

## Сравнение схем каскадных генераторов

Г. И. Китаев

Сравнение симметричной (по существу двухфазной) и трехфазной схем со схемой Кокрофта — Уолтона (точнее, однофазной однополупериодной) [1—4] показало существенные преимущества многофазных схем при использовании их в сравнительно мощных источниках высокого напряжения. Сравнение проводилось при равенстве емкостей  $C$  в каскадах. Было установлено [1, 3], что в симметричной схеме величина пульсации  $\delta U$  (максимальное значение) в  $n + 1$  раз, а падение напряжения  $\Delta U$  (среднее значение) в четыре раза меньше, чем в обычной схеме. Оптимальное число каскадов  $n_{\text{опт}}$  симметричной схемы в два раза больше. Трехфазная схема не подвергалась такому детальному анализу, однако на конкретном примере [2, 4] было показано, что при равном  $n$  и равной нагрузке значения  $\delta U$  и  $\Delta U$  у нее в три раза меньше. В этом же примере даны отношения  $\Delta U$  обычной схемы к  $\Delta U$  других схем: схемы с уменьшающимися емкостями, симметричной и трехфазной схем при равной суммарной емкости всех конденсаторов.

Метод сравнения схем при равном значении  $\Sigma C$  представляется наиболее правильным, так как при этом полнее отражаются достоинства схем и учитывается экономическая сторона сравнения. В связи с этим в данной работе сравнивается эффективность по  $\Delta U$ ,  $\delta U$  и  $n_{\text{опт}}$  наиболее перспективных схем при равной суммарной емкости. Поскольку  $\Delta U$  и  $\delta U$  зависят от  $n$ , то нужно сравнивать схемы при равных  $n$  или же установить зависимость эффективности от  $n$ . Сравнение должно проводиться при равной нагрузке (удобнее, когда  $Q_{\text{н}} = i_{\text{н}} T = \frac{i_{\text{н}}}{f} = 1$ ). Величина нагрузки, особенно у многофазных схем, должна быть меньше той, при которой наступают взаимные перекрытия в работе вентилей. Несоблюдение этого условия может привести к ошибкам при оценке схем по результатам опыта, что имело место, например, в работе [1] при оценке трехфазной схемы.

При равенстве  $\Sigma C$  емкость конденсаторов в каскадах разных схем будет различна, так как число конденсаторов ( $N$ ) в схемах неодинаково, т. е.

$$C = \frac{\Sigma C}{N}$$

Тогда коэффициенты эффективности по  $\Delta U$  и  $\delta U$  для сравниваемых схем можно выразить отноше-

ниями

$$K_{\Delta U} = \frac{\Delta U_{\text{об}}}{\Delta U_{\text{сх}}} = \frac{\frac{i_{\text{н}}}{f} \frac{F(n)_{\text{об}} N_{\text{об}}}{\Sigma C}}{\frac{i_{\text{н}}}{f} \frac{F(n)_{\text{сх}} N_{\text{сх}}}{\Sigma C}} = \frac{F(n)_{\text{об}} N_{\text{об}}}{F(n)_{\text{сх}} N_{\text{сх}}};$$

$$K_{\delta U} = \frac{\delta U_{\text{об}}}{\delta U_{\text{сх}}} = \frac{\frac{i_{\text{н}}}{f} \frac{G(n)_{\text{об}} N_{\text{об}}}{\Sigma C}}{\frac{i_{\text{н}}}{f} \frac{G(n)_{\text{сх}} N_{\text{сх}}}{\Sigma C}} = \frac{G(n)_{\text{об}} N_{\text{об}}}{G(n)_{\text{сх}} N_{\text{сх}}},$$

где индексы «об» и «сх» означают обычную и сравниваемую схемы соответственно.

Эффективность схем по оптимальному числу каскадов можно представить в виде отношения

$$K_{n_{\text{опт}}} \approx \frac{n_{\text{опт сх}}}{n_{\text{опт об}}}$$

Для  $n$ -каскадной обычной однополупериодной однофазной схемы (Кокрофта — Уолтона) при равенстве всех емкостей, число которых равно  $N_{\text{об}} = 2n$ , справедливы следующие формулы [5, 6]:

$$\Delta U = \frac{i_{\text{н}}}{fC} \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12}; \quad F(n)_{\text{об}} = \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12};$$

$$\delta U = \frac{i_{\text{н}}}{fC} \frac{n^2 + n}{2}; \quad G(n)_{\text{об}} = \frac{n^2 + n}{2};$$

$$n_{\text{опт об}} \approx \sqrt{\frac{U_m f C}{i_{\text{н}}}}$$

Для однофазной двухполупериодной схемы (рис. 1) при равных емкостях, число которых  $N = 3n - 2$ , действительны формулы [7]

$$\Delta U = \frac{i_{\text{н}}}{fC} \frac{2n^3 - 3n^2 + 4n}{12}; \quad F(n) = \frac{2n^3 - 3n^2 + 4n}{12};$$

$$\delta U = \frac{i_{\text{н}}}{fC} \frac{n}{2}; \quad G(n) = \frac{n}{2};$$

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt{\frac{2U_m f C}{i_{\text{н}}}}$$

Результаты сравнения схем показывают, что

$$K_{\Delta U} = \frac{(8n^3 + 9n^2 + n) 2n}{(2n^3 + 3n^2 + 4n)(3n - 2)} \rightarrow \frac{8}{3} \text{ при } n \rightarrow \infty;$$

$$K_{\delta U} = \frac{2(n^2 + n) 2n}{2n(3n - 2)} = \frac{2(n^2 + n)}{3n - 2};$$

$$K_{n_{\text{опт}}} = \sqrt[3]{\frac{4n}{3n - 2}} \approx 1,1.$$

Если в данной схеме емкости по ступеням крайних (подзарядных) колонн будут пропорциональны степени разряда емкостей, т. е.  $C_k' = C_k'' = [n - (k - 1)] C_n$ , а в средней (разрядной) колонне все

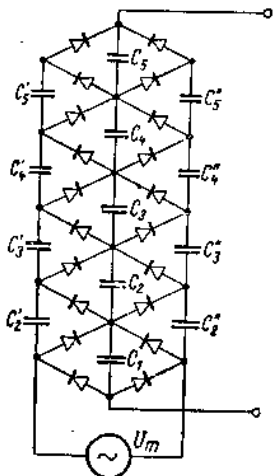


Рис. 1. Однофазная двухполупериодная схема.

емкости равны  $C_k = C_n = C$ , то  $N = n^2 + 2n - 2$  и формулы для  $\Delta U$  и  $\delta U$  имеют вид

$$\Delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n^2}{4}; F(n) = \frac{n^2}{4};$$

$$\delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n}{2}; G(n) = \frac{n}{2}.$$

Тогда такая схема характеризуется коэффициентами

$$K_{\Delta U} = \frac{4(8n^3 + 9n^2 + n) 2n}{12n^2(n^2 + 2n - 2)} =$$

$$= \frac{2(8n^3 + 9n^2 + 4n)}{3(n^2 + 2n - 2)} \rightarrow \frac{16}{3} \text{ (при } n \rightarrow \infty);$$

$$K_{\delta U} = \frac{2(n^2 + n) 2n}{2n(n^2 + 2n - 2)} =$$

$$= \frac{2(n^2 + n)}{n^2 + 2n - 2} \rightarrow 2 \text{ (при } n \rightarrow \infty).$$

Для двухфазной (симметричной) схемы получим:

1) при равных емкостях в каскадах ( $C_k' = C_k'' = C_k = C$ ;  $N = 3n$  [1, 2, 6])

$$\Delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{2n^3 + 3n^2 + 4n}{12}; F(n) = \frac{2n^3 + 3n^2 + 4n}{12};$$

$$\delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n}{2}; G(n) = \frac{n}{2};$$

$$n_{\text{опт}} = 2 \sqrt{\frac{U_m f C}{i_n}};$$

$$K_{\Delta U} = \frac{(8n^3 + 9n^2 + n) 2n}{(2n^3 + 3n^2 + 4n) 3n} \rightarrow \frac{8}{3} \text{ (при } n \rightarrow \infty);$$

$$K_{\delta U} = \frac{2(n^2 + n) 2n}{2n 3n} = \frac{2(n + 1)}{3};$$

$$K_{n_{\text{опт}}} = \sqrt[3]{\frac{8}{3}} = 1,30.$$

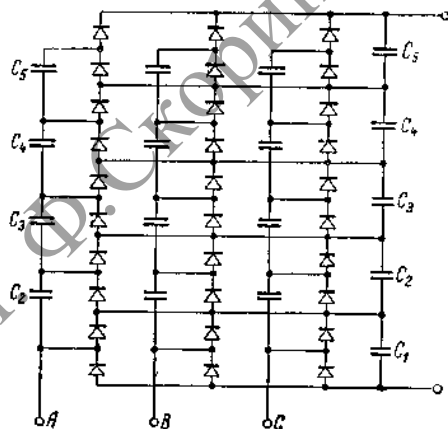


Рис. 2. Трехфазная двухполупериодная схема (A, B, C — обозначение фаз питания).

2) если в крайних колонках  $C_k' = C_k'' = [n - (k - 1)] C_n$ , а в средней  $C_k = C_n = C$  и  $N = n^2 + 2n$  [6], то

$$\Delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n^2 + 2n}{4}; F(n) = \frac{n^2 + 2n}{4};$$

$$\delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n}{2}; G(n) = \frac{n}{2};$$

$$K_{\Delta U} = \frac{4(8n^3 + 9n^2 + n) 2n}{12(n^2 + n)(n^2 + 2n)} \rightarrow \frac{16}{3} \text{ (при } n \rightarrow \infty).$$

$$K_{\delta U} = \frac{2(n^2 + n) 2n}{2n(n^2 + 2n)} \rightarrow 2 \text{ (при } n \rightarrow \infty).$$

Сравнение трехфазной обычной схемы [1, 6] показывает, что

$$\Delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{36}; F(n) = \frac{8n^3 + 9n^2 + n}{36};$$

$$\delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n^2 + n}{6}; G(n) = \frac{n^2 + n}{6};$$

$$n_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3U_m f C}{i_n}}.$$

При  $N=4n$  величины  $K_{\Delta U} = K_{\delta U} = 1,5$ ,  $K_{n_{\text{опт}}} \approx \sqrt[3]{\frac{3}{2}} \approx 1,15$ .

Новая трехфазная двухполупериодная схема (рис. 2), у которой при равенстве емкостей  $N=4n-3$ , характеризуется следующими форму-

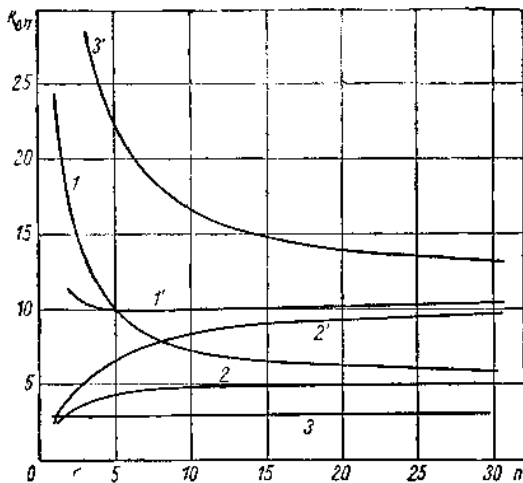


Рис. 3. Эффективность схем по  $\Delta U (K_{\Delta U} = F(n))$ ;

1 — схема рис. 1 с равными  $C$ ; 1' — та же схема с  $C'_k = C''_k = [n - (k-1)]C_n$  и  $C_k = C_n = C$ ; 2 — двухфазная (симметричная) схема с равными  $C$ ; 2' — та же схема с  $C'_k = C''_k = [n - (k-1)]C_n$  и  $C_k = C_n = C$ ; 3 — трехфазная обычная схема с равными  $C$ ; 3' — трехфазная двухполупериодная схема с равными  $C$  (см. рис. 2).

лами [8]:

$$\Delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{2n^3 - 3n^2 + 4n}{36}; \quad F(n) = \frac{2n^3 - 3n^2 + 4n}{36};$$

$$\delta U = \frac{i_n}{fC} \frac{n}{6}; \quad G(n) = \frac{n}{6};$$

$$n_{\text{опт}} \approx \sqrt[3]{\frac{6U_m j C}{i_n}};$$

$$K_{\Delta U} = \frac{3(8n^3 - 3n^2 + 4n)2n}{(2n^3 - 3n^2 + 4n)(4n - 3)} \rightarrow 6 \text{ (при } n \rightarrow \infty);$$

$$K_{\delta U} = \frac{6(n^2 \cdot n)2n}{2n(4n - 3)} = \frac{6(n^2 \cdot n)}{4n - 3};$$

$$K_{n_{\text{опт}}} \approx \sqrt[3]{\frac{12n}{4n - 3}} \approx 1,45.$$

Для наглядного представления о характере зависимостей  $K_{\Delta U}$  и  $K_{\delta U}$  от  $n$  (до  $n=30$ ) рассмотренных в данной статье схем на рис. 3 и 4 показаны графики функций.

По результатам сравнения наиболее перспективных схем каскадных генераторов можно сделать следующие выводы:

1. Оценка эффективности схем должна произво-

диться при равной суммарной емкости всех конденсаторов.

2. Из рассмотренных схем наиболее эффективной является трехфазная двухполупериодная схема, которую можно рекомендовать для мощных каскадных генераторов. Обычная трехфазная схема наименее эффективна.

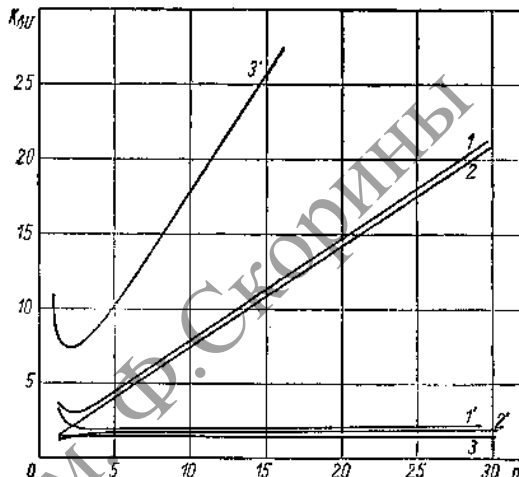


Рис. 4. Эффективность схем по  $\delta U (K_{\delta U} = G(n))$

(обозначения те же, что и для рис. 3).

3. Двухфазная (симметричная) и однофазная двухполупериодная схемы при большом числе  $n$  примерно равноценны, однако при  $n < 20$  новая схема значительно эффективнее.

Поступило в Редакцию 24/11 1962 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Новиковский. «Атомная энергия», 4, вып. 2, 175 (1958).
2. А. А. Воробьев и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. М., Госэнергоиздат, 1960.
3. Е. М. Бамабапов, Ю. С. Смирнов. «Приборы и техника эксперимента», 5, 23 (1960).
4. А. А. Воробьев, С. Ф. Покровский. «Атомная энергия», 9, вып. 4, 305 (1960).
5. A. Bouwens, A. Kuntke. Z. techn. Phys., 18, 209 (1937).
6. Г. И. Китаев. «Изв. высш. учебн. заведений. Энергетика», 11, 32, (1962).
7. Г. И. Китаев. Авторское свидетельство № 143897 (1962).
8. Г. И. Китаев. Авторское свидетельство № 146858 (1962).