EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA TOIMETISED. 32. KÖIDE
FÜÜSIKA * MATEMAATIKA. 1983, NR. 2

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР. ТОМ 32
ФИЗИКА * МАТЕМАТИКА. 1983, № 2

https://doi.org/10.3176/phys.math.1983.2.14

УДК 621.314.63

Т. ТОМСОН

ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В КВАЗИОБЩЕЙ ДИОДНОЙ ГРУППЕ

T. TOMSON. VOOLUDE JAOTUMINE KVAASIÜHISES DIOODGRUPIS

T. TOMSON. THE DISTRIBUTION OF THE CURRENT IN A QUASI-COMMON DIODE GROUP

(Представил И. Эпик)

Исследуя распределение тока в квазиобщей диодной группе системы выпрямителей с общими элементами [1], остановимся как на радиальных, так и магистральных сетях переменного (импульсного) тока. Сеть постоянного тока может быть также радиальной или магистральной, а также вырожденной. Последний случай возможен тогда, когда все диоды квазиобщей группы объединены в одну конструкцию, а нагрузки соединены проводами (или одним общим длинным проводом). Упрощаем анализ следующим образом:

1. Исключаем из схем замещения квазиобщей группы (табл. 1) индуктивности сети постоянного тока, так как они, очевидно, не влияют на токораспределение.

2. Пренебрегаем процессом коммутации, считая, что по сети переменного тока проходит прямоугольный импульс тока нагрузки в течение одной трети периода $T/3$.

3. Считаем, что нагрузка (напр., плазмотрон или сварочная установка с индуктивностью фильтра) представляет собой генератор тока I.

4. Аппроксимируем диоды простейшей кусочно-линейной моделью, в которой r_∂ — дифференциальное сопротивление проводящего ключа.

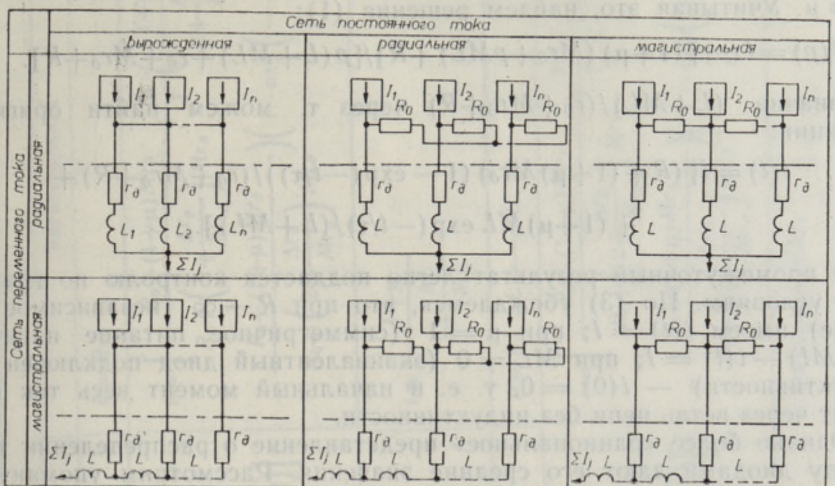
5. Считаем схемы замещения симметричными в том смысле, что однотипные индуктивности, образующие сеть переменного тока, и сопротивления, образующие сеть постоянного тока, равны между собой; «несимметричный» случай оговорен особо.

6. Считаем все фазы симметричными.

Сделаем два пояснения к методу анализа. На схемах замещения (табл. 1) объединены цепи постоянного и импульсного токов (граница раздела показана штрих-пунктирной линией). Постоянный и импульсный токи связаны условием, что через каждую $T/3$ отпирается новый комплект диодов, и ток в цепи переменного тока формируется при начальных условиях баланса суммы мгновенных значений постоянного и импульсного токов, т. е. когда сумма начальных и средних значений импульсных токов становится равной сумме постоянных токов на указанной границе раздела. Разные условия схем замещения обусловливают разные неначальные мгновенные и средние значения импульсных

Таблица 1

Варианты реализации квазиобщей диодной группы



токов в разных диодах. Определение этих средних значений является целью настоящего анализа, ибо по ним можно найти интересующее нас распределение тока в квазиобщей группе.

Заменим в системе, состоящей из n диодных групп, $n-1$ диодов эквивалентной цепью, параметры которой описываются соответствующими математическими ожиданиями Mr_∂, ML. Оставшаяся ветвь имеет параметры r_∂, L, которые отличаются от математических ожиданий на величину Δr_∂, ΔL соответственно. Суммарный ток эквивалентной цепи составляет $MI=\sum\limits_1^{n-1} I_j/(n-1)$, где $j\in\{1,\ \ldots,\ (n-1)\}$ — индекс нагрузки. Следовательно, ток в рассматриваемой нагрузке $I_n\equiv I$. Метод эквивалентной цепи может быть поочередно использован для каждой ветви, и он вполне корректен для радиальной сети переменного тока. Для магистральной же сети переменного тока метод дает в общем случае лишь приближение: ниже показывается, что ветви ближе и дальше от источника энергии не равны. Однако метод корректен в частном случае, когда выделяется первая (ближайшая к источнику энергии) ветвь, а дальние $(n-1)$ заменяются соответствующей эквивалентной цепью.

Сравнение схем замещения (табл. 1) показывает, что наиболее общая из них соответствует случаю радиальных цепей переменного и постоянного токов (рисунок). Поэтому проведем анализ на ее основе. Сообщив ее элементам соответствующие значения $R\in\{0, R_0, 2R_0, \infty\}$, $L\in\{0, L\}$, получим из общего результата анализа необходимое частное решение. Исходя из обобщенной схемы замещения и используя законы Кирхгофа, запишем исходную систему уравнений в операторной форме:

$$\begin{aligned}
&I(p)=i(p)+\Delta i(p),\\
&Mi(p)=MI(p)+\Delta i(p), \qquad (1)\\
&i(p)\,(pL+r_\partial)=Mi(p)\,(Mr_\partial+pML)+\Delta i(p)R.
\end{aligned}$$

Далее воспользуемся тем обстоятельством, что переключение реального и эквивалентного диодов подчиняется одному закону: оба генератора тока описываются одинаковой ступенчатой функцией времени:

$$I(t) = I \cdot 1(t), \qquad MI(t) = MI \cdot 1(t).$$

Соотношение ступенек тока выражается числовым коэффициентом $M \equiv \mu$. Учитывая это, найдем решение (1):

$$i(p) = I(p)\,[\,(1+\mu)\,(Mr_\partial + pML) + R]/[p\,(L+ML) + r_\partial + Mr_\partial + R]. \qquad (2)$$

Обозначив $(L+ML)/(r_\partial + Mr_\partial + R)$ через τ, можем найти оригинал функции:

$$i(t) = I[\,(R + (1+\mu)\,Mr_\partial)\,(1 - \exp(-t/\tau))/(r_\partial + Mr_\partial + R) + \\ + (1+\mu)\,ML\exp(-t/\tau)/(L+ML)\,]. \qquad (3)$$

Этот промежуточный результат легко поддается контролю по граничным условиям. По (3) убеждаемся, что при $R \to \infty$ (независимое питание) имеем $i(t) = I$; при $\mu = 1$ (симметричное питание нагрузки $I = MI$) — $i(t) = I$; при $ML = 0$ (эквивалентный диод подключен без индуктивности) — $i(0) = 0$, т. е. в начальный момент весь ток проходит через ветвь цепи без индуктивности.

Однако более «рациональное» представление о распределении тока между диодами дают его средние значения. Рассмотрим упомянутый выше случай несимметричной цепи. Пусть эта цепь отличается от усредненной на величину Δr_∂ по сопротивлению ключа и на величину ΔL по индуктивности цепи. Заменив

$$L = ML\,(1 + \Delta L/ML), \qquad r_\partial = Mr_\partial\,(1 + \Delta r_\partial/Mr_\partial),$$

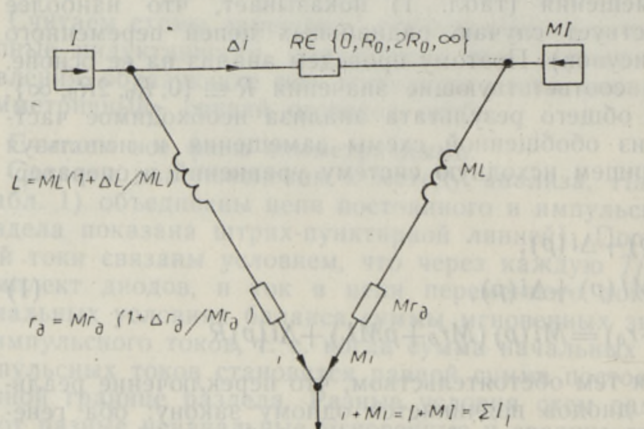
найдем из (3) среднее значение тока

$$i = (3/T)\int_0^{T/3} i(t)\,dt = I[\,(R + (1+\mu)\,Mr_\partial)/(R + (2 + \Delta r_\partial/Mr_\partial) \times \\ \times Mr_\partial + (3\tau/T)\,((1+\mu)/(2 + \Delta L/ML) - \\ - (R + (1+\mu)\,Mr_\partial)/(R + (2 + \Delta r_\partial/Mr_\partial)\,Mr_\partial))\,(1 - \exp(-T/3\tau))\,]. \qquad (4)$$

Полученное обобщенное выражение недостаточно наглядно. Поэтому преобразуем его в приближенное, заменив экспоненциальную функцию двумя членами ее степенного ряда (грубая аппроксимация):

$$i \approx I\,(1+\mu)/(2 + \Delta L/ML). \qquad (5)$$

Точные и приближенные формулы приведены в табл. 2. Сопоставляя их, приходим к выводу, что в магистральной сети переменного тока диоды, находящиеся ближе к источнику энергии, испытывают перегрузку током, потому что в пределе через них проходит суммарный ток всей системы. Это подтверждено экспериментом. Конфигурация сети постоянного тока, как и ее сопротивление, не имеет существенного значения



Обобщенная схема замещения квазиобщей диодной группы.

Таблица 2

Токораспределение при разных вариантах реализации квазиобщей диодной группы

Сеть переменного тока		Сеть постоянного тока: вырожденная	радиальная	магистральная
радиальная	*	$R=0$	$R=2R_0$	$R=R_0$
	**	$i=\left[\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}}+\frac{3\tau}{T}\left(\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}-\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$	$i=\left[\frac{2R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{2R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}+\frac{3\tau}{T}\left(\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}-\frac{2R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{2R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$	$i=\left[\frac{R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}+\frac{3\tau}{T}\left(\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}-\frac{R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$
	***	$i\approx I\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}$	$i\approx I\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}$	$i\approx I\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta L}{ML}}$
магистральная	*	$R=0,\ \Delta L=-ML$	$R=2R_0,\ \Delta L=-ML$	$R=R_0,\ \Delta L=-ML$
	**	$i=\left[\frac{1+\mu}{2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}}+\frac{3\tau(1+\mu)}{T}\times\left(1-\frac{1}{2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$	$i=\left[\frac{2R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{2R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}+\frac{3\tau}{T}\left(1+\mu-\frac{2R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{2R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$	$i=\left[\frac{R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}+\frac{3\tau}{T}\left(1+\mu-\frac{R_0+(1+\mu)Mr_{\text{д}}}{R_0+\left(2+\frac{\Delta r_{\text{д}}}{Mr_{\text{д}}}\right)Mr_{\text{д}}}\right)\left(1-\exp\left(-\frac{T}{3\tau}\right)\right)\right]I$
	***	$i\approx I(1+\mu)=\Sigma I_j$	$i\approx I(1+\mu)=\Sigma I_j$	$i\approx I(1+\mu)=\Sigma I_j$

* Конкретизация параметров, входящих в формулу (4).
** По формуле (4).
*** По приближенной формуле (5).

для распределения тока. Это весьма благоприятный фактор, поскольку зачастую сеть постоянного тока представляет собой заземляющий контур со многими обходными цепями и переменной структурой.

В вырожденной сети постоянного тока и симметричной радиальной сети переменного тока (т. е. когда $\Delta L = 0$) суммарный ток распределяется равномерно между диодами квазиобщей группы. Это свойство известно и широко используется при создании пассивных индуктивных делителей тока. Здесь это свойство подтвердилось лишь как частный результат более общего подхода.

Основные выводы. Модульный принцип наращивания мощности возможен лишь в радиальной сети переменного тока. В магистральной сети переменного тока этот принцип допускается, но при наличии не квазиобщей, а явной общей группы диодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимирова О. Л., Ерохина Е. И., Томсон Т. И.* В кн.: Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей. Таллин, АН ЭССР, 1982, с. 61.

Институт термофизики и электрофизики Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию 20 октября 1982