

## І. ВВЕДЕНИЕ

### І. Постановка задачи

І) В целом ряде устройств, особенно устройств оперативной готовности, существенное значение имеет знание времени выхода в установившийся импульсный режим схемы при первоначальном ее включении. Нередко (особенно в высоковольтных импульсных устройствах) включение питающего напряжения производят либо ступенями, либо плавно за заранее оговоренное время.

Как правило, включение устройства производится следующим образом: 1. Включается источник питания (на нашей схеме замещения, представленной на фиг.1,<sup>\*)</sup> замыкается ключ  $K_1$  при отключенной импульсной нагрузке (ключ  $K_2$  разомкнут). 2. После соответствующей выдержки включается импульсная нагрузка. В схеме протекает переходной импульсный режим, который через определенное время переходит в установившийся (фиг.2а). Время, определяемое от начала включения схемы до начала установления процесса, называемое временем выхода в режим, включает два отрезка времени, что значительно снижает готовность устройства к действию. Тем более на практике это время берется весьма приблизительно и (для страховки) с запасом.

При ступенчатом включении источника питания время выхода в режим еще больше (фиг.2б).

Подобные включения импульсных устройств ведут к их удорожанию (введение дополнительных элементов коммутации), снижению КПД и надежности установки, уменьшению срока службы элементов схемы, к снижению параметров установки, определяемых ее оперативные свойства.

Между тем, как показано ниже на основе анализа времени выхода в режим, наиболее рациональным оказывается иное включение устройства, что позволяет устранить указанные недостатки и

*\*) Рисунки представлены в приложении 3.*

<sup>1</sup> См. с.1-9 в № //econf.rae.ru/article/ на 1 меньше № данного файла

свести время выхода в режим к минимуму. При этом выведено простое и удобное для расчетов выражение для определения этого минимального времени через параметры схемы.

2) В высоковольтных импульсных устройствах (например, модуляторах) или в мощных источниках питания с накопителем энергии, работающих на импульсную нагрузку, выбор напряжения питания, величин преобразовательных и хранирующих элементов схемы обычно ведется приближенно, причем элементы схемы, особенно емкости, выбираются всегда с запасом. Это ведет к нерациональному расходу энергии, к значительным экономическим затратам. Например, каждое увеличение высоковольтного (единицы-десятки киловольт) конденсатора на  $0,1 \text{ мкф}$  обходится, как известно, в несколько десятков рублей. При массовом использовании дорогостоящих элементов завышение их величин ведет к весьма большому неоправданному затратам.

Отсутствие в известной технической литературе единой методики расчета параметров и элементов высоковольтных источников питания, работающих на импульсную нагрузку, приводит к нерациональному, а порой неверному проектированию источников питания мощных систем.

В соответствии со сказанным задача состоит в следующем:

- 1) определение времени выхода в режим импульсного устройства типа "источник энергии-накопитель-нагрузка".
- 2) вывод выражений и на их основе составление методики определения параметров и элементов схемы, оптимальных с точки зрения КПД и пульсаций при заданных параметрах импульсной нагрузки.

Первое определяется переходными процессами в схеме, другое - из анализа установившихся режимов.

*Задачей настоящей работы (1966г) является вывод основных выражений переходных и, как следствие, установившихся импульсных процессов в схеме и их анализ.*

*Рассмотрим, как определяется время выхода в режим.*

## 2. Сущность переходных процессов

В целом ряде технических устройств, особенно системах оперативной готовности (в частности, в радиолокации) проблема времени выхода в рабочий режим является весьма актуальной.

Как известно, время установления определяется переходными процессами. В части I настоящего отчета показано, что при каждом включении (выключении) входного напряжения в рассматриваемой схеме замещения возникают переходные режимы *непрерывных* процессов, а при комбинационной работе ключей - переходные процессы импульсного характера.

В чем заключается физическая сущность этих переходных процессов?

Возникновение переходных процессов объясняется просто: запас энергии в электрической цепи, содержащей реактивные элементы, не может измениться скачком.

Физика переходных процессов рассмотренных *непрерывных* режимов очевидна. Допустим, что в установившемся режиме напряжение на конденсаторе равно  $U_{cу}$ . Энергия электрического поля конденсатора емкостью  $C$ , заряженного до этого напряжения, равна  $W_c = \frac{1}{2} C U_{cу}^2$ . Если бы при переходе из одного установившегося состояния в другое напряжение на конденсаторе изменилось мгновенно, т.е. скачком, то скачком должна была бы измениться и энергия конденсатора, *это невозможно*.

*Поэтому* напряжение на конденсаторе *может изменяться* только за конечное время. В течение этого времени и происходит переходный процесс.

Такова же сущность переходных процессов импульсной работы схемы замещения (фиг. I). Только при импульсном режиме в отличие от непрерывных происходит более сложные процессы, хотя в отдельные интервалы времени (во время импульса и паузы) происходят рассмотренные переходные процессы непрерывных режимов. Импульсный режим считается установившимся, когда энергия, запасенная конденсатором за время паузы, полностью расходуется в нагрузку за время импульса. Т.к. в начале включения импульсного режима во время импульса и паузы происходят разные переходные процессы рассмотренных непрерывных режимов, то установление равенства (баланса) энергий в импульсном режиме работы схемы замещения происходит за конечное время. В течение этого времени и происходит переходный импульсный процесс.

### 3. Необходимость аналитических выражений импульсных процессов

1) Очевидно, для исследования времени установления необходимо его аналитическое выражение. Его можно получить из аналитического выражения импульсного процесса, в частности, из временного выражения напряжения на конденсаторе, и прежде всего из его части, характеризующей переходный режим.

2. Оптимальные соотношения параметров схемы по заданным параметрам могут быть найдены из аналитических выражений, характеризующих установившийся импульсный режим.

3. Для качественного представления импульсных процессов схемы необходима их графическая интерпретация. Графики могут быть получены также на базе аналитических выражений этих процессов.

Здесь необходимо отметить следующее. Наиболее общим импульсным режимом анализируемой схемы является такой режим, когда оба ключа схемы замещения (фиг. I) имитируют импульсную работу устройства с переменными, несинхронными частотами (периодами  $T_k$ ) и длительностями импульсов  $t_u$  (пауз  $t_n$ ), т.е. с переменными, несинхронными скважностями.

Нет необходимости рассматривать все существующие в схеме импульсные режимы, отличающиеся определенными комбинациями параметров  $t_u; T_u; S$ . Из очень большого числа возможных импульсных режимов рассмотрим представляющий наибольший практический интерес режим, когда на выходе устройства необходимо получить последовательность прямоугольных импульсов постоянной длительности ( $t_u = \text{const}$ ) и частоты ( $T_u = \text{const}$ ). Такой режим в указанной схеме замещения достигается в результате замыкания (размыкания) ключа  $K_1$  с постоянной частотой и постоянным временем замыкания (размыкания) при однократном замыкании ключа  $K$  (фиг.3). Что же происходит в этой схеме?

При замкнутом ключе  $K_1$  на нагрузке формируется импульс длительностью  $t_u$ . Во время паузы (когда ключ  $K_1$  разомкнут) происходит накопление энергии на емкости  $C$ . На нагрузке в это время напряжение отсутствует, скачком упав до нуля в момент размыкания безынерционного ключа  $K_1$  (задний фронт). При замыкании ключа  $K_1$  напряжение на нагрузке (также скачком) достигает величины, до которой зарядилась емкость к концу паузы (передний фронт). Форма плоской части импульса зависит от начальных условий импульса, под которыми подразумевается напряжение на накопительном конденсаторе  $U_{C_i}(0)$  в начале  $i$ -го импульса, т.е. в момент замыкания ключа  $K_1$ .

Геометрия плоской части импульса может быть как возрастающего, так и убывающего характера, а величина изменения выходного напряжения за время импульса  $\Delta U$  (спад импульса, *называемый иногда искажением импульса, пульсацией* или перекосом плоской части) может быть весьма различной. Сказанное иллюстрирует фиг.4.

Приведенные формы импульса могут иметь как первые после включения схемы импульсы - возможны любые из указанных на фиг.4, так и импульсы в переходном (например, импульсы в, г, ж, з) и установившемся (импульс  $g$ ) импульсных режимах.

Точное графическое построение выходных импульсов осуществляется также на основе математических выражений.

Таким образом, для нахождения времени выхода в режим, для определения оптимальных параметров схемы и построения наглядных графиков периодической последовательности импульсов переходных и установившихся процессов необходимы аналитические выражения, описывающие эти процессы.

Возникает вопрос, каким образом можно получить такие выражения, с помощью какого математического аппарата?

#### 4. Выбор математического аппарата

Процессы в схеме происходят во времени. Следовательно, их анализ следует вести на основе временных функций. Это очевидно. Однако, импульсный характер работы схемы оказывает соответствующее влияние на эти функции, превращая из непрерывных (в случае *непрерывных* режимов) в функции с точками разрыва. Это обстоятельство накладывает определенные трудности на представление указанных функций в непрерывной форме.

Математическое исследование схемы замещения, работающей в импульсном режиме, существенно упрощается, если функции, описывающие ее поведение, рассматривать в дискретные равноотстоящие моменты времени. Поэтому математическим аппаратом, адекватным задаче изучения процессов, квантованных по времени<sup>х)</sup>, - импульсных процессов - является аппарат функций дискретного аргумента - решетчатых функций<sup>хх)</sup>.

х) См. приложение 1.

хх) См. приложение 2.

П. ВЫВОД ОСНОВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Формированию плоской части импульса соответствует схема фиг. 5, а процессы, происходящие за время импульса, описываются выражениями (11-14) части I. <sup>Следует иметь в виду,</sup> что текущее время  $t$  в этих выражениях определяется интервалом существования импульсов

$$n\bar{t}_u \leq t \leq n\bar{t}_u + t_u, \tag{1}$$

а начальное напряжение  $U_c(0)$  есть <sup>и</sup> нечто иное, как напряжение в начале  $i$ -го импульса  $U_c^i(0)$  <sup>(амплитуда переднего фронта)</sup> или, что то же самое, напряжение в момент замыкания ключа  $K_1$ , т.е. напряжение в конце  $(i-1)$ -й паузы  $U_c^{i-1}(t_n)$ . <sup>Таким образом,</sup> имеем:

$$U_c^i(0) = U_c^{i-1}(t_n) = U_c(t)_{t=n\bar{t}_u} = U_c(n\bar{t}_u). \tag{2}$$

Ограничимся выводом аналитических выражений только для напряжения на емкости, т.к. на основании (11' + 14') части I легко находятся все интересующие процессы, выраженные через  $U_c(t)$ .

Итак, на основании (14) <sup>загру</sup> для условия (1) имеем<sup>x)</sup>

$$U_c(t) = \frac{1}{1+a} \left( 1 - m e^{-\frac{t-n\bar{t}_u}{\tau_2}} \right) \tag{3}$$

здесь:  $U_c(t) = \frac{U_c^*(t)}{E^*}$ ;  $a = \frac{R_i}{R_H}$ ;  $\frac{1}{1+a} = \frac{R_H}{R_i + R_H} = \bar{R}_H$ ,

x) напомним, что выражения приводятся в относительных единицах. За базисное напряжение принято  $U_0 = E^*$ . Знаком \* обозначаются абсолютные величины.