

## РАСЧЕТ ТОКОВ В ЭЛЕМЕНТАХ СХЕМЫ УСКОРЕННОГО НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ ОТ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

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

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники).

Отличительной особенностью исследуемой схемы увеличения величины и скорости передачи энергии от ударного генератора в индуктивную нагрузку является наличие вспомогательной конденсаторной батареи, включаемой параллельно с нагрузкой, и специального коммутирующего аппарата, закорачивающего нагрузку в момент прохождения тока нагрузки через максимум.

Поскольку физическая сущность увеличения электромагнитной энергии в описываемой схеме и работа схемы в процессе ступенчатого накопления энергии в индуктивной нагрузке рассмотрены ранее [1, 2, 3], настоящая статья имеет своей целью, не останавливаясь на физической сущности явлений, дать расчетные формулы для определения токов и напряжений в различных элементах схемы на всех этапах ее работы.

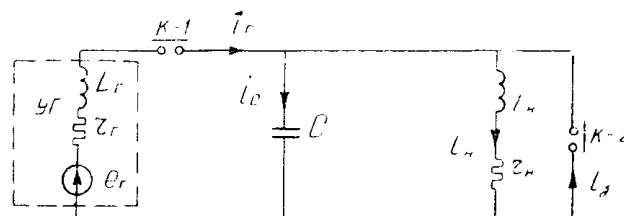


Рис. 1. Схема ускоренного накопления энергии в индуктивной нагрузке.

Описываемая схема представлена на рис. 1, где  $L_r$  — эквивалентная сверхпереходная индуктивность генератора,  $L_n$  — индуктивность нагрузки,  $r_r$ ,  $r_n$  — активные сопротивления генератора и нагрузки,  $C$  — вспомогательная конденсаторная батарея,  $K-1$  и  $K-2$  — быстродействующие бездуговые ионно-механические контактные аппараты.

Процесс накопления энергии в нагрузке идет следующим образом. В момент прохождения э.д.с. генератора через нулевое значение замыкается контактный аппарат  $K-1$ , при разомкнутом  $K-2$ . В течение полуволны э.д.с., которую назовем положительной, генератор передает нагрузке некоторое количество электромагнитной энергии. Ток нагрузки

растет и в конце положительного полупериода э.д.с. он достигает максимума. В этот момент, при смене полярности э.д.с., происходит замыкание К-2. Нагрузка оказывается замкнутой накоротко, и энергия, запасенная в ней, сохраняется (за вычетом потерь) до следующего цикла накопления. При этом ток генератора резко падает, так как генератор оказывается замкнутым накоротко при отрицательной э.д.с. В момент прохождения тока генератора через нуль размыкается аппарат К-1, и цепь остается разомкнутой на всю оставшуюся часть отрицательного полупериода э.д.с.

Следующий цикл накопления начинается замыканием К-1 при прохождении э.д.с. генератора через нулевое значение на положительную полуволну, причем контактный аппарат К-2 остается замкнутым. Генератор работает в режиме внезапного короткого замыкания и ток генератора резко возрастает. В момент, когда ток генератора достигает значения тока нагрузки, размыкается аппарат К-2. Следует отметить, что в этот момент времени ток, протекающий через К-2, равный разности токов генератора и нагрузки, равен нулю. С момента размыкания К-2 в течение оставшегося положительного полупериода э.д.с. происходит возрастание тока в нагрузке, т. е. происходит накопление энергии. В момент, когда э.д.с. генератора становится равной нулю, ток нагрузки достигает очередного максимума и контактный аппарат К-2 закорачивает нагрузку. Начинается этап сохранения накопленной энергии. Дальнейший процесс накопления идет аналогично.

Характер изменения токов генератора, нагрузки и напряжения на емкости в процессе накопления энергии ясен из рис. 2. Для удобства

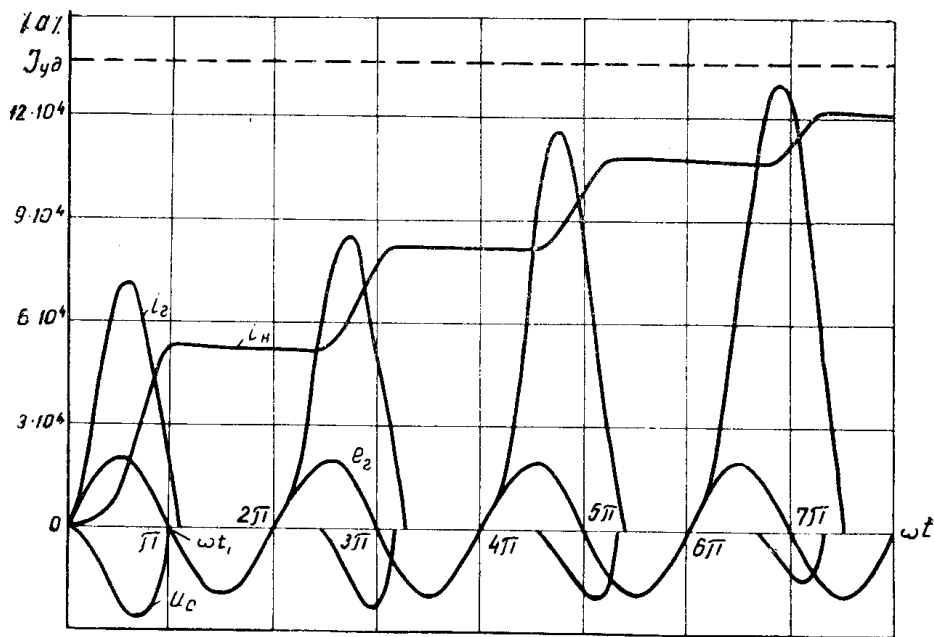


Рис. 2. Характер изменения напряжения и токов в элементах схемы.

математического описания процесс накопления энергии в нагрузке целесообразно разбить на отдельные циклы, длительностью равными периоду э.д.с., каждый из которых состоит из двух этапов: этапа накопления энергии и этапа сохранения накопленной энергии.

### Этап накопления энергии

В течение этого этапа состояние схемы таково: контактный аппарат К-1 замкнут, а аппарат К-2 разомкнут. В момент замыкания К-1 конденсаторная батарея не заряжена. Работа схемы на этапе накопления энергии любого цикла описывается системой уравнений:

$$e_r(p) = i_r(p) r_r + pL_r i_r(p) + pL_r I_r(0) + \frac{1}{pc} [i_r(p) - i_n(p)], \quad (1)$$

$$0 = i_n(p) r_n + pL_n i_n(p) + pL_n I_n(0) + \frac{1}{pc} [i_n(p) - i_r(p)].$$

Решая систему (1) относительно токов генератора и нагрузки, получаем в операторной форме следующие выражения:

$$i_r(p) = \frac{-e_r(p)(p^2 L_n c + 1) + pL_r I_r(0) + pL_n I_n(0)}{p^2 c(pL_r L_n - L_n r_r + L_r r_n) - p(L_n + L_r) - (r_n + r_r)}, \quad (2)$$

$$i_n(p) = \frac{-e_r(p) + pL_r I_r(0) + pL_n I_n(0)(p^2 L_r c + p c r_r + 1)}{p^2 c(pL_r L_n - L_n r_r + L_r r_n) - p(L_n + L_r) - (r_n + r_r)}. \quad (3)$$

После перехода к временной форме записи выражения для токов получаются настолько громоздкими, что пользоваться ими практически невозможно. Поэтому с целью упрощения выражений пренебрегаем величинами активных сопротивлений генератора и нагрузки. Подобное допущение является вполне оправданным, так как активные сопротивления контура значительно меньше индуктивных. С учетом принятых допущений получаем:

$$i_r(t) = \frac{E_m}{\omega L_r} \left\{ \frac{\omega^2 - \omega_n^2}{\omega^2 - \omega_g^2} \left[ \sin \psi \sin \omega t + \frac{\omega}{\omega_g} \cos \psi (1 - \cos \omega t) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\omega_n^2 - \omega_g^2}{\omega^2 - \omega_g^2} \left[ \frac{\omega}{\omega_g} \sin \psi \sin \omega_g t + \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \cos \psi (1 - \cos \omega_g t) \right] \right\} + I_r(0). \quad (4)$$

$$i_n(t) = \frac{E_m}{\omega L_n} \left\{ \frac{\omega_r^2}{\omega_g^2 - \omega^2} \left[ \sin \psi \sin \omega t + \cos \psi (1 - \cos \omega t) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\omega_r^2}{\omega^2 - \omega_g^2} \left[ \frac{\omega}{\omega_g} \sin \psi \sin \omega_g t + \frac{\omega^2}{\omega_g^2} \cos \psi (1 - \cos \omega_g t) \right] \right\} + I_n(0). \quad (5)$$

$$U_c(t) = E_m \frac{\omega_r^2}{\omega_g^2 - \omega^2} \left[ \sin \psi (\cos \omega t - \cos \omega_g t) + \right. \\ \left. + \cos \psi \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_g} \sin \omega_g t \right) \right] + \left[ I_n(0) L_n \left( \omega - \frac{\omega_r^2}{\omega_g} \right) - \right. \\ \left. - I_r(0) L_r \frac{\omega_r^2}{\omega_g} \right] \sin \omega_g t - U_c(0) \cos \omega_g t, \quad (6)$$

где  $\omega$  — угловая частота э.д.с. генератора,

$$\omega_g = \sqrt{\frac{L_n + L_r}{cL_n L_r}} \text{ — эквивалентная частота контура } L_n L_r c,$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{cL_r}} \text{ — собственная частота контура } L_r c,$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{cL_n}} \text{ -- собственная частота контура } L_n c,$$

$E_m$  — амплитуда э.д.с. генератора.

Для первого цикла начальные условия следующие:

$$U_c(0) = 0, \quad I_r(0) = 0, \quad I_n(0) = 0, \quad \psi = \psi_0 = 0,$$

где  $\psi_0$  — начальный угол включения.

Для всех последующих циклов:

$$U_c(n) = 0, \quad I_r(n) = I_n(n) = I_{\max(n-1)} e^{-\frac{1}{T_n} \left( \frac{\pi + \psi_n}{\omega} \right)}, \quad \psi = \psi_n,$$

где  $\psi_n$  — угол от начала положительного полупериода э.д.с. до момента снятия коротки (размыкания К-2).

### Этап сохранения энергии

Этап начинается замыканием аппарата К-2 и оканчивается в момент размыкания этого контактного аппарата. В течение этого этапа ток нагрузки изменяется по экспоненциальному закону

$$i_n(t) = I_{\max(n)} e^{-\frac{t}{T_n}},$$

где  $T_n = \frac{L_n}{r_n}$  — постоянная времени затухания тока нагрузки.

Изменение тока генератора в течение этого этапа описывается несколькими уравнениями. Вначале, после замыкания К-2, ток генератора уменьшается по закону

$$i_r(t) = \frac{E_m}{\omega L_r} \left[ \cos(\omega t + \psi) - \cos \psi e^{-\frac{t}{T_r}} \right] + I_{\max(n)} e^{-\frac{t}{T_r}}, \quad (8)$$

где  $T_r = \frac{L_r}{r_r}$  — постоянная времени генератора.

В момент прохождения тока генератора через нуль размыкается аппарат К-1 и остается разомкнутым до тех пор пока э.д.с. генератора имеет отрицательную полярность. При переходе э.д.с. генератора на положительную полуволну, контактный аппарат К-1 замыкается и генератор оказывается замкнутым накоротко, через К-2.

Изменение тока генератора описывается уравнением (9) вплоть до момента размыкания аппарата К-2, то есть до перехода схемы в режим накопления:

$$i_r(t) = \frac{E_m}{\omega L_r} \left( e^{-\frac{t}{T_r}} - \cos \omega t \right). \quad (9)$$

Максимальный ток, который можно получить в нагрузке, равен амплитуде первой максимальной полуволны тока внезапного короткого замыкания ударного генератора.

По приведенной методике был проведен расчет токов в элементах схемы в процессе накопления энергии в индуктивной нагрузке для следующих данных:

$$\begin{aligned} E_m &= 22 \text{ кВ}, & \omega &= 314, \\ L_r &= 0,001 \text{ гн}, & L_n &= 2,5 L_r, \\ c &= 0,00405 \text{ ф}, & r_n &= 0,05 \text{ ом}, \end{aligned}$$

При этом  $\omega_r = 483$ ,  $\omega_n = 315$ ,  $\omega_э = 587$ .

Результаты расчета представлены графически на рис. 2.

Интересно сравнить скорость запасаения энергии в нагрузке в описываемой схеме со скоростью накопления по схеме без емкости.

В качестве сравниваемой величины бралось число периодов э. д. с. генератора, по прошествии которых в нагрузке устанавливался ток  $0,9 I_{уд}$ . При расчетах величина емкости определяется из условия получения эквивалентной частоты схемы  $\omega_э = \sqrt{3,5} \cdot \omega$ . При этом, как показали расчеты, энергия, на которую должна быть рассчитана конденсаторная батарея (при  $L_n \geq 2,5 L_r$ ), не превосходит 5,5 % от энергии, передаваемой нагрузке. Результаты расчета представлены в табл. 1. Очевидно, что процесс накопления энергии с применением

Таблица 1

$\frac{L_n}{L_r}$	1	2,5	5	7,5	10	Примечание
Число периодов э. д. с.	4	8	14	20	25	по схеме без емкости
	2	4	7	10	12	по схеме с емкостью
$\frac{Q_c}{Q_n} \%$	18	5,5	2,2	1,4	1,1	—

сравнительно небольшой конденсаторной батареи идет в два раза быстрее, что значительно повышает коэффициент полезного действия установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. О совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи на индуктивную нагрузку. Известия ТПИ, т. 132, 1965.

2. А. В. Лоос, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Математическая модель схемы совместной работы генератора ударной мощности и конденсаторной батареи. Известия ТПИ, т. 138, 1965.

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