

УДК 621.327

Ягуп Е. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ В ВЫПРЯМИТЕЛЕ С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ

Одной из наиболее распространенных задач при проектировании преобразователей является анализ квазиустановившегося режима. Информация о квазиустановившемся режиме позволяет оценить гармонический состав выходного напряжения преобразователя, нагрузки на вентильные и реактивные элементы, определить требования к алгоритмам работы системы управления, проанализировать особенности поведения внешней характеристики преобразователя [1, 2].

С появлением программ для имитации процессов в тиристорных схемах стал использоваться метод установления [3–5]. С использованием компьютерных программ воспроизводится реальный переходный режим, приводящий к установлению в тиристорной схеме рассчитываемого квазиустановившегося режима. Недостатками этого метода является то, что переходный процесс может длиться десятки – сотни периодов и возникают сложности определения точного момента его затухания. Кроме того, при определении режимных параметров квазиустановившегося процесса неизбежны неточности, обусловленные процессами накопления вычислительных погрешностей, которые в моделях тиристорных схем связаны с локальными погрешностями методов численного интегрирования, неточностями в определении моментов переключений вентиля, а также погрешностями округления. Перечисленные факторы могут приводить к значительным затратам машинного времени.

Целью работы является моделирование в электронных таблицах Excel электромагнитных процессов выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром и нахождения параметров установившегося процесса без прогонки переходного пускового процесса.

На рис. 1. представлена электрическая схема выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром [6].

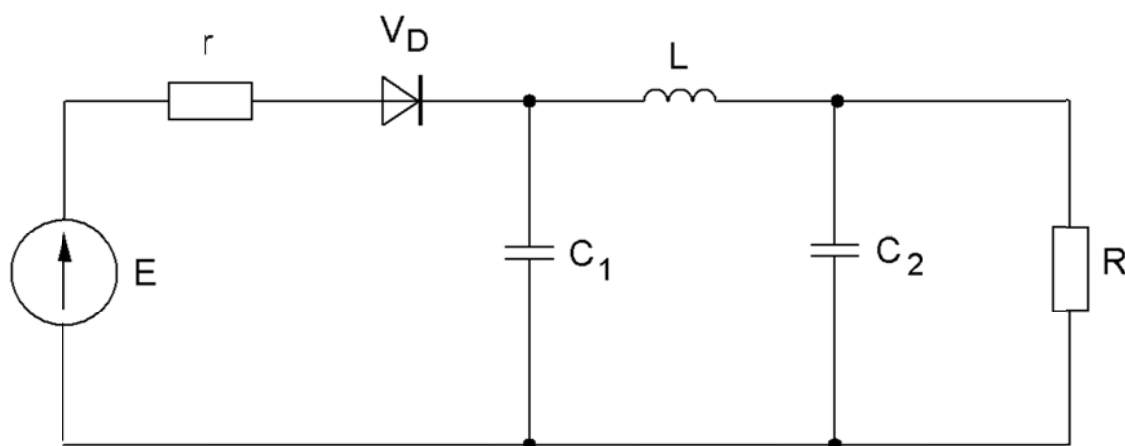


Рис. 1. Электрическая схема выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром

Рассматриваемая схема представляет собой однофазный выпрямитель, питающийся от источника ЭДС, амплитуда и частота которого соответственно равны $E_m = 10 \text{ В}$, $f = 0.5 \text{ Гц}$. Внутреннее сопротивление источника электрической энергии равно $r = 5 \text{ Ом}$, сопротивление нагрузки $R = 100 \text{ Ом}$. Сопротивления диода в открытом

и закрытом состояниях принимаются равными $R_{d\ open} = 0.01$ Ом, $R_{d\ close} = 10000$ Ом. Для сглаживания пульсаций к выходу выпрямителя подключен П-образный фильтр, состоящий из индуктивности и двух емкостей, значения которых $C_1 = C_2 = 0,12$ Ф, $L = 12$ Гн.

С применением метода переменных состояния получена система дифференциальных уравнений переменных состояния (напряжений на конденсаторах и токов индуктивностей), приведенных к нормальной форме [7]:

$$\frac{di_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1}(i_{Rd} - i_L); \quad (1)$$

$$\frac{di_{c2}}{dt} = \frac{1}{C_2}(i_L - \frac{1}{R}V_{C2}); \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{C1} - V_{C2}). \quad (3)$$

Ток диода, необходимый для контроля его состояния выражается следующим образом:

$$i_{Rd} = \frac{e - V_{C1}}{R_d + r}. \quad (4)$$

Реализация математической модели (1) была выполнена в электронных таблицах Excel с применением рекуррентной формулы Эйлера.

$$x_t = x_{t-1} + \Delta t \frac{dx_{t-1}}{dt}, \quad (5)$$

где x_t – значение функции в текущий момент времени;

x_{t-1} , $\frac{dx_{t-1}}{dt}$ – значение функции и ее производной в предыдущий момент времени;

Δt – шаг интегрирования.

Задав значения параметров электрической схемы, начальные нулевые условия переменных состояния и воспользовавшись формулой Эйлера (5), рассчитываются значения напряжений на конденсаторах и тока в индуктивности.

Для построения установившегося режима использовалась надстройка Excel «Поиск решения». Процедура поиска решения позволяет найти оптимальное значение целевой функции, изменяя параметры других ячеек [8]. При этом используется алгоритм нелинейной оптимизации Generalized Reduced Gradient (GRG2), разработанный Л. Ласдоном и А. Уореном.

При решении задачи расчета квазиустановившегося режима однофазного выпрямителя с П-образным индуктивно-емкостным выполнялась следующая последовательность действий:

1. В разработанной модели ограничивается конечное время работы модели периодом источника синусоидального питающего напряжения $T = 2,0$ с.

2. Для наглядности наблюдений за значениями переменных состояния на конце периода эти значения были скопированы в соответствующие ячейки, расположенные над ячейками со значениями переменных состояния в начале периода (в строке с записью «На конце периода», как это показано на рис. 2).

3. В строке под заголовком «Разности» вычисляются разности соответствующих переменных состояния на конце периода и в начале периода.

4. В строке под заголовком «Квадраты разностей» вычисляются квадраты разностей соответствующих переменных состояния.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|----|------|----------|--------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | Em | w | r | R | Rd1 | Rd2 | C1 | dlt | C2 | L | |
| 2 | 10 | 3,141593 | 5 | 100 | 0,01 | 10000 | 0,12 | 0,01 | 0,12 | 12 | |
| 3 | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | Шаровая метрика | | 2,94E-05 | | | | | | |
| 5 | | | Суммы квадратов | | 8,63E-10 | | | | | | |
| 6 | | | Квадраты разностей | | 6,26E-10 | 7,12E-11 | 1,66E-10 | | | | |
| 7 | | | Разности | | -2,5E-05 | -8,4E-06 | 1,29E-05 | | | | |
| 8 | | | Конец периода | | 7,054261 | 7,427301 | 0,076825 | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | |
| 10 | time | e(t) | id | Rd | Vc1 | Vc2 | iL | dVc/dt | dVc2/dt | diL/dt | iL*20 |
| 11 | 0 | 0 | -1,17571 | 1 | 7,054286 | 7,427309 | 0,076812 | -10,4377 | 0,021155 | -0,03109 | 1,536234 |
| 12 | 0,01 | 0,314108 | -0,00066 | 10000 | 6,949909 | 7,427521 | 0,076501 | -0,64303 | 0,018547 | -0,0398 | 1,530017 |
| 13 | 0,02 | 0,627905 | -0,00063 | 10000 | 6,943478 | 7,427706 | 0,076103 | -0,63945 | 0,015215 | -0,04035 | 1,522057 |
| 14 | 0,03 | 0,941083 | -0,0006 | 10000 | 6,937084 | 7,427858 | 0,075699 | -0,63582 | 0,01184 | -0,0409 | 1,513987 |
| 15 | 0,04 | 1,253332 | -0,00057 | 10000 | 6,930726 | 7,427977 | 0,07529 | -0,63215 | 0,008422 | -0,04144 | 1,505807 |
| 16 | 0,05 | 1,564345 | -0,00054 | 10000 | 6,924404 | 7,428061 | 0,074876 | -0,62843 | 0,004961 | -0,04197 | 1,49752 |

Рис. 2. Реализация надстройки Excel «Поиск решения» для расчета квазиустановившегося режима

5. В строке «Сумма» вычисляется сумма квадратов разностей соответствующих переменных состояния.

6. В строке «Шаровая метрика» извлекается квадратный корень из суммы квадратов разностей соответствующих переменных состояния на конце и в начале периода. Эта величина используется в качестве критерия оптимизации при определении параметров квазиустановившегося режима выпрямителя.

7. В диалоговом окне надстройки «Поиск решения» в качестве целевой ячейки выделяется ячейка с шаровой метрикой с указанием того, что она должна быть приведена в результате оптимизации к нулевому значению.

8. В качестве изменяемых ячеек указываются ячейки начальных значений переменных состояния.

После выполнения поиска решения были найдены следующие значения переменных состояния в начале периода:

$$V_{c1}(0) = 7,054286; \quad V_{c2}(0) = 7,427309; \quad I_L(0) = 0,076812.$$

Эти начальные значения приводят к следующим значениям переменных состояния на конце периода $T = 2$:

$$V_{c1}(T) = 7,054261; \quad V_{c2}(T) = 7,427301; \quad I_L(T) = 0,076825,$$

которые весьма близки к начальным значениям переменных состояния, что свидетельствует о достижении моделью квазиустановившегося режима.

Приведенные на рис. 3 графики демонстрируют изменения напряжений на конденсаторах фильтра (рис. 3), ток индуктивности увеличенный для наглядности в 20 раз и ток диода (рис. 4).

Практически равные значения переменных состояния в начале и в конце периода доказывает то, что процесс действительно установился. Значение тока в индуктивности достигает своего минимального значения при максимальном токе в диоде. Напряжение на конденсаторе С1 возрастает в промежутке времени, когда диод открыт, и идет на спад, когда диод закрыт. Выходное напряжение на конденсаторе С2 практически сглажено, что свидетельствует об эффективности использования П-образного индуктивно-емкостного фильтра.

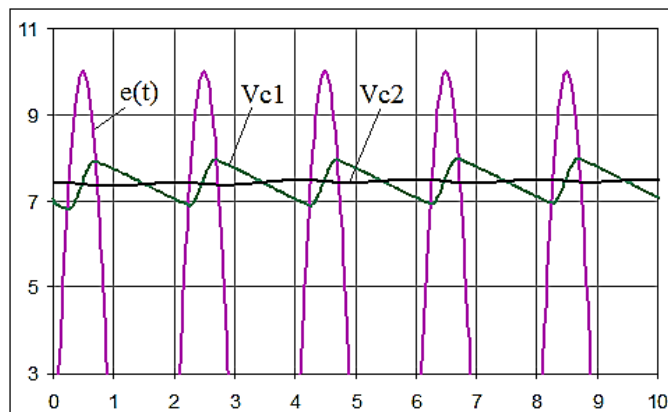


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений на конденсаторах C1 и C2

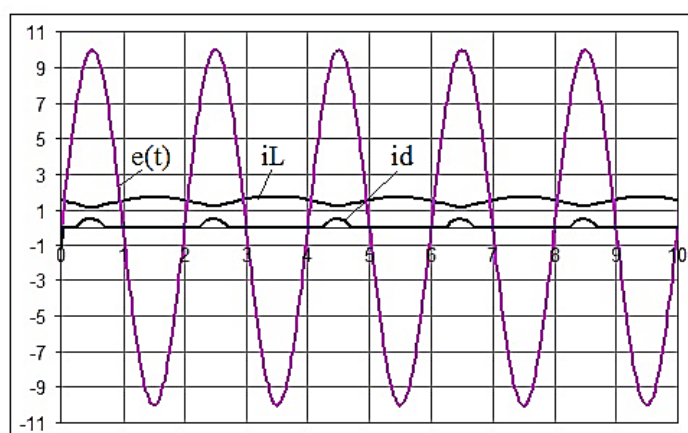


Рис. 4. Временные диаграммы тока в индуктивности и тока диода

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель выпрямителя с индуктивно-емкостным фильтром, реализованная в электронных таблицах Excel.

Использование надстройки Excel «Поиск решения» позволяет находить параметры установившегося процесса без прогонки переходного пускового процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каганов И. Л. *Электронные и ионные преобразователи*. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1950. – Ч. 1. – 664 с. ; 1955. – Ч. 2. – 446 с. ; 1956. – Ч. 3. – 528 с.
2. Ривкин Г. А. *Преобразовательные устройства* / Г. А. Ривкин. – М. : Энергия, 1970. – 544 с.
3. Поссе А. В. *Методы расчета схем выпрямителей и инверторов большой мощности* / А. В. Поссе, А. В. Севрюгов // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1973. – № 3. – С. 259–273.
4. Толстов Ю. Г. *Вопросы методологии анализа электрических цепей с вентилями* / Ю. Г. Толстов, М. С. Липкинд, В. А. Баринов // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. – 1984. – № 3. – С. 162–164.
5. Утевский А. М. *Теория и методы расчета р-фазных выпрямителей с емкостным фильтром* : автореф. дис. канд. техн. наук / А. М. Утевский. – М., 1945. – 32 с.
6. Эйприлл Т. *Анализ стационарного режима нелинейных цепей с периодическими входными сигналами* / Т. Эйприлл, Т. Трик // *ТИИЭР*. – 1972. – № 1. – С. 140–155
7. Ягуп В. Г. *Автоматизированный расчет тиристорных схем [Текст]* / В. Г. Ягуп. – К. : Вища школа, 1986. – 158 с.
8. Уокенбах Джон. *Microsoft Office Excel 2007. Библия пользователя*. – М. : Вильямс, 2008. – 816 с.

Статья поступила в редакцию 24.12.2012 г.