

УДК 621.314

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

Особенности внешней характеристики секционированного стабилизированного источника электропитания

Проанализирована форма внешней характеристики секционированного источника электропитания при различных законах изменения коэффициента передачи исполнительной структуры: линейном и в соответствии с законом геометрической прогрессии. Получены аналитические выражения для построения внешней характеристики, проведен численный анализ параметров внешней характеристики.

Проаналізовано форму зовнішньої характеристики секціонованого джерела електроживлення при різних законах зміни коефіцієнта передачі виконавчої структури: лінійному і у відповідності до закону геометричної прогресії. Отримано аналітичні вирази для побудови зовнішньої характеристики, проведено числовий аналіз параметрів зовнішньої характеристики.

Часто для электропитания потребителей в различных областях техники требуется поддержание величины напряжения питания на определенном уровне с заданной точностью при изменении входного напряжения. Одним из способов поддержания такого режима является использование дискретных стабилизаторов напряжения переменного тока.

Как и во всех дискретных стабилизаторах напряжения переменного (выпрямленного) тока, характеристика вход-выход исполнительной трансформаторно-ключевой структуры формируется из отрезков лучей, исходящих из центра координат и соответствующих множеству нетождественных коэффициентов передачи. Переход между коэффициентами передачи в такой структуре осуществляется дискретным изменением общего числа витков на первичной и вторичной стороне силового трансформатора, подключаемых в контур протекания рабочего тока по входу или выходу исполнительной структуры. Такое дискретное изменение может осуществляться либо путем использования единой обмотки с отпайками, либо применением N -го числа независимых секций обмоток, соединяемых последовательно по контуру рабочего тока с помощью коммутирующих вентиляей.

Обязательной особенностью такой характеристики является наличие участков с различным протеканием процессов при уменьшении и увеличении входного напряжения, что выражается в появлении в ней петель гистерезиса.

В работе [1] были проанализированы особенности построения характеристики вход-выход исполнительной структуры в случае регулирования

по вторичной стороне силового трансформатора, а также приведены конкретные примеры вариантов такого построения. В основу исполнительной структуры было положено использование n основных секций и m регулировочных секций на вторичной стороне трансформатора. В данной структуре основные секции постоянно включены в контур протекания выходного тока исполнительной структуры, а регулировочные секции работают в дискретном режиме — включенном или выключенном относительно контура протекания выходного тока.

В работе [2] рассматривались пути повышения точности стабилизации (снижения погрешности стабилизации $\delta = (U_{2\max} - U_{2\min}) / U_{2\text{ном}} = (U_{2\text{ном}} - U_{2\min}) / U_{2\text{ном}}$) за счет уменьшения числа витков регулировочной секции трансформатора или комбинации двух (трех) видов секций. В этих работах констатировалось, что характеристика вход-выход при линейном изменении числа витков выходной обмотки существенно отличается от такой же характеристики при линейном изменении числа витков входной обмотки трансформатора. Основное отличие заключается в различных значениях ширины упомянутых петель гистерезиса и разных законах их изменения [1,3]. Данный вопрос чрезвычайно важен для осуществления штатной (нормальной) коммутации секций и заслуживает особого внимания. Исходя из этого, представляется необходимым детальнее проанализировать процесс формирования петель гистерезиса характеристики вход-выход.

На рис. 1 показан однофазный эквивалент силового трансформатора стабилизатора напряжения исследуемого класса с секционированной вы-

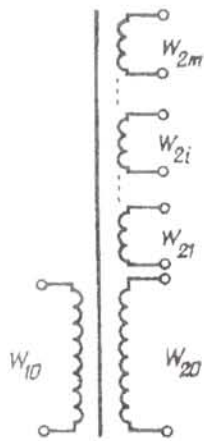


Рис. 1

ходной обмоткой. Здесь W_{10} — первичная обмотка, W_{20} и $W_{21} \dots W_{2m}$ — основная вторичная обмотка и m регулировочных секций соответственно. (Заметим, что в данной работе, как и всегда, когда речь идет об оценочных расчетах, трансформатор принят идеальным).

Поскольку минимальному коэффициенту передачи соответствует максимальное выходное напряжение при максимальном входном напряжении ([2]), когда в работе находятся только основные обмотки трансформатора W_{10} и W_{20} ,

можно записать

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

где ρ — относительное максимальное значение входного напряжения ($\rho = U_{1\max}/U_{1\text{ном}}$), а $f = U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$ — отношение номинальных напряжений входа и выхода.

По аналогии, в этом же режиме ($U_1 = U_{1\max}$) для суммы напряжений всех регулировочных секций запишем

$$\frac{\sum_{i=1}^m U_{2i}}{U_{1\max}} = \frac{U_{2\text{ном}} \sum_{i=1}^m \varphi_i}{\rho U_{1\text{ном}}} = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i}{\rho f}, \quad (2)$$

где φ_i — максимальное напряжение регулировочной секции, нормированное по номинальному значению выходного напряжения.

В режиме $U_1 = \mu U_{1\text{ном}}$, где $\mu = U_{1\min}/U_{1\text{ном}}$, при минимальном выходном напряжении $U_{2\min} = (1-\delta)U_{2\text{ном}}$ коэффициент передачи по напряжению данной исполнительной структуры максимален

$$K_{\max} = \frac{U_{2\min}}{U_{1\min}} = \frac{(1-\delta)U_{2\text{ном}}}{\mu U_{1\text{ном}}} = \frac{1-\delta}{\mu f}. \quad (3)$$

Поскольку в этом режиме задействованы кроме основной W_{20} и все m регулировочных секций, то, с учетом (1) и (2), имеем

$$K_{\max} = \frac{1}{W_{10}} \left(W_{20} + \sum_{i=1}^m W_{2i} \right) = \frac{1}{\rho f} \left(1 + \delta + \sum_{i=1}^m \varphi_i \right). \quad (4)$$

Приравняв выражения (3) и (4), получаем

$$(1-\delta)/(\mu f) = \frac{1}{\rho f} \left(1 + \delta + \sum_{i=1}^m \varphi_i \right),$$

откуда находим необходимое суммарное относительное значение напряжения всех регулировоч-

ных секций

$$\sum_{i=1}^m \varphi_i = \frac{\rho}{\mu} (1-\delta) - (1+\delta) = (1+\delta) \left(G \frac{1-\delta}{1+\delta} - 1 \right), \quad (5)$$

где G — глубина диапазона стабилизации ($G = U_{1\max}/U_{1\min} = \rho/\mu$).

Если все регулировочные секции одинаковы, т.е. изменение числа витков вторичной обмотки или, что тоже самое, изменение коэффициента передачи происходит по линейному закону (как, например, предполагалось в [1,2]), $\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_j = \varphi_m = \varphi$, то

$$m\varphi = (1+\delta) (G/g - 1), \quad (6)$$

где g — отношение максимального выходного напряжения к минимальному его значению, $g = U_{2\max}/U_{2\min} = (1+\delta)/(1-\delta)$.

С учетом (6) для j -го коэффициента передачи по напряжению можно записать

$$K_j = \frac{1+\delta+\varphi(j-1)}{\rho f} = \frac{1+\delta}{\rho f} \left[1 + \frac{(G-g)(j-1)}{gm} \right]. \quad (7)$$

Первичные напряжения, при которых происходят переключения из $(j+1)$ -го состояния в j -е состояние (U_{1j}) и обратно (U_{1j}'), равны

$$U_{1j} = U_{2\max} / K_{j+1} = (1+\delta)U_{2\text{ном}} / K_{j+1}, \quad (8)$$

$$U_{1j}' = U_{2\min} / K_j = (1-\delta)U_{2\text{ном}} / K_j. \quad (9)$$

Подставив выражение (7) в уравнения (8) и (9) и нормируя их по номинальному первичному напряжению, получаем

$$U_{1j}^* = \rho \frac{1+\delta}{1+\delta+\varphi_j} = \rho \frac{gm}{gm+(G-g)j}, \quad (10)$$

$$U_{1j}'^* = \rho \frac{1-\delta}{1+\delta+\varphi(j-1)} = \rho \frac{m}{gm+(G-g)(j-1)}. \quad (11)$$

Тогда ширина j -ой петли определится следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta U_{1j}^* &= U_{1j}^* - U_{1j}'^* = \rho \left[\frac{1+\delta}{1+\delta+\varphi_j} - \frac{1-\delta}{1+\delta+\varphi(j-1)} \right] = \\ &= \rho m \left[\frac{g}{gm+(G-g)j} - \frac{1}{gm+(G-g)(j-1)} \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Важным параметром также является величина входного напряжения, при котором формируется петля ($U_{\text{пер}}^*$). Из выражений (8) и (9) имеем

$$U_{\text{пер}}^* = \frac{1}{2} \left(U_{1(j+1)}^* + U_{1j}^* \right) =$$

$$= \frac{\rho}{2} \left[\frac{1+\delta}{1+\delta+\varphi j} + \frac{1-\delta}{1+\delta+\varphi(j-1)} \right] =$$

$$= \rho m \left[\frac{g}{gm+(G-g)j} + \frac{1}{gm+(G-g)(j-1)} \right]. \quad (13)$$

Разделив выражение (12) на выражение (13), получим ширину j -ой петли, отнесенную к напряжению переключения, которая полнее определяет "качество" характеристики вход-выход:

$$\Delta U_{ij}^{**} = \frac{\Delta U_{ij}^*}{U_{перj}^*} = \frac{g[m(g-1)-(G-g)]+(G-g)(g-1)j}{g[m(g+1)-(G-g)]+(G-g)(g+1)j}. \quad (14)$$

Ширина петель растет с каждым переключением (считая справа налево), поэтому определяющей (наименьшей) является первая петля ($j=1$), для которой

$$\Delta U_{n1}^* = \rho \left[\left(1 + \frac{G-g}{gm} \right)^{-1} - g^{-1} \right]. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что чем больше число m (чем меньше значение φ), тем шире петля.

Определим допустимые пределы варьирования параметра φ . С одной стороны, ширина наименьшей петли должна быть больше нуля, т.е. $\Delta U_{n1}^* > 0$; с другой стороны, две самые широкие (последние) петли не должны накладываться одна на другую, т.е. должно выполняться неравенство

$$U_{1(j-1)}^* < U_{1(j-2)}^*.$$

Для реализации этих условий необходимо соблюдение следующих неравенств с учетом, что $j=m+1$:

$$0 < \rho \left[\frac{m}{m+(G-g)} - \frac{1}{g} \right], \quad (16)$$

$$\rho \frac{gm}{gm+(G-g)m} < \rho \frac{m}{gm+(G-g)(m-2)}. \quad (17)$$

Выразив величину m в формуле (6) через φ и подставляя его в неравенства (16) и (17), получим

$$2g \frac{(g-1)}{(g+1)} \frac{G}{2g^2} < \varphi < 2g \frac{(g-1)}{(g+1)}$$

или

$$(2\delta) \frac{G(1-\delta)}{2(1+\delta)} < \varphi < (2\delta) \frac{(1+\delta)}{(1-\delta)}.$$

На рис. 2, а показана характеристика вход-выход для случая $U_{1\max} = 11,5$ кВ ($\rho = 1,15$), $U_{1\min} = 7$ кВ ($\mu = 0,7$), $U_{1\text{ном}} = 10$ кВ, $U_{2\text{ном}} = 29$ кВ, ($\delta = 1/29$) и исходного варианта $J=9$ ($m=8$), $\varphi = \varphi_0 = 2\delta = 2/29$. Численные данные о петлях приведены в двух первых колонках табл. 1.

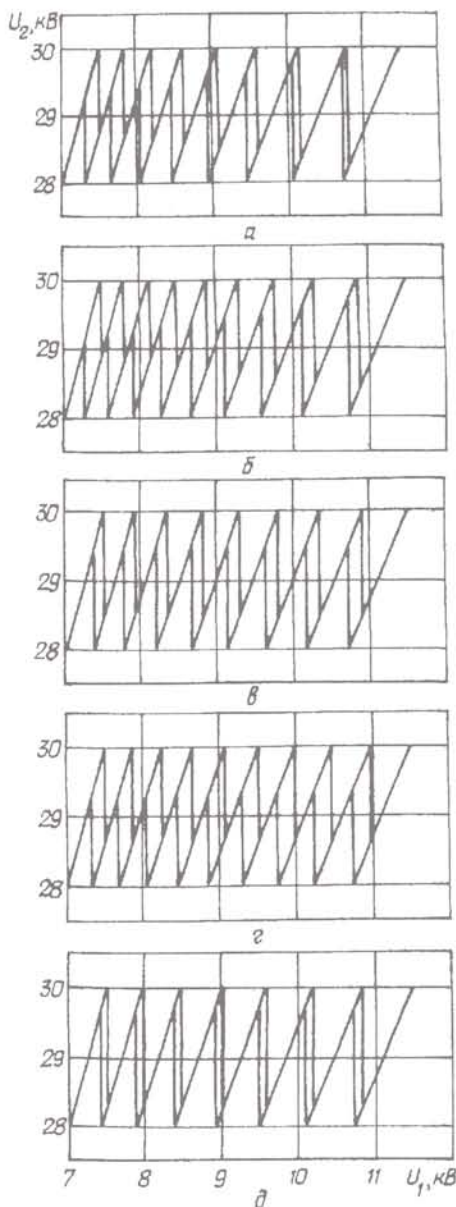


Рис. 2

Таблица 1

i	$\varphi_i = \varphi_0 = \text{const}$			
	m=8		m=9	
	ΔU_n^* , В	ΔU_n^{**} , %	ΔU_n^* , В	ΔU_n^{**} , %
1	47,917	0,445	123,310	1,142
2	84,559	0,837	148,590	1,456
3	112,745	1,183	168,124	1,737
4	134,503	1,493	183,200	1,990
5	151,316	1,770	194,782	2,220
6	164,286	2,020	203,607	2,429
7	174,242	2,247	210,239	2,620
8	181,818	2,454	215,120	2,796
9	-	-	218,593	2,958

Как видно, ширина первой (наименьшей) петли равна всего лишь 48 В и приходится на наибольшее напряжение переключения, в связи с чем $\Delta U_{п}^{**} = 0,45\%$. Увеличение числа состояний до $J=10$ (т.е. увеличение числа секций до $m=9$, что соответствует измененному значению $\varphi = 16\delta/9 = 16/(9 \cdot 29)$), приводит к существенному расширению первой петли до 123,3 В (табл. 1 и рис. 2, б), однако, относительное ее значение все же остается небольшим (1,14%), да и характер (направленность) изменения петель сохраняется.

Это заставляет перейти к поиску другого принципа формирования характеристики вход-выход, а именно — с неодинаковыми регулировочными секциями вторичной обмотки ($\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \dots \neq \varphi_i \neq \varphi_m$).

Воспользуемся способом изменения коэффициента передачи исполнительной структуры по закону геометрической прогрессии, достаточно апробированным в трансформаторно-ключевых исполнительных структурах с размещением регулировочных секций на первичной стороне трансформатора [3,4,5]. Исходя из того, что в данном случае нумерация режимов (коэффициентов передачи) происходит справа-налево — от режима максимального входного напряжения в сторону его уменьшения, этот закон необходимо записать следующим образом:

$$K_j = K_1 \cdot \gamma^{j-1}, \quad j = \overline{1, (m+1)}, \quad (18)$$

где K_1 — первый наименьший коэффициент передачи, который, как и последний, наибольший коэффициент передачи, остается таким же, как и при линейном законе (формулы (1) и (3) соответственно), поскольку оба они определяются только значениями границ зоны стабилизации; γ — коэффициент пропорциональности ($\sqrt{g} < \gamma < g$).

Для коэффициента передачи во втором режиме, согласно (18), имеем

$$K_2 = K_1 \gamma = (1 + \delta + \varphi_1) / \rho f. \quad (19)$$

Из уравнений (1) и (19) находим коэффициент φ_1 для первой регулировочной секции вторичной обмотки

$$\varphi_1 = (1 + \delta) (\gamma - 1). \quad (20)$$

Анализируя последующие коэффициенты передачи, приходим к выводу, что и изменения коэффициентов φ подчиняются тому же закону геометрической прогрессии

$$\varphi_i = \varphi_1 \gamma^{i-1} = (1 + \delta) (\gamma - 1) \gamma^{i-1}. \quad (21)$$

Просуммировав коэффициенты φ всех регулировочных секций, получаем

$$\sum_{i=1}^m \varphi_i = (1 + \delta) (\gamma - 1) \sum_{i=1}^m \gamma^{i-1} = (1 + \delta) (\gamma^m - 1). \quad (22)$$

Приравняв выражения (22) и (5), находим простую зависимость

$$\gamma^m = G/g, \quad (23)$$

из которой для заданных параметров зоны стабилизации G и g можно определить требуемое число регулировочных секций m , соблюдая, естественно, оговоренное ранее условие

$$\sqrt{g} < \gamma < g.$$

Строить характеристику вход-выход при изменении коэффициента передачи по закону геометрической прогрессии достаточно просто. Действительно, величины первичных напряжений, при которых происходят переключения от большего ($K_{(j+1)}$) к меньшему ($K_j(U_{1j}^*)$) и наоборот (U_{1j}^*), также изменяются по закону геометрической прогрессии

$$U_{1j}^* = \rho \gamma^{-j}, \quad (j = \overline{1, m}), \quad (24)$$

$$U_{1j}^* = \mu \gamma^{m-j+1}, \quad (j = \overline{1, m}). \quad (25)$$

С учетом выражения (23) последнее уравнение примет вид

$$U_{1j}^* = \rho \gamma^{-j} \cdot \gamma/g = U_{1j}^* \gamma/g. \quad (26)$$

Таким образом, для ширины j -ой петли имеем

$$\Delta U_{1j}^* = U_{1j}^* - U_{1j}^* = \rho \gamma^{-j} (1 - \gamma/g), \quad (27)$$

т.е. она, в отличие от случая $\varphi_i = \text{const}$, уменьшается не при росте, а при снижении входного напряжения.

Поскольку первичное напряжение, в области которого происходят переключения, равно

$$U_{перj}^* = 0,5 (U_{1j}^* - U_{1j}^*) = 0,5 \rho \gamma^{-j} (1 + \gamma/g), \quad (28)$$

то относительная ширина петли оказывается не зависящей от ее расположения и равной

$$\Delta U_{пj}^{**} = \frac{\Delta U_{1j}^*}{U_{перj}^*} = 2 \frac{g - \gamma}{g + \gamma} = f(j). \quad (29)$$

Численные значения $\Delta U_{пj}^*$ и $\Delta U_{пj}^{**}$ для принятых ранее в качестве примера границ зоны стабилизации и при количестве регулировочных секций $m=8$ приведены в табл. 2, а сама характеристика вход-выход с реализацией выбора чисел витков регулировочных секций вторичной обмотки по закону (16) представлена на рис. 2, в. Сравнение

этой характеристики с характеристикой, изображенной на рис. 2, а, свидетельствует об их принципиальном различии: предлагаемый способ выбора коэффициентов передачи (максимальных относительных напряжений регулировочных секций) не только расширяет минимальную петлю в 2,41 раза, но и смещает эту петлю в область близких к нижней границе входных напряжений, благодаря чему еще существенно увеличивается ее относительная величина (в 3,47 раза). Увеличение числа регулировочных секций до $m=9$ (рис. 2, з) приводит и в этом случае к расширению наименьшей петли (табл. 2).

Таблица 2

i	$\varphi_i = \varphi_0 \gamma^{i-1}$					
	$m=7$		$m=8$		$m=9$	
	ΔU_{ii}^* , В	ΔU_{ii}^{**} , %	ΔU_{ii}^* , В	ΔU_{ii}^{**} , %	ΔU_{ii}^* , В	ΔU_{ii}^{**} , %
1	85,44	0,793	168,3	1,556	233,2	2,150
2	80,38		159,5		222,4	
3	75,62		151,2		212,1	
4	71,14		143,4		202,2	
5	66,93		135,9		192,8	
6	62,96		128,8		183,9	
7	59,23		122,1		175,4	
8	-		115,8		167,2	
9	-		-		159,5	

Если не требуется столь значительное расширение меньшей петли, то можно при таком законе выбора коэффициентов передачи даже уменьшить число требуемых секций. На рис. 2, д показана характеристика вход-выход для $m=7$, где ширина наименьшей петли $\Delta U_{ii}^* = 59,23$ В меньше, чем при $m=8$ (в 1,95 раза), но все же больше, чем при линейном законе и $m=8$ (в 1,24 раза).

В заключении остановимся на конкретном сопоставлении регулировочных секций вторичной обмотки силового трансформатора, пронормировав параметр φ по величине диапазона неустойчивости, равному удвоенному значению погрешности стабилизации ($\varphi_i^* = \varphi_i / 2\delta$). Характер зависимости $\varphi_i^* = f(i)$ в обоих вариантах — с линейным законом изменения коэффициента передачи исполнительной структуры и с законом геометрической прогрессии — наглядно демонстрирует рис. 3. На данном рисунке показаны соответствующие гистограммы при $m=8$ (для первого варианта черного цвета, для второго варианта — белого цвета). Как видно, наиболее "весомая" последняя регулировочная секция во втором варианте ненамного (всего лишь на 19,5 %) превосходит однотипную

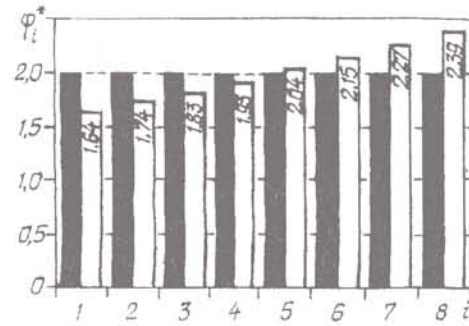


Рис. 3

($\varphi_i^* = 1$) регулировочную секцию первого варианта, причем суммарное число витков всех регулировочных секций согласно выражения (5) остается неизменным в обоих вариантах.

Таким образом, предлагаемое выполнение регулировочных секций вторичной обмотки силового трансформатора стабилизатора напряжения переменного (выпрямленного) тока по аналогии с выполнением этих секций при их размещении на первичной стороне трансформатора (а именно, с выбором чисел их витков согласно закону геометрической прогрессии) позволяет получить идентичную характеристику вход-выход, которая выгодно отличается от характеристики, формируемой при одинаковых регулировочных секциях, существенно большей шириной наименьшей (определяющей) петли гистерезиса и ее более выгодным расположением вблизи нижней границы зоны регулирования.

1. Липковський К.А., Руденко Ю.В. Стабілізація вихідного напруги в високовольтному секціонованому джерелі живлення // Техн. електродинаміка. — 2009. — №2. — С. 36—41.
2. Липковський К.А., Руденко Ю.В. Пути підвищення точності стабілізації вихідного напруги секціонованих джерел живлення // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. — Київ: ІЕД НАНУ. 2009. — Вип. 22. — С. 49—52.
3. Липківський К.О. Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. — 2005. — №5. — С. 28—31.
4. Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Особливості побудови розрахункової характеристики дискретного стабілізатора напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. — 2003. — №1. — С. 32—36.
5. Липківський К.О., Можаровський А.Г. Аналіз вхідних та вихідних характеристик дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. — 2005. — №4. — С. 38—42.

Надійшла 05.03.2009