

К.В. Быков, Н.М. Лазарева, Ю.В. Павлов, В.М. Яров  
 (г. Чебоксары, ООО НПП ЭКРА,  
 Чувашский государственный университет)

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В LLC-КОНВЕРТОРЕ С ФИМ-УПРАВЛЕНИЕМ

Моделированием в Simulink Matlab получены кривые разгона преобразователя по напряжению нагрузки, первичному току силового трансформатора и выпрямленному выходному току. Определены параметры модели конвертора в виде передаточных функций.

Simulation in Simulink Matlab obtained acceleration curves of the converter for the load voltage, the primary current of the power transformer and the rectified output current. The parameters of the converter model are defined as transfer functions.

Ключевые слова: LLC-конвертор, кривая разгона, передаточная функция, моделирование в Simulink.

Keywords: LLC-converter, acceleration curve, transfer function, simulation in Simulink.

Для построения замкнутой системы управления электрическим режимом преобразователя необходимо знать передаточные функции объекта управления. Наиболее просто информацию о параметрах передаточных функций можно получить на основе кривых разгона, полученных в результате имитационного моделирования [1]. Simulink-модель LLC-конвертора с ФИМ управлением приведена на рис. 1.

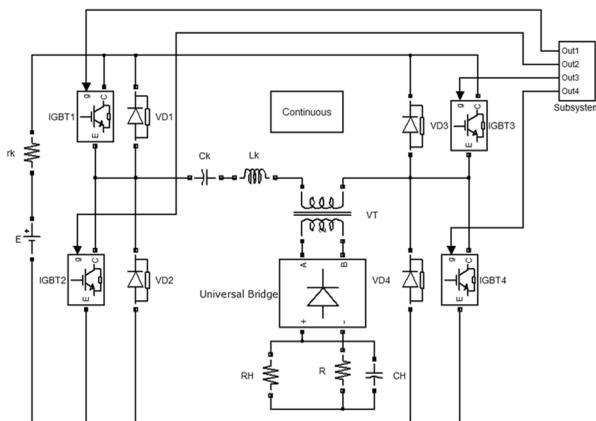


Рис. 1. Simulink-модель LLC-конвертора с разомкнутой системой управления

Кривая разгона представляет собой переходный процесс изменения тока или напряжения преобразователя, работающего в установившемся режиме, при подаче скачка возмущающего воздействия. В общем случае возмущение может выражаться в изменении напряжения питания, сопротивления нагрузки и т.п. Для конвертора с ФИМ-управлением можно изменять значение фазового сдвига, подавая возмущение по цепи управления.

Нормированный динамический процесс изменения среднего значения напряжения нагрузки *LLC*-конвертора приведен на рис. 2. По виду кривой разгона можно предположить, что преобразователь может быть моделирован колебательным звеном. Параметры передаточной функции колебательного звена можно определить по кривой разгона по следующим простым соотношениям [2]:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\omega_k^2 + \gamma^2}}; \xi = T\gamma,$$

где  $\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}; \gamma = \frac{\ln(A_1/A_3)}{T_k}$ .

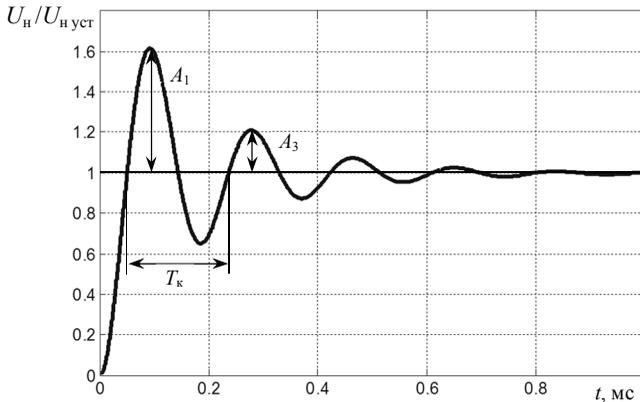


Рис. 2. Нормированная кривая разгона *LLC*-конвертора по напряжению нагрузки

В результате получим, что по напряжению нагрузки *LLC*-конвертор может быть представлен следующей нормированной передаточной функцией:

$$W_{U_n}(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \tag{1}$$

где  $T = 2,9214 \cdot 10^{-5}$  – постоянная времени колебательного звена;  
 $\xi = 0,1678$  – коэффициент затухания.

На рис. 3 показана модель вычислительного эксперимента и его результат – аппроксимация экспериментальной кривой разгона напряжения нагрузки переходной характеристикой колебательного звена (1). В принятом на рисунке масштабе кривые практически совпадают, что свидетельствует о достоверности моделирования LLC-конвертора по напряжению нагрузки колебательным звеном с приведенными выше параметрами.

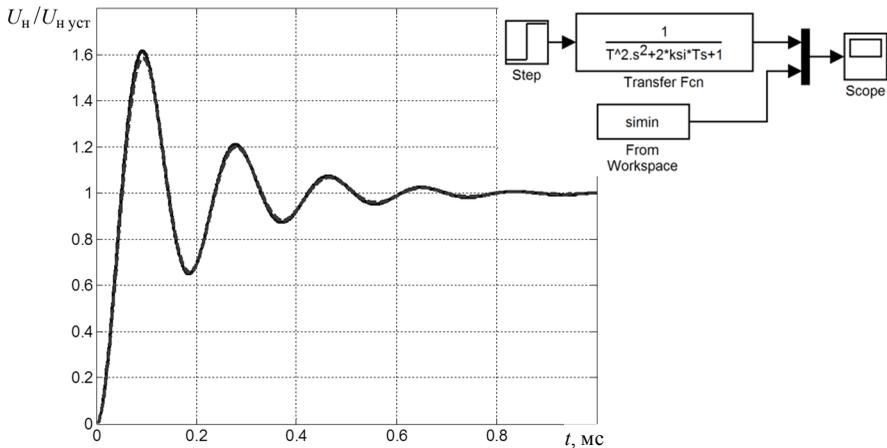


Рис. 3. Вычислительный эксперимент аппроксимации экспериментальной кривой разгона напряжения нагрузки (синяя сплошная линия) переходной характеристикой колебательного звена (1) (красная пунктирная линия)

Нормированная кривая разгона LLC-конвертора по среднему значению выпрямленного выходного тока представлена на рис. 4 сплошной синей линией. Из рисунка следует, что в данном случае одного только колебательного звена для построения модели преобразователя будет недостаточно – в начале переходного процесса ток резко нарастает, т.е. имеет место форсирование режима. Таким образом, по выпрямленному выходному току кривая разгона конвертора моделируется динамической переходной характеристикой звена

$$W_{I_d}(p) = \frac{\tau p + 1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (2)$$

где  $T = 2,96 \cdot 10^{-5}$  и  $\xi = 0,167$  – параметры колебательного звена;  
 $\tau = 3,45 \cdot 10^{-4}$  – постоянная времени форсирующего звена.

Аппроксимация переходного процесса  $LLC$ -конвертора переходной характеристикой звена (2) приведена на рис. 4 красной пунктирной линией. Модельная кривая практически не отличается от кривой разгона тока  $I_d$ , т.е. допустимо моделировать преобразователь по выпрямленному выходному току звеном (2).

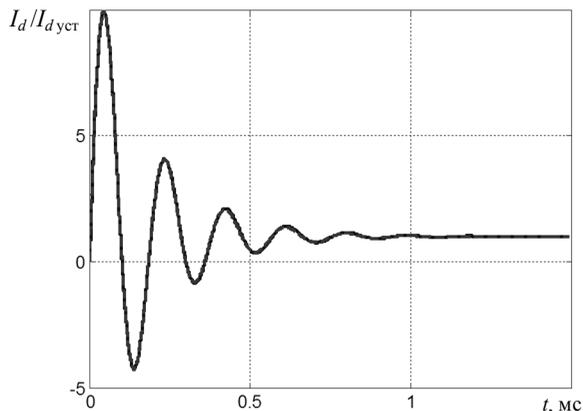


Рис. 4. Нормированная кривая разгона  $LLC$ -конвертора по выпрямленному выходному току (сплошная синяя линия) и ее модель переходной характеристикой звена (2) (красная пунктирная линия)

**Выводы:** по напряжению нагрузки кривая разгона  $LLC$ -конвертора с ФИМ управлением может быть аппроксимирована переходной характеристикой колебательного звена, а по выпрямленному выходному току – переходной характеристикой звена, полученного последовательным соединением реального форсирующего и колебательного звеньев.

#### Список литературы

1. Лазарева, Н.М. Компьютерное моделирование резонансных инверторов / Н.М. Лазарева, В.М. Яров. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 498 с.
2. Гольдфарб, Л.С. Теория автоматического управления / Л.С. Гольдфарб, А.В. Балтрушевич, А.В. Негушила и др. – М.: Высш. шк., 1976. – 216 с.

Материал поступил в редколлегию 11.10.18.