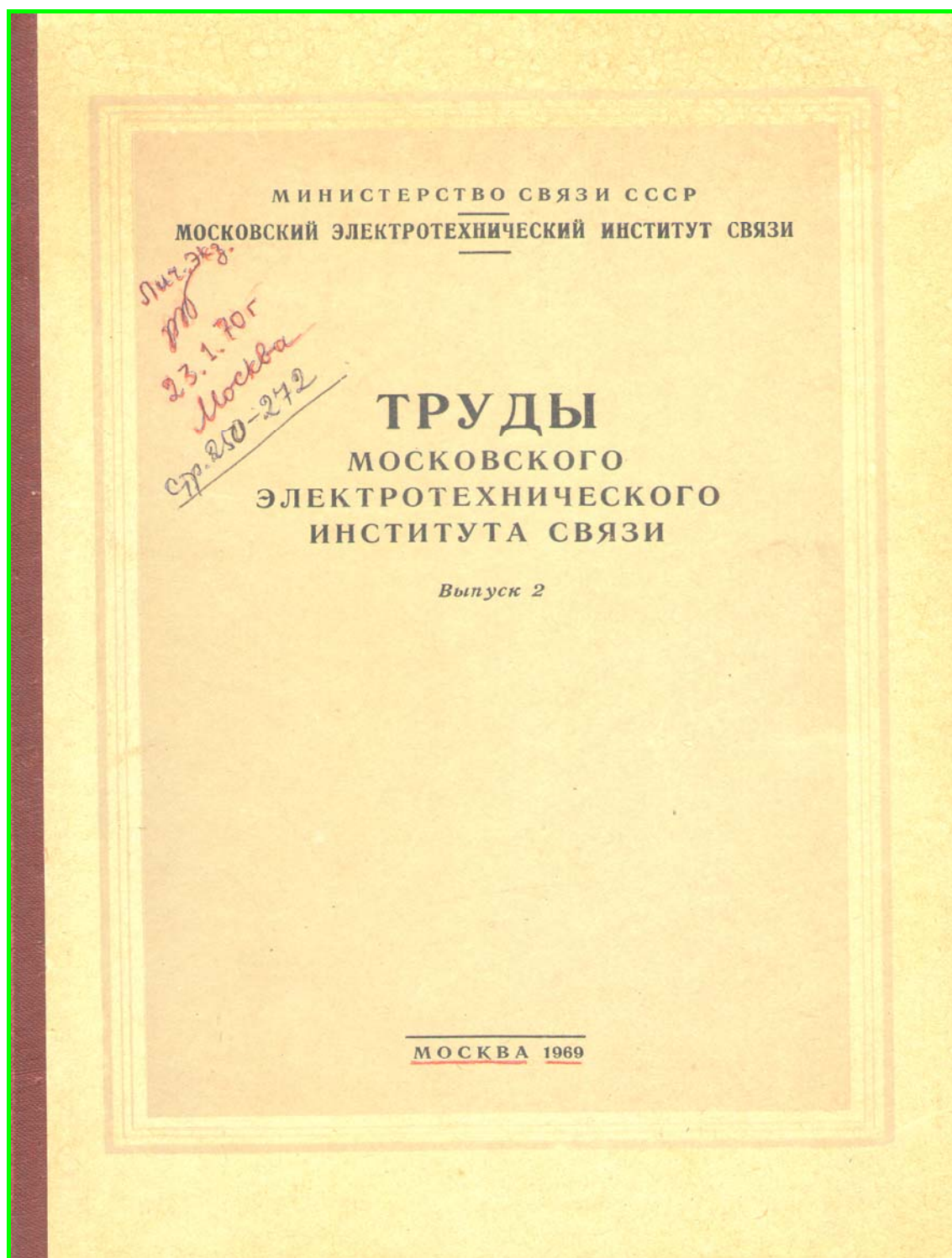


Анонс. На основе научных отчётов автора (*Анализ переходных процессов устройства типа «источник электропитания – накопитель – нагрузка»*. Ч.2, Ч.3. 1967-68. [RC. 3, 4]. <http://www.econf.rae.ru/article/7892>), а также научных докладов на НТК МЭИС (1967-68 гг. [RC.5, 8, 5эл, 8эл]. <http://econf.rae.ru/article/7893>) впервые в электронном варианте и авторском дизайне приводятся уникальные результаты математического и графического анализа импульсных процессов в R//C-схеме с двумя ключами. Использование **решетчатых (смещённых) функций** и принципов их решения посредством **дискретного преобразования Лапласа** позволило весьма просто выполнить **анализ** электрического состояния эквивалентно представляемых данной схемой импульсных устройств. Причём в **переходном** и **установившемся импульсном** режиме. Дан способ графического анализа. Получены выражения, в т.ч. для **времени выхода устройства в рабочий режим**, являющиеся основой для инженерного проектирования.



МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР
МОСКОВСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ

ТРУДЫ
МОСКОВСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
СВЯЗИ

Выпуск 2

Под редакцией
И. В. КУШМАНОВА

В настоящий сборник «Труды МЭИС» вошли материалы научно-технической конференции Московского электротехнического института связи, проходившей в апреле 1968 года и посвящённой различным направлениям техники связи и смежных отраслей.

В «Труды» включены статьи по наиболее актуальным вопросам построения систем связи, проектирования антенн, телеграфии, источников электропитания, а также автоматизации и механизации почтовой связи.

Все замечания и предложения по сборнику просим направлять в редакционно-издательский отдел МЭИС.

=====

СБОРНИК ТРУДОВ МЭИС
Выпуск 2

Редакторы: Хухриков С. Н., Рябцева И. Л.
Технический редактор Ларионов Г. Е.
Корректор Карпова А. А.

Сдано в набор 20/II 1969 г.
Подписано к печати 25/VII 1969 г.
Л-47942 Тираж 800 экз. Усл. печ. л. 30,8
Цена 1 руб. 98 коп. Заказ 2135

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР,
Шлюзовая наб., 10

**Анализ переходных импульсных процессов
эквивалентной схемы устройств
с ёмкостным накопителем энергии**

**Стр. 250–254. Поступило в октябре 1967 г.
Доложено 16.4.1968 г. на научно-технической конференции
профессорско-преподавательского состава
(НТК ППС) МЭИС, посвящённой Дню радио
Докладчик А.М. Репин**

МОСКВА 1969

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВ С ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Рассмотрена эквивалентная схема (рис. 1), к которой сводится целый ряд устройств (выпрямители с ёмкостью на выходе, модуляторы с ёмкостным накопителем энергии, элементы вычислительной техники и т. д.).

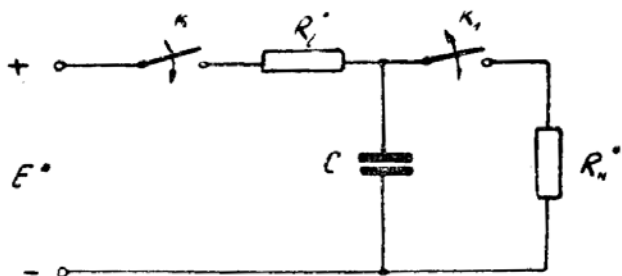


Рис. 1. Эквивалентная схема устройств с ёмкостным накопителем энергии.

С применением решетчатых функций и принципов их решения посредством дискретного преобразования Лапласа анализируются переходные импульсные режимы, возникающие в схеме при периодическом замыкании (размыкании) ключа K_1 (в произвольный момент времени после замыкания ключа K).

В результате (в относительных единицах*) получены законы изменения напряжения на ёмкости u_c^H во время импульса $t_{и}^*$ (ключ K_1 замкнут) и u_c^H во время паузы $t_{п}^*$ между импульсами (ключ K_1 разомкнут) при ненулевых начальных условиях в виде:

$$U_c^H(t) = \underbrace{\left[R_H + R_i \frac{1 - e^{-\alpha t}}{1 - e^{-\alpha T^*}} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right]}_I + \underbrace{\left[U_c(0) - \frac{v}{1 - e^{-\alpha T^*}} \right] e^{-\frac{t}{\tau_i}} e^{-\alpha n}}_{II}; \quad (1)$$

$$0 \leq \varepsilon \leq S;$$

$$U_c^H(t) = \underbrace{\left[1 - R_i \frac{1 - e^{-\alpha S}}{1 - e^{-\alpha T^*}} e^{-\frac{t-S}{\tau_i}} \right]}_I + \underbrace{\left[U_c(0) - \frac{v}{1 - e^{-\alpha T^*}} \right] e^{-\alpha S} e^{-\frac{t-S}{\tau_i}} e^{-\alpha n}}_{II}; \quad (2)$$

$$S \leq \varepsilon \leq 1,$$

где $t = \frac{t^*}{T^*} = \frac{nT^* + \Delta t^*}{T^*} = n + \varepsilon$ — относительное время;

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$ — целое положительное число;

$0 \leq \Delta t^* \leq T^*$ — текущее время внутри периода импульсной последовательности $T^* = t_{и}^* + t_{п}^*$;

$0 \leq \varepsilon \leq 1$ — относительная текущая координата;

$$a = \alpha_i + \alpha_0 = \frac{1 + aS}{\tau_i}; \quad \tau_i = \frac{\tau_i^*}{T^*}; \quad \tau_i^* = R_i^* C;$$

$$a = \frac{R_i^*}{R_H^*} = \frac{R_i}{R_H}; \quad S = \frac{t_{и}^*}{T^*}; \quad \alpha_i = \frac{t_{п}^*}{\tau_i^*} = \frac{1 - S}{\tau_i};$$

$$\alpha_0 = \frac{t_{п}^*}{\tau_0^*} = \frac{S}{\tau_0}; \quad \tau_0^* = R_0^* C = R_H \cdot \tau_i^*;$$

$$\tau_0 = \frac{\tau_0^*}{T^*}; \quad R_0^* = \frac{R_i^* \cdot R_H^*}{R_i^* + R_H^*}; \quad R_i = \frac{R_i^*}{R_0}; \quad R_H = \frac{R_H^*}{R_0};$$

* Величины со значком * приведены в абсолютных единицах (вольт, ампер, ом, секунда); величины без значка приведены в относительных (безразмерных) единицах.

$$v = 1 - R_i e^{-\alpha t} - R_{II} e^{-\alpha t} = R_{II} (1 - e^{-\alpha t}) + R_i (1 - e^{-\alpha t});$$

$$U = \frac{U^*}{U_0}; R = \frac{R^*}{R_0}; \tau = \frac{\tau^*}{t_0}.$$

За базисные величины приняты:

$$U_0 = E^*; R_0 = R^*_i + R^*_{II}; t_0 = T^*.$$

Члены II этих выражений, зависящие от n , характеризуют переходный импульсный процесс U_{cII} , члены I, не зависящие от n , отражают установившийся импульсный процесс U_{cI} :

$$U_{cII}^n(t) = [U_c(0) - U_{\max}] e^{-\frac{\epsilon}{\tau_0}} e^{-an}; \quad (3)$$

$$U_{cI}^n(t) = R_{II} + A e^{-\frac{\epsilon}{\tau_0}}; \quad (4)$$

$0 \leq \epsilon \leq S$.

$$U_{cII}^n(t) = [U_c(0) - U_{\max}] e^{-\alpha_0 t} e^{-\frac{\epsilon-S}{\tau_i}} e^{-an}; \quad (5)$$

$$U_{cI}^n(t) = 1 - B e^{-\frac{\epsilon-S}{\tau_i}}; \quad (6)$$

$S \leq \epsilon \leq 1$,

где

$$U_{\max} = R_{II} + A; \quad (7)$$

$$A = R_i \frac{1 - e^{-\alpha t}}{1 - e^{-\alpha}}; \quad (8)$$

$$B = R_i \frac{1 - e^{-\alpha_0 t}}{1 - e^{-\alpha}}. \quad (9)$$

Из этих выражений видно, что при фиксированном n напряжение на ёмкости во время импульса и паузы изменяется по экспоненте. Во время импульса в зависимости от напряжения на ёмкости $U_{cI}^n(0)$ в момент замыкания ключа K_1 ($\epsilon = 0$, начало импульса) выражения (3) и (5) описывают либо заряд (при $U_{cI}^n(0) < E_0$), либо разряд ёмкости (при $U_{cI}^n(0) > E_0$). При $U_{cI}^n(0) = E_0$ напряжение на ёмкости (на нагрузке) за время импульса не меняется и равно E_0 , где $E_0 = \frac{E^*_0}{E^*} = R_{II}$; $E^*_0 = E^* \frac{R^*_{II}}{R^*_{II} + R^*_i}$; E^* — постоянное напряжение источника. Во время паузы происходит только подзаряд (заряд) ёмкости независимо от напряжения на конденсаторе в момент размыкания ключа K_1 (начало паузы) и начального напряжения на ёмкости $U_c(0)$.

Очевидно, что сказанное сохраняет силу и для $n=0$. При этом $U_{cI}^n(0) = U_c(0)$, где $U_c(0)$ — напряжение на ёмкости в момент первого замыкания ключа K_1 (начальные условия). Из выражений (4) и (6) видно, что напряжение на ёмкости в установившемся импульсном режиме изменяется пилообразно (заряд — во время паузы и разряд — во время импульса).

Приведенные выражения показывают, что в зависимости от аргумента напряжение на ёмкости в дискретные моменты времени, соответствующие произвольно выбранному, фиксированному ϵ ($0 \leq \epsilon \leq 1$), изменяется также по экспоненциальному закону. Удобно эту законо-

мерность общего характера процесса представить при помощи «огнибающих», которые представляют собой кривые, проходящие через точки, соответствующие напряжениям ёмкости в начале импульса $U_c^{HH} [n]$ или в конце импульса $U_c^{KH} [n]$.

Уравнения „огнибающих“ $U_c^{HH} [n]$ и $U_c^{KH} [n]$ получаем из формулы (1) при $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = s$ соответственно:

$$U_c^{HH} [n] = U_{\max} - [U_{\max} - U_c(0)] e^{-an}, \quad (9)$$

$$U_c^{KH} [n] = U_{\min} + e^{-as} [U_c(0) - U_{\max}] e^{-an}, \quad (10)$$

где $U_{\min} = R_n + Ae^{-as}$; U_{\max} определяются из ф-лы (7).

Выражения U_{\max} и U_{\min} получены из ф-лы (4) для установившегося импульсного режима подстановкой $\varepsilon = 0$ и $\varepsilon = s$ соответственно. Начало координат по оси аргумента n выражения (10) сдвинуто на величину s по отношению к началу отсчёта выражения (9), что очевидно, ибо формулы (9) и (10) получены из выражения (4) для значений ε , сдвинутых на величину s . Приведя эти выражения к единому началу координат по оси абсцисс, находим разность значений «огнибающих» по оси ординат $\Delta_{ог}$:

$$\Delta_{ог} = U_{\max} - U_{\min} = \Delta = \text{const.}$$

Таким образом, разность значений «огнибающих» постоянна в любой момент времени при любых начальных условиях и равна пульсации напряжения на нагрузке Δ в установившемся импульсном режиме. Формы «огнибающих» $U_c^{HH} [n]$ и $U_c^{KH} [n]$ одинаковы. Отсюда следует, что достаточно анализировать одну «огнибающую» (удобнее $U_c^{HH} [n]$).

На основе изложенного может быть предложен простой графический способ изображения физической картины импульсного процесса, заключающийся в следующем. По табличным данным строится функция $f_1(x) = 1 - e^{-x}$, которая отображает «огнибающую» $U_c^{HH} [n]$ в приведенных к U_{\max} единицах для нулевых начальных условий.

Опустив $f_1(x)$ на величину $\frac{\Delta}{U_{\max}}$, получаем в принятом масштабе „огнибающую“ $U_c^{KH} [n]$. Через точки n и $n + s$ на оси $x = an$ проводим вертикальные линии до пересечения с „огнибающими“ $U_c^{HH} [n]$ и $U_c^{KH} [n]$ соответственно. Точки пересечения соединяются отрезками экспонент (рис. 2). Для начальных условий, не равных нулю ($0 < U_c(0) < U_{\max}$), построение производится так же. При этом ось ординат переносится по оси абсцисс на отрезок oa , соответствующий $U_c(0)$ (рис. 3). При $U_c(0) = 1$, т. е. когда ёмкость перед началом импульсного режима заряжена до величины источника E^* , способ построения аналогичен. Следует лишь иметь в виду, что по табличным данным строится функция $f_2(x) = e^{-x}$, которая и отражает «огнибающую» $U_c^{HH} [n]$ в приведенных к $1 - U_{\max}$ единицах (рис. 4).

Для погрешности установления γ из (9)* может быть получено выражение для дискретной длительности переходного импульсного про-

* Отметим, что время установления для «огнибающей» $U_c^{KH} [n]$ при одинаковой γ будет одинаково с временем установления «огнибающей» $U_c^{HH} [n]$, в то время, как например, в [1] указывается, что эти времена будут разные.

$n_{уи}$

щесса $n_{уи}$ при окончании времени начального включения схемы $t^*_{н}$ (закрытие ключа K) в виде:

$$n_{уи} \geq \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\gamma} \left| 1 - \frac{U_c(0)}{U_{max}} \right|. \quad (11)$$

Отсюда время выхода схемы в установившийся импульсный режим в абсолютных единицах равно:

$$t^*_{уи} \geq \frac{\tau^*_i}{1 + as} \ln \frac{1}{\gamma} \left| 1 - \frac{U_c(0)}{U_{max}} \right|. \quad (12)$$

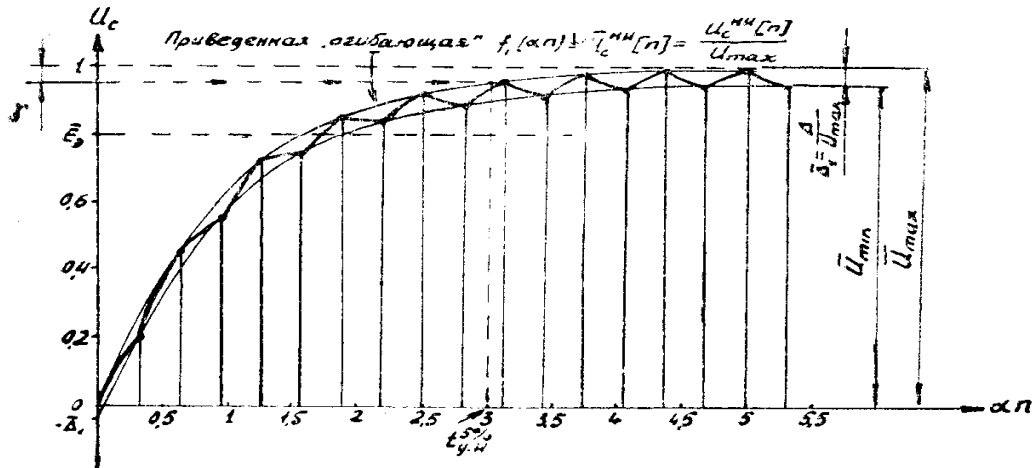


Рис. 2. Построение переходного импульсного процесса при $U_c(0) = 0$.

Максимальное время установления импульсного процесса будет при $U_c(0) = 0$

$$t^*_{у.и.макс} = \frac{\tau^*_i}{1 + as} \ln \frac{1}{\gamma}. \quad (13)$$

При $U_c(0) \neq 0$ (в том числе при $U_c(0) = 1$, т. е. в случае, когда к началу импульсного режима ёмкость заряжена до E^*) время установления будет меньше $t^*_{у.и.макс}$.

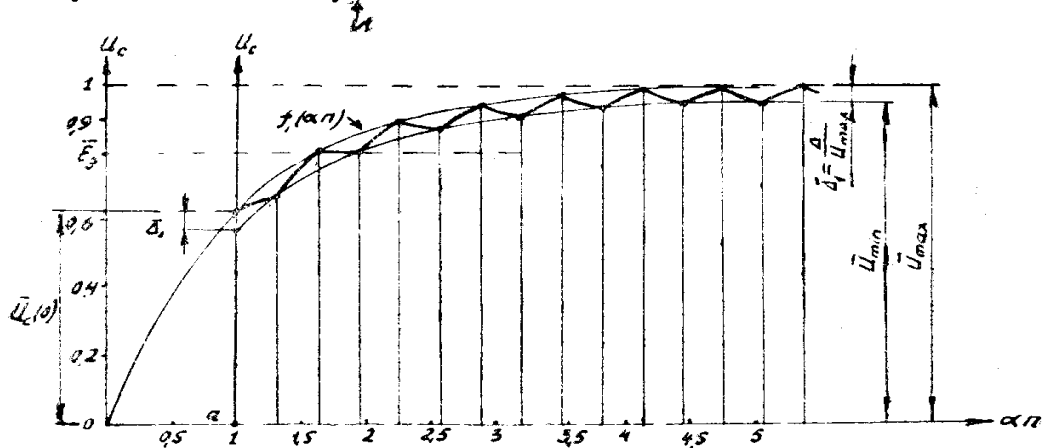


Рис. 3. Построение процесса при ненулевых начальных условиях.

Из формулы (11) видно, что чем больше α , тем меньше время установления. При значении $\alpha = \ln \frac{1}{\gamma}$ переходный процесс заканчивается в первом цикле, т. е. при $n \leq 1$. Чем больше as , тем меньше $t^*_{уи}$. На практике зачастую выполняется условие $as \ll 1$. Так в радиолокацион-

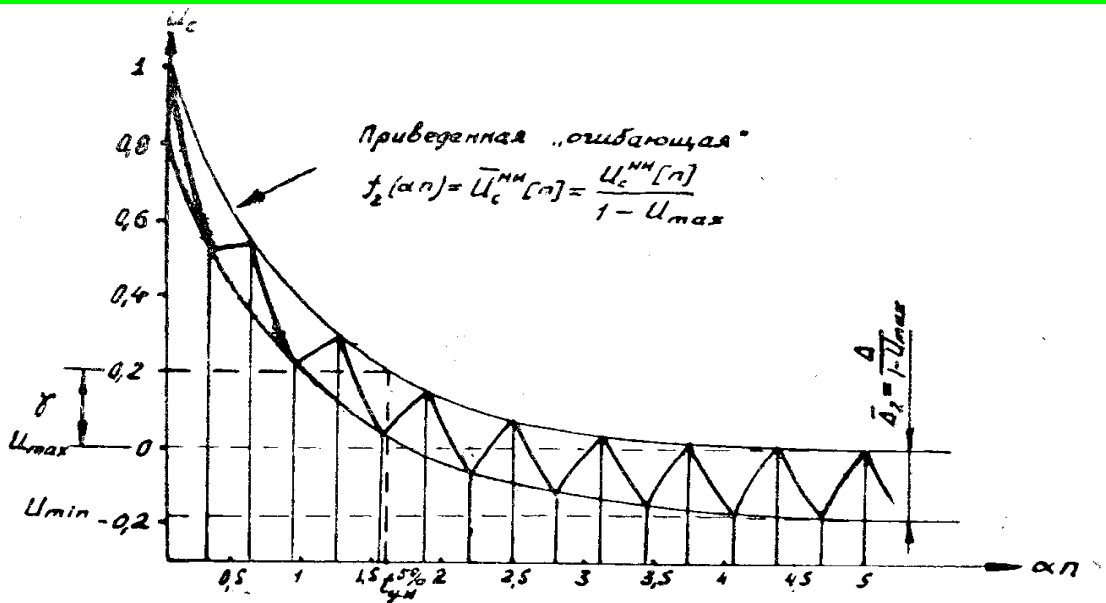


Рис. 4. Построение процесса при $U_c(0) = E$.

ных импульсных устройствах величина скважности $Q = \frac{1}{s}$ достигает нескольких тысяч единиц. В этом случае из выражения (13) получим

$$t^*_{\text{ун}} = R^*_i C \cdot \ln \frac{1}{\gamma} \dots \quad (14)$$

Выражение (14) по сравнению с (13) даёт значение с производственным запасом и может служить для инженерных, ориентировочных расчётов. Отметим, что в частности для погрешности 5% ($\gamma = 0,05$) из формулы (14) получим выражение, используемое в импульсной технике: $t^*_y = 3R^*_i C$. Для значений $\frac{1}{\gamma}$ кратных десяти, выражение (14) примет вид

$$t^*_{\text{ун}} \approx Kb \cdot \tau_1,$$

где $K = 1, 2, 3 \dots$ — величина, соответствующая погрешности $\gamma = 10\%; 1\%; 0,1\% \dots$; $b = 2,3026$. В частности, для $\gamma = 0,1$ получим выражение, широко используемое в приёмных устройствах $t^*_y = 2,3R^*_i C$.

Очевидно, что общее время установления $t^*_{\text{у общ}}$ определяется как, $t^*_{\text{у общ}} \approx t^*_{\text{н}} + t^*_{\text{ун}}$, при этом $t^*_{\text{н}} > t^*_{\text{ун max}}$. Если требуется получить минимально возможное общее время установления $t^*_{\text{у общ min}}$, импульсный режим следует начинать в момент, когда напряжение на ёмкости после замыкания ключа К (начальная подача питания на устройство) достигнет величины U_{max} . Это время определяется выражением

$$t^*_{\text{у общ min}} = R^*_i C \cdot \ln \frac{1}{1 - (1 - \gamma) U_{\text{max}}}.$$

ВЫВОДЫ

Проведён анализ переходных импульсных процессов эквивалентной схемы устройств с ёмкостным накопителем энергии. Получены аналитические выражения. Дан способ графического анализа, получены выражения для времени выхода схемы в режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпкин Я. З., Теория линейных импульсных систем. ГИФМЛ, 1963.
2. Репин А. М., Собиннов К. П., К анализу схемы замещения устройств с ёмкостным накопителем энергии. Труды МЭИС, 1969. (здесь). Стр.262-266.

Продолжение следует.

© А.М. Репин. 1967, -68, -69. 6.9.2013