

## **АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ИМПУЛЬСНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

**Балабанов А. С., Темербаев С. А.**

**Научный руководитель - д.т.н., профессор Довгун В. П.**

***Сибирский федеральный университет***

С конца 80-х годов проблема качества электроэнергии приобретает все большее значение как для энергосетевых компаний, так и для потребителей. Одной из причин, вызывающих ухудшение качества электроэнергии, является рост нелинейных нагрузок. В первую очередь, такими нагрузками являются импульсные источники питания.

Широкое распространение импульсных преобразователей в современных энергосберегающих системах электропитания объясняется тем, что они имеют значительные преимущества перед традиционными непрерывными источниками. Эти преимущества заключаются в более высоком КПД, меньших габаритах и массе. В настоящее время импульсные преобразователи, работающие на частотах переключения от десятков до сотен килогерц, используются в источниках вторичного электропитания компьютеров, систем телекоммуникаций, технологических установок, бытовой техники и т.п.

Существенный недостаток импульсных преобразователей заключается в том, что они являются источниками кондуктивных и радиопомех, возникающих в процессе переключения. Это объясняется схемными особенностями импульсных преобразователей. Периодические коммутации вентилях приводят к тому, что ток, потребляемый преобразователями, имеет форму коротких импульсов. В результате повышается уровень гармоник в сети, к которой подключен преобразователь.

Высокий уровень содержания гармоник отрицательно влияет на эффективность работы промышленного электрооборудования, бытовых приборов, вычислительной техники, приводит к ускоренному старению оборудования. Поэтому анализ гармонического состава напряжений и токов в электрических сетях представляет важную и актуальную задачу.

Следует отметить, что анализ цепей с импульсными преобразователями является весьма трудоемким и сопряжен с серьезными трудностями. Причина в том, что коммутации изменяют топологию цепи, поэтому работа импульсного преобразователя представляет периодическую последовательность различных режимов. Для расчета таких цепей необходимы специализированные методы. Одним из таких является метод усредненного пространства состояний. Он основан на замене мгновенных значений токов и напряжений их средними значениями. Метод используется преимущественно в тех случаях, когда амплитуда пульсаций переменных состояния цепи невелика по сравнению с их средними значениями. Однако для анализа гармонического состава колебаний этот метод неприменим.

Другой метод анализа цепей с импульсными преобразователями, основанный на представлении токов и напряжений в виде ряда Фурье, рассмотрен в работах. Исходным математическим описанием цепи является система дифференциальных уравнений, которые затем трансформируются в частотную область. Его можно рассматривать как обобщение метода усредненного пространства состояний. Он назван методом многочастотного усреднения.

В докладе метод многочастотного усреднения использован для анализа установившихся режимов в электрических цепях с периодически коммутируемыми элементами. Таким элементами могут быть импульсные преобразователи, управляемые и не-

управляемые выпрямители и т.д. Форма напряжений и токов цепи может быть произвольной.

Особенности предлагаемого метода заключаются в следующем:

1. Коммутируемые элементы представляются непрерывными моделями, содержащими зависимые источники напряжения и тока.

2. Используется спектральное представление переменных цепи, а также законов управления коммутируемых элементов.

3. Для анализа полученной математической модели используются уравнения в смешанном координатном базисе напряжений узлов цепи и токов коммутируемых элементов.

4. Уравнения цепи формируются в частотной области. Это позволяет упростить анализ за счет исключения этапа формирования дифференциальных уравнений.

Анализируемая цепь может содержать индуктивные, емкостные, резистивные элементы, независимые источники, а также коммутируемые элементы. Последние мы будем считать идеальными. Это означает, что коммутация происходит мгновенно, сопротивление замкнутой ветви равно нулю.

Представим коммутируемый элемент четырехполюсником, переменные на внешних зажимах которого связаны матричным равенством

$$[x_2] = [M][x_1]$$

Здесь  $[x_1]$  – вектор входных (управляющих), а  $[x_2]$  – вектор зависимых (выходных) переменных. Например, для двухпозиционного ключа, показанного на рис. 1, компонентное уравнение имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Уравнению (1) соответствует эквивалентная схема, показанная на рис. 2.

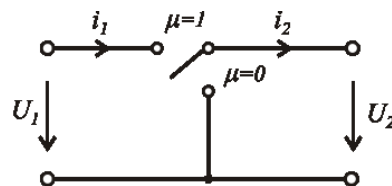


Рис. 1. Двухпозиционный ключ.

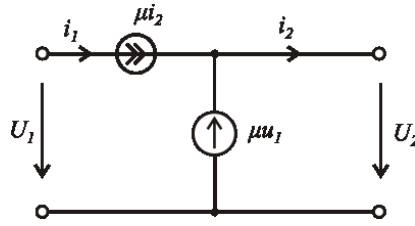


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения двухпозиционного ключа.

Примем, что коммутации в рассматриваемой цепи происходят с периодом  $T$ . Токи и напряжения также являются периодическими функциями времени. Они могут быть представлены рядом Фурье

$$x(t) = \sum_{(k)} \langle x \rangle_k(t) e^{jk\omega_1 t}$$

Здесь  $\langle x \rangle_k(t)$  – комплексная амплитуда  $k$ -й гармоники, определяемая по формуле

$$\langle x \rangle_k(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jk\omega_1 t} dt.$$

Частота основной гармоники  $\omega_1 = 2\pi/T$ .

Коэффициент  $\langle x \rangle_0$  равен среднему значению  $x(t)$  за период. Коэффициент  $\langle x \rangle_1$  определяет амплитуду основной гармоники.

Точность результатов расчета зависит от числа гармоник, учитываемых при анализе. Амплитуды гармоник быстро убывают с ростом их порядкового номера. Кроме того, в большинстве случаев непрерывная подсистема импульсного преобразователя обладает частотно-селективными свойствами и ослабляет амплитуды большинства гармоник.

Компонентные матрицы пассивных элементов имеют диагональную структуру. При выводе компонентных уравнений для коммутируемых элементов учтем, что умножению функций времени соответствует свертка их спектров:

$$\langle m \cdot x \rangle_n = \sum_{(i)} \langle m \rangle_{n-i} \langle x \rangle_i$$

Поэтому компонентное уравнение коммутируемого элемента имеет вид (учтены гармоники с индексами -1, 0, 1):

$$\begin{bmatrix} \langle x_2 \rangle_{-1} \\ \langle x_2 \rangle_0 \\ \langle x_2 \rangle_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle m \rangle_0 & \langle m \rangle_{-1} & 0 \\ \langle m \rangle_1 & \langle m \rangle_0 & \langle m \rangle_{-1} \\ 0 & \langle m \rangle_1 & \langle m \rangle_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle x_1 \rangle_{-1} \\ \langle x_1 \rangle_0 \\ \langle x_1 \rangle_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

В уравнении (2)  $\langle x_1 \rangle_k, \langle x_2 \rangle_k$  – комплексные амплитуды гармоник входных (управляющих) и выходных (управляемых) переменных коммутируемого элемента.

Заметим, что компонентная матрица в формуле (1) имеет теплицеву структуру. Матрицы такой структуры часто встречаются в задаче спектрального оценивания при использовании параметрических моделей случайных процессов. Эквивалентная схема, соответствующая равенству (2), представляет многополюсник.

### Заключение.

1. В докладе рассмотрен общий метод анализа установившихся процессов в электрических цепях с импульсными преобразователями. Он может быть использован для анализа неуправляемых и управляемых выпрямителей, ШИМ-преобразователей, резонансных конверторов. Точность результатов анализа можно контролировать, варьируя число гармоник, учитываемых при анализе.

2. Предлагаемый метод позволяет получать решение как во временной, так и в частотной областях. Это дает возможность не только оценить относительное содержание отдельных гармоник, но и определить форму напряжений и токов в сети.

3. Приведены примеры, иллюстрирующие предложенный метод анализа.