

выми транзисторами от сгорания при выходе из строя силовых ключей, так как диоды 1VD2–6VD2 и 1VD3–6VD3 не пропускают высокое напряжение на низковольтные элементы силовых ключей.

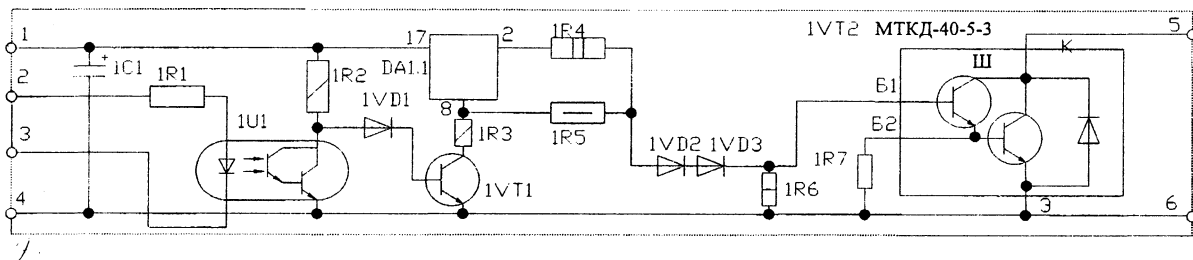


Рисунок 1. Схема силового ключа

Для питания узлов управления ключей СК1.1–СК3.1, находящихся под высоким потенциалом, служат три преобразователя типа DC/DC, имеющие гальваническую развязку входа и выхода. Благодаря этому стало возможным отказаться от трансформатора с четырьмя отдельными обмотками.

Силовой выпрямитель собран на 50-ти амперном диодном мосту типа W10X. Корпус силового выпрямителя изолирован от выводов, поэтому не требуется дополнительных изолирующих прокладок при его установке на охлаждающий радиатор.

Трансформатор Т1 габаритной мощностью 30 Вт имеет всего одну вторичную обмотку на напряжение 12 В, рассчитанную на ток 2 А. В источнике [2] применялся аналогичный трансформатор мощностью 60 Вт.

Составные транзисторы силовых ключей 1VT2–6VT2 устанавливаются на общий теплоотвод площадью $\geq 2400 \text{ см}^2$, так как теплоотводящая поверхность транзисторов МТКД-40-5-3 электрически изолирована от полупроводниковой структуры.

Поэтому источник питания ТАД стал более компактным, лёгким и экономичным.

Литература

1. Дубровский, А. Регулятор частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей // Радио. – 2001. – № 4. – С. 42–43.
2. Нарыжный, В. Источник питания трехфазного электродвигателя от однофазной сети с регулировкой частоты вращения // Радио. – 2003. – № 12. – С. 35–37.

УДК 621.372

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Сачков А.А., Кунцевич Д.И.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент МОЖАР В.И.

Целью настоящей работы является идентификация нелинейной цепи [1], т. е. определение параметров линейной части электрической цепи (при известной топологии), для получения требуемого гармонического состава напряжения на нелинейном элементе.

Для решения поставленной задачи воспользуемся подходом к расчету гармонического состава периодических режимов в нелинейных цепях предложенным в [2, 3].

Рассмотрим сложную электрическую цепь с одним нелинейным элементом (рисунок 1). Для удобства все расчеты будем вести в относительных единицах.

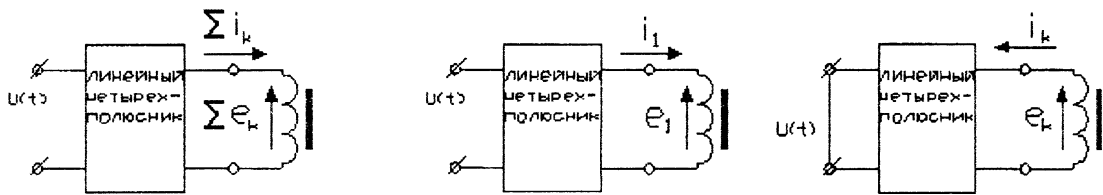


Рисунок 1

Пусть процесс перемагничивания ферромагнитного сердечника описывается выражением:

$$H = f(B). \quad (1)$$

Пусть

$$B = B_1 + \sum_{k=3,5,7}^{\infty} B_k, \quad (2)$$

где $B_1 = B_{1m} \cos(\tau + \psi_1)$ и $B_k = B_{km} \cos(k\tau + \psi_k)$ считаем заданными.

Подставляя (2) в выражение (1) и раскладывая полученное выражение в ряд Тейлора по степеням малого параметра $\sum B_k$ (причем $\sum B_k$ не должно превышать 10 % от амплитуды основной гармонии), получим

$$H = f(B_1 + \sum B_k) = f(B_1) + f'(B_1) \sum B_k + f''(B_1) \frac{(\sum B_k)^2}{2!} + \dots \quad (3)$$

Разложим $f(B_1)$ и $f'(B_1)$ в ряд Фурье:

$$f(B_1) = \sum_{k=3,5,7}^{\infty} A_{km} \cos(k\tau + \varphi_k); \quad (4)$$

$$f'(B_1) = D_0 + 2 \sum_{k=2,4,6}^{\infty} D_{km} \cos(k\tau + \theta_k).$$

Подставляя (4) в (3) и ограничиваясь линейным приближением, находим

$$H = \sum_{k=3,5,7}^{\infty} A_{km} \cos(k\tau + \varphi_k) + \left[D_0 + 2 \sum_{k=2,4,6}^{\infty} D_{km} \cos(k\tau + \theta_k) \right] \sum_{k=3,5,7}^{\infty} B_{km} \cos(k\tau + \psi_k). \quad (5)$$

Выделим из (5) отдельные гармоники напряженности поля, опуская для простоты записи индекс m :

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= \dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{D}_2^* + \dot{B}_3^* \dot{D}_4 + \dot{B}_5 \dot{D}_4^* + \dot{B}_5^* \dot{D}_6 + \dots; \\ \dot{H}_3 &= \dot{A}_3 + \dot{B}_3 \dot{D}_0 + \dot{B}_3^* \dot{D}_6 + \dot{B}_5 \dot{D}_2^* + \dot{B}_5^* \dot{D}_8 + \dots; \\ \dot{H}_5 &= \dot{A}_5 + \dot{B}_3 \dot{D}_3 + \dot{B}_3^* \dot{D}_8 + \dot{B}_5 \dot{D}_0 + \dot{B}_5^* \dot{D}_{10} + \dots \end{aligned}$$

Пренебрегая членами, содержащими B_3^*, B_5^*, \dots для высших гармоник напряженности поля, получим:

$$\begin{aligned} \dot{H}_3 &= \dot{A}_3 + \dot{B}_3 \dot{D}_0 + \dot{B}_5 \dot{D}_2^* + \dot{B}_7 \dot{D}_4^* + \dot{B}_9 \dot{D}_6^* + \dots; \\ \dot{H}_5 &= \dot{A}_5 + \dot{B}_3 \dot{D}_2 + \dot{B}_5 \dot{D}_0 + \dot{B}_7 \dot{D}_2^* + \dot{B}_9 \dot{D}_4^* + \dots; \\ \dot{H}_7 &= \dot{A}_7 + \dot{B}_3 \dot{D}_4 + \dot{B}_5 \dot{D}_2 + \dot{B}_7 \dot{D}_0 + \dot{B}_9 \dot{D}_2^* + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что $\dot{H}_k = -jk\dot{B}_k\dot{Y}_k$ ($k = 3, 5, 7, \dots$), где \dot{Y}_k – проводимость линейной части схемы со стороны нелинейного элемента при коротком замыкании первичных зажимов, приведем систему уравнений (6) к виду:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_3 &= -\frac{\dot{A}_3 + \dot{B}_3\dot{D}_0 + \dot{B}_5\dot{D}_2^* + \dot{B}_7\dot{D}_4^* + \dot{B}_9\dot{D}_6^* + \dots}{j3\dot{B}_3}; \\ \dot{Y}_5 &= -\frac{\dot{A}_5 + \dot{B}_3\dot{D}_2 + \dot{B}_5\dot{D}_0 + \dot{B}_7\dot{D}_2^* + \dot{B}_9\dot{D}_4^* + \dots}{j5\dot{B}_5}; \\ \dot{Y}_7 &= -\frac{\dot{A}_7 + \dot{B}_3\dot{D}_4 + \dot{B}_5\dot{D}_2 + \dot{B}_7\dot{D}_0 + \dot{B}_9\dot{D}_2^* + \dots}{j7\dot{B}_7}. \end{aligned} \quad (7)$$

В первом приближении можно пренебречь влиянием высших гармоник на низшие.

В этом случае система уравнений (7) становится рекуррентной, что дает возможность легко решить задачу нахождения проводимости высших гармоник. Уточнение решения может быть достигнуто в последующих приближениях. Практика расчетов показывает, что даже первое приближение дает хорошие результаты.

Пример.

Определим параметры линейной части схемы феррорезонансного стабилизатора напряжения, принципиальная схема которого изображена на рисунок 2, а расчетная схема на рисунок 3. Кривую намагничивания стали стабилизатора напряжения аппроксимируем выражением: $H = 26sh(4B)$.

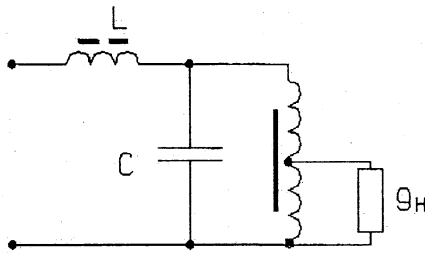


Рисунок 2

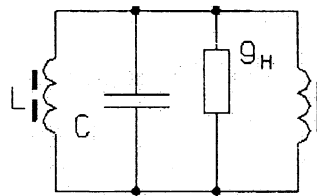


Рисунок 3

Пусть амплитуды соответствующих гармоник магнитной индукции в относительных единицах будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{1m} &= 6,5; \\ \dot{B}_{3m} &= 0,434e^{j13,24}; \\ \dot{B}_{5m} &= 0,069e^{j12,671}; \\ \dot{B}_{7m} &= 0,012e^{j13,887}. \end{aligned}$$

Тогда уравнения (4) в относительных единицах запишутся следующим образом:

$$f(B_1) = sh(B_1) = sh(\dot{B}_{1m} \cos \tau) = 2 \sum_{k=1,3,5,\dots}^n J_k(\dot{B}_{1m}) \cos(k\tau);$$

$$f'(B_1) = ch(B_1) = ch(\dot{B}_{1m} \cos \tau) = J_0(\dot{B}_{1m}) + 2 \sum_{k=2,4,6,\dots}^n J_k(\dot{B}_{1m}) \cos(k\tau),$$

где $J_k(\dot{B}_{1m})$ – модифицированные функции Бесселя.

А коэффициенты \dot{A}_k и \dot{D}_k будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{A}_3 &= 2J_3 = 101,66; \\ \dot{A}_5 &= 2J_5 = 29,536; \\ \dot{A}_7 &= 2J_7 = 5,238; \\ \dot{D}_0 &= J_0 = 106,293; \\ \dot{D}_2 &= J_2 = 76,221; \\ \dot{D}_4 &= J_4 = 29,3. \end{aligned}$$

По уравнениям (7) найдем проводимости линейной части схемы:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_3 &= \frac{-\dot{A}_3 - \dot{B}_3 \dot{D}_0}{j3\dot{B}_3} = \frac{-101,66 - 0,434e^{j13,24} \cdot 106,293}{3 \cdot e^{j90} 0,434e^{j13,24}} = 17,9 + j111,507; \\ \dot{Y}_5 &= \frac{-\dot{A}_5 - \dot{B}_5 \dot{D}_0 - \dot{B}_3 \dot{D}_2}{j5\dot{B}_5} = \\ &= \frac{-29,536 - 0,069e^{j12,671} \cdot 106,293 - 0,434e^{j13,24} \cdot 76,221}{5 \cdot e^{j90} \cdot 0,069e^{j12,671}} = 17,9 + j201,304; \\ \dot{Y}_7 &= \frac{-\dot{A}_7 - \dot{B}_7 \dot{D}_0 - \dot{B}_3 \dot{D}_4 - \dot{B}_5 \dot{D}_2}{j7\dot{B}_7} = \\ &= \frac{-5,238 - 0,012e^{j13,887} \cdot 106,293 - 0,434e^{j13,24} \cdot 29,3 - 0,069e^{j12,671} \cdot 76,221}{7 \cdot e^{j90} \cdot 0,012e^{j13,887}} = \\ &= 17,9 + j287,789. \end{aligned}$$

Зная проводимости на высших гармониках и схему феррорезонансного стабилизатора напряжения, найдем параметры схемы C , L и g_H , решив совместно уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_3 &= g_H + j\left(3C - \frac{1}{3L}\right); \\ \dot{Y}_5 &= g_H + j\left(5C - \frac{1}{5L}\right); \\ \dot{Y}_7 &= g_H + j\left(7C - \frac{1}{7L}\right). \end{aligned}$$

В результате получим в относительных единицах:

$$\begin{aligned} g_H &= 17,9; \\ C &= 42; \\ L &= 0,023. \end{aligned}$$

Параметры элементов реального стабилизатора напряжения были в относительных единицах равны:

$$\begin{aligned} g_H &= 17,9; \\ C &= 42; \\ L &= 0,023. \end{aligned}$$

Литература

1. Данилов, Л.В., Матханов, П.Н., Филиппов, Е.С. Теория нелинейных электрических цепей. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Bladyko, M.M., Moshar, W.I. Die iterative Methode bei der harmonischen Analyse in Ferroresonanzkreisen // XX. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau. 1975. – P. 23–26.
3. Бладыко, В.М., Можар, В.И. Расчет гармонического состава периодических режимов нелинейных электрических цепей // Электричество. – 1988. – № 7. – С. 69–71.