

Член-корреспондент НАН Украины А. Е. Божко

Об энергосбережении в импульсных технологических процессах

Пропонується принцип енергозбереження в імпульсному технологічному процесі. Цей принцип оснований на неповному розряді накопичувального конденсатора.

В импульсных технологиях, таких, как точечная сварка и пайка, очистка жидкостей от примесей, импульсное формообразование деталей, очистка литых деталей электрогидро-воздействием в реакторах с жидкостью и др., используется принцип разряда накопительной электрической емкости на заданную технологическую нагрузку. Обычно в таких процессах применяется разряд конденсатора с последующим его зарядом. На взгляд автора, разряд емкости до нулевого напряжения (емкостный ток i_C становится равным нулю) не всегда целесообразен, поскольку импульсный технологический процесс осуществляется при емкостном токе до определенной его величины. Если этот ток ниже действующей величины емкостного тока, то технологический процесс прекращается. Из этого следует, что процесс разряда накопительной емкости необходимо ограничить во времени (t_U), при котором импульсный технологический процесс может происходить. Для убедительности сделаем акцент на накопительной схеме, представленной на рис. 1, где C — электрическая емкость; R_n — сопротивление нагрузки; Кл — выключатель.

В данной схеме ключ Кл замыкается на время t_U , в течение которого емкостный ток осуществляет протекание технологического процесса. Здесь энергия заряженной емкости C , равная $W_C = (1/2)CU_{C0}^2$, передается на резистор R_n в виде

$$W_p = \int_0^{t_U} i_C^2 R_n dt, \quad (1)$$

где U_{C0} — начальное напряжение на емкости C ; i_C — емкостный ток, возникший после включения Кл.

В этом случае баланс энергии с учетом (1) определяется выражением

$$\frac{1}{2}CU_{C0}^2 = \int_0^{t_U} i_C^2 R_n dt + \frac{1}{2}CU_{Ct_U}^2 + W_n, \quad (2)$$

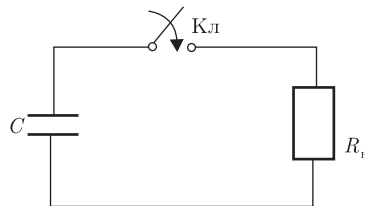


Рис. 1

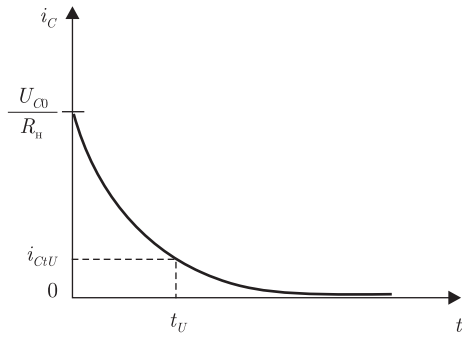


Рис. 2

где $U_{Ct_U}^2$ — напряжение на емкости C при закрывании ключа Кл (в конце длительности импульса t_U); W_{π} — энергия потерь.

Емкостный ток i_C при разряде конденсатора C равен

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt} = \frac{U_{C0}}{R_n} e^{-t/(R_n C)}, \quad (3)$$

где e — основание натурального логарифма.

Импульсный технологический процесс протекает при токе

$$i_C \geq \frac{U_{C0}}{R_n} e^{-t_U/(R_n C)}. \quad (4)$$

Выражение (4) объясняется графиком, изображенным на рис. 2, где

$$i_{Ct_U} = \frac{U_{C0}}{R_n} e^{-t_U/(R_n C)}.$$

Из (2) видно, что энергия, затраченная на протекание импульсного технологического процесса, равна

$$\frac{1}{2} C (U_{C0}^2 - U_{Ct_U}^2) = \int_0^{t_U} i_C^2 R_n dt + W_{\pi} \quad (5)$$

и выражение (5) четко показывает, что при ограничении разряда емкости C в течение времени t_U для протекания импульсного технологического процесса необходима энергия не W_C , а $C(U_{C0}^2 - U_{Ct_U}^2)/2$. После разряда C до величины U_{Ct_U} ключ Кл размыкается и этот конденсатор заряжается до величины U_{C0} при начальном напряжении U_{Ct_U} , т. е. не от $U_C = 0$, а от $U_{Ct_U} > 0$. А это значит, что как при разряде емкости C , так и при ее заряде происходит экономия электроэнергии и, в принципе, при импульсном технологическом процессе осуществляется энергосбережение. Энергия, непосредственно формирующая импульсный технологический процесс, выражается соотношением

$$W_{\pi} = \frac{1}{2} C U_{C0}^2 (1 - e^{-2t_U/(R_n C)}). \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) видим, что энергия потерь за один импульс t_U имеет вид

$$W_{\pi} = \frac{1}{2} C (U_{C0}^2 e^{-2t_U/(R_n C)} - U_{Ct_U}^2). \quad (7)$$

Если считать, что при разряде емкости C напряжение на ней изменяется по закону $U_C(t) = U_{C0}e^{-t/(R_H C)}$, то $U_C(t_U) = U_{C t_U} - U_{C0}e^{-t/(R_H C)}$ и из (7) получается $W_{\text{п}} = 0$. В принципе, при длительности $0 - t_U$ потери реально малы. В этом случае энергия $W_0 = (1/2)CU_{C t_U}^2$ представляет собой энергию сбережения. Длительность импульса можно получить на основании формулы (4) в виде

$$t_U = R_H C \ln \frac{U_{C0}}{R_H i_{C t_U}}. \quad (8)$$

При этом связь t_U с энергией записывается выражением

$$t_U = \frac{R_H C}{2} \ln \frac{CU_{C0}^2}{2} \frac{1}{\frac{CU_{C0}^2}{2} - W_{\text{п}}} = \frac{R_H C}{2} \ln \frac{W_0}{W_0 - W_{\text{п}}}, \quad (9)$$

где $W_0 = (1/2)CU_{C0}^2$.

Заметим, что при таком методе разряда и заряда накопительной емкости C увеличивается частота воздействия электроэнергии на импульсный технологический процесс, так как сокращается время заряда конденсатора от напряжения $U_{C t_U}$ до U_{C0} . Время заряда емкости C до напряжения U_{C0} определяется выражением

$$t_3 = R_3 C \ln \frac{E - U_{C t_U}}{E - U_{C0}}, \quad (10)$$

где R_3 — активное сопротивление в зарядной цепи; E — напряжение, заряжающее конденсатор C .

Из (10) видно, что с увеличением $U_{C t_U}$ время заряда уменьшается и в общем технологическом процессе уменьшается время $t_3 + t_U$, а значит, увеличивается частота воздействия электроэнергии на технологический объект. Представленные решения были осуществлены классическими методами. Однако, как показано в работе [1], при включении ключа Кл напряжение U_{C0} является скачкообразным $U_{C0} = |U_{C0}|1(t)$, где $1(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0 \\ 0 & \text{при } t < 0 \end{cases}$ — единичная скачкообразная функция. В соответствии с новой концепцией о переходных процессах напряжения $|U_{C0}|1(t)$ можно представить в виде сингулярисного разложения [2]

$$U_{C0} = U_{C0}(1 - e^{-\alpha t}) + U_{C0}e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t, \quad (11)$$

где $U_{a1} = 1/\pi$; $\omega_k/\omega_1 = k$; $U_{ak} = U_{a1}/k$; $\sum_{k=1}^n U_{ak} = 1$; α — коэффициент затухания; U_{ak} , ω_k — амплитуда и круговая частота k -й гармоники, $n \approx 12$.

Ориентируясь на (3) и (11), изменение напряжения на конденсаторе C при его разряде запишем в математическом виде

$$U_{CP}(t) = U_{C0}(1 - e^{-\alpha t})e^{-\delta t} + U_{C0}e^{-(\alpha+\delta)t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t, \quad (12)$$

где $\delta = 1/(R_H C)$.

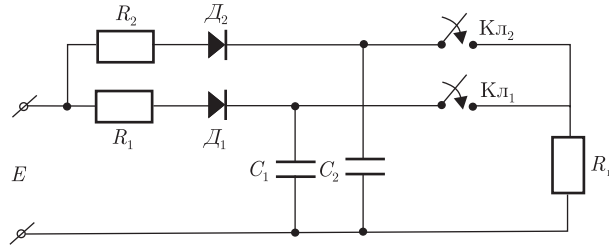


Рис. 3

Электрический ток разряда равен [2]

$$i_{CP}(t) = CU_{C0}[-\delta e^{-\delta t} + (\alpha + \delta)e^{-(\alpha+\delta)t}] - \\ - C(\alpha + \delta)e^{-(\alpha+\delta)t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t - Ce^{-(\alpha+\delta)t} \sum_{k=1}^n \omega_k U_{ak} \sin \omega_k t. \quad (13)$$

Заметим, что $\alpha \gg \delta$. При $\alpha = \infty$

$$U_{CP}(t) = U_{C0}e^{-\delta t}, \quad i_{CP}(t) = \frac{U_{C0}}{R_{н}}e^{-\delta t}.$$

С учетом того, что $\alpha \gg \delta$, составляющие в (12) и (13) с сомножителями $e^{-(\alpha+\delta)t}$ затухают в начале разряда емкости за время, меньше t_U . Электрический ток разряда конденсатора, согласно (13), включает в себя $2n$ затухающих гармоник $U_{ak} \cos \omega_k t$ и $U_{ak} \sin \omega_k t$, которые в одну полуволну разряжают, а в другую — заряжают конденсатор C . В каждой полуволне амплитудное напряжение гармоники $U_{ak}e^{-(\alpha+\delta)t}$, из чего следует, что последующая полуволна имеет амплитудное напряжение $U_{ak}e^{-(\alpha+\delta)t}T_k/2$, где T_k — период изменения k -й гармоники. Действие на конденсатор этих гармоник затягивает переходный процесс разряда, а поэтому, с учетом (4), энергосбережение в импульсном технологическом процессе осуществляется при длительности импульса включения ключа Кл больше, чем t_U , описываемой выражениями (8), (9). Частоту повторения действующих импульсов тока в технологическом процессе можно увеличить в два раза с помощью схемного решения, представленного на рис. 3, где E — источник напряжения; R_1, R_2 — резисторы; D_1, D_2 — диоды; C_1, C_2 — конденсаторы; $R_{н}$ — резистор нагрузки (сопротивление технологического процесса); Кл₁, Кл₂ — выключатели.

В этой схеме предусмотрено время заряда C_1 и C_2 должно равняться t_U . Тогда по окончании разряда C_1 срабатывает (включается) Кл₂, выключается Кл₁ и конденсатор C_2 разряжается на $R_{н}$. После разряда C_2 включается Кл₁, выключается Кл₂ и разряжается на $R_{н}$ конденсатор C_1 . Таким образом, процесс воздействия разрядных токов от C_1 и C_2 повторяется. Если необходимо время заряда емкостей увеличить без изменения повторения разрядных токов, действующих на технологический процесс, то можно построить схему с несколькими цепочками $R \rightarrow C \rightarrow \text{Кл} \rightarrow R_{н}$, например, такую, какая изображена на рис. 4. Здесь имеется n резисторов $\overline{R_1, R_m}$, диодов $\overline{D_1, D_m}$, емкостей $\overline{C_1, C_m}$, ключей $\overline{\text{Кл}_1, \text{Кл}_m}$ и одно сопротивление $R_{н}$. Ключи Кл₁–Кл_m включают поочередно на время t_U . Время заряда каждой емкости C_1 – C_m равно $(m-1)t_U$, т. е. в этой схеме накопительный заряд каждой емкости осуществляется медленнее, чем разряд, что обусловлено необходимостью иметь большую емкость для осуществления импульсного технологического процесса.

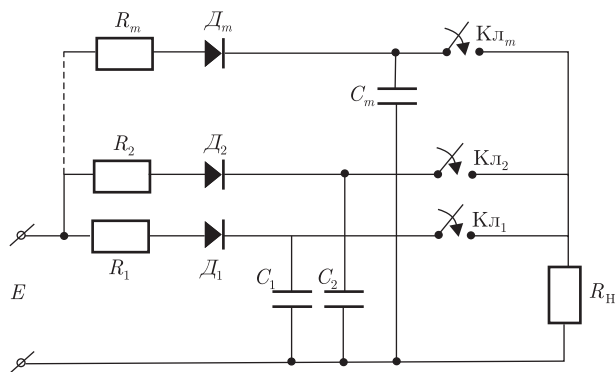


Рис. 4

Ключи $KЛ_1$ – $KЛ_m$ в этой схеме должны работать от специального управляющего устройства, которое поочередно включает и выключает $KЛ_1$ – $KЛ_m$, соблюдая заданную логику. В каждой отдельной цепочке $R_k D_k C_k KЛ_k R_H$, $k = \overline{1, m}$, этой схемы (см. рис. 4) осуществляется экономия энергии (см. рис. 1), причем это происходит при каждом разряде емкости C_k и ее заряда. Такое энергосбережение может быть существенным в общей сумме разнообразных импульсных технологических процессов.

1. Божко А. Е. Новая интерпретация переходных процессов в электрических цепях // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 83–87.
2. Божко А. Е. О новых решениях задач по переходным процессам разряда конденсаторов // Там само. – 2007. – № 7. – С. 87–92.

Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков

Поступило в редакцию 04.03.2008

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. E. Bozhko**

On power saving in impulse technological processes

The principle of power saving in impulse technological processes is offered. This principle is based on the incomplete discharging of a storage capacitor.