

УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ДИСКРЕТНЫХ СТАБИЛИЗАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Проведено розрахунок установленої потужності трансформатора в дискретних стабілізаторах напруги при секціонуванні обмоток по первинній і вторинній стороні. Отримано аналітичні вирази для розрахунку потужності, виконано порівняльний аналіз характеристик.

Одним из наиболее распространенных в настоящее время классов устройств стабилизации напряжения переменного тока являются так называемые дискретные стабилизаторы (ДС), в которых требуемое изменение коэффициента передачи осуществляется переключением отпаек обмоток электромагнитных элементов (трансформаторов, автотрансформаторов, вольтодобавочных трансформаторов или их сочетаний). Этим стабилизаторам присущи высокая энергоэффективность и обеспечение должного уровня электромагнитной совместимости с потребителем и питающей сетью. Наиболее простое и очевидное решение задачи построения исполнительных структур таких стабилизаторов предусматривает секционирование первичной (рис. 1 а) или вторичной (рис. 1 б) обмотки силового трансформатора. Структуры первого типа с секциями на первичной стороне рассмотрены в технической литературе достаточно подробно [1, 2]. Что касается структур второго типа, то до сих пор основное внимание уделялось особенностям построения их внешней характеристики [3, 4]. Представляется необходимым оценить расчетную установленную мощность в таких структурах и сравнить ее с установленной мощностью трансформатора в структуре первого типа. При этом вполне допустимым является принятие трансформаторов идеальными, а номинальных напряжений на входе и выходе – равными ($U_{1ном} = U_{2ном} = U_{ном}$).

На рис. 2 представлено поле стабилизации (ПС) – прямоугольная область ABCD, в которой должна располагаться внешняя пилообразная характеристика $U_2 = f(U_1)$. Тангенс угла наклона к оси абсцисс луча OA численно равен максимальному коэффициенту передачи по напряжению $K_J = K_{max}$ (здесь – коэффициенту трансформации), а луча OC – минимальному его значению $K_1 = K_{min}$ (J – общее число коэффициентов трансформации или, что то же самое, число возможных устойчивых состояний системы). Если все напряжения пронормированы по $U_{ном}$, то $K_J = (1 - \delta)/\mu$, а $K_1 = (1 + \delta)/\rho$, где δ – погрешность стабилизации ($\delta = (U_{2max} - U_{2ном})/U_{2ном} = (U_{2ном} - U_{2min})/U_{2ном}$), а μ и ρ – границы ПС ($\mu = U_{1min}/U_{ном}$, $\rho = U_{1max}/U_{ном}$). Значения остальных коэффициентов трансформации зависят от принимаемого закона их изменения. В данной работе остановимся на вариантах разбиения диапазонов регулирования соответствующих напряжений на одинаковые секции.

Начнем со структуры первого типа, в которой на первичной стороне трансформатора имеется одна основная (W_{11}) и m одинаковых регулировочных обмоток (рис. 1 а). Из рис. 2 следует, что максимальное напряжение на основной первичной обмотке $U_{11max}^* = \mu g$, а на каждой из регулировочных обмоток $U_{12}^* = \dots = U_{1j}^* = \dots = U_{1j}^* = \mu(g - 1)$. Таким образом, отрезок MC поля стабилизации на рис. 2, соответ-

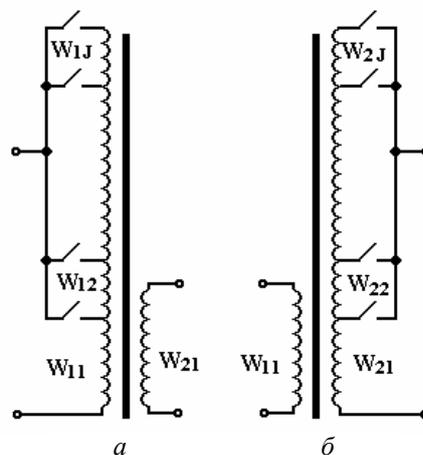


Рис. 1

вующий напряжению $U_{1\min}(\rho - g\mu)$, делится на m участков, причем

$$m = \frac{\rho - g\mu}{\mu(g-1)} = \frac{G-g}{g-1}, \quad (1)$$

где $g = U_{2\max}/U_{2\min} = (1+\delta)/(1-\delta)$, $G = U_{1\max}/U_{1\min} = \rho/\mu$.

Общее число устойчивых состояний системы при этом определится выражением

$$J = (m+1) = \frac{G-1}{g-1}. \quad (2)$$

Расчетная установленная мощность трансформатора обычно определяется полусуммой произведений максимальных напряжений всех обмоток (секций обмоток) на их максимальные токи:

$$P_I^* = \frac{P_1}{P_{2\text{ном}}} = \frac{1}{2} \left[\left(U_{11\max}^* I_{11\max}^* + \sum_{j=2}^J U_{1j\max}^* I_{1j\max}^* \right) + U_{2\max}^* I_{2\max}^* \right]. \quad (3)$$

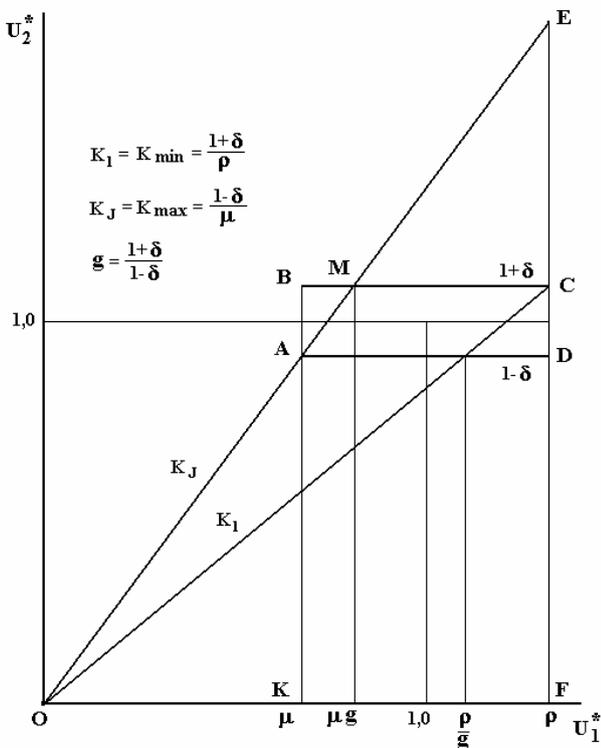


Рис. 2

Поскольку в силу принятых допущений (идеальность трансформатора) $P_1^* = P_2^*$, для максимального значения тока в любой части первичной обмотки в j -м состоянии имеем

$$I_{1j\max}^* = \frac{P_{1\max}^*}{U_{1j\max}^*} = \frac{P_{2\max}^*}{U_{1j\max}^*} = \frac{(1+\delta)^2}{U_{1j\max}^*}. \quad (4)$$

С учетом полученного в работе [2] закона изменения первичного напряжения

$$U_{1j}^* = \mu[1 + j(g-1)] = \mu \left(1 + j \frac{2\delta}{1-\delta} \right) \quad (5)$$

выражение (4) записывается следующим образом:

$$I_{1j\max}^* = \frac{(1+\delta)^2}{\mu(1 + j2\delta/(1-\delta))}. \quad (6)$$

Теперь для слагаемых уравнения (3) можно записать

$$U_{11\max}^* I_{11\max}^* = (1+\delta)^2, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=2}^J U_{1j\max}^* I_{1j\max}^* &= \mu(g-1) \sum_{j=2}^J \frac{(1+\delta)^2}{\mu[1 + j2\delta/(1-\delta)]} = \\ &= (1+\delta)^2 \sum_{j=2}^J \frac{1}{[0,5(-1+1/\delta) + j]} = (1+\delta)^2 \sum_{j=1}^m \frac{1}{[0,5(1+1/\delta) + j]}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$U_{2\max}^* I_{2\max}^* = (1+\delta) \cdot (1+\delta) = (1+\delta)^2. \quad (9)$$

Подставив выражения (7), (8), и (9) в уравнение (3), окончательно получим

$$P_I^* = (1+\delta)^2 \left[1 + 0,5 \sum_{j=1}^m \frac{1}{[0,5(1+1/\delta) + j]} \right]. \quad (10)$$

Это выражение однозначно связывает величину расчетной установленной мощности силового трансформатора ДС с параметрами поля стабилизации, поскольку m , согласно выражению (1), также является их функцией.

Расчитанные по формуле (10) установленные мощности трансформатора ДС для ряда значений глубины поля стабилизации (параметра G) и нескольких характерных значений числа устойчивых состояний J сведены в таблицу; в ней же указаны и обеспечиваемые при этом погрешности стабилизации δ . Таблица наглядна и удобна для пользования. Так, например, если задано, что сетевое напряжение может изменяться в пределах $\pm 20\%$ от номинала, то параметр $G = 1,2/0,8 = 1,5$. При этом в случае $J = 8$ можно получить погрешность δ не более $3,05\%$. При желании при том же G уменьшить погрешность до $2,5\%$, необходимо увеличить J до 10 (при этом $\delta \leq 2,44\%$), а погрешность меньшая $1,25\%$ потребует увеличения J до 20. Причем во всех названных вариантах хотя и растет число регулировочных секций, установленная мощность трансформатора остается практически неизменной (даже незначительно – на несколько процентов – снижается).

G	$J=8$		$J=10$		$J=16$		$J=20$	
	$\delta, \%$	P^*						
1,1	0,6	1,054	0,5	1,053	0,3	1,051	0,25	1,05
1,2	1,2	1,105	1,0	1,102	0,6	1,098	0,5	1,097
1,3	1,8	1,152	1,5	1,148	0,9	1,142	0,74	1,14
1,4	2,4	1,197	2,0	1,192	1,2	1,183	0,99	1,18
1,5	3,0	1,24	2,4	1,233	1,5	1,222	1,2	1,218
1,6	3,6	1,281	2,9	1,272	1,8	1,259	1,5	1,254
1,7	4,2	1,32	3,4	1,31	2,1	1,294	1,7	1,288
1,8	4,8	1,358	3,8	1,346	2,4	1,327	2,0	1,321
1,9	5,3	1,395	4,3	1,381	2,7	1,359	2,2	1,352
2,0	5,9	1,43	4,8	1,415	3,0	1,390	2,4	1,382

При секционировании обмоток на вторичной стороне трансформатора (рис. 1 б) в режиме максимального входного напряжения ($U_{1\max}^* = \rho$) к основной вторичной обмотке прикладывается напряжение $U_{21\max}^* = (1 + \delta)$, соответствующее отрезку FC (рис. 2). При этом ко всем выходным обмоткам прикладывается суммарное напряжение, соответствующее отрезку EF, который, исходя из условия подобия треугольников OAK и OEF, равен

$$U_{2\Sigma\max}^* = EF = AK \cdot \frac{FO}{KO} = (1 - \delta) \frac{\rho}{\mu} = (1 - \delta)G. \quad (11)$$

Отрезок EC = (EF – CF), соответствующий максимальному напряжению на всех регулировочных секциях, делится на m одинаковых секций с максимальным напряжением на каждой из них:

$$U_{2j\max}^* = \frac{(1 - \delta)G - (1 + \delta)}{m}. \quad (12)$$

Расчетная установленная мощность трансформатора в этом случае определяется формулой

$$P_{II}^* = \frac{1}{2} \left[U_{11\max}^* I_{11\max}^* + \left(U_{21\max}^* I_{21\max}^* + \sum_{j=2}^J U_{2j\max}^* I_{2j\max}^* \right) \right]. \quad (13)$$

Поскольку максимальный ток во всех вторичных обмотках (основной и регулировочных) одинаков и равен максимальному току нагрузки $I_{2\max}^* = (1 + \delta)$, то выражение (13) существенно упростится:

$$P_{II}^* = \frac{1}{2} \left[U_{11\max}^* I_{11\max}^* + (1 + \delta) \sum_{j=1}^J U_{2j}^* \right] = \frac{1}{2} \left[U_{11\max}^* I_{11\max}^* + (1 + \delta) \cdot (1 - \delta) G \right]. \quad (14)$$

Максимальное напряжение, равное $\rho U_{1\text{ном}}$, прикладывается к первичной обмотке в последнем состоянии, а максимальный ток, протекающий в ней в первом состоянии, равен

$$I_{11\max}^* = \frac{P_{2\max}^*}{\mu g} = \frac{(1 + \delta)^2}{\mu} \cdot \frac{1 - \delta}{1 + \delta} = \frac{1 - \delta^2}{\mu}. \quad (15)$$

После соответствующих подстановок выражение (14) примет следующий вид:

$$P_{II}^* = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot \frac{1 - \delta^2}{\mu} + (1 - \delta^2) G \right] = G(1 - \delta^2) \approx G, \quad (16)$$

так как погрешность стабилизации δ практически всегда меньше $\pm 5\%$ и величину $(1 - \delta^2)$ можно принять равной единице с ошибкой $\leq 0,25\%$.

На рис. 3 представлены зависимости от глубины ПС (параметра G) мощности P_{II}^* (прямая a) и P_I^* для двух значений числа состояний – $J=8$ (кривая b) и $J=20$ (кривая $в$), а также – пунктиром – зависимость $P_I^* = \sqrt{G}$, которая достаточно точно аппроксимирует кривые b и $в$. Таким образом, установленная мощность трансформатора при секционировании выходной обмотки существенно (примерно в \sqrt{G} раз) превосходит этот же показатель для случая секционирования входной обмотки.

Следует отметить, что полученные результаты можно распространить и на варианты иного, чем линейный, способа секционирования регулировочных обмоток, например,

для секционирования по закону геометрической прогрессии, когда каждая последующая секция в γ раз ($\sqrt{g} \leq \gamma \leq g$) больше предыдущей [4]. Кроме того, подчеркнем, что ситуация со сравнительной оценкой секционирования по первичной и вторичной стороне электромагнитного элемента качественно не изменится и при использовании автотрансформатора вместо трансформатора.

Выводы. 1. Реализация функции стабилизации напряжения переменного тока возможна при секционировании как первичной, так и вторичной обмотки регулируемого трансформатора ДС.

2. В обоих случаях повышение точности требует только увеличения числа регулировочных секций, но не влечет за собой увеличения расчетной установленной мощности трансформатора.
3. Расширение границ поля стабилизации (увеличение параметра G) приводит к существенному повышению расчетной установленной мощности регулируемого трансформатора.
4. При секционировании вторичной обмотки расчетная установленная мощность трансформатора примерно в \sqrt{G} раз больше, чем в случае секционирования первичной обмотки. Это следует учитывать при выборе рационального варианта построения ДС, особенно при больших значениях параметра G .
5. Полученные выводы справедливы для любого закона секционирования обмоток силового регулировочного трансформатора дискретного стабилизатора напряжения. Каче-

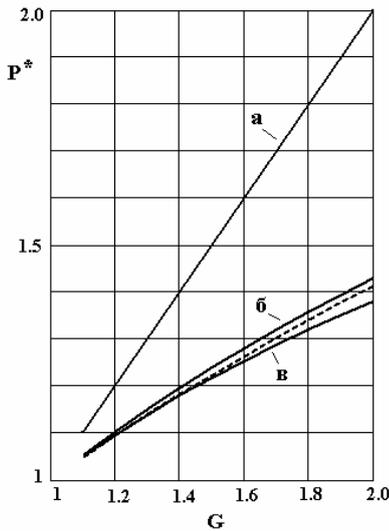


Рис. 3

ственно они не изменяются и при замене электромагнитного элемента – трансформатора автотрансформатором.

Проведен расчет установленной мощности трансформатора в дискретных стабилизаторах напряжения при секционировании обмоток по первичной и вторичной стороне. Получены аналитические выражения для расчета мощности, выполнен сравнительный анализ характеристик.

The calculation of transformer's installed capacity at the discrete stabilizers with sectioning of winding on primary and secondary site is fulfilled. The analytical expressions for calculating of power are obtained, comparative analysis of characteristics is fulfilled.

1. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 1983. – 214 с.
2. Липківський К.О. Порівняльна оцінка основних варіантів побудови розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги змінного струму // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 5. – С. 28–31.
3. Липковский К.А., Руденко Ю.В. Стабилизация выходного напряжения в высоковольтном секционированном источнике питания // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 36–41.
4. Липковский К.А., Руденко Ю.В. Особенности внешней характеристики секционированного стабилизированного источника электропитания // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 4. – С. 7–11.

Надійшла 15.05.2009