

УДК 621.314

К.А.ЛИПКОВСКИЙ, докт.техн.наук, Ю.В.РУДЕНКО, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Стабилизация выходного напряжения в высоковольтном секционированном источнике питания

Проанализирован механизм стабилизации выходного напряжения в высоковольтном секционированном источнике электропитания. Оценены погрешность и коэффициент стабилизации выходного напряжения, даны практические рекомендации по выбору структуры исполнительного органа источника электропитания.

Проаналізовано механізм стабілізації вихідної напруги у високовольтному секціонованому джерелі електроживлення. Оцінено похибку та коефіцієнт стабілізації вихідної напруги, дано практичні рекомендації щодо вибору структури виконавчого органу джерела електроживлення.

Для электропитания высоковольтных нагрузок часто используются секционированные системы питания, в которых высокое выходное напряжение формируется за счет последовательного соединения по выходу некоторого числа N выпрямителей, подключенных к соответствующим вторичным обмоткам силового трансформатора [3]. Достоинством секционированных структур в высоковольтных системах является возможность использования существующей элементной базы, рассчитанной на значительно более низкие напряжения. Такая структура системы питания может быть использована для электропитания мощных электро-технологических установок [2], которые широко применяются в настоящее время в промышленности. Одной из задач, возникающих при эксплуатации таких установок, является поддержание величины напряжения питания на заданном уровне при воздействии внешних факторов, например, изменении входного сетевого напряжения.

Возможная структура секционированного источника питания показана на рис. 1. На данном рисунке показано, что в таком источнике питания к вторичной стороне силового трансформатора ТР1 подключено определенное число секций выходных выпрямителей. Выходы всех выпрямителей соединены последовательно, что позволяет сформировать заданный уровень высокого выходного напряжения. Допустим, что силовой трансформатор источника представляет собой идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации между первичной обмоткой и каждой из

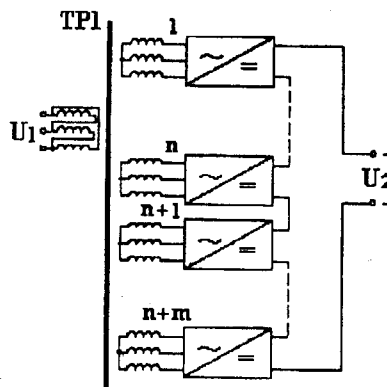


Рис. 1

вторичных обмоток, равным по величине α . Таким образом, напряжения на выходе каждой секции источника равны между собой. Считаем также, что в данной структуре источника имеется n секций, каждая из которых в рабочем режиме всегда подключена к нагрузке. Этот тип секций назовем нерегулируемыми. Имеется также m секций (назовем их регулирующими), которые в зависимости от сигналов системы управления могут дискретно находиться в двух состояниях — включенном и выключенном. Во включенном состоянии на выходе такой секции формируется напряжение, пропорциональное коэффициенту трансформации α и равному напряжению на выходе остальных n секций. В выключенном состоянии напряжение на выходе этой секции m равно нулю. Таким образом, общее число секций на вторичной стороне трансформато-

ра равно $n+t$. Подключая либо отключая регулировочные секции источника при изменении входного напряжения, можно добиться стабильности величины выходного напряжения с точностью, равной половине величины напряжения на одной секции.

С целью рационального выбора количества секций (нерегулируемых и регулировочных) и определения неустойчивости выходного напряжения при разных условиях их подключения рассчитаем внешнюю характеристику рассматриваемого источника.

Допустим, что система управления регулировочными секциями имеет фиксированные пороги срабатывания на включение-выключение секций на максимальном $U_{2\max}$ и минимальном $U_{2\min}$ уровнях. В дальнейшем используем понятие неустойчивости (погрешности) выходного напряжения δ , требования к которой задаются потребителем, относительно величины номинального выходного напряжения $U_{2\text{ном}}$

$$\delta = \frac{U_{2\max} - U_{2\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{U_{2\text{ном}} - U_{2\min}}{U_{2\text{ном}}}$$

Проследим процесс формирования внешней характеристики рассматриваемого источника (рис. 2). Эта характеристика состоит из отрезков прямых, исходящих из начала координат, тангенсы углов наклона к оси абсцисс которых численно равны суммарному коэффициенту передачи по напряжению исполнительного органа ИО, который представляет собой трансформатор ТР1 совместно с $n+t$ секциями выходных выпрямителей. Эти отрезки ограничены по оси ординат: сверху максимальным значением выходного напряжения $U_{2\max} = U_{2\text{ном}}(1+\delta)$, а снизу — его минимальным значением $U_{2\min} = U_{2\text{ном}}(1-\delta)$.

Для удобства рассмотрения исходной точкой описания процесса стабилизации будем считать режим работы, когда нагрузка подключена к n последовательно соединенным секциям. Начало этого

режима (точка "0") совпадает с максимальным входным напряжением $U_{1\max} = U_{10}$ (рис. 2). Обозначим максимальное относительное (нормированное по $U_{1\text{ном}}$) входное напряжение через $\rho = U_{10} / U_{1\text{ном}}$, а отношение номинальных значений входного и выходного напряжения — через $f = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}}$.

Таким образом, точка "0" на характеристике будет соответствовать первому — минимальному — коэффициенту передачи ИО, который равен

$$K_1 = K_{\min} = \frac{U_{2\text{ном}}(1+\delta)}{U_{10}} = \frac{U_{2\text{ном}}(1+\delta)}{U_{1\text{ном}}\rho} = \frac{1+\delta}{\rho f} \quad (1)$$

При уменьшении по каким-либо причинам входного напряжения до величины U_{11}' выходное напряжение снижается до своего минимально допустимого уровня $U_{2\min}$, и система управления источником производит последовательное подключение к нерегулируемым n секциям первой из t регулировочных секций. При этом коэффициент передачи ИО дискретно возрастет до значения

$$K_2 = K_1(n+1) / n \quad (2)$$

Однако при данном значении входного напряжения $U_{11}' < U_{10}$ величина напряжения на всех секциях, в том числе и на подключенной секции, уменьшена. Поэтому рабочая точка при подключении этой секции переместится в точку $U_{21}' < U_{2\max}$.

Очевидно, что для любого i -го коэффициента передачи можно записать

$$K_i = K_1(n+i-1) / n, \quad i = \overline{1, J}, \quad (3)$$

где J — число возможных коэффициентов передачи (число нетождественных состояний ИО), причем оно на единицу превосходит число регулировочных секций

$$J = m + 1 \quad (4)$$

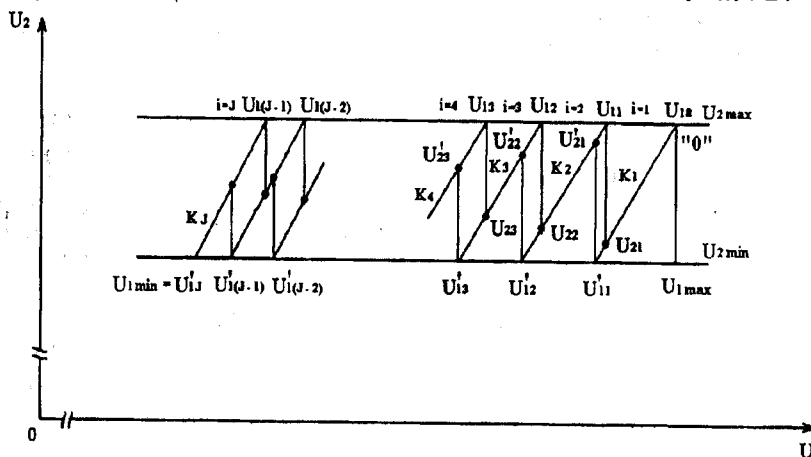


Рис. 2

Минимальное входное напряжение, пронормированное по его номиналу, обозначим через $\mu = U_{1\min} / U_{1\text{ном}} = U'_{1i} / U_{1\text{ном}}$.

Необходимо отметить, что вплоть до последнего состояния J рабочие точки U'_{2i} при новых подключениях секций из числа m будут уменьшать свои значения по оси ординат. Так описывается процесс стабилизации при уменьшении входного напряжения в рассматриваемом источнике питания.

При увеличении входного напряжения характер изменения выходного напряжения существенно другой: переход от i -го к $(i-1)$ -му коэффициенту передачи происходит при напряжении $U_{1i} > U'_{1i}$, а выходное напряжение ограничено своим максимально допустимым верхним пределом $U_{2\max}$. При различном протекании процесса стабилизации в прямом и обратном направлениях естественно возникают петли гистерезиса ($U_{1i} \neq U'_{1i}$). Заметим, что эти петли являются не просто естественными: без них незначительные колебания входного напряжения в зонах переключений могли бы приводить к возникновению гораздо больших колебаний выходного напряжения, что крайне нежелательно.

Напряжения в точках переключения секций легко определить, имея выражение для коэффициентов передачи. Запишем их в нормированном виде

$$U'_{1i} = \frac{U_{1i}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{U_{2\max}}{U_{1\text{ном}} K_{(i+1)}} = \frac{1+\delta}{f \cdot \frac{1+\delta}{\rho f} \cdot \frac{n+i+1}{n}} = \rho \frac{n}{n+i}, \quad (5)$$

$$U_{1i} = \frac{U'_{1i}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{U_{2\min}}{U_{1\text{ном}} K_i} = \frac{1-\delta}{f \cdot \frac{1+\delta}{\rho f} \cdot \frac{n+i-1}{n}} = \rho \frac{n(1-\delta)}{(1+\delta)(n+i-1)}. \quad (6)$$

Для полноты описания внешней характеристики определим нормированные по $U_{2\text{ном}}$ значения выходных напряжений, которые соответствуют моментам переключений

$$U'_{2i} = \frac{U_{1i} K_i}{U_{2\text{ном}}} = \frac{U_{1\text{ном}} \rho}{U_{2\text{ном}}} \cdot \frac{n}{n+i} \cdot \frac{(1+\delta)(n+i-1)}{\rho f n} = (1+\delta) \frac{n+i-1}{n+i}, \quad (7)$$

$$U_{2i} = \frac{U'_{1i} K_{(i+1)}}{U_{2\text{ном}}} = \frac{U_{1\text{ном}} \rho}{U_{2\text{ном}}} \times \frac{n(1-\delta)}{(1+\delta)(n+i-1)} \cdot \frac{(1+\delta)(n+i)}{\rho f n} = (1-\delta) \frac{n+i}{n+i-1}. \quad (8)$$

Эти уравнения содержат одновременно параметры n и δ , которые в принципе связаны между собой. (Заметим, что независимо от номера режима $U'_{2i} \cdot U_{2i} = 1 - \delta^2 \approx 1$, поскольку обычно $\delta \leq 0,05$).

Рассмотрим вариант построения характеристики, когда при $U_1 = U_{10}$ точке $U_{2\max}$ соответствует n секций, а точке $U_{2\min}$ соответствует $(n-1)$ секция. В этом случае можно записать

$$U_{2\max} = (1+\delta) U_{2\text{ном}} = n U_{cm} = n(\alpha U_{10}); \quad (9)$$

$$U_{2\min} = (1-\delta) U_{2\text{ном}} = (n-1) U_{cm} = (n-1)(\alpha U_{10}), \quad (10)$$

где U_{cm} — максимальное напряжение на секции, т.е. напряжение на секции при максимальном входном напряжении (это значение и будет расчетной величиной).

Из уравнений (9) и (10) находим

$$1+\delta = 2\delta n, \quad (11)$$

откуда

$$n \geq (1+\delta) / 2\delta; \quad (12)$$

$$\delta \leq 1 / (2n-1). \quad (13)$$

Знаки "больше" и "меньше" введены в силу того, что n должно быть целым числом, равным, или ближайшим большим числом к величине $(1+\delta) / 2\delta$, а δ может быть и меньше задаваемой погрешности.

С учетом (13) запишем уравнения (6)–(8) в функции только параметра n (уравнение (5), в котором отсутствует δ , сохранит свой вид)

$$U'_{1i} = \rho \frac{n-1}{n+i-1}; \quad (6')$$

$$U'_{2i} = \frac{2n}{2n-1} \cdot \frac{n+i-1}{n+i}; \quad (7')$$

$$U_{2i} = \frac{2(n-1)}{2n-1} \cdot \frac{n+i}{n+i-1}. \quad (8')$$

Из уравнений (5) и (6') легко определяется уравнение для нахождения ширины упомянутой ранее петли гистерезиса характеристики, также нормированной по $U_{1\text{ном}}$

$$\Delta U_n = \rho \frac{i}{(n+i)(n+i-1)}. \quad (14)$$

Она минимальна при $i = 1$

$$\Delta U_{\text{пmin}}^* = \rho \frac{1}{(n+1)n} \quad (15)$$

и расширяется по мере уменьшения входного напряжения (увеличения i), достигая своего последнего максимального значения при $i = J - 1$.

В пределах i -ой петли ИО может находиться в одном из двух состояний: i -ом или $(i-1)$ -ом, в зависимости от характера изменения входного напряжения (повышения или понижения). Чтобы не появилось третье объективно ненужное состояние, необходимо не допускать "переклеста" петель, естественно, наиболее широких. Для этого должно соблюдаться неравенство $U_{1(J-1)}^* \leq U_{1(J-2)}^*$ или, с учетом (5) и (6')

$$\rho \frac{n}{n+J-1} \leq \rho \frac{n-1}{n+J-3}, \quad (16)$$

откуда находим предельное максимально реализуемое число состояний

$$J \leq J_{\text{max}} = n + 1. \quad (17)$$

Таким образом, исходя из (4) и (17), заключаем, что число регулировочных секций m не может превышать число нерегулируемых секций n , т.е. необходимо, чтобы $m \leq n$. Максимальное относительное напряжение на каждой секции выходной обмотки достигается при на $U_1 = U_{10}$ и равно

$$U_{\text{сmax}}^* = U_{\text{сmax}} / U_{2\text{ном}} = 2\delta = 2 / (2n - 1). \quad (18)$$

Представляет интерес определение предельных возможностей этого варианта расчета исполнительной структуры. Исходя из (6') и (17), определяем относительную величину нижней границы зоны стабилизации

$$U_{1\text{min}}^* = U_{1J}^* = \rho(n-1) / (n+J-1) = \rho(n-1) / 2n, \quad (19)$$

и, соответственно, относительное предельное значение ширины этой зоны

$$\Delta U_{1\text{пр}}^* = U_{1\text{max}}^* - U_{1\text{min}}^* = \rho - \rho \frac{n-1}{2n} = \rho \frac{n+1}{2n}. \quad (20)$$

Рассмотрим распространенный случай, когда отклонения входного напряжения "вниз" и "вверх" от номинала одинаковы, т.е. $(1 - U_{1\text{min}}^*) = (U_{1\text{max}}^* - 1)$. Подставляя в это равенство формулы (4) и (6'), находим

$$2 = \rho + \rho \frac{n-1}{n-1+i_{\text{max}}} = \rho \left(1 + \frac{n-1}{n+m} \right). \quad (21)$$

Из (21) легко определить, какое ρ можно получить при заданных количествах основных секций n и регулировочных секций m

$$\rho = 2(n+m) / (2n-1+m) \quad (22)$$

либо какое число дополнительных (регулируемых) секций надо использовать для получения заданного ρ

$$m \geq \frac{\rho(2n-1) - 2n}{2-\rho}. \quad (23)$$

Знак "больше" в этом уравнении говорит лишь о том, что в качестве m необходимо выбирать ближайшее к полученному большее целое число.

При этом для относительного значения ширины зоны стабилизации получаем

$$\Delta U_{1m}^* = \rho - \rho \frac{n-1}{n+m} = \rho \frac{m+1}{n+m} \quad (24)$$

или с учетом (22)

$$\Delta U_{1m}^* = \frac{2(m+1)}{(2n-1+m)}. \quad (25)$$

Введем понятие коэффициента стабилизации, показывающего во сколько раз уменьшается нестабильность выходного напряжения по отношению к отклонениям входного при использовании m регулировочных секций,

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{1m}^*}{\Delta U_2^*} = \frac{\Delta U_{1m}^*}{2\delta} = \frac{(2n-1)(m+1)}{(2n-1)+m}. \quad (26)$$

Проследим, как зависит $K_{\text{СТ}}$ от параметра m для конкретного числа нерегулируемых секций, например, при $n = 15$, когда $\delta = (2n-1)^{-1} = 0,03448$. Как видно из таблицы, $K_{\text{СТ}}$ с ростом m увеличивается, что естественно, однако эффективность стабилизации ($K_{\text{СТ}}/J$) существенно падает, что вызвано наличием все расширяющихся петель гистерезиса в характеристике вход-выход.

Проанализированный вариант построения характеристики вход-выход исполнительного органа рассматриваемого источника питания не является, естественно, единственно возможным. Кратко остановимся еще на одном варианте, чтобы проследить, как влияет выбор напряжения секции на характеристику. Предположим, что при входном напряжении $U_{11} = U_{10}(1-\delta') / (1+\delta')$ величине выходного напряжения $U_{2\text{max}}$ соответствует $(n+1)$ секция, а напряжению $U_{2\text{min}} - n$ секций, т.е.

$$U'_{2\text{max}} = (1+\delta') U_{2\text{ном}} = (n+1) (\alpha' U_{11}), \quad (27)$$

$$U'_{2\text{min}} = (1-\delta') U_{2\text{ном}} = n (\alpha' U_{11}), \quad (28)$$

откуда находим

$$n \geq (1 - \delta') / 2\delta', \quad (29)$$

$$\delta' = (2n + 1)^{-1}. \quad (30)$$

n=15	I вариант		II вариант	
	K_{CT}	$K_{CT}/J, \%$	K_{CT}	$K_{CT}/J, \%$
1	1,933	96,7	1,998	99,9
2	2,806	93,5	2,931	97,7
3	3,625	90,6	3,807	95,2
4	4,394	87,9	4,629	92,6
5	5,118	85,3	5,404	90,1
6	5,8	82,8	6,134	87,6
7	6,444	80,6	6,823	85,3
8	7,054	78,4	7,475	83,1
9	7,631	76,3	7,963	79,6
10	8,179	74,3	8,68	78,9
11	8,7	72,5	9,237	76,9
12	9,195	70,7	9,767	75,1
13	9,667	69,0	10,272	73,5
14	10,116	67,4	10,753	71,7
15	10,545	65,9	11,213	70,0
16	-	-	11,625	68,5
17	-	-	12,072	67,1

Как видно, при том же числе основных секций n величина погрешности стабилизации уменьшилась в $(2n + 1)/(2n - 1)$ раз по сравнению с предыдущим вариантом, и теперь максимальное напряжение на секции будет определяться следующим образом:

$$U_{cmax}^* = 2\delta' \frac{1 + \delta'}{1 - \delta'} = \frac{2(n + 1)}{n(2n + 1)}, \quad (31)$$

т.е. оно будет меньше, чем в предыдущем варианте, в $n(2n + 1)/(n + 1)(2n - 1)$ раз. Несмотря на заметную разницу формул, эти изменения достаточно малы. Так, например, для характерного случая $n = 15$ имеем: $\frac{2n + 1}{2n - 1} = 1,0689$, а $\frac{n(2n + 1)}{(n + 1)(2n - 1)} = 1,0022$.

Несколько изменятся и другие формулы для определения интересующих нас напряжений (кроме формулы (5)):

$$U_{ii}^* = \rho \frac{n}{n + 1} \frac{n}{n - 1 + i}; \quad (6'')$$

$$U_{2i}^* = \frac{2(n + 1)}{2n + 1} \frac{n + i - 1}{n + i}; \quad (7'')$$

$$U_{2i}^* = \frac{2n}{2n + 1} \frac{n + i}{n + i - 1}. \quad (8'')$$

Для ширины петли гистерезиса характеристики вход-выход при i -ом переключении теперь имеем

$$\Delta U_{ii} = \rho \frac{n(i - 1)}{(n + 1)(n + i)(n - 1 + i)}. \quad (32)$$

Как видно, при $i = 1$ ширина петли сводится к нулю (первая петля "исчезает"), и во всем диапазоне изменения входного напряжения петли оказываются более узкими, чем в первом варианте расчета.

Исходя из условия неперекрывания последних наиболее широких петель гистерезиса $U_{1(J-1)}^* \leq U_{1(J-2)}^*$ (рис. 2), находим, что предельное максимальное число состояний системы теперь больше, чем ранее

$$J \leq J_{max} = n + 3, \quad (33)$$

т.е. предельное число регулировочных секций $m \leq n + 2$. Минимальная предельная нижняя граница допустимого изменения входного напряжения

$$U_{1np}^* = U_{1J}^* = \rho \frac{n^2}{2(n + 1)^2}. \quad (34)$$

Если $i < J$, то для определения ширины диапазона изменения входного напряжения имеем

$$\Delta U_{ii}^* = \rho - \rho \frac{n}{n + 1} \frac{n}{n - 1 + i} = \rho \frac{(n + 1)i - 1}{(n + 1)(n - 1 + i)}. \quad (35)$$

Максимальное ее значение при $i = J = n + 3$ равно

$$\Delta U_{1np}^* = \frac{n^2 + 4n + 2}{2(n + 1)^2}. \quad (36)$$

Если, как и ранее, принять для определенности $(1 - U_{1min}^*) = (U_{1max}^* - 1)$, то получим

$$2 = \rho + \rho \frac{n}{n + 1} \frac{n}{n - 1 + m - 1} = \rho \left[1 + \frac{n^2}{(n + 1)(n + m)} \right], \quad (37)$$

откуда

$$\rho = \frac{2(n + 1)(n + m)}{n^2 + (n + 1)(n + m)}. \quad (38)$$

Подставляя (38) в (35) при $i = m + 1$, находим

$$\Delta U_{1m}^* = 2 \frac{n+m(n+1)}{n^2+(n+1)(n+m)} \quad (39)$$

При этом выражение для коэффициента стабилизации будет иметь вид

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{1m}^*}{2\delta'} = \frac{n+m(n+1)}{n^2+(n+1)(n+m)} \cdot (2n+1) \quad (40)$$

Как видно из приведенных в таблице данных, коэффициент стабилизации K_{CT} при таком расчете характеристики вход-выход исполнительного органа несколько выше в силу меньшей ширины петель гистерезиса этой характеристики и меньшей погрешности стабилизации δ' .

Проведенные расчеты показали следующее. В высоковольтных секционированных системах электропитания возможна стабилизация выходного напряжения при изменении входного с заданной точностью, которая определяется количеством нерегулируемых секций исполнительного органа (секций вторичных обмоток силового трансформатора). Для повышения точности стабилизации выходного напряжения необходимо перейти к большему числу нерегулируемых секций, что связано со снижением максимальной величины напряжения на секции.

Ширина зоны стабилизации определяется количеством используемых регулировочных секций, причем, если максимальное напряжение на секции при максимальном входном напряжении определяется по первому варианту построения характеристики вход-выход, то допустимое число регулировочных секций должно быть не больше числа нерегулируемых секций. При втором варианте — не больше числа нерегулируемых секций плюс две.

Коэффициент стабилизации зависит от числа регулировочных секций. При увеличении этого числа он возрастает, хотя при этом снижается эффективность стабилизации за счет наличия расширяющихся петель гистерезиса в характеристике вход-выход источника. В результате расчетов установлено, что коэффициенты стабилизации, рассчитанные по двум приведенным вариантам, мало отличаются друг от друга. Но, тем не менее, например, для обеспечения величины коэффициента

стабилизации на уровне 8,7 при первом варианте построения необходимо использовать 11 регулировочных секций, а при втором — можно 10. При этом эффективность стабилизации во втором случае будет выше, чем в первом.

Второй вариант построения характеристики вход-выход является аничным. Он затруднен в практическом применении из-за отсутствия петли гистерезиса в данной характеристике при максимальных входных напряжениях. Однако этот вариант приведен для иллюстрации различных возможностей построения такой характеристики.

Также необходимо отметить, что форма внешней характеристики вход-выход источника питания при принятом способе стабилизации напряжения существенно отличается от случая с изменением числа однотипных секций входной обмотки силового трансформатора [1]. Отличие состоит в характере изменения ширины петель характеристики: с уменьшением входного напряжения ширина петель увеличивается. Особенностью рассмотренного в статье подхода к построению внешней характеристики является возможная его многовариантность — при изменении порядка определения максимального напряжения на секции, несмотря на сохранение внешнего подобия, характеристика вход-выход претерпевает некоторые незначительные количественные изменения.

Приведенные результаты анализа представляют практический интерес, поскольку позволяют обоснованно выбирать структуру секционированного высоковольтного источника питания для обеспечения требуемых параметров выходного напряжения: неустойчивости и коэффициента стабилизации.

1. Липківський К.О. Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. — 2005. — №5. — С. 28–31.

2. Руденко Ю.В. Регулировочные характеристики секционированного источника питания для электронно-лучевых технологий // Техн. електродинаміка. — 2009. — №1. — С. 67–70.

3. А.С. 944020 СССР, МКИ³ H02 M7/06. Преобразователь переменного напряжения в постоянное / Ю.И. Дравович, И.Г. Пономарев, В.В. Чаруга, И.А. Криштафович. // БИ — 1982. — №26.

Надійшла 20.11.08