

Итак, в случае, если по каким-либо соображениям включение импульсного устройства одновременно с источником питания недопустимо, следует соблюдать следующую последовательность:

1) Включается источник питания. Накопительный конденсатор заряжается до величины, равной амплитуде импульса с заданным допуском, т.е. до величины $(1-\delta)U_{max}$. 2) Включается импульсное устройство, которое начинает работу сразу в номинальном импульсном режиме. Методика включения аппаратуры сохраняется, она такая же, какая применяется в настоящее время. Однако, общее время готовности системы сведено к минимально возможному за счёт того, что а) уменьшено время накопления энергии конденсатором; б) импульсный режим после начального включения схемы начинается через время $t_{y.min}$, т.е. раньше, чем при используемых способах; в) время переходного импульсного режима практически сведено к нулю.

Здесь – одно замечание. При величине амплитуды импульса, близкой к величине источника питания, т.е. если $U_{max} \approx 1$, из (18) получаем выражение (10). Это вполне естественно, т.к. из [37] видно, что при $a = \frac{R_i}{R_H} < 1$ и $s = \frac{t_u}{T_u} \ll 1$ значение $U_{max} \rightarrow 1$. Именно условие $as \ll 1$ и дало формулу (10). Т.е. при выполнении условия (9) из (18) получаем

$$t_{y.min} = t_{y.op} = R_i C \ln \frac{1}{\delta}, \quad (\text{при } as \ll 1). \quad (18,1)$$

Отсюда следует, что при условии $as \ll 1$ удовлетворяются оба требования практики: получение наименьшего времени готовности системы и необходимость первоначального включения источника питания с последующим включением импульсной работы. Однако и в этом случае импульсное устройство следует включать после включения источника питания не через неопределённое, как правило очень завышенное время, (как это делается теперь), а через строго заданное время, определяемое выражением (10).

13. Ещё замечания. Относительно выражения (5).

I. В том случае, если ёмкость к началу импульсного режима зарядилась до величины источника питания E (в относительных

единицах до 1) выражение (5) справедливо только при условии:

$$U_{max} < U_{max.кр}^E \quad (19)$$

При $U_{max} = U_{max.кр}^E$ время t_y^E равно нулю. При $U_{max} > U_{max.кр}^E$ из выражения (5) получим, что t_y^E будет отрицательным, что не имеет физического смысла. Например, при $U_{max} = 0,96$ для $\gamma = 0,05$ получим: $\tau_y^E = -0,17 \frac{1}{\alpha}$. Это говорит о том, что напряжение на ёмкости, при величине амплитуды импульса больше критической, уже находится в пределах $(\gamma \cdot 100)\%$ — процентного допуска от амплитуды импульса. При $U_{max} \geq U_{max.кр}^E$ выражение (5) не имеет решения.

Критическая величина амплитуды импульса по отношению к величине источника питания для случая заряда ёмкости до E определяется выражением:

$$U_{max.кр}^E = \frac{1}{1 + \gamma} \quad (20)$$

Например, для 5% погрешности ($\gamma = 0,05$) величина критической амплитуды равна

$$U_{max.кр}^E (5\%) = 0,9527 \quad (21)$$

Выражение (20) находится из условия равенства единице числа натурального логарифма в выражении (5).

Физически это тоже очевидно. Условие (20) соответствует случаю, когда верхняя граница допуска $(1 + \gamma)U_{max}$ соответствует напряжению источника питания или, иными словами, когда U_{max} отличается от E на величину γU_{max} , и, следовательно, в момент включения импульсного режима (при $U_c(0) = E = 1$) амплитуда выходного сигнала уже лежит в пределах допуска, определяемого величиной γ .

Т.к. время $t_{y,0}^E$ входит в величину $t_{y,общ}$, то сказанное относится и к выражениям (13), (15)², (16) и, следовательно, при $U_{max} > U_{max.кр}^E$ время $t_{y,общ}$ определяется только временем $t_{y,н.} = \tau_c \ln \frac{1}{\gamma}$ (выр.14), т.е. опять-таки выражением (10).

2. На практике ёмкость заряжается до величины, меньшей E с некоторым определенным допуском δ_1 .

Если под этой δ_1 понимается та же величина δ недостижения импульсного процесса, то в этом случае время установления импульсного процесса сверху, т.е. при $U_c(0) > U_{max}$, находится из выражения (2) при условии: $U_c(0) = 1 - \delta$:

$$t_y \geq \frac{T_c}{\alpha} \ln \frac{1}{\delta} \left(\frac{1-\delta}{U_{max}} - 1 \right). \quad (22)$$

Если импульсный режим начнётся в момент, когда во время режима начального включения ёмкость зарядилась до напряжения, равного $(1-\delta)E$, то время $t_{y.обш.}$ в соответствии с (13) будет равно

$$t_{y.обш.} = \tilde{\tau}_i \ln \frac{1}{\delta} + \frac{\tilde{\tau}_i}{1+\delta} \ln \frac{1}{\delta} \left(\frac{1-\delta}{U_{max}} - 1 \right). \quad (23)$$

(Частным случаем выражения (23) является выражение (16)).

В данном случае критическая величина амплитуды импульса (рис.2) определяется следующим образом: $(1+\delta)U_{max.кр.}^\delta = 1 - \delta$. Откуда:

$$\left\{ \underline{U_{max.кр.}^\delta = \frac{1-\delta}{1+\delta}} \right\} \quad (24)$$

Для 5% погрешности эта величина равна

$$U_{max.кр.}^{\delta=0.05} = 0,905. \quad (25)$$

Выражениями (22) и (23) следует пользоваться только при условии

$$U_{max} < U_{max.кр.}^\delta \quad (26)$$

При $U_{max} \geq U_{max.кр.}^\delta$ время $t_{y.обш.}$ определяется только временем начального установления $t_{y.н.} = \tilde{\tau}_i \ln \frac{1}{\delta}$, что опять-таки соответствует выражению (10).

С физической точки зрения критическая величина амплитуды импульса (выр.24) говорит о том, что к моменту начала импульсного режима напряжение на ёмкости лежит в пределах допуска, определяемого величиной δ по отношению к требуемой амплитуде U_{max} (фиг.2). Рис.2, с.32.

3. ВЫВОДЫ.

1. Общее время выхода импульсного устройства в режим $t_{y.обш.}$ определяется временем установления непрерывного режима $t_{y.н}$ (режима начального включения) и временем установления импульсного режима, которое в общем случае определяется выражением (2).

2. В случае, если устройство начинает работать в импульсном режиме, когда напряжение на накопительной ёмкости в режиме начального включения достигло величины, определяемой допуском γ , общее время $t_{y.обш.}$ определяется выражением (23).

3. В случае, если импульсный режим начинается совместно с включением питания, время выхода $t_{y.о.мах}$ определяется из выражения (3), которое является максимальным временем установления импульсного режима и которое однако меньше времени $t_{y.н}$ - (выражение 14) и тем более меньше времени $t_{y.обш.}$ - (выражение 23). Следовательно, с точки зрения получения меньшего времени установления, целесообразнее включать импульсную работу (ключ K_1) одновременно с подачей питания (ключ K). Однако, с точки зрения работы импульсного устройства, желательно осуществлять предварительное включение питания.

4. Компромиссным решением указанных вопросов является включение импульсного режима после начального включения устройства, однако в момент времени, определяемый выражением (18), которое является минимально возможным временем готовности рассматриваемого устройства.

5. В случае, если включение импульсной работы в момент, определяемый выражением (18), осуществить невозможно, для уменьшения времени переходного импульсного процесса следует пользоваться выражением (8).

6. Если выполняется условие (9) ($as \ll 1$) - для случая одновременного включения питания и импульсного режима, или условие $U_{мах} \geq U_{мах.кр.}$, определяемое выражением (24), - для случая включения импульсного ре-

жима после установления режима начального включения, то время выхода в режим определяется простым выражением (10). Для 5% - й погрешности ($\gamma = 0,05$) это время находится по широко распространённой в импульсной технике формуле ^{для непрерывных процессов} $t_{\gamma}^{5\%} = 3 R_0 C$.

При указанных условиях время выхода в режим:

1. не зависит от параметров импульсной нагрузки ($R_n; t_n; T_n; U_{max}; \delta; \Delta$), указанных в части II [12].

2. не зависит от величины напряжения источника питания E ;

3. определяется только зарядной цепочкой $R_0 C$ и величиной относительной погрешности амплитуды импульса γ ;

4. для 5% точности ($\gamma = 0,05$) равно утроенному произведению величины накопительной ёмкости C на сопротивление R_0 ;

7. Время, определяемое $t_{\gamma}^{5\%}$ (10), может служить для инженерных расчетов времени выхода в режим для любых условий работы рассматриваемого импульсного режима.

Огибающая импульсного процесса, как было показано, имеет экспоненциальную закономерность. По аналогии с непрерывным зарядом (разрядом) ёмкости через сопротивление, происходящим, как известно из электротехники и импульсной техники, также по экспоненциальному закону, в качестве проверочного материала приведём вывод времени установления импульсного процесса иным способом, чем в данной главе.

4. ВЫВОД ВРЕМЕНИ ВЫХОДА В РЕЖИМ МЕТОДОМ АНАЛОГИЙ.

а/ случай "заряда". $U_C(0) = 0$

Известное выражение непрерывного заряда ёмкости C через сопротивление R от источника U имеет вид:

$$U_C(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (27)$$

При этом конденсатор стремится зарядиться до величины U по экспоненте с постоянной времени $\tau = RC$, и для 5%-й погрешности

Выражение (29) аналогично (27). Оно отличается только тем, что в (27) параметр непрерывный, а в (29) - дискретный. Следовательно, (29) показывает, что изменение напряжения по дискретным точкам n происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени $\frac{\tau}{\alpha}$, стремясь к своему пределу U_{max} .

см. вставку после следующего параграфа

Теоретически переходный процесс длится бесконечно большое время ($n \rightarrow \infty$), т.к. только при $n = \infty$ член $e^{-\alpha n}$ становится равным нулю, и напряжение в цепи, в соответствии с выр.м (29), примет установившееся значение, — $U_{\max} [n] = U_{\max}$.

Однако, как было сказано, на практике считают процесс установившимся, когда разность между изменяющейся величиной и её пределом составляет 5% от полного изменения. Если для нахождения дискретного времени установления процесса n_y исходить из такого определения, то по аналогии с зарядной цепочкой из выражения (29) можно найти, что время окончания переходного процесса

$$n_y = 3 \frac{1}{\alpha}. \quad (30)$$

Действительно, полагая $U_{\max}^0 [n] = 0,95 U_{\max}$ при $n = n_y$ из (29) имеем:

$$0,95 U_{\max} = U_{\max} (1 - e^{-\alpha n_y}).$$

Откуда: $e^{-\alpha n_y} = 0,05$.

~~и для 5% -й погрешности~~ процесс заряда считается законченным через время $t_y \approx 3\tau$.

Разряд в аналитической форме записи характеризуется обычно членом $1 - e^{-\beta t}$.

Возьмём выражение [39] и по аналогии с выр. ^{аналогично (27)} представим его в форме "разряда"

$$U_{\max} [n, 0] = U_c(0) + [U_{\max} - U_c(0)](1 - e^{-\alpha n}). \quad (28)$$

Отсюда при $U_c(0) = 0$ получим

$$U_{\max}^0 [n, 0] = U_{\max} (1 - e^{-\alpha n}). \quad (29)$$

и, следовательно, $n_y = \frac{1}{\alpha} \ln 20 = 2,9957 \frac{1}{\alpha} \approx 3 \frac{1}{\alpha}$.

Выражение (30) совпадает с выр.м (4). (стр.12)

Таким образом, с достаточной для практических целей относительной погрешностью 0,05 процесс формирования импульсов нагрузки при $U_c(0) = 0$ можно считать законченным через время

$$t_y = n_y T_u = 3 \frac{R \cdot C}{1 + a s}.$$

Заметим, что методом аналогии необходимо пользоваться умело. Иногда допускаются элементарные ошибки. Пока не было строгого доказательства выражения (1) и полученного из него (5), были попытки утверждения, что время выхода в режим при включении K_1 после окончания режима начального включения — $U_c(0) = 1$ будет таким же, как для (29), что неверно.

3.5/Случай "разряда" $U_c(0) = 1$.

Если ёмкость накопителя к моменту коммутации ключа K_1 заряжена до напряжения источника питания E , то можно показать, что изменение значений напряжения на нагрузке в дискретных точках n будет изменяться по тому же закону, по которому происходит разряд конденсатора C через сопротивление R от величины U_c .

Закон разряда запишется:

$$U_c(t) = U_c e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (31)$$

вставка на предыдущей стр. —

По мере разряда напряжение на конденсаторе $U_c(t)$ экспоненциально уменьшается, стремясь к своему пределу, равному нулю (Фиг. 4)

Рис. 4. с. 33

Полагая $U_c(t) = 0,05 U_c$ при $t = t_y$ имеем

$$e^{-\frac{t_y}{\tau}} = 0,05, \text{ откуда } t_y \approx 3\tau.$$

Разряд характеризуется экспоненциальным членом, и время t_y определяется временем затухания экспоненты $e^{-\beta t}$. При $U_c(0) > U_{max}$ "огibaющая максимумов" имеет форму "разряда".

$$U_{max}(t, 0) = U_{max} + [U_c(0) - U_{max}] e^{-\alpha t} \quad (32)$$

Здесь также имеется экспоненциальный член, который прибавляется к некоторой постоянной величине, не влияющей на процесс затухания. Как любая экспонента, этот член затухнет также через время, определяемое показателем экспоненты, и, следовательно, условно не принимая во внимание постоянный член (принимая условно $U_{max} = 0$) при $U_c(0) = 1$ из выражения (32) по аналогии с выражением разряда (31) можно сказать, что для точности в 5% имеем $e^{-\alpha t} = 0,05$, откуда $t_y \approx 3\frac{1}{\alpha}$. (33).

т.е. тоже, что и ввр. (30).

Но это не так. Ошибка рассуждения заключается в следующем.

Выражение (32) действительно аналогично выражению разряда (31), отличаясь, казалось бы, как и в предыдущем случае "заряда", только тем, что показывает "разрядное" изменение напряжения от точки к точке, а не непрерывно, как в (31). Однако, (32) отличается пределом, к которому стремится "разряд", и, следовательно, величина 0,05, которая берётся в этом случае для определения времени установления, даёт иное значение, чем 0,05 при выводе выражения (30). Ввр. (33) получено ошибочно из-за нарушения элементарного правила экспоненты, которое можно сформулировать след. образом.

Правило экспоненты.

В случаях, где имеется экспоненциальная зависимость, время затухания (установления) процесса t_y определяется затуханием члена, содержащего экспоненту $e^{-\beta t}$, и для погрешности γ , взятой от величины предела затухания экспоненциального члена, это время равно $\frac{1}{\beta} \ln \frac{1}{\gamma}$, т.е. для $\gamma = 0,05$ - $t_y = 3\frac{1}{\beta}$.

В выражении (32) затухает по экспонента не $U_c(0)$, как было принято выше, а разность $U_c(0) - U_{max}$, т.е. величина, меньшая начального напряжения $U_c(0)$, а 5%-я погрешность означает, что нужно взять 0,05 не от 1, а от U_{max} , которое меньше 1. Тогда для (32) при $U_c(0) = 1$ по правилу экспоненты имеем: $1,05 U_{max} = U_{max} + (1 - U_{max}) e^{-\alpha t_y}$, откуда $t_y = \frac{1}{\alpha} \ln 20 \left(\frac{1}{U_{max}} - 1 \right)$ (34)

что совпадает с (5). Величина t_y меньше, чем t_y из (33). Так для $U_{max} = 0,8$ величина $t_y = 1,6 \frac{1}{\alpha}$. При увеличении U_{max} согласно (38) время t_y уменьшается. Так для $U_{max} = 0,9$ $t_y = 0,8 \frac{1}{\alpha}$; для $U_{max} = 0,95$ - $t_y = 0,06 \frac{1}{\alpha}$.

Отсюда видно, что время выхода в режим, определяемое после окончания режима начального включения - $U_c(0) = 1$, по выражению (30) будет значительно завышено. Например, для $U_{max} = 0,95$ завышение будет в 50 раз, что явно недопустимо в случаях, где борьба идёт за доли секунд.

Правило экспоненты и приведенные некоторые рассуждения в этом параграфе иллюстрирует Фиг. 3, на основании которой можно

Рис. 3. с. 32.

сказать следующее.

Для погрешности в 5% относительно своего предела время установления для всех кривых одинаково - t_y . Но для каждой кривой эта 5%-я погрешность соответствует разным абсолютным значениям. Очевидно, это справедливо для любой погрешности δ . Для одной и той же абсолютной погрешности время установления тем меньше, чем меньше коэффициент экспоненты, т.е. чем меньше разность между установившимся напряжением U_{max} и напряжением на ёмкости в начальный момент коммутации ключа K_1 . $U_c(0) \rightarrow \dots$

5. Пример проверки времени выхода в режим и амплитуды импульса:

Для $U_c(0)=1$ на основании выражений (24) ^{и [25]} последовательно от импульса к паузе, от паузы к импульсу был просчитан и построен переходный импульсный процесс (фиг. 4) для следующих данных: $R_{ш}=1400 \text{ ом}$; $R_i=1000 \text{ ом}$; $C=20 \text{ мкф}$; $t_{ш}=55 \text{ мксек}$; $t_{и}=700 \text{ мксек}$.

Для $\delta=0,01$ время установления на основании графика ^{рис. 4, с. 33.} фиг. 4 равно $n_{у,граф}^{1\%} = 48$. Здесь величина U_{max} взята равной 0,94753. (см. приложение 2).

На основании [37] величина $U_{max} = 0,94778$.

В соответствие с формулой $n_y^E = t_y^E / t_{и}$, где t_y^E найдена из (5), дискретное время установления импульсного процесса при $U_c(0) = 1$ определено величиной $n_{у,расч.}^E = 46$. Незначительное расхождение между расчетной и графической величинами объясняется погрешностями графического построения. Этим примером показано, однако, как трудоёмка операция определения t_y и U_{max} методом последовательного графического построения, (что делалось до недавнего времени) по сравнению с расчётом по полученным в данной работе выражениям [37] и (5).

В этом разделе о времени выхода в режим имеется ещё один небезинтересный вопрос.

6. ГРАФИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА В РЕЖИМ ПРИ НЕНУЛЕВЫХ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.

Если начальное напряжение на накопителе лежит в пределах $U_{max} > U_c(0) > 0$, время переходного режима будет меньше $t_{y,max}$, определяемого выраж(4). Это - очевидно, т.к. результирующая э.д.с., действующая в цепи "заряда" и равная $U_{max} - U_c(0)$ (выр.28), будет меньше U_{max} (выр.29). Время выхода в режим можно определять на основании выр. (1). Однако, достаточно посмотреть на фиг. 6, чтобы заметить, что для $U_c(0) \neq 0$, время установления t_y меньше $t_{y,max}$ на величину $\Delta t_y = a'b'$ и определяется весьма просто: $t_y = a'b' - ab$. Величина уменьшения времени выхода в режим Δt_y зависит только от начального напряжения на ёмкости. Из фиг. 6 видно, что эта величина Δt_y легко определяется графическим путём, зная $t_{y,max}$ (выр. 3) и величину $m = U_c(0) / U_{max}$ - начальное напряжение на ёмкости относительно U_{max} , время установления определяется по графику

6! фиг. 7?
к с. 34 6!

Отрезок δc показывает, какую долю от максимального времени $t_{y,max}$ составляет время t_y при ненулевых начальных условиях. Тогда время t_y находится из выражения;

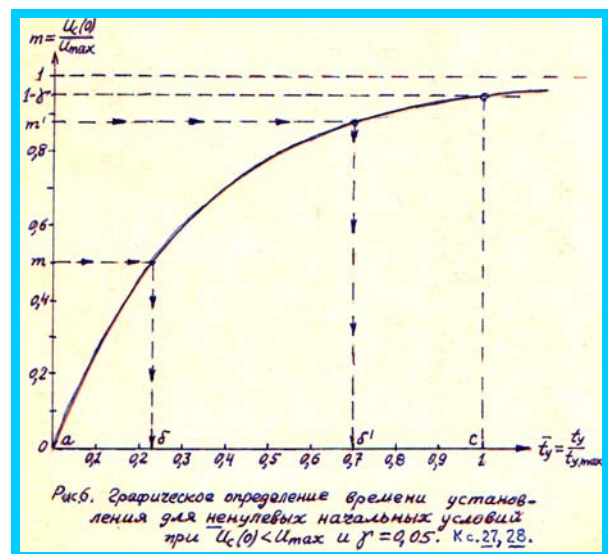
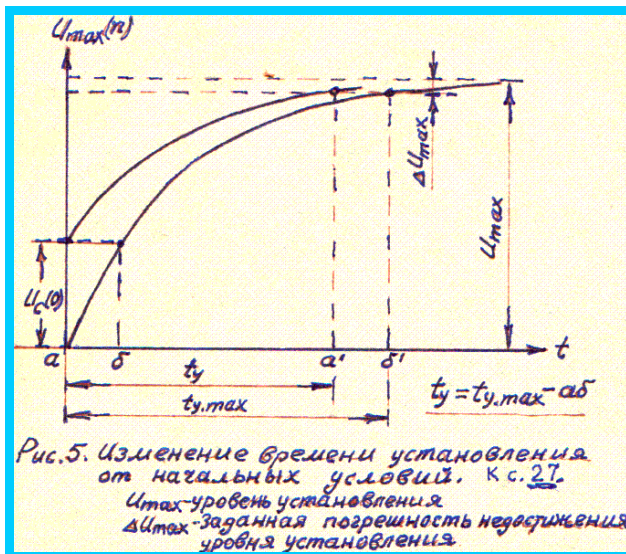
$$t_y = \delta c \cdot t_{y,max} = (1 - a\delta) / t_{y,max} \quad (35)$$

Отрезок $a\delta$ находится легко.
Рис. На фиг 6 показано пунктирными стрелками его нахождение для $m' = 0.88$. В этом случае $t_y = (1 - 0.7) t_{y,max} = 0.3 t_{y,max}$.

Так же можно определить, во сколько раз уменьшается t_y для $U_c(0) \neq 0$ по сравнению с максимальным временем выхода в режим $t_{y,max}$. Эта величина $K = t_{y,max} / t_y$ определяется из графика фиг. 7(б) как отношение $1/\delta c$. Рис. 6 с. 34

$$K = \frac{t_{y,max}}{t_y} = \frac{1}{\delta c} \quad (36)$$

Для $m = 0.88 - K = \frac{1}{0.3} \approx 3$, т.е. время уменьшилось в 3 раза..
 при начальном напряжении на ёмкости, составляющем 88% от величины амплитуды изменения U_{max} .



Автор. В переходном процессе. Того времени. Без t_y .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время выхода устройств в номинальный режим – важный параметр широкого класса импульсных устройств с ёмкостным накопителем энергии. Знание его особенно важно в системах оперативной готовности и действия. Получение выражений в замкнутой форме для нахождения времени установления импульсных (разрывных) процессов представляет определенные затруднения. В настоящее время таких формул нет. В работе выведены эти формулы в обобщённом виде для любых начальных условий и любой погрешности выхода импульсных устройств в установившийся рабочий режим.

Дан всесторонний анализ времени выхода в режим, рассмотрены особенности его расчёта. Как частные случаи, получены выражения, широко используемые, например в импульсной технике и в радиоприёмных устройствах.

В качестве проверочного материала те же формулы получены другим методом – методом аналогии. Использование правила экспоненты позволило привести графический способ определения времени установления.

Результаты работы позволяют существенно повысить точность, достоверность и, следовательно, качество, а также значительно снизить трудоёмкость определения времени выхода в режим целого ряда импульсных устройств. Для иллюстрации этого в работе приведен сравнительный расчёт времени выхода в режим методом индукции ("шаг за шагом"), который с очевидностью показывает преимущества расчёта времени установления по выведенным в данной работе формулам.

В [12] рассмотрены способы включения источника питания: одноразового и ступенчатого включения. Включение аппаратуры по ряду причин осуществляется после того, как напряжение на накопительной ёмкости достигает величины источника питания.

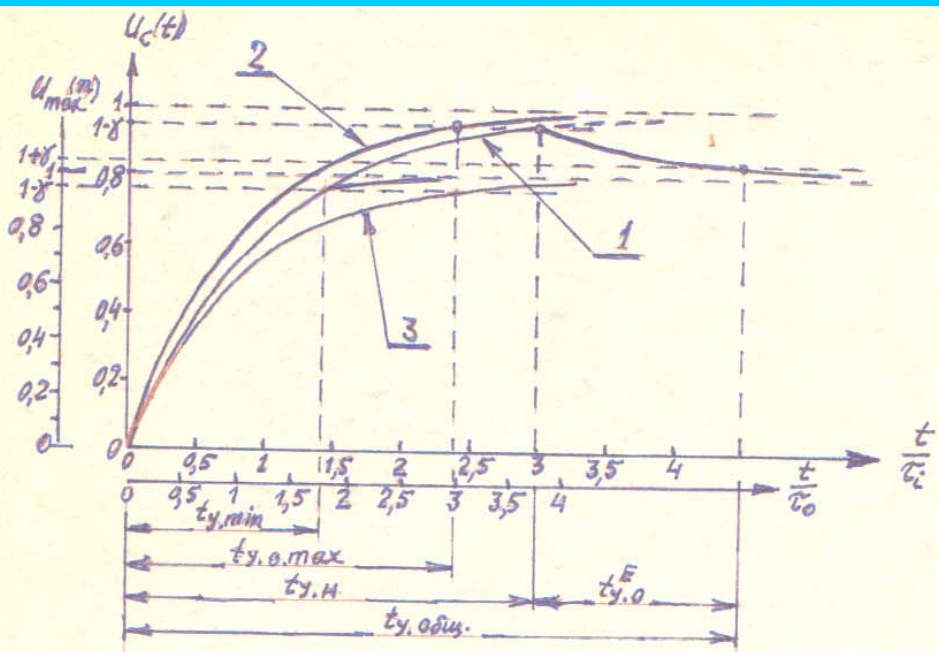
При этом время начального включения источника берётся весьма приблизительно и всегда с неоправданным завышением. В данной работе на основе анализа времени выхода в режим предложено два способа включения источника питания и импульсного устройства, отличающихся от применяемых в настоящее время тем, что они позволяют значительно уменьшить время готовности аппаратуры. Первый способ с целью уменьшения времени предполагает одновременное включение источника питания и импульсного устройства. В том случае, если по каким-либо соображениям одновременное включение нецелесообразно, включение импульсного устройства следует осуществить после включения источника питания через некоторое время $t_{y. min}$, которое легко находится по весьма простой формуле. В этом случае потребуется специальное устройство, скажем реле времени, которое и осуществит включение устройства через заданное время $t_{y. min}$, когда напряжение на накопительной ёмкости достигнет номинальной величины. Такой способ включения является оптимальным в смысле получения наименьшего времени готовности устройства в целом, а также в отношении требований, когда работа импульсного устройства возможна только после предварительного заряда накопительной ёмкости.

Анализ проведён в относительных единицах, что позволило решить задачу в общем виде, абстрагируясь от конкретных величин элементов схемы, параметров импульсов и источника питания.

Хотя исследованию подлежали импульсные (разрывные) процессы, основные аналитические выражения по определению времени выхода в режим получены в замкнутой, непрерывной форме. В этом смысле, методологически, работа может быть полезна и в других, связанных с импульсными процессами, областях науки и техники.

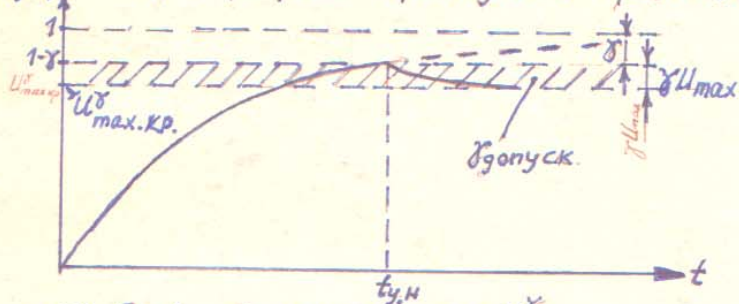
Приложение 1

(Графики, рисунки)



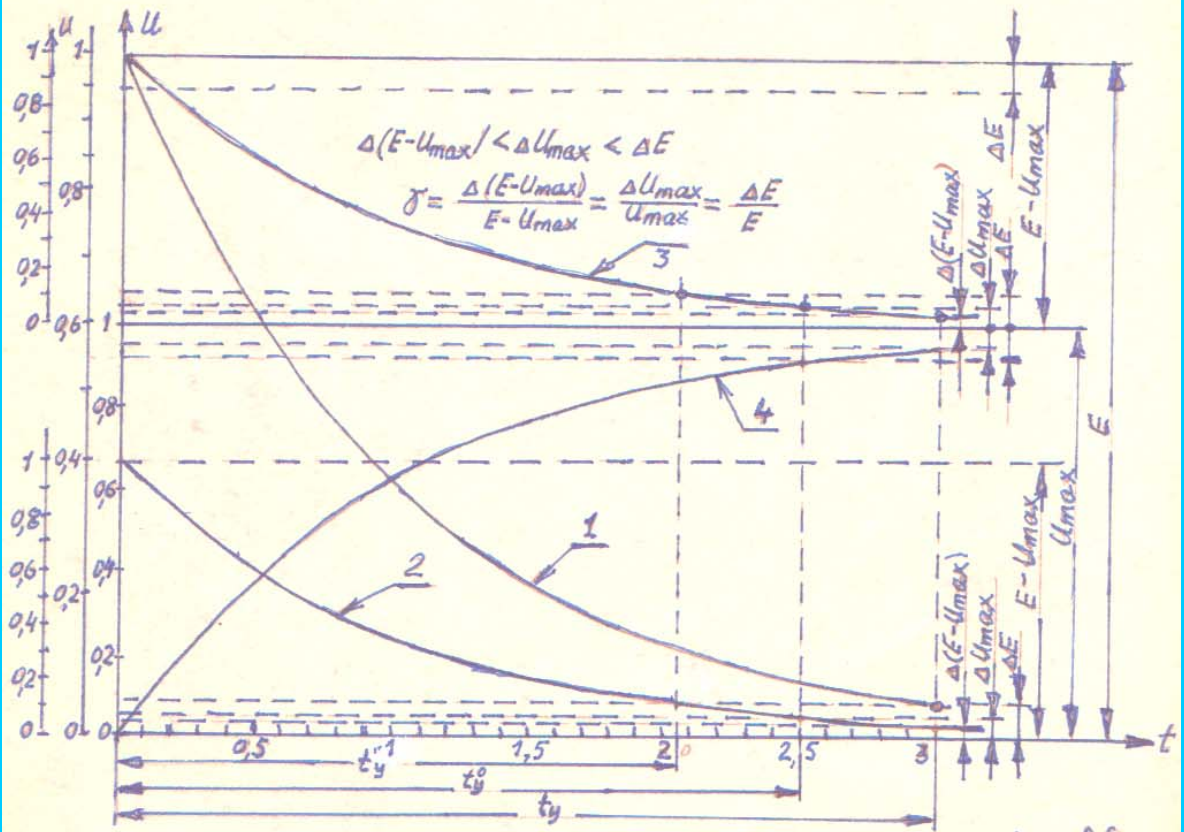
с.17

Кс.17,18,19 Рис.1. График переходных процессов.



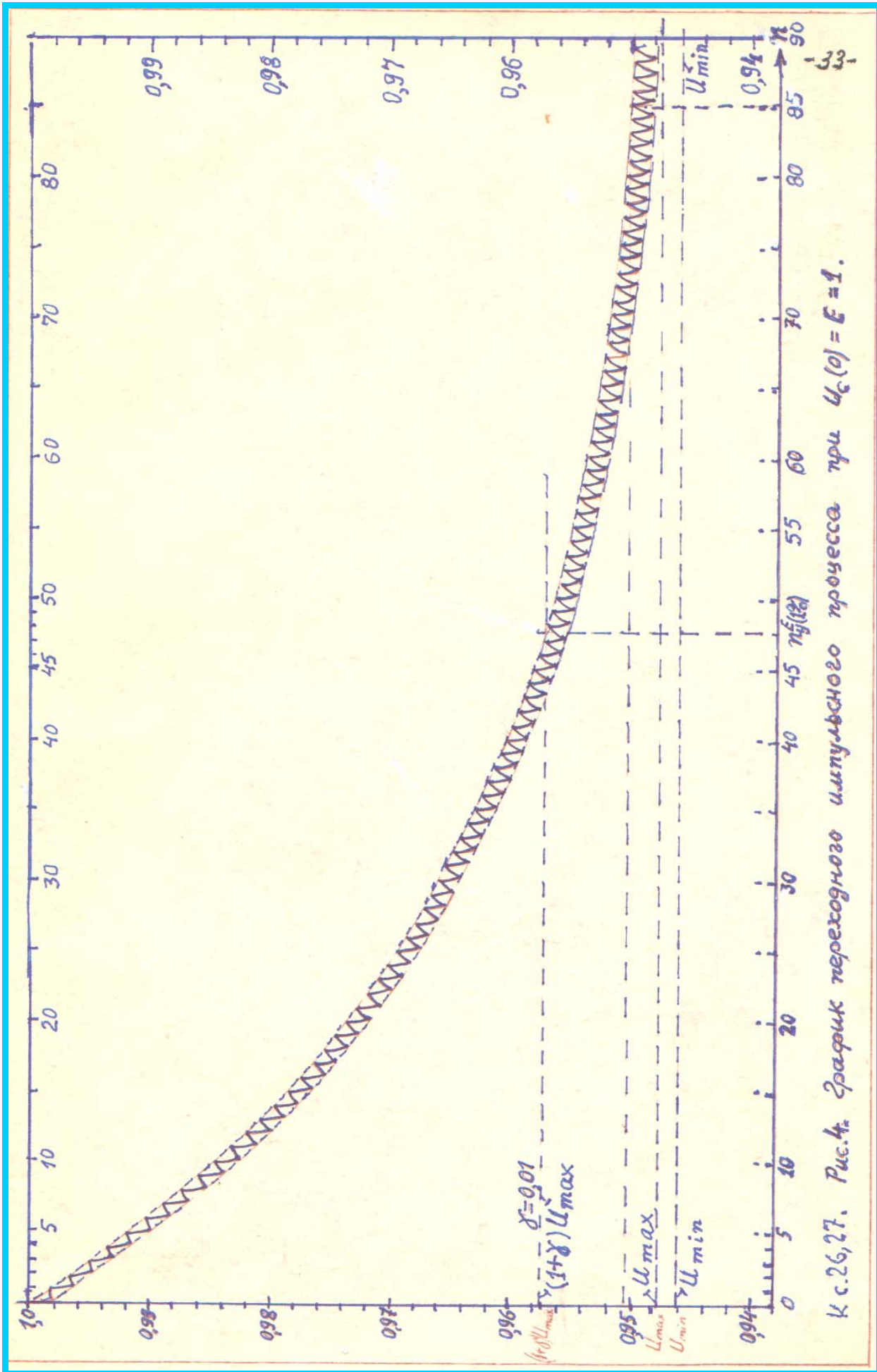
с.22

Кс.22. Рис.2. К определению U_max,кр.



Кс.26

Рис.3. Иллюстрация правила экспоненты.



К с. 26, 27. Рис. 4. График переходного импульсного процесса при $U_c(0) = E = 1$.

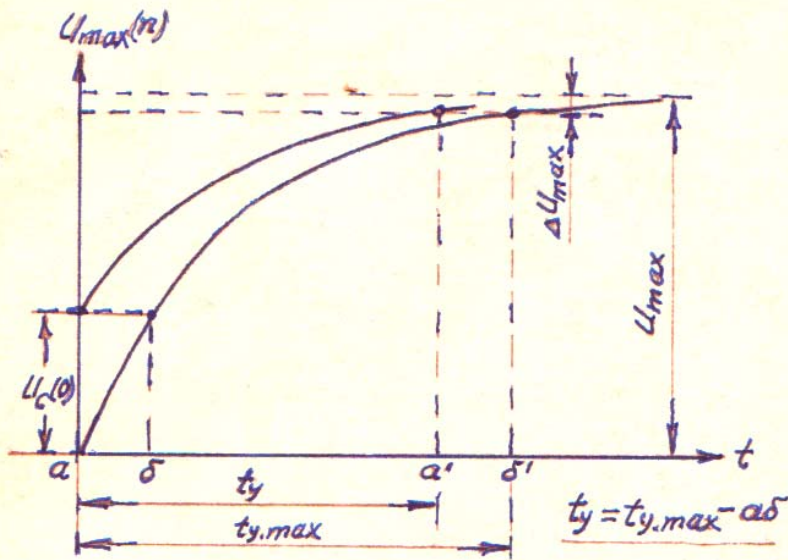


Рис.5. Изменение времени установления от начальных условий. К с. 27.
 U_{max} - уровень установления
 ΔU_{max} - заданная погрешность недостижения уровня установления

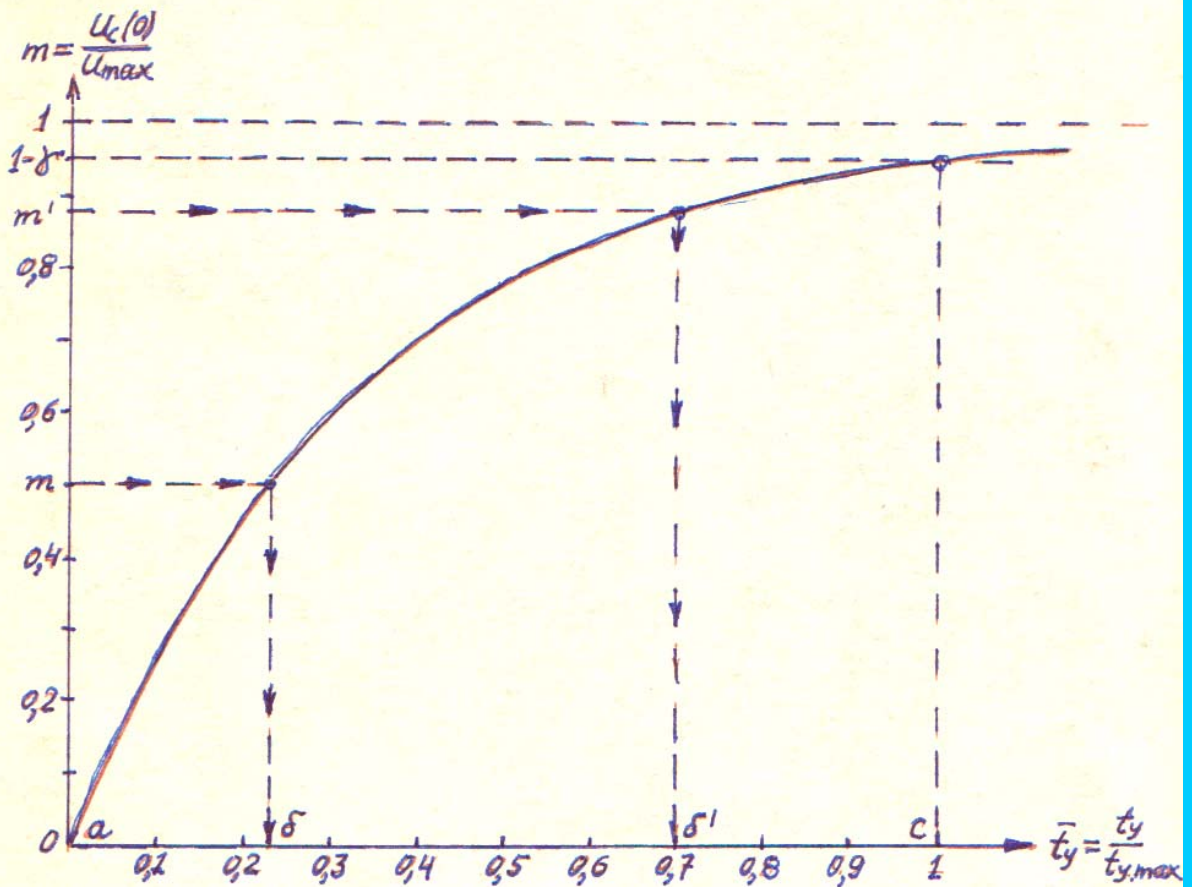


Рис.6. Графическое определение времени установления для ненулевых начальных условий при $U_c(0) < U_{max}$ и $\gamma = 0,05$. К с. 27, 28.

Приложение 2

(Расчёт, таблицы)

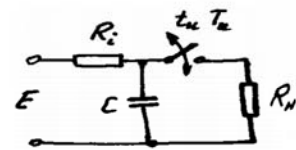
ПРИЛОЖЕНИЕ К РИС. 4

1. ДАННЫЕ: $R_H = 1400 \text{ ом}; R_i = 1000 \text{ ом}; C = 20 \text{ мкф.}$

$t_u = 55 \cdot 10^{-6} \text{ сек}; T_u = 700 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$

Выпрямитель на 70 кв.

$E = 70 \text{ кв.}$



2. РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ:

$$U_{\min}^{(i)} = \bar{R}_H + [U_{\max}^{(i)} - \bar{R}_H] e^{-\alpha_i}; \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$U_{\max}^{(i)} = 1 - [1 - U_{\min}^{(i-1)}] e^{-\alpha_i}; \quad i = 2, 3, 4, 5, \dots$$

3. НАЧАЛЬНЫЕ РАСЧЁТНЫЕ ДАННЫЕ.

$$a = \frac{R_i}{R_H} = \frac{1}{1,4}; \quad \alpha_i = \frac{t_H}{\tau_i} = \frac{645 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} = 0,03225; \quad e^{-\alpha_i} = 0,96824.$$

$$\tau_i = R_i C; \quad \tau_2 = R_2 C; \quad R_2 = \frac{R_i R_H}{R_i + R_H} = \frac{0,7 \cdot 10^3}{1,2}; \quad \tau_2 = \frac{7}{6} \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha_2 = \frac{t_u}{\tau_2} = \frac{55 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{7 \cdot 10^{-2}} = 0,0471; \quad e^{-\alpha_2} = 0,9953;$$

$$\bar{R}_H = \frac{R_H}{R_i + R_H} = \frac{7}{12} = 0,58333; \quad \bar{R}_i = \frac{R_i}{R_i + R_H} = \frac{5}{12}; \quad s = \frac{t_u}{T_u} = 0,0786;$$

$$\alpha = \frac{T_u}{\tau_i} (1 + as) = \alpha_i + \alpha_2 = 0,036967. \quad e^{-\alpha} = 0,963689.$$

для $i=1 \quad U_{\max}^{(1)} = 1; \quad U_{\min}^{(1)} = \bar{R}_H + \bar{R}_i e^{-\alpha_2} = 0,99804$

4. ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РАСЧЁТНОЙ ТАБЛИЦЕ:

$$A = U_{\max}^{(i)} - \bar{R}_H = U_{\max}^{(i)} - 0,58333; \quad B = A e^{-\alpha_2} = 0,9953 A;$$

$$U_{\min}^{(i)} = \bar{R}_H + B = 0,58333 + B;$$

$$C = 1 - U_{\min}^{(i-1)}; \quad D = C e^{-\alpha_i} = 0,9684 C;$$

$$U_{\max}^{(i)} = 1 - D.$$

Расчёт проведен с точностью до 5 знака. Если шестой знак ≥ 5 , пятый знак увеличен на 1, если < 5 , отбрасываем его.

5. РАСЧЁТНАЯ ТАБЛИЦА К РИСУ.5

2.

| i | i -й цикл | | | $(i-1)$ -я пауза | | |
|-----|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | $U_{max}^{(i)} - 0,58333 = A$ | $0,9953 \cdot A = B$ | $0,58333 + B = U_{min}^{(i)}$ | $U - U_{min}^{(i-1)} = C$ | $0,96824 \cdot C = D$ | $1 - D = U_{max}^{(i)}$ |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. | 0,41667 | | 0,99804 | нулевая пауза | | 1,0000 |
| 2. | 0,41477 | 0,41282 | 0,99615 | 0,00196 | 0,00189775 | 0,99810 |
| 3. | 0,41294 | 0,411 | 0,99433 | 0,00385 | 0,00373 | 0,99627 |
| 4. | 0,41118 | 0,40925 | 0,99258 | 0,00567 | 0,00549 | 0,99451 |
| 5. | 0,40949 | 0,40756 | 0,99089 | 0,00742 | 0,00718 | 0,99282 |
| 6. | 0,40785 | 0,40593 | 0,98926 | 0,00911 | 0,00882 | 0,99118 |
| 7. | 0,40620 | 0,40429 | 0,98762 | 0,01074 | 0,01040 | 0,98960 |
| 8. | 0,40468 | 0,40278 | 0,98611 | 0,01238 | 0,01199 | 0,98801 |
| 9. | 0,40312 | 0,4011 | 0,98561 | 0,01399 | 0,01355 | 0,98645 |
| 10. | 0,402274 | 0,40085 | 0,98418 | 0,01439 | 0,01393 | 0,98607 |
| 11. | 0,40135 | 0,39945 | 0,98279 | 0,01582 | 0,01532 | 0,98468 |
| 12. | 0,40001 | 0,39813 | 0,98146 | 0,01721 | 0,01666 | 0,98334 |
| 13. | 0,39872 | 0,39685 | 0,98018 | 0,01854 | 0,01795 | 0,98205 |
| 14. | 0,39748 | 0,39561 | 0,97894 | 0,01982 | 0,01919 | 0,98081 |
| 15. | 0,39628 | 0,39442 | 0,97775 | 0,02106 | 0,02039 | 0,97961 |
| 16. | 0,39513 | 0,39327 | 0,97660 | 0,02225 | 0,02154 | 0,97846 |
| 17. | 0,39401 | 0,39216 | 0,97549 | 0,02340 | 0,02266 | 0,97734 |
| 18. | 0,39294 | 0,39109 | 0,97442 | 0,02451 | 0,02373 | 0,97627 |
| 19. | 0,39190 | 0,39005 | 0,97338 | 0,02558 | 0,02477 | 0,97523 |
| 20. | 0,39090 | 0,38906 | 0,97239 | 0,02662 | 0,02577 | 0,97423 |
| 21. | 0,38994 | 0,38811 | 0,97144 | 0,02761 | 0,02673 | 0,97327 |
| 22. | 0,38908 | 0,38725 | 0,97058 | 0,02856 | 0,02765 | 0,97235 |
| 23. | 0,38818 | 0,38636 | 0,96969 | 0,02942 | 0,02849 | 0,97151 |
| 24. | 0,38732 | 0,38550 | 0,96883 | 0,03031 | 0,02935 | 0,97065 |
| 25. | 0,38649 | 0,38467 | 0,96800 | 0,03117 | 0,03018 | 0,96982 |
| 26. | 0,38569 | 0,38388 | 0,96721 | 0,0320 | 0,03098 | 0,96902 |
| 27. | 0,38492 | 0,38311 | 0,96644 | 0,03279 | 0,031750 | 0,96825 |
| 28. | 0,38418 | 0,38237 | 0,96570 | 0,03356 | 0,03249 | 0,96751 |
| 29. | 0,38346 | 0,38166 | 0,96499 | 0,03430 | 0,03321 | 0,96679 |
| 30. | 0,38277 | 0,38097 | 0,96430 | 0,03501 | 0,03390 | 0,96661 |
| 31. | 0,38207 | 0,38027 | 0,96360 | 0,03570 | 0,03460 | 0,96540 |
| 32. | 0,38143 | 0,37964 | 0,96297 | 0,03640 | 0,03524 | 0,96476 |
| 33. | 0,38077 | 0,37898 | 0,96231 | 0,03703 | 0,0359 | 0,9641 |
| 34. | 0,38018 | 0,37839 | 0,96172 | 0,03769 | 0,03649 | 0,96351 |
| 35. | 0,37961 | 0,37782 | 0,96115 | 0,03828 | 0,03706 | 0,96294 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 36. | 0,37905 | 0,37727 | 0,96060 | 0,03885 | 0,03762 | 0,96238 |
| 37. | 0,37853 | 0,37675 | 0,96008 | 0,03940 | 3814 | 188 |
| 38. | 0,37802 | 0,37624 | 0,95957 | 0,03993 | 3865 | 135 |
| 39. | 0,37752 | 0,37575 | 0,95908 | 0,04043 | 3915 | 085 |
| 40. | 0,37705 | 0,37528 | 0,95861 | 0,04092 | 3962 | 038 |
| 41. | 0,37659 | 0,37482 | 0,95815 | 0,04139 | 4008 | 0,95992 |
| 42. | 0,37615 | 0,37438 | 0,95771 | 0,04185 | 4052 | 948 |
| 43. | 0,37572 | 0,37395 | 0,95728 | 0,04229 | 4095 | 905 |
| 44. | 0,37531 | 0,37354 | 0,95687 | 0,04272 | 4136 | 864 |
| 45. | 0,37491 | 0,37315 | 0,95648 | 0,04313 | 4176 | 824 |
| 46. | 0,37453 | 0,37453 | 0,95610 | 0,04352 | 4214 | 786 |
| 47. | 0,37416 | 0,37240 | 0,95573 | 0,04320 | 4225 | 749 |
| 48. | 0,37381 | 0,37205 | 0,95538 | 0,04427 | 4286 | 714 |
| 49. | 0,37347 | 0,37171 | 0,95504 | 0,04462 | 4320 | 680 |
| 50. | 0,37314 | 0,37139 | 0,95472 | 0,04496 | 4353 | 647 |
| 51. | 0,37283 | 0,37108 | 0,95441 | 0,04528 | 4384 | 616 |
| 52. | 0,37253 | 0,37048 | 0,95410 | 0,04559 | 4414 | 596 |
| 53. | 0,37223 | 0,37048 | 0,95381 | 0,04590 | 4444 | 556 |
| 54. | 0,37195 | 0,37020 | 0,95353 | 0,04619 | 4472 | 528 |
| 55. | 0,37168 | 0,36993 | 0,95326 | 0,04647 | 4499 | 501 |
| 56. | 0,37141 | 0,36966 | 0,95299 | 0,04674 | 4526 | 474 |
| 57. | 0,37115 | 0,36941 | 0,95274 | 0,04701 | 4552 | 448 |
| 58. | 0,37091 | 0,36916 | 0,95249 | 0,04726 | 4576 | 424 |
| 59. | 0,37067 | 0,36893 | 0,95226 | 0,04751 | 4600 | 400 |
| 60. | 0,37045 | 0,36871 | 0,95204 | 0,04774 | 4622 | 378 |
| 61. | 0,37023 | 0,36849 | 0,95182 | 0,04796 | 4644 | 356 |
| 62. | 0,37002 | 0,36828 | 0,95161 | 0,04818 | 4665 | 335 |
| 63. | 0,36982 | 0,36808 | 0,95141 | 0,04839 | 4685 | 315 |
| 64. | 0,36962 | 0,36788 | 0,95121 | 0,04859 | 4705 | 295 |
| 65. | 0,36943 | 0,36769 | 0,95102 | 0,04879 | 4724 | 276 |
| 66. | 0,36925 | 0,36751 | 0,95084 | 0,04898 | 4742 | 258 |
| 67. | 0,36907 | 0,36734 | 0,95067 | 0,04898 | 4760 | 240 |
| 68. | 0,36891 | 0,36718 | 0,95051 | 0,04933 | 4776 | 224 |
| 69. | 0,36875 | 0,36702 | 0,95035 | 0,04949 | 4792 | 208 |
| 70. | 0,36860 | 0,36687 | 0,95020 | 0,04965 | 4807 | 193 |
| 71. | 0,36845 | 0,36672 | 0,95005 | 0,04980 | 4822 | 178 |
| 72. | 0,36831 | 0,36658 | 0,94991 | 0,04995 | 4836 | 164 |
| 73. | 0,36817 | 0,36644 | 0,94977 | 0,05009 | 4850 | 150 |

| 1 | ! | 2 | ! | 3 | ! | 4 | ! | 5 | ! | 6 | ! | 7 |
|------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|
| 74. | | 0,36804 | | 0,36631 | | 0,94964 | | 0,05023 | | 0,04863 | | 0,95137 |
| 75. | | 0,36791 | | 0,36618 | | 0,94951 | | 0,05036 | | 0,04876 | | 0,95124 |
| 76. | | 778 | | 605 | | 38 | | 49 | | 89 | | 111 |
| 77. | | 766 | | 593 | | 26 | | 62 | | 901 | | 099 |
| 78. | | 54 | | 581 | | 14 | | 74 | | 13 | | 087 |
| 79. | | 43 | | 570 | | 03 | | 86 | | 24 | | 76 |
| 80. | | 32 | | 559 | | 892 | | 97 | | 35 | | 65 |
| 81. | | 21 | | 548 | | 81 | | 108 | | 46 | | 54 |
| 82. | | 11 | | 538 | | 71 | | 119 | | 56 | | 44 |
| 83. | | 01 | | 29 | | 62 | | 29 | | 66 | | 34 |
| 84. | | 692 | | 20 | | 53 | | 38 | | 75 | | 25 |
| 85. | | 83 | | 11 | | 44 | | 47 | | 84 | | 16 |
| 86. | | 75 | | 03 | | 36 | | 56 | | 92 | | 08 |
| 87. | | 67 | | 494 | | 27 | | 64 | | 0,05000 | | 0,95000 |
| 88. | | 58 | | 86 | | 19 | | 73 | | 09 | | 0,94991 |
| 89. | | 51 | | 79 | | 12 | | 81 | | 16 | | 84 |
| 90. | | 44 | | 72 | | 05 | | 88 | | 23 | | 77 |
| 91. | | 37 | | 65 | | 798 | | 95 | | 30 | | 70 |
| 92. | | 30 | | 58 | | 91 | | 202 | | 37 | | 63 |
| 93. | | 23 | | 51 | | 84 | | 09 | | 44 | | 56 |
| 94. | | 14 | | 42 | | 75 | | 16 | | 53 | | 47 |
| 95. | | 08 | | 36 | | 69 | | 25 | | 59 | | 41 |
| 96. | | 02 | | 30 | | 63 | | 31 | | 65 | | 35 |
| 97. | | 596 | | 24 | | 57 | | 37 | | 71 | | 29 |
| 98. | | 91 | | 19 | | 52 | | 43 | | 76 | | 24 |
| 99. | | 86 | | 14 | | 47 | | 48 | | 81 | | 19 |
| 100. | | 0,36581 | | 0,36409 | | 0,94742 | | 53 | | 86 | | 14 |
| 101. | | - | | - | | - | | 0,05258 | | 0,05091 | | 0,94909 |

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА В РЕЖИМ.

Спад за один период по $U_{max}^{(n)}$ составляет около 0,00005 ,
по $U_{min}^{(n)}$ — 0,00005.

Установившиеся значения составляют : $U_{max} = 0,94753$,
 $U_{min} = 0,94581$.

Разность между значением 100-го импульса и установившимся значением равна 0,00156, т.е. процесс установится примерно через $\frac{0,00156}{0,00005} = 30$ периодов, и общее время установления составит 130 периодов ($130 \cdot 0,710^3 = 90 \cdot 10^3$ сек.).

С точностью до 1% по отношению к U_{max} процесс установится примерно через $n_{у,грар}^E = 48$, (рис. 4).

По расчётной формуле $U_{max} = \bar{R}_H + \bar{R}_i \frac{1 - e^{-\alpha_i}}{1 - e^{-\alpha_H}}$ находим: $U_{max} = 0,94777753$
 $\approx 0,94778$. С ошибкой $\gamma = 0,01$ по выражению (49) находим:

$$n_{у,расч}^E = \frac{1}{0,036967} \ln 100 \left(\frac{1}{0,94778} - 1 \right) = 46.$$

По выражению $U_{min} = \bar{R}_H + (U_{max} - \bar{R}_H) e^{-\alpha_H}$ находим $U_{min} = 0,946065$.
Откуда $\Delta = U_{max} - U_{min} = 0,001714$, что от 70 кВ составляет
 $= 119,98 \approx 120$ в.



Автор. В переходном процессе. Того времени. Без ty.

ЛИТЕРАТУРА

1. Репин А.М. Анализ переходных процессов устройства типа "источник питания-накопитель-нагрузка".
Часть I. Непрерывные процессы. Вывод и анализ основных выражений, научный отчёт № 3655. ВНИИММШ. 1966 г.
2. Репин А.М. Анализ переходных процессов устройства типа "источник питания-накопитель-нагрузка".
Часть II. Импульсные процессы. Вывод и анализ основных выражений. Научный отчёт № 3776. ВНИИММШ. 1967 г.



Красное

Солнышко

Кавказ. X. 1987 г. Пятигорск. Кафе в горах. На высоте. По пешеходной тропе. В импульсных условиях. Без t_y

© А.М. Репин. 1968. 15.9.2015.