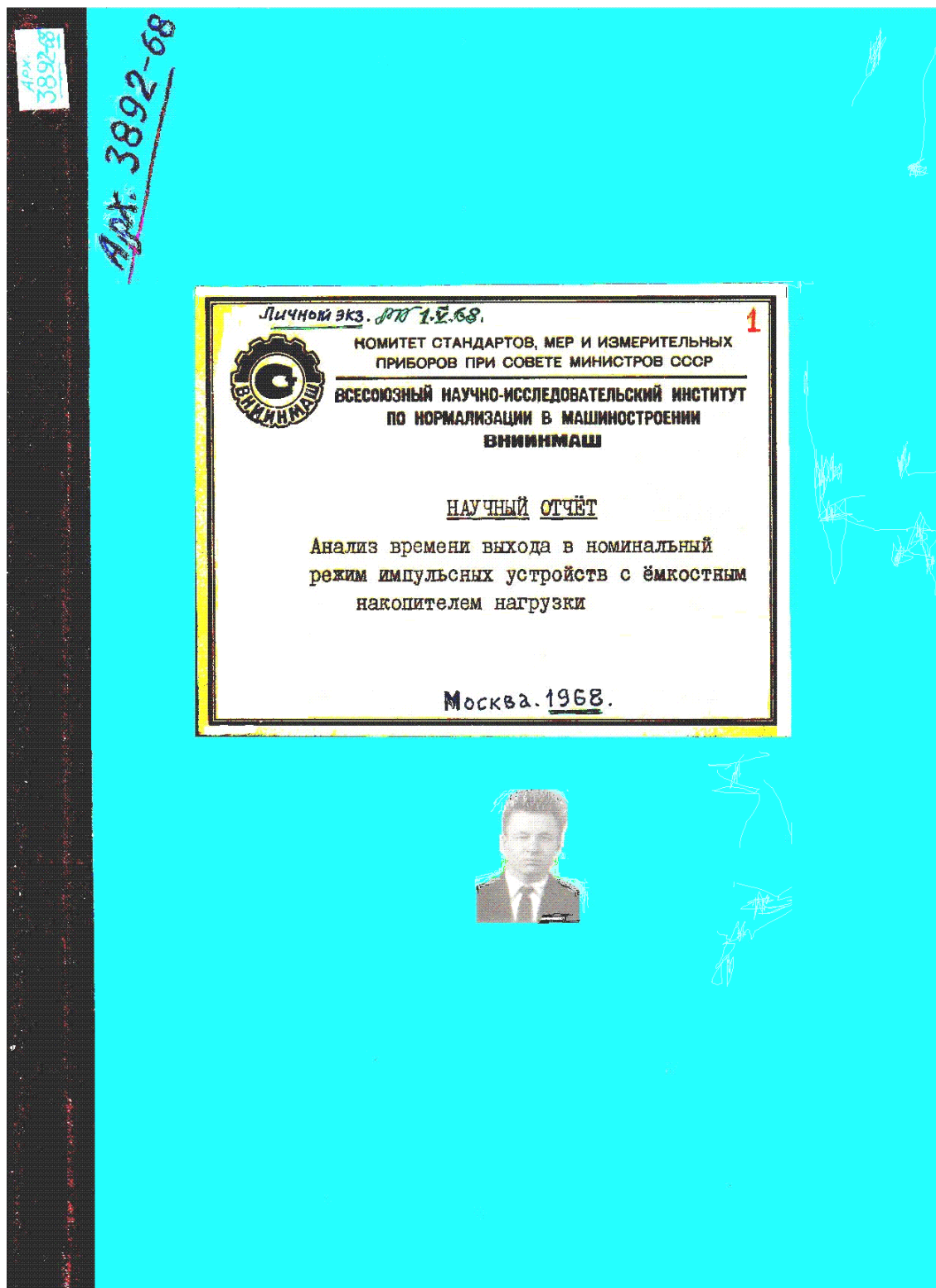


А.М. Репин. Время выхода в номинальный (установившийся,  $t_y$ ) режим импульсных устройств с ёмкостным накопителем энергии в нагрузке. / *A.M. Repin. The time to steady state ( $t_{ss}$ , or established,  $t_{es}$ ) of pulse devices with capacitive energy storage load. 1968–2015. Ч.3<sup>1</sup>. С.1–20.*

**Анонс.** Впервые в электронной версии и при впервые авторском сканировании и дизайне приведены **очень простые** (“элементарные, Ватсон”) формулы для определения  $t_{уст}$  импульсных процессов. Обычно в математическом отношении не простых из-за их разрывности, скачкообразности.

Ниже, уже во введении, при кратком обзоре, сообщается о полученных далее результатах.

При всей актуальности проблемы, уникальности результатов, их незаконченности, эта, основанная на первых двух частях третья часть – последняя для автора работа. Не только, как научная, во ВНИИИНАШ. Но и в целом по данной теме. “За всю оставшуюся жизнь”. А ВНИИ, как тогда, в 1968-м, эпизодически или периодически и ныне (по сведениям из Интернета) вновь в “чёрной полосе”. 18.12.2015-3.3.16.



<sup>1</sup>См. Части 1 и 2 в <http://econf.rae.ru/article/9632>. ../9633. ../9634. ../9647. ../9646. ../9633. и ../article/9654. ../9655. ../9660. ../9661. ../9664. ../9665. ../9670. ../9671. ../9672.

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

Всесоюзный научно-исследовательский институт по  
нормализации в машиностроении  
ВНИИМАШ

Арх № 3892-68

"Утверждаю"

Директор института  
*В. Верченко* (В. Верченко)  
6.5.68.

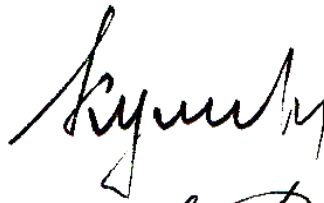
Тема: Переходные процессы в источниках питания и  
импульсных устройствах.

НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

Анализ времени выхода в номинальный режим  
импульсных устройств с емкостным накопите-  
лем энергии.

На 41 стр.

Зам. директора  
по научной части



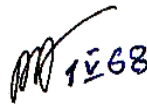
В. Курнявко

Нач. отдела № 31



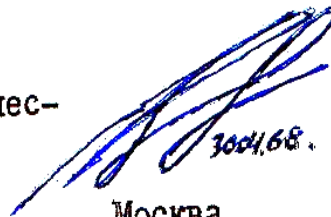
А. Акопянц

Руководители темы,  
ответственные испол-  
нители и исполнители:

  
12.68

А. Репин

Согласовано:  
Нач. научно-техничес-  
кого отдела

  
30.4.68.

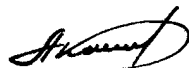
В. Виноградов

Москва  
1968 г.

П Р О Т О К О Л № 2

заседания НТС отдела № 31 от 3.5.68 г.

Председатель - нач.отдела  
Секретарь - инженер  
Члены НТС - И.о.зам.нач.отд.  
рук.темы  
ст.инженер



Акопянц А.А.  
Григорьев А.Н.  
Виноградов В.  
Матусовский А.М.  
Выгорчук А.Н.

Обсуждён научный отчёт "Анализ времени выхода в номинальный режим импульсных устройств с ёмкостным накопителем энергии" по теме "Переходные процессы в источниках питания и импульсных устройствах".

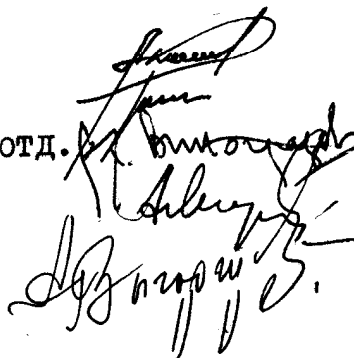
НТС отмечает:

1. Проведён полный анализ указанного параметра, являющегося важнейшим при эксплуатации любой аппаратуры. Получены простые аналитические выражения, позволяющие повысить надёжную достоверность и качество определения времени выхода в режим и сократить трудоёмкость процесса этого определения. Приведён сравнительный расчёт, подтверждающий эффективность предложенного способа. Дан графический способ определения времени выхода для случая ненулевых начальных условий. Подобный анализ и его результаты в литературе отсутствуют. Результаты работы найдут применение в практике и теории импульсных систем.

2. Работа может быть рекомендована к опубликованию.

3. Работа рекомендуется к утверждению.

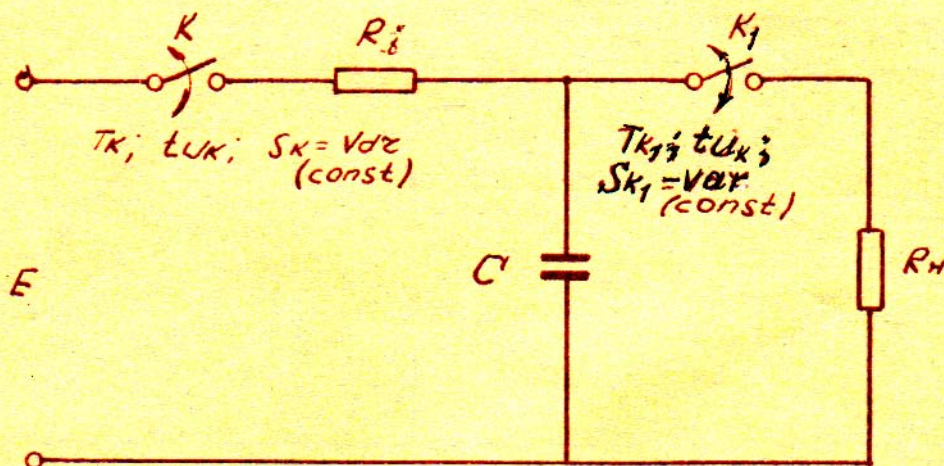
Председатель НТС  
Секретарь  
Члены НТС - и.о.зам.нач.отд.  
рук.темы  
ст.инженер



Акопянц А.А.  
Григорьев А.Н.  
Виноградов В.  
Матусовский А.М.  
Выгорчук А.Н.

## А Н Н О Т А Ц И Я

На основе анализа работы схемы замещения, представляющей широкий класс импульсных устройств, выведено и исследовано в обобщённом виде время выхода этих устройств в номинальный режим. Этот важный параметр представляет большой интерес при эксплуатации любой аппаратуры и в особенности систем оперативной готовности и действия.

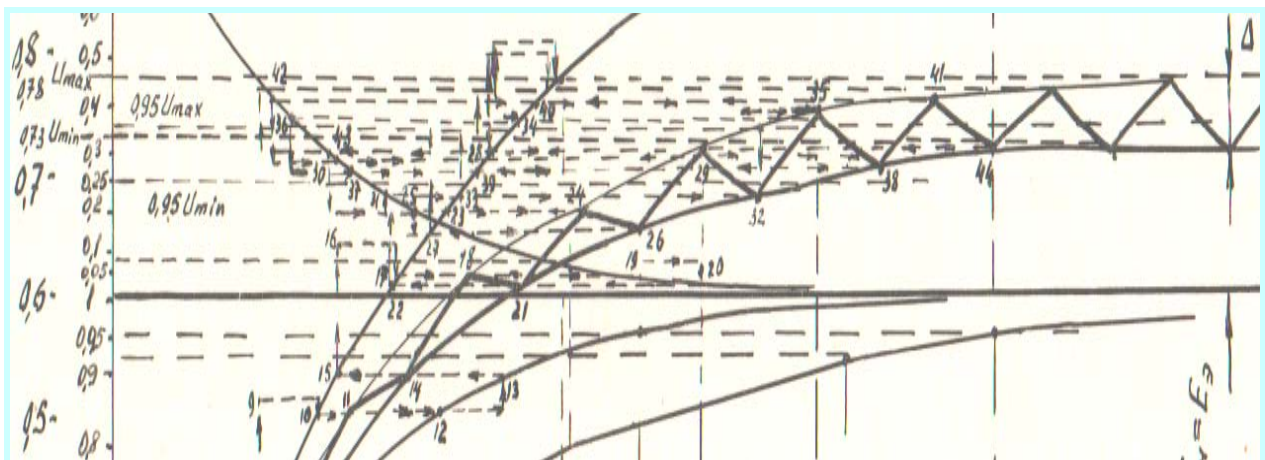
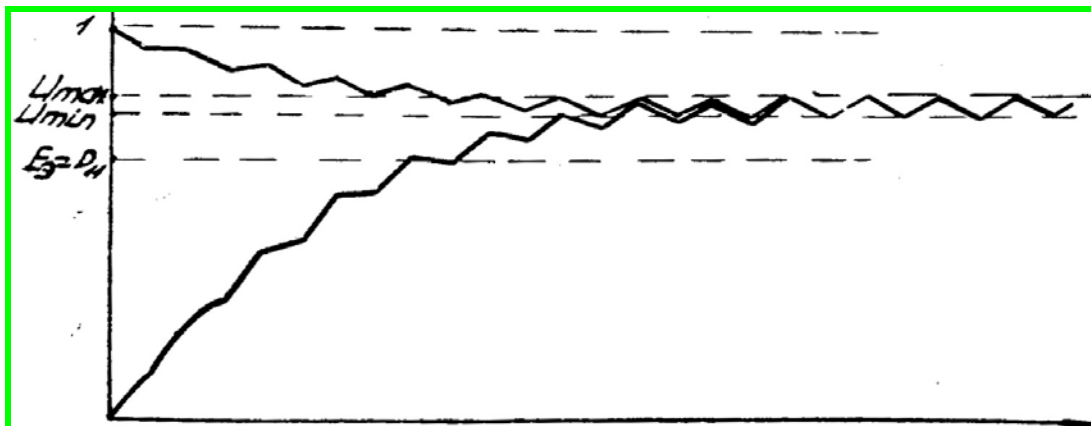


Фиг. 1 Схема замещения

## О Г Л А В Л Е Н И Е

	стр.
Наименование	
Введение . . . . .	6
1. Вывод выражений для времени выхода схемы замещения в номинальный (рабочий) режим . . . . .	9
2. Анализ времени выхода в режим . . . . .	12
3. Выводы . . . . .	23
4. Вывод выражений времени выхода в режим методом аналогий . . . . .	24
5. Пример проверки времени выхода в режим и амплитуды импульса . . . . .	27
6. Графическое определение времени выхода в режим при ненулевых начальных условиях . . . . .	27
7. Заключение . . . . .	29
Приложение 1. Графики, рисунки . . . . .	31
Приложение 2. Расчёт, таблицы . . . . .	35
Литература . . . . .	41

Анализ времени выхода  
в номинальный режим  
импульсных устройств  
с ёмкостным накопителем  
энергии



## В в е д е н и е

Данная работа является продолжением (третьей частью) исследования схемы замещения устройств с ёмкостным накопителем энергии [Л1,2]. Такой схемой может быть представлен широкий класс электро- и радиотехнических устройств, используемых в различных областях техники. К ним могут быть отнесены такие, например, устройства как источники питания с ёмкостью на выходе, модуляторы с ёмкостным накопителем (передающие устройства), некоторые каскады импульсных СВЧ приёмников, дифференциальный детектор, некоторые элементы вычислительной техники, фильтры с ёмкостью на выходе, работающие на импульсную нагрузку, и т.д.

В первых двух частях проанализированы непрерывные и импульсные, переходные и установившиеся процессы в схеме замещения при нулевых и ненулевых начальных условиях. На основе решетчатых функций и аналитического метода дискретного преобразования Лапласа выведены основные аналитические зависимости токов и напряжений в элементах схемы. Для непрерывных процессов даны также выражения для мощностей и к.п.д.

Важнейшим параметром переходных процессов, происходящих в указанных устройствах, является время установления. К примеру, время выхода в рабочий режим источника питания определяет готовность к работе устройства в целом. Знание времени выхода в нормальный режим передатчика, определяемого в основном модулятором, позволяет оценить потери в переходном режиме, а значит и кпд передатчика. Кроме того, в устройствах радиолокации, использующих пачко-импульсный способ, время выхода в режим лимитирует длительность пачки, а, значит, существенно снижает достоверность и надёжность определения цели, особенно в случае, если проектирование устройств осуществлено на идеальную пачку. Знание времени выхода в режим является особенно актуальной проблемой в так называемых системах оперативной готовности и оперативного действия, где идет борьба за каждую долю секунды.

Очевидно, что в любом случае, независимо от аппаратуры и условий её эксплуатации, время выхода её в номинальный режим, время готовности устройства к нормальной, предназначенной для него работе желательно иметь как можно меньше. При этом время выхода в режим должно быть определено качественно, с высокой степенью точности, а способ определения должен быть надёжен и обладать возможно меньшими затратами труда и времени.

Из всех известных способов определения времени выхода в режим наиболее удобным, качественным и эффективным, т.е. наиболее практичным способом является его оценка посредством аналитического выражения.

Любая формула в её замкнутом виде представляет собой, как правило, непрерывную зависимость искомой величины от определяющих её параметров.

В данном случае, импульсные процессы, которые не могут быть представлены аналитически в непрерывном виде, а описываются функциями с точками разрыва, накладывают известные трудности на представление времени выхода в режим в аналитической форме. К настоящему времени нет формулы для нахождения времени выхода в режим анализируемого класса импульсных устройств. Для общего случая, когда имеется возможность определения времени окончания переходных процессов с любой степенью точности их установления, аналитических выражений нет не только для рассматриваемых электрических импульсных процессов, но и для процессов иного вида явлений, скажем, атомных, молекулярных, механических, биологических, экономических и т.д.

Вопрос о физической сущности и причинах переходных непрерывных и импульсных процессов, определяющих время выхода анализируемой схемы замещения в номинальный режим, рассмотрен в

[12] .



В данной работе получено довольно простое аналитическое выражение для дискретного (относительно периода следования импульса) и текущего времени выхода в установившийся режим рассматриваемой схемы замещения, работающей в непрерывном и импульсном режиме. Формулы даны в обобщённом виде для любых начальных условий и любой требуемой точности, что является новым не только для указанных выше устройств, но и при определении времени установления любых переходных процессов из любой области науки и техники.

Приведенная ниже оценка позволяет существенно повысить достоверность и надёжность и снизить трудоёмкость определения времени выхода в режим устройств, которые могут быть сведены к рассматриваемой эквивалентной схеме. В работе проанализирован ряд частных случаев.

Для случая малого отношения внутреннего сопротивления (например, источника) к сопротивлению нагрузки, либо для случая большой скважности импульсной последовательности (например, радиолокация) найдено простое выражение, из которого, как частные варианты, получены формулы для времени установления, широко используемые, например, в импульсной технике и радиоприёмных устройствах. В работе дан анализ некоторым особенностям, которые могут встретиться на практике при расчёте времени установления. В частности, приведено выражение критической амплитуды импульса, рассматриваемой относительно начального напряжения на накопительной ёмкости в момент начала импульсного режима. При заданной величине амплитуды рабочего импульса, больше критической, переходный импульсный процесс отсутствует, устройство начинает работу сразу в номинальном импульсном режиме, время установления импульсного процесса равно нулю.

На основе правила экспоненты приведено графическое определение времени выхода в режим. С целью иллюстрации эффективности приведенного аналитического способа определения времени

выхода в режим в работе проделан сравнительный расчёт этого времени графо-аналитическим способом, использующим индуктивный метод анализа импульсных процессов (метод "шаг за шагом").

И, наконец, на основе всестороннего анализа времени выхода в режим предложен оптимальный, в смысле наименьшего времени установления, способ включения источника питания и импульсного устройства. При этом время выхода в режим устройства (системы) в целом (источника питания и самого импульсного устройства) получается значительно меньше, чем в случае применяемых в настоящее время способов. Это достигается путём уменьшения времени установления напряжения на накопительном конденсаторе при начальном включении источника, а также за счёт того, что время установления импульсного процесса практически сводится к нулю.

#### 1. Вывод выражений для времени выхода схемы замещения в номинальный (рабочий) режим.

В [Л2] представлена анализируемая схема замещения и показано, что переходный импульсный процесс закончится при числе периодов  $n = \infty$  (см. выражение [26] )<sup>х)</sup>. При этом величина переходной дискретной составляющей напряжения на накопительной ёмкости  $U_{сп} [n, \varepsilon]$  выражения [29]

---

х) цифрами в квадратных скобках, например, [26], обозначаются выражения [Л2]. С целью сокращения объёма отчёта выражения [Л1,2] здесь не приводятся.

будет равна нулю <sup>х)</sup>. На практике, однако, не имеет смысла брать  $n = \infty$  и обычно задаются определенной точностью окончания переходного процесса, некоторой величиной  $\gamma$  недостижения переходным процессом своего установившегося значения. В рассматриваемом случае таким значением является величина напряжения переднего фронта импульса [37] в установившемся (рабочем) импульсном режиме -  $U_{max}$ . Тогда параметр  $\gamma$  запишется:

$$\gamma = \frac{|U_{max}[n] - U_{max}|}{U_{max}}$$

где  $U_{max}[n]$  - значение амплитуды переднего фронта импульса в переходном импульсном режиме, определяемое выражением [39]

Импульсный режим можно считать установившимся при таком числе периодов  $n_y$ , когда "оглибающая максимумов" [39] отличается от своего установившегося значения [37] на величину, не превышающую  $\gamma$ . Это число периодов, определяющее дискретную длительность переходного импульсного процесса в схеме, находится из условия:

$$e^{-\alpha n_y} \leq \frac{\gamma U_{max}}{|U_{max} - U_c(0)|}$$

Здесь  $U_c(0)$  - начальное напряжение на накопительном конденсаторе, определяющее напряжение на нём в момент начала импульсного процесса, т.е. в момент включения импульсного устройства.

х) напомним, что анализ осуществляется, как и ранее, в относительных единицах. За базисное напряжение принята величина  $U_s = E^*$ , где  $E^*$  - напряжение источника питания. Знак \* свидетельствует о том, что величина взята в абсолютных (вольт) единицах.

Логарифмируя обе части неравенства, получим общее выражение для дискретного времени выхода схемы в режим:

$$\tau_y \geq \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\gamma} \left| 1 - \frac{U_c(0)}{U_{max}} \right| = \frac{1}{\alpha} \left( \ln \frac{1}{\gamma} + \ln \left| 1 - \frac{U_c(0)}{U_{max}} \right| \right) \quad (1)$$


---

Здесь:  $\alpha = \bar{\beta}_i (1 + as)$  ;

$$\bar{\beta}_i = \frac{T_u}{\tau_i} ; \quad \tau_i = R_i C ;$$

$$\alpha = \frac{R_i}{R_H} ;$$

$$s = \frac{t_u}{T_u} ;$$

$$1 \geq U_{max} > \bar{R}_H + \Delta ;$$

$$\Delta = U_{max} - U_{min} ;$$

$$\bar{R}_H = \frac{R_H}{R_i + R_H} ;$$

$$1 \geq U_c(0) \geq 0 ;$$

$$\gamma \leq 0,01 \div 0,05 ; \quad \gamma(\%) \leq (1 \div 5)\%$$

Отсюда <sup>текущее</sup> время установления импульсного процесса, определяющееся как время установления «ограничений», будет равно:

$$t_{y.o.} \geq \frac{\tau_i}{1 + as} \ln \frac{1}{\gamma} \left| 1 - \frac{U_c(0)}{U_{max}} \right| \quad (2)$$


---

## 2. АНАЛИЗ ВРЕМЕНИ ВЫХОДА В РЕЖИМ .

Анализируя выражения ( I ) и ( 2 ) можно заметить следующее.

1. Для любого  $U_c(0)$  (кроме  $U_c(0)=0$  и  $U_c(0)=U_{max}$ ) и любого  $U_{max}$  второй логарифм в выр. ( I ) имеет отрицательное значение и, следовательно,  $t_{y.0}$  в этом случае всегда меньше величины  $\frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\gamma}$ .

2. При  $U_c(0)=U_{max}$  выражение ( I ) не имеет смысла. При этом условии из выражения [39] видно, что переходной процесс отсутствует, и, следовательно,  $t_{y.0} = t_{y.0}^{U_{max}} = 0$ .

3. При  $U_c(0)=0$  второй логарифм равен нулю, и время выхода в режим не зависит от  $U_{max}$  и будет максимальным. ← передний фронт импульса в установившемся режиме (р.б. ток)

$$t_{y.0,max} = t_{y.0}^0 \geq \frac{\tilde{t}_i}{1+\alpha s} \ln \frac{1}{\gamma}. \quad (3)$$

Откуда для 5%-й погрешности ( $\gamma=0,05$ ) имеем:

$$t_{y.0,max}^{5\%} \approx 3 \frac{\tilde{t}_i}{1+\alpha s}. \quad (4)$$

4. Для второго граничного случая начальных условий ( $U_c(0)=1$ ) время выхода в установившийся режим  $t_{y.0}^E$  будет меньше, чем  $t_{y.0,max}$ .

$$t_{y.0}^E = \frac{1}{1+\alpha s} \ln \frac{1}{\gamma} \left( \frac{1}{U_{max}} - 1 \right) < t_{y.0,max}. \quad (5)$$

5. Для  $U_c(0)$ , лежащего в пределах  $(1+\gamma)U_{max} \div 1$ , время выхода в установившийся режим находится в интервале  $0 \div t_{y.0}^E$ .

При значении начального напряжения, определяемого неравенством  $(1-\gamma)U_{max} \geq U_c(0) \geq 0$  величина  $t_{y.0}$  лежит в интервале  $0 \div t_{y.0,max}$ .

Следовательно, время выхода в режим будет максимальным, когда в момент начала формирования импульсной последовательности накопитель не обладал начальным запасом энергии ( $U_c(0)=0$ ).

При любом другом заряде на ёмкости, в том числе, если накопительный конденсатор заряжен до величины  $E$  (переходный процесс на начальном включении схемы закончился, часть I, режим I) время выхода в режим меньше величины  $t_{y.0,max}$ , определяемой выр. ( 3 ), в том числе может быть равно нулю.

6. Время выхода в установившийся импульсный режим равно нулю, когда величина  $U_c(0)$  лежит в пределах:

$$U_c(0) = (1 \pm \gamma) U_{max}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что прежде, чем определять время  $t_{y.0}$  по (2), необходимо проверить следующее условие:

$$U_c(0) \geq (1 \pm \gamma) U_{max} \begin{cases} >; + - \text{ для } U_c(0) > U_{max}. \\ <; - - \text{ для } U_c(0) < U_{max}. \end{cases} \quad (7)$$

Если это условие не выполняется, время выхода в режим равно нулю и, очевидно, считать его по (2) нет необходимости.

7. Из выражения (1) видно, что чем больше  $\alpha$ , тем меньше время выхода в режим. При  $\alpha = \ln \frac{1}{\gamma}$  переходный процесс заканчивается в первом цикле, т.е. при  $n \leq 1$ . Это имеет место даже в случае, если  $U_c(0) = 0$ , т.е. даже в случае, если второй, вычитаемый (уменьшающий время выхода) логарифм выражения (1) равен нулю.

8. Аналогично можно сказать и о выражении (2). С уменьшением отношения  $\frac{C_i}{1+aS}$  время выхода в режим становится меньше, т.е. чем меньше произведение  $R_i C$  и чем больше произведение  $aS$ , тем время  $t_{y.0}$  меньше.

Иными словами:

Чем меньше внутреннее сопротивление источника, тем переходный процесс заканчивается быстрее; для уменьшения времени необходимо, при прочих равных условиях, уменьшать величину накопительной ёмкости; с ростом длительности импульса при прочих равных условиях (в том числе период следования импульсов постоянен) или с уменьшением периода следования при постоянной длительности, т.е. с увеличением коэффициента заполнения  $S$ , время выхода в режим уменьшается; с увеличением нагрузки при

прочих равных условиях  $t_{y0}$  уменьшается. Покажем сказанное в символической форме:

$$\downarrow R_i; R_n; C; (\tau_i); \uparrow t_u; T_u; (a, S); \gamma \rightarrow \downarrow t_{y0}. \quad (8)$$

Эта запись означает, что увеличение или уменьшение одной из соответствующих выражению ( 8 ) величины при постоянных остальных ведёт к уменьшению времени выхода в режим.

В этой записи не фигурируют  $U_{max}$  и  $U_c(0)$ , что объясняется следующими соображениями. Величина  $U_{max}$  сама зависит от указанных параметров, и утверждение "с увеличением  $U_{max}$  при прочих равных условиях" будет ошибочным. При величине  $U_c(0) < U_{max}$  увеличение  $t_{y0}$  будет иметь место при уменьшении  $U_c(0)$ , а при условии  $U_c(0) > U_{max}$  наоборот, увеличение  $U_c(0)$  ведёт к увеличению  $t_{y0}$ .

При  $\frac{\tau_i}{1+aS} = \ln \frac{1}{\gamma}$  независимо от начальных условий  $U_c(0)$  переходный процесс заканчивается в первом периоде.

Здесь интересно отметить один нюанс. С точки зрения физики явлений при уменьшении длительности импульса  $t_u$  (т.е. с увеличением паузы или уменьшением коэффициента заполнения  $S$ ) время выхода в режим должно уменьшаться, ибо чем больше пауза, тем на большую величину успеет зарядиться накопительный конденсатор, тем быстрее установится нормальный режим.

Однако из ( 8 ) следует, что с уменьшением  $S$  время выхода растёт. Это объясняется тем, что при тех же параметрах схемы с уменьшением  $S$  растёт амплитуда импульса в установившемся режиме  $U_{max}$ , т.е. растёт величина предела, к которому стремится экспоненциальная "огibaющая максимумов", затухание которой и определяет время выхода. Известно, что чем больше предел, тем дольше длится затухание, т.е. тем больше время выхода (при меньшем  $S$ ). В этом очевидном выводе также есть

свое "но". Возникает вопрос, для какого значения недостижения (точности) уровня установления считать это время?

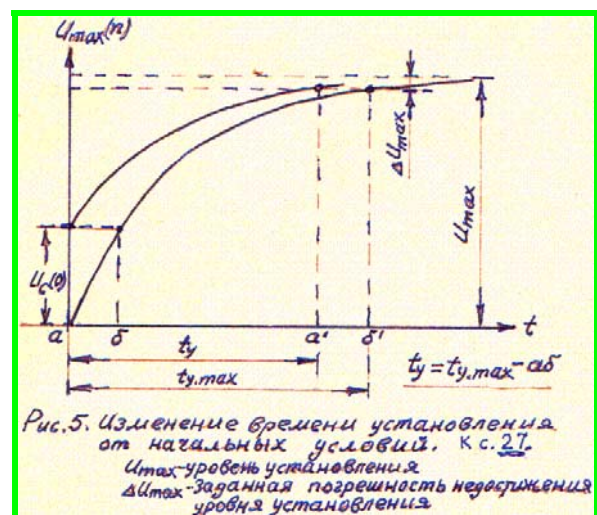
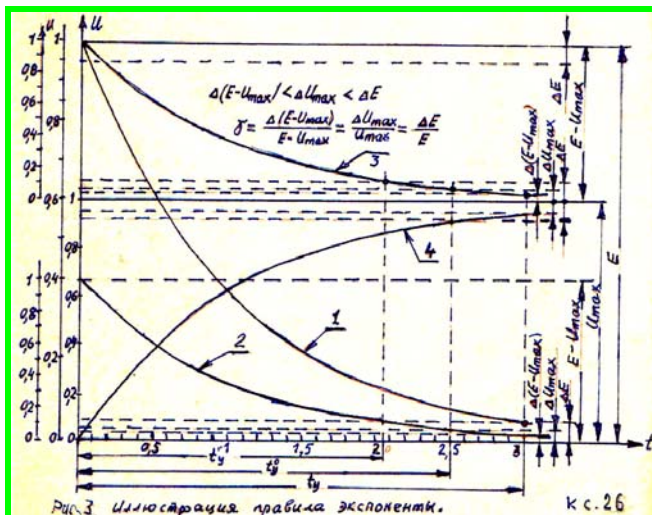
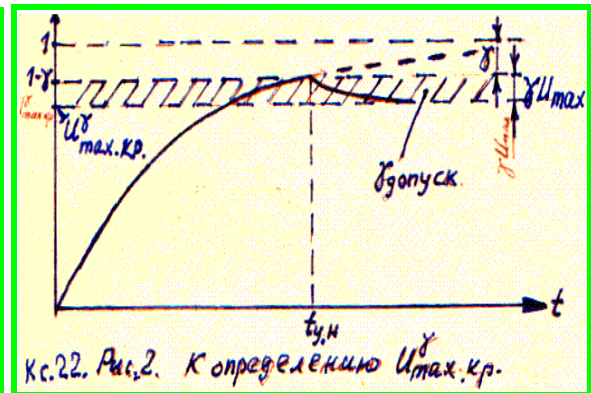
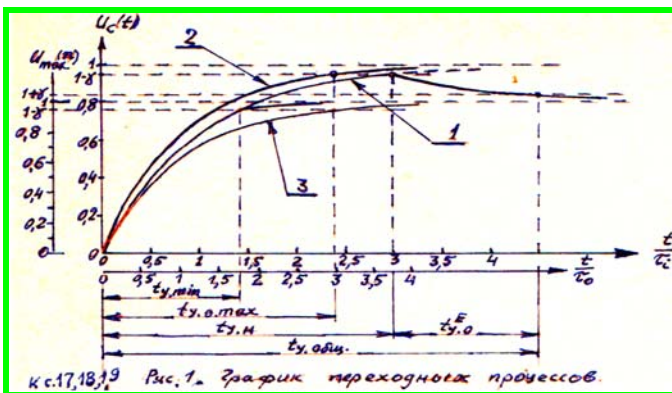
Если величину недостижения брать по абсолютной величине (в вольтах), т.е. брать  $\Delta U_{max}^*$ , то вывод о росте времени  $t_y$  с увеличением  $U_{max}$  верен для одинаковой  $\Delta U_{max}^*$ . Однако, если под величиной недостижения понимать её относительное значение, т.е.  $\gamma = \frac{\Delta U_{max}^*}{U_{max}}$ , то для одинаковой погрешности  $\gamma$  с ростом  $U_{max}$  (с уменьшением  $S$ ) значение  $t_{y0}$  не растёт.

Почему же все-таки согласно (8) с уменьшением коэффициента заполнения  $S$  время выхода растёт? Дело в том, что кроме роста  $U_{max}$  с уменьшением величины  $S$  увеличивается постоянная времени экспоненты, описывающей переходный импульсный процесс. А, как известно, увеличение постоянной времени экспоненты ведёт к увеличению её времени затухания (для одинаковой  $\gamma$ ).

9. На практике зачастую величина  $S$  много меньше единицы, а величина  $a < 1$  (только в некоторых вынужденных случаях  $a = \frac{R_i}{R_H}$  достигает значения 1, что ведёт к уменьшению

При  $a < 1$  и  $S < 1$  произведение этих величин будет много меньше единицы

$$as \ll 1. \quad (9)$$



Рисунки автора из отчёта. Со стр.32 (рис.1 к с.17-19; рис.2 к с.22; рис.3 к с.26) и с.34 (рис.5 к с.27)



При этом условии из выражения ( 3 ) можно определить ориентировочное время установления:

$$t_{y.op.} = R_i C \ln \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

Эта величина по сравнению с ( 3 ) даёт значение с избытком

В этом случае, даже при  $a=1$  ( $as < 0,1$ ) выражение ( 10 ) вполне приемлемо.

При выполнении условия ( 9 ) время установления ( выр.10 ) не зависит от параметров нагрузки и величины источника питания, что весьма удобно для оценочных расчётов.

При этом, для уменьшения времени выхода в режим величину накопительной емкости необходимо уменьшать.

10. В предыдущем пункте анализ  $t_{y.o.}$  проводился при  $U_c(0) = 0$ . Однако, в практических условиях, как было отмечено во введении, в части работы, вначале обычно включается ключ К ( режим начального включения), на ёмкости устанавливается напряжение, равное  $E$ , а затем включается импульсный режим ( ключ  $K_1$ ).

В этом случае ( фиг.1 ) общее время выхода устройства в режим будет равно:

$$t_{y.общ.} = t_{y.n} + t_{y.o.}, \quad (13)$$

$$\text{где: } t_{y.n.} = \tau_i \ln \frac{1}{\mu} \quad (14)$$

Для  $\mu = 0,05$  и в случае, если импульсный режим начинается в момент, когда конденсатор зарядился до  $0,95E$ ,  $t_{y.общ.}$  будет равно:

$$t_{y.общ.}^{5\%} \approx 3\tau_i + \frac{\tau_i}{1+as} \ln 20 \left( \frac{0,95}{U_{max}} - 1 \right) \quad (16) \quad \text{а 29e75?}$$

Из ( 16 ) видно, что величина, определяемая (16), больше величины, определяемой (14), т.е. устройства, включаемые по существующей методике, имеют время  $t_{y.общ.}$ , большее, чем  $t_{y.o.max}$ , определяемое выражением ( 3 ), когда импульсный режим включается одновременно с подачей питания,

$$t_{y.общ.} > t_{y.o.max} \quad (17)$$

Это означает, что в случаях, где большее значение имеет оперативная готовность систем, время выхода завышено, и, следовательно, в системах оперативной готовности и оперативного действия, для получения меньшего времени выхода в режим целесообразно производить включение импульсного режима совместно с включением источника питания ( кривая 3 фиг.1 )

Рис.1. с.32

В этом случае, даже при  $a=1$  ( $as < 0,1$ ) выражение (10) вполне приемлемо.

При выполнении условия (9) время установления (выр.10) не зависит от параметров нагрузки и величины источника питания, что весьма удобно для оценочных расчётов.

При этом, для уменьшения времени выхода в режим? величину накопительной емкости необходимо уменьшать.

10. В предыдущем пункте анализ  $t_{y.o.}$  проводился при  $u_c(0)=0$ . Однако, в практических условиях, как было отмечено во введении, в части работы, вначале обычно включается ключ К (режим начального включения), на ёмкости устанавливается напряжение, равное  $E$ , а затем включается импульсный режим (ключ  $K_1$ ).

В этом случае (фиг.1) общее время выхода устройства в режим будет равно:

$$t_{y.общ} = t_{y.n} + t_{y.o.}, \quad (13)$$

$$\text{где: } t_{y.n} = \tau_i \ln \frac{1}{\mu}. \quad (14)$$

Для  $\mu = 0,05$  и в случае, если импульсный режим начинается в момент, когда конденсатор зарядился до  $0,95E$ ,  $t_{y.общ}$  будет равно:

$$t_{y.общ}^{5\%} \approx 3\tau_i + \frac{\tau_i}{1+as} \ln 20 \left( \frac{0,95}{U_{max}} - 1 \right). \quad (16) \quad \text{а где?}$$

Из (16) видно, что величина, определяемая (16), больше величины, определяемой (14), т.е. устройства, включаемые по существующей методике, имеют время  $t_{y.общ}$ , большее, чем  $t_{y.o.max}$ , определяемое выражением (3), когда импульсный режим включается одновременно с подачей питания,

$$t_{y.общ} > t_{y.o.max}. \quad (17)$$

Это означает, что в случаях, где большее значение имеет оперативная готовность систем, время выхода завышено, и, следовательно, в системах оперативной готовности и оперативного действия, для получения меньшего времени выхода в режим целесообразно производить включение импульсного режима совместно с включением источника питания (кривая 3 фиг.1)

рис.1. с.32

Рис. 1. с. 32.

11. Из фиг. 1 легко усматривается возможность более очевидного доказательства выр. (17)

Поясним это подробнее. Кривая 1 характеризует процесс начального включения схемы и определяется функцией:

$$U_c(t) = 1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}),$$

где:  $\tau_i = R_i C$  -

постоянная времени этого процесса;

1 - его амплитуда в относительных величинах.

Кривая 2 определяется такой же функцией, только с постоянной времени  $\tau_o$ , взятой как у процесса кривой 3. Кривая 3 характеризует "огibaющую" импульсного процесса и определяется функцией  $U_{max}(n) = U_{max}(1 - e^{-\alpha n})$ , где:  $\frac{t}{\alpha n}$  - постоянная времени "огibaющей";  $U_{max}$  - её амплитуда в относительных единицах.

Т.к.  $U_{max} < 1$ , то, имея одинаковые постоянные времени, кривая 2 идёт круче кривой 3.

Т.к. постоянная времени  $\tau_o$  меньше постоянной времени  $\tau_i$  ( $\alpha n = \frac{1 + \alpha s}{\tau_i} t$ ;  $\tau_o = \frac{\tau_i}{1 + \alpha s} < \tau_i$ ),

то время установления процесса кривой 2 меньше времени установления процесса, описываемого кривой 1. Но время установления импульсного процесса (кривая 2) равно времени установления процесса кривой 3 (для одинаковой относительной величины недостижения -  $\gamma$ ). Следовательно, время установления начального включения схемы больше максимального времени установления импульсного процесса.

$$t_{y.n.} > t_{y.o.max.} \quad (17.1)$$

Выполнение этого условия говорит о том, что условие (17) тем более выполняется.

Выражение (17.1) можно доказать ещё и более простым способом, без кривой 2.

Процессы начального включения схемы -  $U_c(t)$  и импульсной работы -  $U_{max}(n)$ , приведенные выше, описываются экспоненциальными зависимостями, одинаковыми по форме. Амплитуда и постоянная времени экспоненциальной зависимости  $U_{max}(n)$  меньше амплитуды и постоянной времени зависимости  $U_c(t)$ . Отсюда вытекает очевидный факт, что и время установления процесса  $U_{max}(n)$  меньше времени установления процесса  $U_c(t)$ , т.е.  $t_{y.o.max} < t_{y.n.}$  Следовательно, с точки зрения оперативности работы схемы импульсный режим целесообразнее включать не после того, как накопительная

ёмкость зарядится до напряжения источника (как это делается в настоящее время), а совместно с источником.

12. Однако, с точки зрения получения минимально возможного времени выхода в режим  $t_{y.min}$  возможен иной способ включения.

Определим это время.

При анализе "оггибающих" и в методах графического построения переходных импульсных процессов [Л2] показано, что процесс  $U_{max}[n]$  всегда находится между процессами  $U_c'(t)$  с амплитудой  $E$  и с постоянной времени  $\tilde{\tau}_1$  и  $U_c''(t)$  с амплитудой  $E_2$  и с постоянной времени  $\tilde{\tau}_2$  (см. например, кривые 1 и 2 фиг. 12 в [Л2]). Это значит, что уменьшение постоянной времени  $\tilde{\tau}_2$  в сравнении с  $\tilde{\tau}_1$  не превалирует над уменьшением амплитуды  $U_{max}$  в сравнении с  $E$ . Следовательно, кривая 3 фиг. 1, описывающая переходный импульсный процесс, всегда положе кривой 1, описывающей непрерывный процесс начального включения схемы. Отсюда легко усмотреть очевидный резерв уменьшения времени выхода схемы в режим.

Действительно, если импульсный режим начнётся в момент  $t = t_{y.min}$  (рис. 1) <sup>с. 32</sup>, когда напряжение на ёмкости при начальном включении схемы (см. режим 1, [Л1]) достигает величины  $(1-\beta)U_{max}$ , то время переходного импульсного режима  $t_{y.o.}$  будет равно нулю (выполняется условие (6) - переходный импульсный процесс отсутствует). Т.к. кривая 1 круче кривой 3, то выполняется условие:

$$t_{y.min} < t_{y.o.max}. \quad (17.2)$$

Из выражения {5} х) находим, что минимально возможное время выхода схемы в установившийся импульсный режим будет равно:

$$t_{y.min} = R_1 C \ln \frac{1}{1-(1-\beta)U_{max}}. \quad (18)$$

х) Цифрами в фигурных скобках, например, {5}, обозначены выражения [Л1].