к частоте э.д.с. генератора: $\nu^2 = \frac{\omega_k^2}{\omega^2} = 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5$ при $\frac{r}{x} = 0,05$, $U_{c0} = 0,5E_m$, $L_H = L_r$. Результаты исследований, выраженные в относительных единицах, сведены в табл. 2.

Таблица 2

ν^2	1,25	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$I_{H\max}$	4,60	4,50	4,20	3,85	3,60	3,20	3,00	2,80	2,75
$I_r \text{ при } I_{H\max}$	-0,45	-0,10	0,30	0,60	0,80	1,01	1,06	1,15	1,18
$I_{r\max}$	3,30	3,00	2,70	2,25	2,00	1,80	1,75	1,85	1,85
$U_{c\max}$	2,00	1,90	1,70	1,31	1,25	1,20	1,15	1,13	1,12
Q_H	5,30	5,07	4,43	3,70	3,24	2,56	2,25	1,96	1,89
Q_c	6,40	4,83	2,89	1,37	1,04	0,82	0,66	0,57	0,50
Q_c/Q_H	1,20	0,95	0,65	0,37	0,32	0,32	0,29	0,29	0,26

При этом за базисные единицы приняты следующие:

$I_m = \frac{E_m}{L_n + L_r}$ — значение периодической составляющей тока при работе генератора непосредственно на нагрузку, то есть без емкости при $L_n = L_r$;

E_m — базисная э.д.с., равная амплитуде э.д.с. генератора;
 $Q_1 = 0,5L_n(2I_m)^2$ — базисная энергия, которая передавалась бы в нагрузку при работе ударного генератора на нагрузку по обычной схеме, то есть без емкости.

При определении базисной энергии величина ударного тока принята равной сумме периодической и аperiodической составляющей тока ($2I_m$) без учета затухания.

Максимальная энергия в нагрузке и максимальная энергия конденсаторной батареи вычислялись по формулам:

$$Q_n = 0,5L_n I_n^2,$$

$$Q_c = 0,5c U_{\text{сmax}}^2,$$

$$c = \frac{L_n + L_r}{\omega_k^2 L_n L_r}.$$

Как следует из табл. 2, с помощью вспомогательной емкости можно в несколько раз увеличить энергию, отдаваемую нагрузке. Границы приемлемых значений v^2 могут быть определены, исходя из двух условий.

1. С целью получения максимальной энергии в нагрузке следует стремиться к меньшим значениям v^2 , при этом нижним пределом можно считать значение $v^2 = 2$, при котором $Q_c = 0,5Q_n$. При $v^2 < 2$ генератор переходит в двигательный режим и работа схемы становится нецелесообразной.

2. Из экономических соображений, то есть из соображений стоимости 1 дж энергии, отдаваемой нагрузке, следует стремиться к наибольшим значениям v^2 , при этом верхним пределом можно считать значение $v^2 = 6$, при котором от генератора в нагрузку отнимается энергия

$$Q_n = 1,5Q_1.$$

Итак, возможные границы отношения v^2 будут

$$2 \leq v^2 \leq 6.$$

В результате проведенных исследований можно рекомендовать более узкие границы оптимальных величин v^2 , а именно

$$3 \leq v^2 \leq 3,5.$$

3. Исследование влияния первоначального заряда конденсаторной батареи. Исследования проводились для значений $U_{\text{со}}$, равных 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1 от величины E_m при $\frac{\kappa}{x} = 0,05$ и $v^2 = 3,5$. Результаты исследований представлены в табл. 3. Как следует из табл. 3, предварительная зарядка емкости ведет к увеличению энергии, отдаваемой генератором нагрузке, однако, одновременно увеличивается объем конденсаторной батареи, т. е. стоимость энергии, вырабатываемой схемой.

Вопрос о выборе оптимального начального напряжения на конденсаторной батарее следует также рассматривать из условий получения максимальной энергии и минимальной стоимости единицы энергии.

Таблица 3

U_{co}/E_m	0	0,25	0,5	0,75	1
$I_{нmax}$	2,75	2,85	3,20	3,60	3,85
$I_{г}$ при $I_{нmax}$	1,20	1,10	1,01	1,11	1,28
$U_{сmax}$	0,98	1,05	1,20	1,45	1,58
$Q_{н}$	1,89	2,03	2,56	3,24	3,70
$Q_{с}$	0,55	0,63	0,82	1,20	1,42
$Q_{с}/Q_{н}$	0,29	0,31	0,32	0,37	0,38

На наш взгляд, приемлемое значение U_{co} находится в пределах 0,25 ÷ 0,75 от величины E_m .

4. Исследование влияния величины нагрузки. Исследования проводились для значений индуктивностей нагрузки, равных 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 от величины $L_{г}$ при $\frac{r}{x} = 0,05$, $U_{co} = 0,5E_m$ и значений ν^2 , равных 3; 3,5; 4. Результаты исследований сведены в табл. 4. Как следует из табл. 4, с отклонением индуктивного сопротивления нагрузки от зна-

Таблица 4

ν^2	$L_{н}/L_{г}$	0,5	1	2	3	5	10
3	$I_{нmax}$	4,55	3,60	2,22	1,32	1,00	0,53
	$I_{г}$ при $I_{нmax}$	1,85	0,80	-0,15	-1,20	-1,25	-1,80
	$U_{сmax}$	1,36	1,25	1,21	1,21	1,20	1,20
	$Q_{н}$	2,59	3,24	2,43	1,31	1,25	0,70
	$Q_{с}$	2,08	1,04	0,82	0,87	1,01	1,60
	$Q_{с}/Q_{н}$	0,80	0,32	0,34	0,66	0,80	2,28
3,5	$I_{нmax}$	4,30	3,20	2,14	1,37	0,92	0,45
	$I_{г}$ при $I_{нmax}$	1,95	1,01	0	-0,30	-0,90	-1,40
	$U_{сmax}$	1,23	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
	$Q_{н}$	2,30	2,55	2,29	1,43	1,06	0,50
	$Q_{с}$	1,46	0,82	0,69	0,73	0,88	1,37
	$Q_{с}/Q_{н}$	0,64	0,32	0,30	0,51	0,83	2,70
4	$I_{нmax}$	4,05	3,00	1,96	1,41	0,89	0,44
	$I_{г}$ при $I_{нmax}$	2,02	1,06	0,24	-0,25	-0,70	-1,10
	$U_{сmax}$	1,20	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
	$Q_{н}$	2,05	2,25	1,92	1,49	0,99	0,48
	$Q_{с}$	1,21	0,66	0,55	0,58	0,71	1,10
	$Q_{с}/Q_{н}$	0,59	0,28	0,29	0,34	0,72	2,27

чения, равного сопротивлению генератора, величина энергии, передаваемой нагрузке, уменьшается, причем одновременно увеличивается и энергия, на которую должна быть рассчитана конденсаторная бата-

рея. Увеличение индуктивного сопротивления нагрузки при неизменной конденсаторной батарее может привести к тому, что в момент максимума тока нагрузки появляется отрицательный всплеск тока генератора. Это свидетельствует о завышенной емкости батареи. Например, при $\frac{L_H}{L_r} = 3$, $\nu^2 = 3; 3,5; 4$ имеем соответственно ток генератора, равный $-1,20; -0,30; -0,25$. С уменьшением емкости батареи генератор не переходит в двигательный режим, и большая часть энергии передается нагрузке. Если при $\nu^2=3$ $Q_H=1,31$, то при $\nu^2=4$ $Q_H=1,49$ при отношении $\frac{Q_c}{Q_H}$ 0,66 и 0,39 соответственно.

Из табл. 4 следует, что отклонение величины индуктивного сопротивления нагрузки от величины индуктивного сопротивления генератора больше чем в два раза невыгодно.

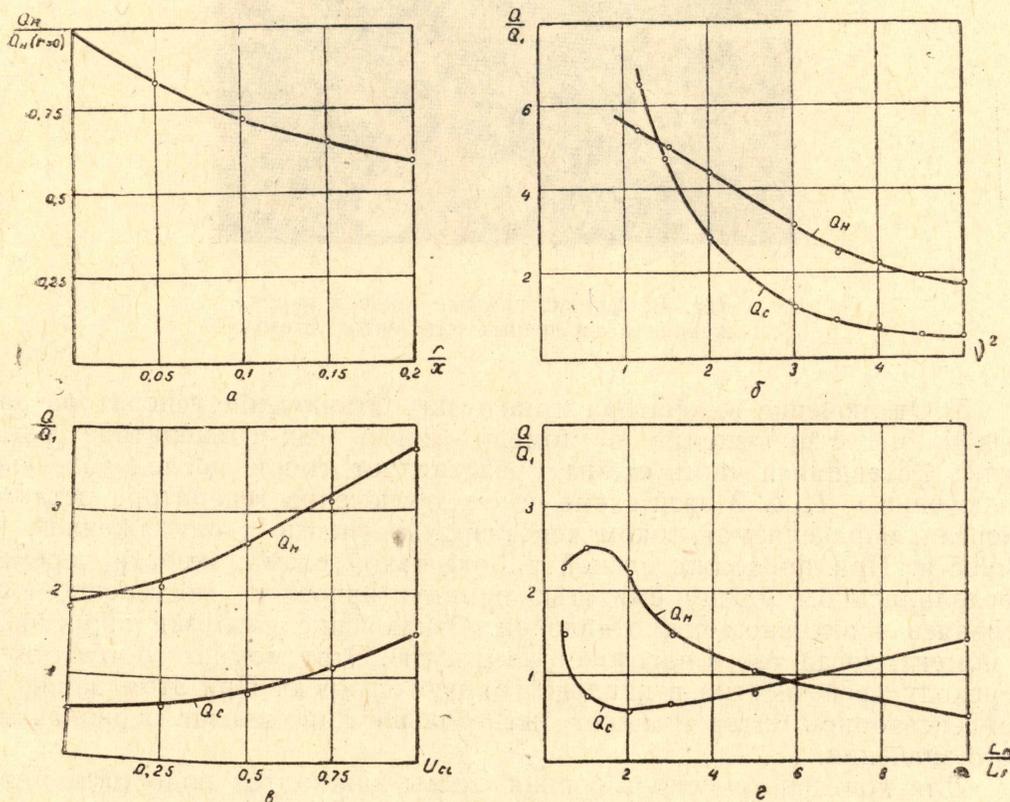


Рис. 3. Кривые зависимости энергии нагрузки и энергии конденсаторной батареи от: а) активного сопротивления; б) собственной частоты колебаний контура; в) начального заряда конденсаторной батареи; г) величины сопротивления нагрузки.

По результатам исследований (табл. 1, 2, 3, 4) построены кривые (рис. 3), характеризующие зависимости энергии в нагрузке и энергии, на которую должна быть рассчитана конденсаторная батарея, от различных факторов. Кривые позволяют наглядно проследить влияние активного сопротивления, собственной частоты колебаний контура сопротивления нагрузки, начального заряда емкости на величину энергии.

На рис. 4 приведена осциллограмма решения процесса включения ударного генератора и конденсаторной батареи на индуктивную на-

грузку при $\nu^2=3$, $U_{co}=0,5E_m$, $L_H=L_r$, $\frac{r}{x}=0,05$. На осциллограмме показаны кривые изменения напряжения U_c и тока I_c конденсаторной батареи, токов генератора I_r и нагрузки I_H и э.д.с. генератора e_r в функции времени. Качественно кривые осциллограммы совпадают с кривыми, полученными расчетным путем при пренебрежении активным сопротивлением, а количественно отличаются от них на величину, определяемую затуханием тока α [1].

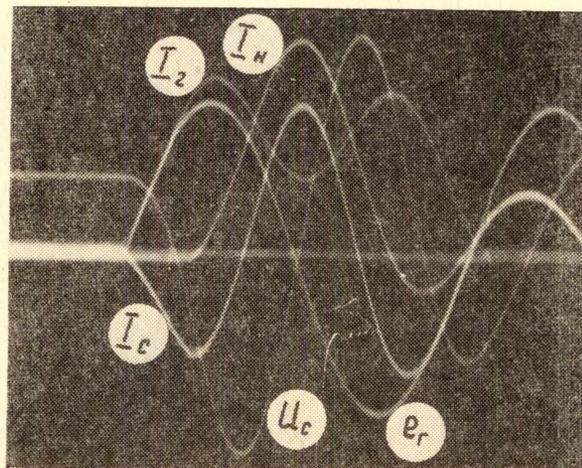


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений в различных элементах схемы.

5. Отключение генератора и нагрузки. Отключение генератора размыканием К-1 происходит в момент, когда ток в генераторе равен нулю. Оставшаяся часть схемы представляет собой последовательное включение r , L , c . В этой схеме после отключения генератора остается энергия, определяемая током через индуктивность и напряжением на емкости. При продолжительной работе такой схемы энергия перераспределялась бы между емкостью и индуктивностью, постепенно рассеиваясь в активном сопротивлении. Отключение нагрузки происходит в момент, когда ток в нагрузке равен нулю. Этот момент соответствует переходу всей энергии в конденсаторную батарею. При этом заряд на конденсаторной батарее может быть больше или меньше первоначального значения.

Для повторного использования схемы важно так подобрать параметры схемы и заряд конденсаторной батареи, чтобы после одного цикла на конденсаторной батарее остался первоначальный заряд.

На аналоговой машине нетрудно найти такие соотношения путем изменения U_{co} или ν^2 . Например, равенство заряда конденсаторной батареи в начале и в конце цикла имеет место при $U_{co}=0,25E_m$, $L_H=L_r$, $\frac{r}{x}=0,05$; $\nu^2=3,5$.

В этом случае не будет необходимости иметь мощное зарядное устройство для конденсаторной батареи, а также уменьшится время, необходимое для подготовки схемы к следующему циклу.

Выводы

Созданная электронная модель позволила исследовать совместную работу ударного генератора и конденсаторной батареи для различных соотношений параметров схемы и начальных условий.

Из результатов исследований можно сделать вывод, что применение вспомогательной емкости ведет к значительному (2—4 раза) увеличению энергии, отдаваемой генератором в нагрузку.

Приемлемыми пределами изменения параметров, при которых работа схемы будет особенно эффективной и целесообразной, являются следующие:

$$\nu^2 = 3 \div 3,5,$$

$$L_n = (0,5 \div 2) L_r,$$

$$U_{co} = (0,25 \div 0,75) E_m.$$

Данная математическая модель может быть использована при проектировании реальной схемы совместной работы ударного генератора и конденсаторной батареи. В этом случае нетрудно будет найти параметры элементов схемы и начальные условия, при которых будет обеспечено быстрое действие схемы и наибольшая эффективность ее применения.

ЛИТЕРАТУРА

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