

УДК 639.2.081.193

ОБ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛОВА РЫБЫ

С. К. Малькявичус, Ю. Д. Бальчунас

Принцип действия импульсных генераторов сильного тока, предназначенных для электролова рыбы, основан на применении накопителя электроэнергии — мощных конденсаторных батарей и ионных контактов тока. Параметры разрядной цепи обеспечивают мгновенный разряд конденсаторной батареи по отношению к времени зарядного процесса. Это позволяет получить большую мощность в импульсе при относительно малой средней мощности источников питания. Ограничение зарядного тока обычно осуществляется с помощью дросселя (рис. 1), от параметров которого в значительной степени зависит экономичность установки.

Анализ импульсных схем, работающих на разрядную цепь, содержащую только активную составляющую сопротивления, приведен в соответствующей литературе [1]. Однако в морских условиях соотношение активного сопротивления разрядной цепи с ее индуктивностью оказывает значительное влияние на характер процессов, происходящих в схеме, поэтому результатами, приведенными в указанной выше статье, практически можно воспользоваться только для расчета схем, предназначенных для пресноводного водоема.

Цель данной работы — создать основы расчета силовой части импульсных схем сильного тока, работающих на нагрузку, обладающую значительной индуктивностью.

На принципиальных схемах, графиках, а также в приводимых ниже формулах применяются следующие условные обозначения:

- η — коэффициент полезного действия;
- P — мощность;
- f — частота;

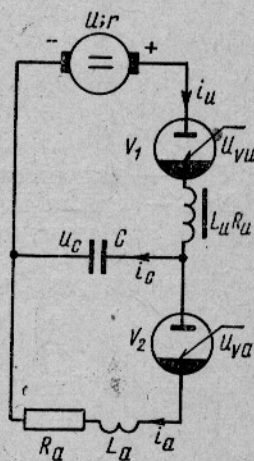


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора униполярных импульсов.

U — напряжение;
 i — сила тока;
 R — активное сопротивление;
 L — индуктивность;
 T — время прохождения процесса, период;
 C — емкость.

Индексы:

u — зарядная цепь;
 c — цепь конденсаторов;
 a — цепь нагрузки;
 ef — действующее значение;
 v — среднее значение.

Амплитудные значения обозначаются прописными, а мгновенные значения — прописными буквами с соответствующими индексами.

Когда параметры разрядной цепи соответствуют условию колебательного разряда, т. е.

$$R_a \leq 2 \sqrt{\frac{L_a}{C}}, \quad (1)$$

процессы, происходящие в схеме, несколько отличаются по сравнению с апериодическим разрядом. В последнем случае напряжение на конденсаторной батарее устанавливается сразу после первого цикла

$$U_c = U' \left(1 + e^{-\frac{\tau d_u}{\sqrt{4 - d_u^2}}} \right) + U_{va} \quad (2)$$

где

$$U' = U - \sum U_v;$$

U — напряжение источника питания;
 $\sum U_v$ — сумма падений напряжения на всех вентилях зарядной и разрядной цепи.

Для схемы, изображенной на рис. 1,

$$\sum U_v = U_{vu} + U_{va} \approx 2U_v;$$

d_u — коэффициент затухания зарядной цепи;

$$d_u = \frac{R_u}{\sqrt{\frac{L_u}{C}}}, \quad (3)$$

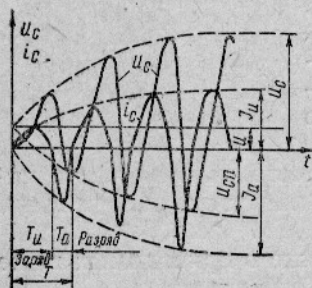


Рис. 2. Графическая зависимость напряжения и тока в цепи конденсаторной батареи.

В случае колебательного разряда напряжение конденсатора U_c растет с каждым циклом за счет частичного возврата их энергии через индуктивность L_a .

После определенного числа циклов напряжение конденсаторов достигает установившегося значения U_c (рис. 2), при котором прирост напряжения конденсаторов за счет энергии источника тока уравнивается потерей напряжения на активную составляющую

щую. Наиболее важен для практических целей случай колебательного разряда, так как при морской солености параметры разрядной цепи в большинстве случаев соответствуют условию (1), поэтому случай периодического разряда в данной работе был подвергнут более подробному анализу.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Основные зависимости. Обозначив напряжение конденсаторов после разряда U_{cn} , для зарядной цепи можно написать следующее уравнение в операторной форме:

$$i(p) R_u + i(p) Z_l + i(p) Z_c + U_{cn} + U_v = U.$$

Учитывая, что $Z_l = pL_u$ и $Z_c = \frac{1}{pc}$, где оператор

$$p = \frac{d}{dt} \quad \text{и} \quad p^2 = \frac{d^2}{dt^2}$$

после соответствующих преобразований получаем изображение зарядного тока:

$$i(p) = \frac{U - U_{cn} - U_v}{L_u} \cdot \frac{p}{p^2 + p \frac{R_u}{L_u} + \frac{1}{L_u C}}.$$

В соответствии с (2) находим оригинал зарядного тока:

$$i = \frac{U - U_v - U_{cn}}{L_u \omega'_u} e^{-\delta_u t} \sin \omega'_u t, \quad (4)$$

где

$$\omega'_u = \frac{\pi}{T_u} \sqrt{\omega_{u0}^2 - \delta_u^2},$$

$$\delta_u = \frac{R_u}{2L_u}; \quad \omega_{u0}^2 = \frac{1}{L_u C}.$$

Чтобы найти мгновенное значение напряжения U_c пользуемся условием

$$C \frac{du_c}{dt} = \frac{dq}{dt} = i_u$$

или

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{1}{C} \int i_u dt = \frac{U - U_v - U_{cn}}{L_u \omega'_u C} \int e^{-\delta_u t} \sin \omega'_u t dt = \\ &= \frac{[U - U_v - U_{cn}] e^{-\delta_u t} \omega'_u}{L_u \omega'_u C (\delta_u^2 + \omega_u'^2)} \left(-\frac{\delta_u}{\omega'_u} \sin \omega'_u t - \cos \omega'_u t \right) + A, \end{aligned}$$

где q — мгновенное значение заряда конденсаторов.

Исходя из начальных условий $t=0$; $u_c = U_{cn}$, находим постоянную интегрирования

$$A = U - U_v.$$

Пусть

$$\frac{\delta_u}{\omega'_u} = \operatorname{tg} \beta_u,$$

тогда

$$u_c = -(U - U_v - U_{cn}) \frac{\omega_{u0}}{\omega'_u} e^{-\delta_u t} \cos(\omega'_u t - \beta_u) + U - U_v,$$

$$\cos \beta_u = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_u}} = \frac{\omega'_u}{\omega_{u0}} \quad \text{и} \quad \omega_{u0}^2 = \frac{1}{L_u C}.$$

Выражение напряжения конденсаторной батареи приобретает вид:

$$u_c = U - U_v - [U - U_v - U_{cn}] \frac{\omega_{u0}}{\omega'_u} \cos(\omega'_u t - \beta_u) e^{-\delta_u t}. \quad (5)$$

Амплитудное значение напряжения конденсаторов соответствует условию

$$\frac{d[\cos(\omega'_u t - \beta_u)] e^{-\delta_u t}}{dt} = 0$$

или

$$\sin \omega'_u t = 0,$$

$$t = \frac{\pi}{\omega'_u},$$

при этом

$$\cos(\omega'_u t - \beta_u) = \cos(\pi - \beta_u) = -\cos \beta_u = -\frac{\omega'_u}{\omega_{u0}},$$

Подставив полученное выражение в уравнение (5), получаем выражение амплитудного значения напряжения конденсаторной батареи в конце зарядного процесса:

$$U_c = U - U_v + [U - U_v - U_{cn}] e^{-\delta_u \frac{\pi}{\omega'_u}}.$$

Обозначив декремент колебания зарядной цепи через $\frac{1}{K_u^2}$, получим

$$K_u = e^{-\delta_u \frac{\pi}{\omega'_u}} = e^{-\frac{\pi d_u}{\sqrt{4 - d_u^2}}}, \quad (6)$$

а амплитуда напряжения конденсаторной батареи при этом примет вид:

$$U_c = (U - U_v)(1 + K_u) - U_{cn} K_u. \quad (7)$$

Для нахождения K_u при расчете удобно пользоваться графиком $K = \varphi(d)$, представленным на рис. 3.

Применяя аналогичный ход решения, можно убедиться, что разрядный ток конденсаторов C в цепи $L_a R_a$ будет изменяться по закону

$$i_a = \frac{U'_c}{\omega'_a L_a} e^{-\delta_a t} \sin \omega'_a t, \quad (8)$$

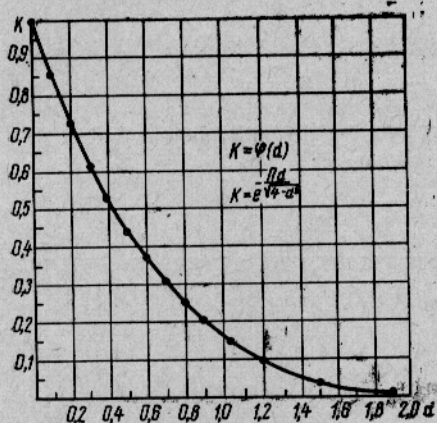
где

$$U'_c = U_c - U_v,$$

$$\omega'_a = \frac{\pi}{T_a} = \sqrt{\omega_{a_0}^2 - \delta_a^2},$$

$$\delta_a = \frac{R_a}{2L_a}, \quad \omega_{a_0}^2 = \frac{1}{L_a C};$$

напряжение конденсаторов при разряде находим из выражения



$$u_{cn} = -\frac{1}{C} \int i_a dt.$$

Рис. 3. Зависимость $K = \varphi(d)$.

С учетом начальных условий $t=0$ и $u_{cn} = U_c$ напряжение принимает вид:

$$u_{cn} = U'_c \frac{\omega_{a_0}}{\omega'_a} e^{-\delta_a t} \cos(\omega'_a t - \beta_a) + U_v. \quad (9)$$

Амплитудное значение в конце разряда соответствует условию

$$t = \frac{\pi}{\omega'_a},$$

поэтому обозначив

$$K_a = e^{-\delta_a \frac{\pi}{\omega'_a}} = e^{-\frac{\pi d_a}{\sqrt{4 - d_a^2}}}$$

где d_a — коэффициент затухания колебаний в разрядной цепи.

Амплитудное значение напряжения конденсаторов в конце разряда равно:

$$U_{cn} = -U_c K_a + U_v (1 + K_a). \quad (10)$$

Подставив значение (10) в уравнение (7), получим выражение установившегося значения амплитуды напряжения конденсаторов в конце заряда

$$U_c = \frac{1}{1-a} [(U - U_v)(1 + K_u) - U_v(1 + K_a)K_u]$$

или

$$U_c = \frac{U'}{1-a} (1 + K_u) + U_v, \quad (11)$$

где

$$a = K_u K_a = e^{-\pi \left(\frac{\delta_a}{\omega'_a} + \frac{\delta_u}{\omega'_u} \right)}.$$

Напряжение конденсаторов в конце разряда при установившемся режиме находим пользуясь уравнениями (10) и (11)

$$U_{cn} = \frac{-1}{1-a} [(U - U_v) (1 + K_u) K_a - U_v (1 + K_a)]$$

или

$$U_{cn} = - \frac{U' (1 + K_u)}{1-a} K_a + U_v. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что падение напряжения U_v здесь принято постоянным. Для ионных вентилях имеем

$$15 \leq U_v \leq 20 \text{ в.}$$

В том случае, когда падение напряжения на зарядных и разрядных вентилях неодинаково, амплитудное значение напряжения конденсаторов соответствует уравнениям

$$U_c = \frac{(U - \Sigma U_v)}{1-a} (1 + K_u) + \Sigma U_{va}, \quad (13)$$

$$U_{cn} = - \frac{(U - \Sigma U_v)}{1-a} (1 + K_u) K_a + \Sigma U_{va}, \quad (14)$$

где ΣU_v — суммарное падение напряжения на всех последовательно включенных вентилях (если в схеме их больше одного) в зарядной и разрядной цепях;

ΣU_{va} — суммарное падение напряжения на всех вентилях в разрядной цепи.

Мгновенное значение зарядного тока для установившегося режима с учетом (4) и (12)

$$i_u = \frac{U' (1 + K_a)}{(1-a) L_u \omega'_u} e^{-\delta_u t} \sin \omega'_u t. \quad (15)$$

Из формул (8) и (11) установившийся разрядный ток соответствует уравнению

$$i_a = \frac{U' (1 + K_u)}{\omega'_a L_a (1-a)} e^{-\delta_a t} \sin \omega'_a t, \quad (16)$$

Максимальное значение зарядного, а также и разрядного тока можно определить, если $\frac{di}{dt}$ приравнять нулю.

Таким образом,

$$\frac{d(e^{-\delta t} \sin \omega' t)}{dt} = 0$$

или

$$\cos(\omega' t + \beta) = 0, \text{ если } \frac{\delta}{\omega'} = \text{tg } \beta.$$

Поэтому максимум наступит в момент

$$t = \frac{\pi}{2\omega'} - \frac{\beta}{\omega'} \quad (17)$$

Подставляя (17) в (15), находим амплитудное значение зарядного тока:

$$I_u = \frac{U' (1 + K_a)}{(1-a) \sqrt{\frac{L_u}{C}}} e^{-\frac{\delta_u \pi}{2\omega'_u}} e^{\frac{\delta_u \beta_u}{\omega'_u}}$$

После соответствующих математических преобразований получим

$$I_u = \frac{U' (1 + K_a)}{(1-a) \sqrt{\frac{L_u}{C}}} e^{-\frac{d_u}{\sqrt{4-d_u^2}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{d_u}{\sqrt{4-d_u^2}} \right)} \quad (18)$$

или

$$I_u = \frac{U' (1 + K_a)}{(1-a) \sqrt{\frac{L_u}{C}}} K_i \quad (19)$$

где K_i — коэффициент тока;

$$K_i = e^{-\frac{d_u}{\sqrt{4-d_u^2}} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{d_u}{\sqrt{4-d_u^2}} \right)}$$

На рис. 4 дана графическая зависимость коэффициента тока K_i от коэффициента затухания. Имея коэффициент затухания контура, по гра-

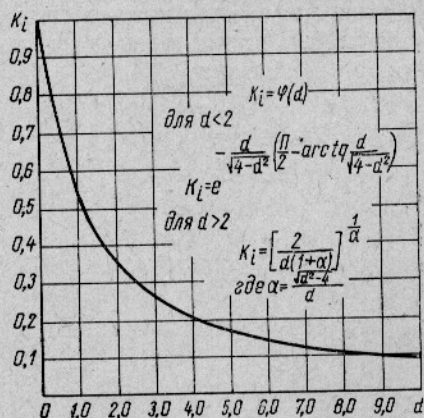


Рис. 4. Зависимость коэффициента тока от коэффициента затухания.

фику легко найти K_i , что очень важно при производстве технических расчетов.

Для небольших значений d_u , когда $d \approx 0$ и $\beta \approx 0$,

$$I_u = \frac{U' (1 + K_a)}{\sqrt{\frac{L_u}{C}} (1-a)} K_u^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Амплитудное значение разрядного тока находим аналогично, пользуясь (17).

Таким образом:

$$I_a = \frac{U' (1 + K_u)}{\sqrt{\frac{L_a}{C} (1 - a)}} e^{-\frac{d_a}{\sqrt{4 - d_a^2}} \left(\frac{\pi}{2} - \text{arc tg } \frac{d_a}{\sqrt{4 - d_a^2}} \right)} \quad (21)$$

или, учитывая (11),

$$I_a = \frac{U'_c}{\sqrt{\frac{L_a}{C}}} K_i, \quad (22)$$

где $U'_c = U_c - U_v$ и K_i — коэффициент тока для разрядной цепи. При небольших значениях d_a :

$$I_a \approx \frac{U'_c}{\sqrt{\frac{L_a}{C}}} K_a^{\frac{1}{2}}. \quad (23)$$

Во время заряда напряжение на конденсаторах с учетом (12)

$$u_c = U - U_v - \frac{(U - 2U_v)(1 + K_a)}{1 - a} \frac{\omega_{uo}}{\omega'_u} e^{-\delta_u t} \cos(\omega'_u t - \beta_u)$$

или

$$u_c = U' \left[1 - \frac{(1 + K_a)}{(1 - a)} \frac{\omega_{uo}}{\omega'_u} e^{-\delta_u t} \cos(\omega'_u t - \beta_u) \right] + U_v. \quad (24)$$

Закон изменения напряжения на конденсаторах при установившемся режиме во время разряда находим аналогично, интегрируя уравнение разрядного тока

$$u_{cn} = \frac{1}{C} \int i_a dt = \frac{U'_c}{\omega'_a} \omega_{ao} \cos(\omega'_a t - \beta_a) e^{-\delta_a t} + U_v$$

или

$$u_{cn} = \frac{U' (1 + K_u)}{1 - a} \frac{\omega_{ao}}{\omega'_a} \cos(\omega'_a t - \beta_a) e^{-\delta_a t} + U_v. \quad (25)$$

Интересующий нас максимум напряжения возникает в момент

$$t = \frac{\pi}{\omega'_a}.$$

Для определения момента, когда u_c переходит нуль, приравняем

$$u_c = 0 \quad \text{или} \quad \cos(\omega'_a t - \beta_a) e^{-\delta_a t} = 0.$$

Возможны два случая, когда

$$e^{-\delta_a t} = 0, \quad \text{а} \quad t = \infty \quad \text{или} \quad \cos(\omega'_a t - \beta_a) = 0.$$

Нас интересует второй случай, так как t должно находиться в пределах

$$0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega'_a},$$

поэтому

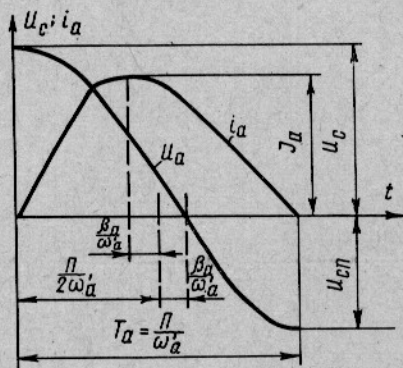
$$\omega'_a t - \beta_a = \frac{\pi}{2},$$

или

$$t = \left(\frac{\pi}{2} + \beta_a \right) \frac{1}{\omega'_a}. \quad (26)$$

Из графика, иллюстрирующего закон изменения разрядного тока и напряжения конденсаторов во время разряда (рис. 5), видно, что с уве-

Рис. 5. Графическая зависимость напряжения конденсаторов и разрядного тока во время разрядного процесса.



личением коэффициента затухания момент перехода напряжения через нуль сдвигается вправо, а момент достижения амплитудного значения тока — влево на величину $\frac{\beta_a}{\omega'_a}$.

При значительном преобладании активной составляющей точки перехода u_c и i_c через нуль сближаются, а момент достижения амплитудного значения i_c приближается к точке $t=0$.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ В СХЕМЕ

Действующие значения токов, протекающих в разных цепях схемы, нужны для определения сечений токоведущих частей импульсного генератора и выбора кабельной сети.

Для разрядного тока действующее значение находим как среднеквадратичное за полный период

$$I_{\text{aef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_a} i_a^2 dt};$$

учитывая (8), пишем

$$I_{\text{aef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_a} \frac{U_c^2}{L_a^2 \omega_a'^2} e^{-2\beta_a t} \sin^2 \omega_a' t dt.}$$

Решение аналогичного уравнения приведено в статье Малькявичуса [1], поэтому, не приводя подробных математических действий, можно написать

$$I_{\text{aef}} = \frac{U'_c}{2 \sqrt{\frac{L_a}{C}}} \sqrt{\frac{1 - K_a^2}{T \delta_a}}, \quad \text{где } U'_c = U_c - U_v,$$

или

$$I_{\text{aef}} = U'_c \sqrt{\frac{(1 - K_a^2) C f}{2 R_a}}. \quad (27)$$

Учитывая (23), для разрядного тока можем написать

$$I_{\text{aef}} \approx \frac{I_a}{2} \sqrt{\frac{1 - K_a^2}{T \delta_a K_a}}$$

или

$$I_{\text{aef}} \approx I_a \sqrt{\frac{(1 - K_a^2) L_a f}{2 K_a R_a}}. \quad (28)$$

Таким же способом, пользуясь зависимостью (15), находим действующее значение зарядного тока

$$I_{\text{uef}} = \frac{U' (1 + K_a)}{2 \sqrt{\frac{L_u}{C} (1 - a)}} \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{T \delta_u}} \quad (29)$$

или, учитывая (20), при $d \approx 0$

$$I_{\text{uef}} \approx \frac{I_u}{2} \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{T \delta_u K_u}}. \quad (30)$$

В цепи конденсаторной батареи действующее значение тока можно определить следующим выражением:

$$I_{\text{cef}} = \sqrt{I_{\text{uef}}^2 + I_{\text{aef}}^2}. \quad (31)$$

СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА

По среднему значению тока выбирается ионная аппаратура импульсной схемы. Кроме того, среднее значение тока характеризует степень электролитических реакций при рассеивании импульсного тока в воду.

Среднее значение тока в зарядной цепи равно среднему значению тока в разрядной цепи, что обуславливается равенством энергии, пополняющей конденсаторную батарею во время заряда, и энергии, рассеиваемой во время разряда, т. е.

$$I_{\text{uv}} = I_{\text{av}} = I_v,$$

$$I_v = \frac{1}{T} \int_0^{T_a} i_a dt.$$

Учитывая уравнение (8), пишем

$$I_v = \frac{1}{T} \int_0^{T_a} \frac{U'_c}{L_a \omega'_a} e^{-\delta_a t} \sin \omega'_a t dt.$$

Решение аналогичного интеграла приведено в статье Малькявичуса [1], поэтому

$$I_v = \frac{U'_c}{T \omega'^2_a L_a} (1 + K_a) = U'_c C f (1 + K_a). \quad (32)$$

В цепи конденсаторной батареи ток периодически меняет свое направление, поэтому среднее его значение равно нулю

$$I_{cv} = 0.$$

АПЕРИОДИЧЕСКИЙ РАЗРЯД

При двукратном преобладании активного сопротивления разрядной цепи по сравнению с волновым

$$R_a \geq 2 \sqrt{\frac{L_a}{C}} \quad (33)$$

колебательный разрядный процесс переходит в аperiodический. Практически такой случай при разряде конденсаторов на цепь электродов, погруженных в морскую воду, бывает редко. Он возможен при работе с большой емкостью конденсаторной батареи на цепь электродов, погруженных в опресненную воду, или ввиду своих геометрических особенностей, обладающих большим омическим сопротивлением.

Амплитуда напряжения на конденсаторной батарее в этом случае обуславливается лишь напряжением источника тока и параметрами разрядной цепи и выражается зависимостью, аналогичной для случая разряда на чисто активное сопротивление:

$$U_c = U' (1 + K_u) + U_v. \quad (34)$$

Ток в разрядной цепи в случае аperiodического разряда соответствует закону:

$$i_a = \frac{U'_c}{2 L_a \sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2}} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}), \quad (35)$$

который получен как общее решение дифференциального уравнения цепи, состоящей из R , L , C и приводимой в различных классических работах из теории электротехники, например в работе Л. Р. Нейман и П. Л. Калантарова [3].

В уравнении (35) приняты условные обозначения:

$$\alpha_1 = -\delta_a + \sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2},$$

$$\alpha_2 = -\delta_a - \sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2}.$$

Наиболее важным параметром для электролова рыбы является амплитуда разрядного тока, от которой фактически зависит зона действия электрического поля в воде.

Амплитуду тока находим из условия

$$\frac{di_a}{dt} = 0,$$

что соответствует

$$\alpha_1 e^{\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t} = 0.$$

Таким образом, амплитудное значение тока наступит в момент

$$t = \frac{\ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{\alpha_2 - \alpha_1} = \frac{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}{\alpha_1 - \alpha_2} \quad (36)$$

После подстановки (36) в (35) получим

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{U'_c}{2 L_a \sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2}} \left[e^{\ln \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - e^{\ln \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right] = \\ &= \frac{U'_c}{2 L_a \sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2}} \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что $\sqrt{\delta_a^2 - \omega_a^2} = -\frac{1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1)$ и выводя за пределы скобок $\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}}$, получим

$$I_a = \frac{-U'_c}{L_a \alpha_2} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} \quad (37)$$

Учитывая, что

$$\alpha_1 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_a^2} = \delta \left[-1 + \sqrt{1 - \frac{\omega_a^2}{\delta^2}} \right] = \delta \frac{-d + \sqrt{d^2 - 4}}{d}$$

$$\text{и} \quad \alpha_2 = (-\delta) \frac{-d - \sqrt{d^2 - 4}}{d},$$

получаем

$$\begin{aligned} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} &= \frac{4}{(d + \sqrt{d^2 - 4})^2} \quad \text{и} \\ \alpha_2 L &= -\frac{R_a}{2d} (d + \sqrt{d^2 - 4}), \end{aligned}$$

поэтому

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{U'_c d}{R_a} \frac{2}{d + \sqrt{d^2 - 4}} \left(\frac{2}{d + \sqrt{d^2 - 4}} \right)^{\frac{2\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} = \\ &= \frac{U'_c d}{R_a} \left(\frac{2}{d + \sqrt{d^2 - 4}} \right)^{\frac{\alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2}} \end{aligned}$$

или

$$I_a = \frac{U'_c d}{R_a} \left(\frac{2}{d + \sqrt{d^2 - 4}} \right)^{\frac{d}{\sqrt{d^2 - 4}}} \quad (38)$$

Обозначив

$$\frac{\sqrt{d^2 - 4}}{d} = \xi,$$

получим

$$I_a = \frac{U'_c d}{R_a} \left[\frac{2}{d(1+\xi)} \right]^{\frac{1}{\xi}} = \frac{U'_c}{\sqrt{\frac{L_a}{C}}} \left[\frac{2}{d(1+\xi)} \right]^{\frac{1}{\xi}} \quad (39)$$

или

$$I_a = \frac{U'_c}{\sqrt{\frac{L_a}{C}}} K_i, \quad (40)$$

где коэффициент тока

$$K_i = \left[\frac{2}{d(1+\xi)} \right]^{\frac{1}{\xi}}.$$

Найдем предельные значения амплитуды разрядного тока для аperiodического режима.

При $d \rightarrow 2$; $\xi \rightarrow 0$

$$\lim_{\xi \rightarrow 0} I_a = \frac{2U'_c}{R_a} \frac{1}{\lim_{\xi \rightarrow 0} (1+\xi)^{\frac{1}{\xi}}} = \frac{U'_c}{R_a} \cdot \frac{2}{e}$$

или

$$I_a = 0,736 \cdot \frac{U'_c}{R_a}. \quad (41)$$

При $d \rightarrow \infty$; $\xi \rightarrow 1$

$$\lim_{\xi \rightarrow 1} I_a = \lim_{\xi \rightarrow 1} \frac{U'_c}{R_a} \left[\frac{2d^{\xi-1}}{(1+\xi)} \right]^{\frac{1}{\xi}} = \frac{U'_c}{R_a}.$$

Таким образом, в случае аperiodического разряда I_a может меняться в пределах

$$0,736 \frac{U'_c}{R_a} \leq I_a \leq \frac{U'_c}{R_a}.$$

СРЕДНЯЯ МОЩНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СХЕМЫ

Средней мощностью, потребляемой импульсной схемой, необходимо руководствоваться при выборе источника питания. По к. п. д. схемы можно судить об экономичности установки и на основании этого выбирать наиболее рациональные параметры элементов схемы.

Среднюю мощность, потребляемую схемой от источника тока, можно найти из произведения средних значений тока и напряжения питания

$$P = U I_v.$$

Учитывая уравнения (11) и (32), можем написать

$$P = \left[\frac{U'_c(1-a)}{1+K_u} + 2U_v \right] U'_c C f (1+K_a)$$

или

$$P = \frac{U_c'^2 C f (1-a) (1+K_a)}{1+K_u} + 2U_v U'_c C f (1+K_a). \quad (42)$$

При $U_v \ll U$

$$P \approx \frac{U_c'^2 C f (1-a) (1+K_a)}{1+K_u} \quad (43)$$

Для практики определенным интерес представляют также выражения мощностей, расходуемых отдельными элементами схемы.

Если считать, что падение напряжения на ионном вентиле постоянно ($U_v = \text{const}$), мощность, выделяемую в нем, можно определить по произведению средних значений тока и падения напряжения в нем:

$$P_v = U_v I_v$$

или, учитывая (32),

$$P_v = U'_c U_v C f (1+K_a). \quad (44)$$

Величина P_v влияет на мощность и производительность насоса или вентилятора, охлаждающего вентиль.

Потеря мощности в дросселе зависит от действующего значения зарядного тока и активного сопротивления дросселя:

$$P_u = I_{\text{uef}}^2 R_u \quad (45)$$

или с учетом (29)

$$P_u = \frac{U'^2 (1+K_a)^2 (1-K_u^2) R_u}{4 \frac{L_u}{C} (1-a)^2 T \delta_u} = \left[\frac{U' (1+K_a)}{(1-a)} \right]^2 \frac{(1-K_u^2) C f}{2}. \quad (46)$$

Выражая P_u через I_u (20), получим

$$P_u \approx \frac{I_u^2 (1-K_u^2) L_u f}{2 K_u}. \quad (47)$$

Для целей электролиза фактически используется лишь мощность, рассеиваемая электродами в воде, величину которой можем определить уравнением

$$P_a = I_{\text{aef}}^2 R_a$$

или, учитывая (27),

$$P_a = U_c'^2 \frac{(1-K_a^2) C f}{2}, \quad (48)$$

или в соответствии с (28)

$$P_a = \frac{I_a^2}{2} \cdot \frac{1-K_a^2}{K_a} L_a f \quad (49)$$

К. п. д. схемы можно определить соотношением P_a и P в том случае, когда можно пренебречь потерями в линии передачи:

$$\eta' = \frac{P_a}{P}.$$

Подставляя (42) и (49), получаем к. п. д. для схемы без потерь в линии передачи

$$\eta' = \frac{1 - K_a}{2 \left[\frac{1 - a}{1 + K_u} + \frac{2U_v}{U'_c} \right]}, \quad (50)$$

практически $\frac{2U_v}{U'_c} \ll 1$, поэтому им часто можно пренебречь, тогда

$$\eta' = \frac{1}{2} \frac{(1 - K_a)(1 + K_u)}{1 - a}. \quad (51)$$

На рис. 6 изображена графическая зависимость к. п. д. от K_a и K_u . Максимальное значение η приобретает при $K_u = 1$ и $K_a = 0$ и минимальное при $K_u = 0$ и $K_a = 1$.

При работе импульсной установки на нагрузку, состоящую из электродов, погруженных в морскую воду, R_a становится очень незначительным, поэтому в данном случае потери в сопротивлении кабеля R_k , передающего импульсы, составляют значительную долю, а во многих случаях — доминирующую часть от всей энергии, потребляемой схемой. Кроме того, при малых значениях сопротивления R_a значительное влияние на η может оказать и внутреннее сопротивление импульсного генератора R_v разрядному току. Поэтому к. п. д. в общем случае выражен

$$\eta = \frac{R_a}{R_a + R_k + R_v} \eta'. \quad (52)$$

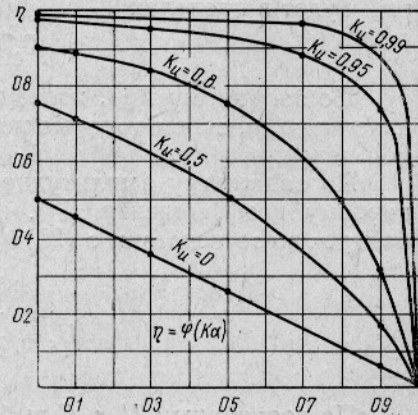


Рис. 6. Зависимость коэффициента полезного действия от коэффициентов K_a и K_u .

Основные зависимости, представленные в результате изложенного выше анализа, были проверены экспериментально. Незначительное отклонение теоретических выводов от экспериментальных показывает полную пригодность выведенных формул для технических расчетов импульсных схем сильного тока, основанных на принципе заряда — разряда конденсаторной батареи.

Методика расчета импульсной схемы будет зависеть от того, какие величины необходимо найти и что задано. Наиболее вероятными являются два случая.

1. Заданы параметры разрядной цепи, продолжительность импульса и амплитуда разрядного тока. Необходимо найти параметры импульсной схемы.

В этом случае, исходя из заданной продолжительности импульса

$$T_a = \frac{\pi}{\omega'_a} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{L_a C} - \frac{R_a^2}{4L_a^2}}} \quad (53)$$

и других заданных параметров, находим емкость конденсаторов C .

Индуктивность зарядного дросселя достаточно точно находим пользуясь формулой В. Томсона.

$$L_u = \frac{T_u^2}{\pi^2 C}, \quad (54)$$

где продолжительность зарядного процесса получаем исходя из максимальной частоты f_{\max} , заданной биологическими требованиями [4], из формулы

$$f_{\max} = \frac{1}{T_u + T_a}. \quad (55)$$

Затем по аналогии с (3) находим d_a , а по графику, изображенному на рис. 3, K_a . Учитывая обычно высокую добротность зарядного контура, в первом приближении задаемся коэффициентом K_u , который будет в пределах

$$0,75 \leq K_u \leq 0,9.$$

По заданному K_u , пользуясь графиком, представленным на рис. 3, находим d_u , затем токовые коэффициенты K_i для зарядной и разрядной цепей.

По заданному амплитудному значению разрядного тока I_a и найденному коэффициенту K_i , находим напряжение на конденсаторной батарее в соответствии с (22)

$$U_c = \frac{I_a \sqrt{\frac{L_a}{C}}}{K_i} + U_v. \quad (56)$$

По полученным U_c и C выбирают конденсаторную батарею.

В соответствии с (11) определяется напряжение источника тока по формуле

$$U = \frac{U'_c (1-a)}{1+K_a} + 2U_v.$$

С помощью формул (27) (29), (31) и (32) находим действующие и средние значения зарядного, разрядного токов и тока конденсаторов. По формуле (42) находим среднюю потребляемую мощность.

На основании P , U и I_u выбирают источник питания.

Затем по формуле (19) находим амплитудное значение зарядного тока I_u и энергию дросселя

$$A_L = \frac{L_u I_u^2}{2}. \quad (57)$$

Используя найденные L_u , I_u , I_{uef} и A_L , проводим конструктивный расчет дросселя, после чего определяется R_u и уточняется K_u .

По перечисленным выше величинам выбирают все элементы импульсной схемы, источника питания и монтажа.

2. Заданы параметры схемы, нужно найти параметры тока. В этом случае находим d_a и d_u , а из графиков (рис. 3) — K_a и K_u соответственно.

Пользуясь выведенными зависимостями, находим U_c , максимальные, действующие и средние значения токов для зарядной и разрядной цепей.

Используя эти же зависимости, можно принять и любую другую последовательность расчета с учетом конкретных требований, выставляемых к импульсной схеме, или параметрам импульсного тока.

ВЫВОДЫ

1. Приведенный в настоящей работе анализ фактически расширяет ранее полученные нами данные и позволяет получить взаимосвязь между параметрами зарядно-разрядных цепей с токами в них для общего случая нагрузки.

На основании этих зависимостей получены простые и удобные формулы для практических расчетов, импульсных генераторов, выбора элементов импульсной установки и кабельной сети.

2. Напряжение на конденсаторах устанавливается в зависимости от напряжения источника тока и параметров зарядно-разрядных цепей. Напряжение на конденсаторах может во много раз превысить напряжение источника питания.

3. К. п. д. импульсного генератора можно получить высоким (90—95%) (см. рис. 6), если соответственно подобрать параметры схемы. Увеличение коэффициента K_u и уменьшение K_a приводят к увеличению к. п. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малькявичус С. К. Импульсные схемы для электролова рыбы. Научно-технический сборник Клайпедского отделения Гипрорыбфлота, 1963, № 2.
2. Теумин Н. И. Справочник по переходным электрическим процессам. Госиздат по вопросам связи и радио. М., 1951.
3. Нейман Л. Р. и Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1959.
4. Гедминас В. и Данюлите Г. Некоторые данные о реакции атлантической сельди на электроток. Научно-технический сборник Клайпедского отделения Гипрорыбфлота, 1963, № 2.