

## РЕАКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ

С. П. КОНОНОВ, А. С. БЕЛОКОПЫТОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

В литературе достаточно хорошо описаны реактивные (индуктивно-емкостные) преобразователи источников напряжения в источники тока (схемы БУШЕРО). Им посвящено много статей [1, 2] и др. и даже целые монографии [3]. Это объясняется перспективностью таких схем в импульсной электроэнергетике в качестве промежуточных устройств при зарядке емкостных накопителей от сети переменного напряжения.

В соответствии с принципом дуальности можно утверждать, что существуют схемы, дуальные схемам БУШЕРО, которые также могут быть использованы в технике. Анализ таких схем, позволяющих преобразовать источник тока в источник напряжения, и посвящена настоящая статья. В известной авторам литературе существует лишь упоминание о подобных схемах, но их анализ отсутствует.

Процессы в первой из схем (рис. 1), подключенной к источнику тока  $\dot{I}$ , описываются следующими выражениями:

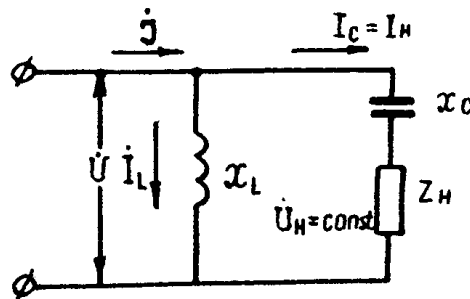


Рис. 1

Напряжение на выходе —

$$U = \dot{I} \frac{jX_L(z_H - jX_C)}{z_H + j(X_L - X_C)},$$

ток индуктивности —

$$\dot{I}_L = \dot{I} \frac{z_H - jX_C}{z_H + j(X_L - X_C)},$$

ток нагрузки —

$$\dot{I}_H = \dot{I} \frac{jX_L}{z_H + j(X_L - X_C)},$$

напряжение на емкости —

$$\dot{U}_c = \dot{I} \frac{x_L x_c}{z_H + j(x_L - x_c)},$$

напряжение на нагрузке —

$$\dot{U}_H = \dot{I} \frac{x_L z_H}{z_H + j(x_L - x_c)}.$$

Если  $x_L = x_c = x$ , тогда имеем

$$\dot{U} = \dot{I} \left( jx + \frac{x^2}{z_H} \right), \dot{I}_L = \dot{I} \left( 1 - j \frac{x}{z_H} \right), \dot{I}_H = \dot{I} j \frac{x}{z_H},$$

$$\dot{U} = \dot{I} \frac{x^2}{z_H}, \dot{U}_H = \dot{I} jx.$$

Видно, что при  $x_L = x_c$  напряжение нагрузки не зависит от ее сопротивления. Это объясняется автоматическим увеличением тока при снижении сопротивления нагрузки. Анализ векторной диаграммы (рис. 2)

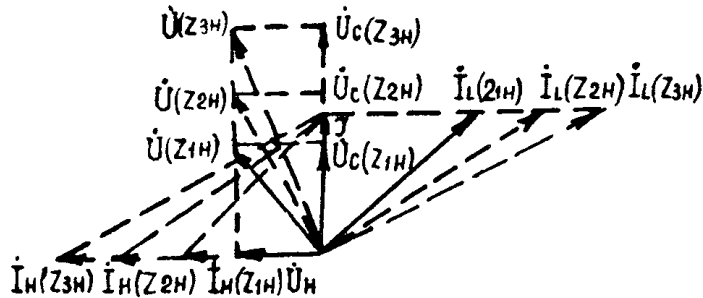


Рис. 2

для случая, когда  $x_L = x_c = x$ , при трех различных сопротивлениях нагрузки  $z_H$  подтверждает высказанные соображения. Видно, что напряжение нагрузки, опережающее ток  $\dot{I}$  источника на  $\pi/2$ , неизменно. Изменение же сопротивления  $z_H$  влияет лишь на ток нагрузки и напряжение на других элементах схемы. Полная мощность нагрузки  $S = \dot{U}_H \dot{I}_H$  равна активной и определяется как сопротивлением нагрузки, так и током источника.

Такая схема может найти практическое применение, например, для зарядки индуктивных накопителей  $L_H$ , включенных вместо сопротивле-

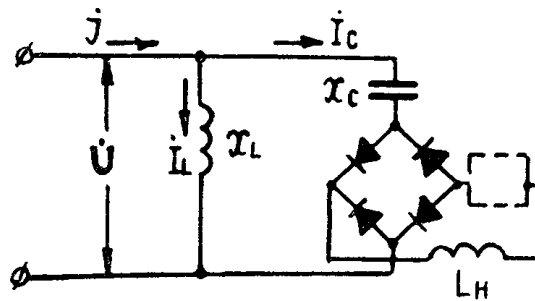


Рис. 3

ния  $z_H$  (рис. 3). Преимуществом схемы является возможность получения в индуктивности тока, значительно превышающего ток источника. Тео-

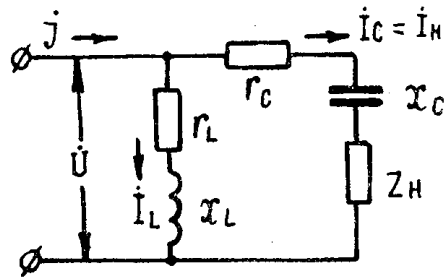


Рис. 4

ретиически при наличии идеальных элементов зарядный ток может возрасти до бесконечно большой величины даже при питании от источника незначительного тока.

В реальной схеме (рис. 4) потерями энергии в индуктивности и ёмкости контура пренебречь нельзя. В этом случае имеем

$$\dot{U} = \dot{I} \frac{r_L z_H + r_c r_L + x_c x_L + j(x_L r_c - x_c r_L + z_H x_L)}{x_L + r_c + z_H + j(x_L - x_c)},$$

$$\dot{I}_L = \dot{I} \frac{z_H + r_c - jx_c}{r_L + r_c + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{I}_H = \dot{I} \frac{r_L + jx_L}{r_L + r_c + z_H + j(x_L - x_c)},$$

$$\dot{U}_c = \dot{I} \frac{x_L x_c - jr_L x_c}{r_L + r_c + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{U}_H = \dot{I} z_H \frac{r_L + jx_L}{r_L + r_c + z_H + j(x_L - x_c)}.$$

Если  $x_L = x_c = x$ , тогда

$$\dot{U} = \dot{I} \frac{r_L z_H + r_c r_L + x^2 + j(r_c - r_L + z_H)}{r_c + r_L + z_H},$$

$$\dot{I}_H = \dot{I} \frac{r_L + jx}{r_L + r_c + z_H}, \quad \dot{U}_H = \dot{I} z_H \frac{r_L + jx}{r_L + r_c + z_H}.$$

Видно, что в таком, неидеальном, случае напряжение на нагрузке уже зависит от его сопротивления  $z_H$ , увеличиваясь при росте последнего. Только при  $r_L + r_c \ll |z_H|$  напряжение на нагрузке практически постоянно, а ток изменяется обратно пропорционально сопротивлению нагрузки.

Существует и другая разновидность подобного однофазного реактивного преобразователя (рис. 5), когда сопротивление нагрузки вклю-

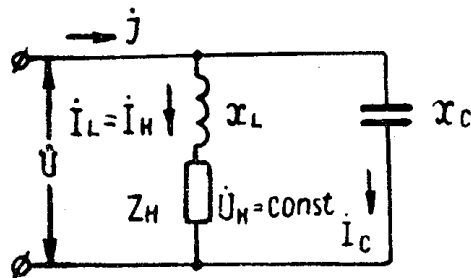


Рис. 5

чено последовательно с индуктивностью параллельного контура. В этом случае на зажимах  $z_H$  также сохраняется неизменное напряжение, если она подключена к источнику тока  $\dot{I}$ . При этом имеем

$$\dot{U} = -Ijx_c \frac{z_H + jx_L}{z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{I}_c = I \frac{z_H + jx_L}{z_H + j(x_L - x_c)},$$

$$\dot{I}_H = -Ijx_c \frac{1}{z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{U}_L = I \frac{x_L x_c}{z_H + j(x_L - x_c)},$$

$$\dot{U}_H = -Ij \frac{x_c z_H}{z_H + j(x_L - x_c)}.$$

Если  $x_L = x_c = x$ , тогда находим, что

$$\dot{U} = I \left( \frac{x^2}{z_H} - jx \right), \quad \dot{I}_c = I \left( 1 + j \frac{x_c}{z_H} \right), \quad \dot{I}_H = -I \frac{jx}{z_H},$$

$$\dot{U}_L = I \frac{x^2}{z_H}, \quad \dot{U}_H = -Ijx.$$

Характер процесса в системе удобно оценить, используя векторную диаграмму (рис. 6), построенную для трех различных сопротивлений  $z_H$ . Индуктивный накопитель  $L_H$  импульсной электроэнергетической системы и в этом случае также подключен вместо сопротивления  $z_H$  (рис. 7). Как и в предыдущей схеме, ток такого накопителя может быть значительно больше тока источника, что является положительным свойством системы.

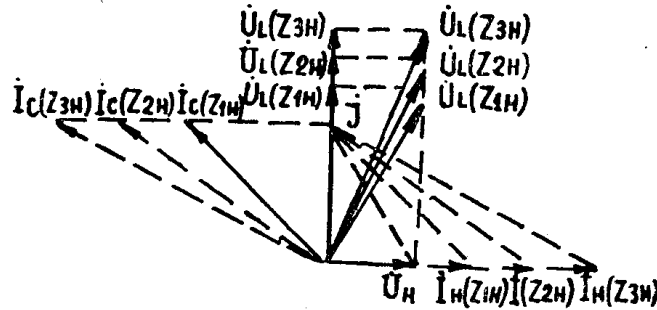


Рис. 6

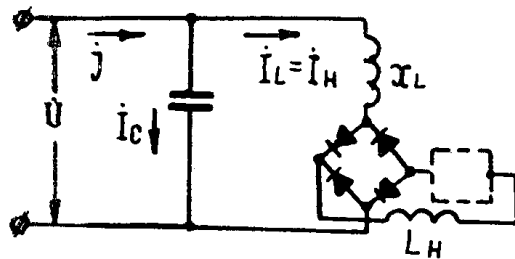


Рис. 7

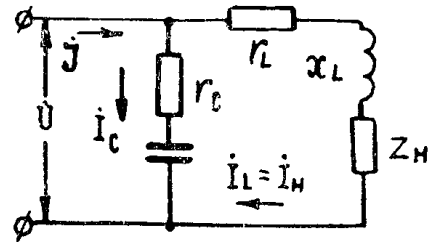


Рис. 8

В реальной схеме (рис. 8), когда активными сопротивлениями индуктивной и емкостной ветвей пренебречь нельзя, процессы описываются соотношениями

$$\dot{U} = I \frac{r_c z_H + r_L r_c + x_L x_c + j(x_L r_c - r_L x_c - z_H x_c)}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)},$$

$$\dot{I}_c = I \frac{r_L + jx_L + z_H}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{I}_H = I \frac{r_c - jx_c}{r_c + r_L + z_H + j(r_L - x_c)},$$

$$\dot{U}_L = I j x_L \frac{r_c - jx_c}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}, \quad \dot{U}_H = I z_H \frac{r_c - jx_c}{r_c + r_L + z_H + j(x_L - x_c)}$$

Если  $x_L = x_c = x$ , тогда имеем

$$\dot{U} = I \frac{r_c z_H + r_L r_c + x^2 + jx(r_c - r_L - z_H)}{r_c + r_L + z_H},$$

$$I_H = I \frac{r_c + jx}{r_c + r_L + z_H}, \quad \dot{U}_H = I z_H \frac{r_c - jx_c}{r_c + r_L + z_H}.$$

Видно, что в реальной схеме напряжение на нагрузке уже не постоянно. Оно зависит от сопротивления  $z_H$ , и лишь при  $|z_H| \gg r_L - r_c$  напряжение на нагрузке близко к идеальному.

Анализ показывает, что помимо описанных может быть создано большое количество и других разновидностей реактивных преобразователей источников тока в источник напряжения: однофазные Т-образные и мостовые, с индуктивной связью и без нее, трехфазные.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. C. Green, I. B. Купер. Constant Current Cources, Rev. Scient. Instru-  
ments. New-Iork, Vol. 11, 1940.
2. H. K. Lennings. Charging Large Capacitor Bank in Thermonuclear Research,  
Electric Eng., № 6, 1961.
3. А. Н. Милых, Б. Е. Кубышин, И. В. Волков. Индуктивно-емкостные  
преобразователи. Киев, 1967.