высотой до 10 мм, загнутыми книзу. Пленочный электронагреватель расположен на нижней поверхности панели в виде двух последовательно соединенных полос. Снизу нагреватель защищен теплостойкой резиновой пластиной толщиной 1 мм. Токоподвод выполнен аналогично электрообогреваемым емкостям.

Панели весьма эффективны для сушки мелких деталей, особенно при использовании фильтровальной бумаги, на которой размещают детали россыпью при сушке на панелях. Время сушки сокращается при этом более чем в 2 раза. На замене каждой лампы ИКЗ-500 сушильной панелью завод экономит до 20 рублей в год.

Аналитическая обработка опытных данных позволила получить эмпирическую формулу расчетного срока службы пленочного нагревателя в зависимости от начальной удельной поверхностной мощности и допустимого снижения мощности (в %) к концу эксплуатации установки.

$$T_{сл} = 148{,}5 \cdot \Delta P_{\%} \; W_{уд}^{-1{,}39} , \qquad (1)$$

где $T_{сл}$ – расчетный срок службы, ч; $\Delta P_{\%}$ – допустимое снижение мощности, %; $W_{уд}$ – начальная удельная поверхностная мощность, Вт/см^2.

Резюме. Экономический эффект от внедрения на Минском часовом заводе, разработанных и изготовленных в БИМСХ, более сотни электрообогреваемых емкостей и сушильных панелей составит около 17 тысяч рублей, а экономия электроэнергии около 209800 кВт · ч в год.

Литература

1. Кудрявцев И.Ф., Герасимович Л.С. Полупроводниковые пленочные электронагреватели в сельском хозяйстве. Минск, 1973.

УДК 621.314.263

В.И. Можар

РАСЧЕТ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСОВ

Для питания систем телеуправления, работающих от сети с частотой 50 Гц или 400 Гц применяются феррорезонансные формирователи импульсов (ФФИ) [1] . Схема этого ФФИ при-

ведена на рис. 1. Так как в каждый полупериод работает только один из вентилей, то для расчета схема ФФИ может быть заменена эквивалентной схемой, состоящей из последовательно соединенных: нелинейного дросселя $i(\psi)$, емкости C и эквивалентного активного сопротивления $R_э$:

$$R_э = R_{др} + R_в + R_н + R_д ,$$

где $R_{др}$ – активное сопротивление нелинейного дросселя; $R_в = R_{в1} = R_{в2}$ – сопротивление вентиля; $R_н = R_{н1} = R_{н2}$ – сопротивление нагрузки; $R_д$ – добавочное сопротивление.

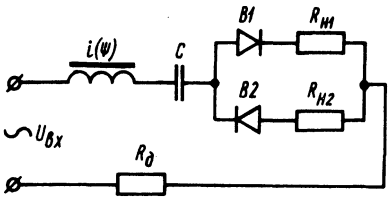

Рис.1. Схема феррорезонансного формирователя импульсов.

Установившиеся процессы в такой схеме описываются дифференциальным уравнением типа Картрайт – Литлвуда, которое в относительных единицах при аппроксимации характеристики нелинейного элемента гиперболическим синусом примет вид

$$\frac{d^2\psi}{d\tau^2} + R_э \operatorname{ch}\psi \frac{d\psi}{d\tau} + \frac{1}{C}\operatorname{sh}\psi = U_{m\,вх}\cos\tau . \quad (1)$$

Расчет комплексных амплитуд гармонических составляющих потокосцепления нелинейного дросселя выполним по методике, изложенной в [2]. Задаваясь значениями первой гармонической ψ_{1m}, определяем высшие гармонические потокосцепления по формулам:

$$\left.\begin{aligned}
\dot{\psi}_{3m} &= \frac{\left(\frac{1}{C}+j3R_э\right)\dot{A}_{3m} + \frac{1}{C}\left(\overset{*}{\psi}_{3m}\dot{D}_{6m} + \dot{\psi}_{5m}\overset{*}{D}_{2m} + \ldots\right)}{9 - D_o\left(\frac{1}{C} + j3R_э\right)}, \\
\dot{\psi}_{5m} &= \frac{\left(\frac{1}{C}+j5R_э\right)\dot{A}_{5m} + \frac{1}{C}\left(\dot{\psi}_{3m}\dot{D}_{2m} + \overset{*}{\psi}_{3m}\dot{D}_{8m} + \ldots\right)}{25 - D_o\left(\frac{1}{C} + j5R_э\right)}, \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Здесь коэффициенты A_{km} и D_{km} определяются как результат разложения $sh(\varphi_{1m}\cos\tau)$ и $ch(\varphi_{1m}\cos\tau)$ в ряд Фурье. В первом приближении пренебрегаем влиянием высших гармонических на низшие и сопряженным комплексом искомой величины, тогда система уравнений (2) станет рекуррентной. Причем для получения достаточной для инженерных расчетов точности сумма высших гармонических не должна превышать 10% от основной гармонической.

Затем определяем напряжение на входе схемы, которое соответствует заданной величине φ_{1m}, по формуле

$$\dot{U}_{mвх} = -\dot{\varphi}_{1m} + \left(\frac{1}{C} + jR_э\right)\dot{A}_{1m} + \frac{1}{C}\left(\dot{\varphi}_{3m}\overset{*}{D}_{2m} + \overset{*}{\varphi}_{3m}\dot{D}_{4m} + \ldots\right).$$

Первая гармоническая составляющая тока в эквивалентной расчетной схеме ФФИ в относительных единицах будет равна

$$\dot{I}_{1m} = \frac{\dot{U}_{m\,вх} - \dot{U}_{1\,мдр}}{R_э - j\frac{1}{C}} = \frac{\dot{U}_{m\,вх} - j\dot{\varphi}_{1m}}{R_э - j\frac{1}{C}}.$$

Нелинейный элемент является генератором э.д.с. высших гармонических (E_k), поэтому k-ая гармоническая составляющая тока, протекающего в эквивалентной схеме, будет равна

$$\dot{I}_{km} = \frac{\dot{E}_{km}}{R_э - j\frac{1}{kC}} = \frac{-jk\dot{\varphi}_{km}}{R_э - j\frac{1}{kC}}.$$

Затем графически или численно по найденным значениям первой и высших гармонических составляющих тока получаем амплитуду несинусоидальной кривой тока, протекающего в эквивалентной схеме. Амплитуда же импульса, появляющегося в зависимости от полупериода в нагрузке $R_{н1}$ или $R_{н2}$, численно будет равна амплитуде несинусоидального тока в эквивалентной расчетной схеме, т.е. можно построить зависимость амплитуды импульса тока ФФИ от амплитуды входного напряжения при данных параметрах схемы.

В тех случаях, когда сумма высших гармонических превышает 10% от основной гармонической, следует воспользоваться итерационным методом [3]. В этом случае, задаваясь φ_{1m}, будем определять приращения к высшим гармоническим по формулам

$$\Delta\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{3m} = \frac{-9\dot{\psi}^{(\lambda)}_{3m} + \left(\frac{1}{C} + j3R_э\right)\dot{A}_{3m} + \frac{1}{C}\left(\Delta\overset{*}{\psi}{}^{(\lambda)}_{3m}\dot{D}_{6m} + \Delta\dot{\psi}^{(\lambda)}_{5m}\overset{*}{D}_{2m} + \ldots\right)}{9 - D_0\left(\frac{1}{C} + j3R_э\right)};$$

$$\Delta\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{5m} = \frac{-25\dot{\psi}^{(\lambda)}_{5m} + \left(\frac{1}{C} + j5R_э\right)\dot{A}_{5m} + \frac{1}{C}\left(\Delta\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{3m}\dot{D}_{2m} + \Delta\overset{*}{\psi}{}^{(\lambda+1)}_{3m}\dot{D}_{8m} + \ldots\right)}{25 - D_0\left(\frac{1}{C} + j5R_э\right)},$$

. . . . . .

где (λ) и ($\lambda+1$) указывают на порядковый номер итерации. А сами величины высших гармонических составляющих потокосцепления определим по формулам:

$$\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{3m} = \dot{\psi}^{(\lambda)}_{3m} + \Delta\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{3m};$$

$$\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{5m} = \dot{\psi}^{(\lambda)}_{5m} + \Delta\dot{\psi}^{(\lambda+1)}_{5m};$$

. . . . . .

В остальном же порядок расчета амплитудных характеристик ФФИ останется тем же.

Резюме. Предложена инженерная методика расчета амплитудных характеристик ФФИ.

Литература

1. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. М., 1974. 2. Можар В.И. Расчет нелинейных электрических цепей, описываемых уравнением типа Картрайт-Литлвуда. Рук. деп. в ОВНИИЭМ, № 94-д/76. РЖ (ВИНИТИ) "Электротехника и энергетика", 1976, № 11, 11А52ДЕП. 3. Bladyko W.M., Moshar W.I. Die iterative Methode bei der harmonischen Analyse in Ferroresonanzkreisen. XX. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1975, Heft 2.