

КОЭФФИЦИЕНТЫ СГЛАЖИВАНИЯ И ФИЛЬТРАЦИИ АКТИВНОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО ФИЛЬТРА В ЦЕПИ НАГРУЗКИ ОДНОФАЗНОГО ДВУХПОЛУПЕРИОДНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Е. И. ГОЛЬДШТЕИН

(Представлена научным семинаром кафедры автоматики и телемеханики)

В работе [1] рассмотрены принцип действия и результаты экспериментального исследования сглаживающего компенсационного фильтра. В настоящей статье выводятся расчетные выражения для определения коэффициентов сглаживания и фильтрации перестраиваемого фильтра. При этом пренебрегаем внутренним сопротивлением выпрямителя и представляем его пульсирующее напряжение в виде суммы трех составляющих — постоянной U_0 , переменного $U_{2\omega}$ частотой $2f_c$ и переменного $U_{4\omega}$ частотой $4f_c$, где f_c — частота в сети питания. Соответствующая эквивалентная схема приведена на рис. 1. Выход удвоителя будем

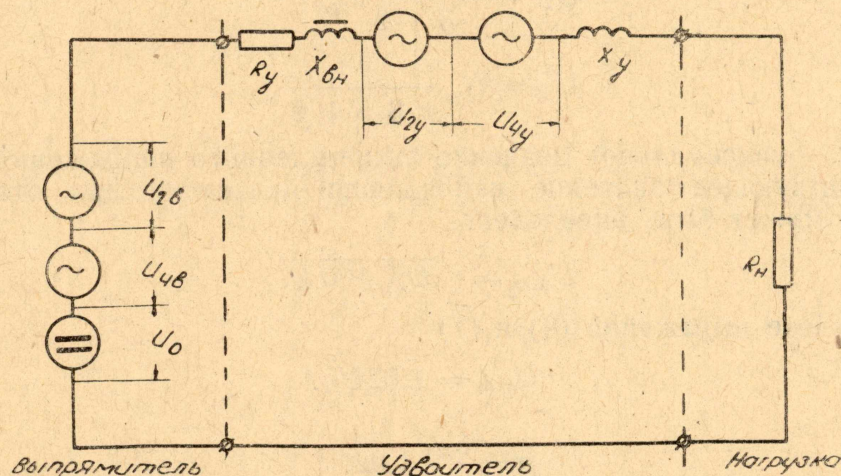


Рис. 1

рассматривать как соединение двух генераторов частот $2f_c$ и $4f_c$ с напряжениями холостого хода U_{2y} и U_{4y} . При этом пренебрегаем всеми высшими гармониками по сравнению со второй и четвертой.

X_n — внутреннее (индуктивное) сопротивление удвоителя.

R_y и X_y — соответственно активное и индуктивное (рассеяния) сопротивления обмоток подмагничивания, выполняющих одновременно роль нагрузочных обмоток.

R_n — сопротивление нагрузки.

Основные характеристики фильтра — коэффициент сглаживания q_c и коэффициент фильтрации κ_ϕ :

$$q_c = \frac{p}{p_\phi}, \quad (1)$$

$$\kappa_\phi = \frac{U_{п.вх}}{U_{п.вых}}, \quad (2)$$

$$p = \frac{U_{п.вх}}{U_0}, \quad (3)$$

$$p_\phi = \frac{U_{п.вых}}{U_0}. \quad (4)$$

В выражения (1) ÷ (4):

p — коэффициент пульсации на нагрузке при отсутствии фильтра;

p_ϕ — коэффициент пульсации на нагрузке при наличии фильтра;

$U_{п.вх}$ — напряжение пульсации на входе фильтра;

$U_{п.вых}$ — напряжение пульсации на нагрузке;

U_0 — выпрямленное напряжение на нагрузке при включенном фильтре.

При определении $U_{п.вх}$ будем считать, что в рабочем режиме (при компенсации) соотношение между напряжениями $U_{2в}$ и $U_{4в}$ остается таким же, как при холостом ходе выпрямителя. Но для холостого хода, используя разложение кривой выпрямленного напряжения $U = U_m \sin \omega t$ в ряд Фурье, получим:

$$U_0 = 2 \frac{U_m}{\pi}, \quad (5)$$

$$U_{2в} = \frac{4}{\pi \cdot 3 \cdot \sqrt{2}} U_m, \quad (6)$$

$$U_{4в} = U_m \frac{4}{\pi \cdot 3 \cdot 5 \cdot \sqrt{2}}, \quad (7)$$

где U_m — максимальное значение выпрямленного напряжения;

Действующее значение напряжения пульсации при отсутствии фильтра может быть определено:

$$U_{п.вх} = \sqrt{U_{2в}^2 + U_{4в}^2}. \quad (8)$$

И при учете выражений (6) и (7)

$$U_{п.вх} = 1.02 U_{2в}. \quad (9)$$

Откуда

$$p = \frac{U_{2в}}{U_0} 1.02. \quad (10)$$

В рабочем режиме напряжения $U_{2в}$ и $U_{2у}$ полностью компенсируют друг друга, поэтому в цепи нагрузки будет протекать только ток четвертой гармоники. Так как удвоитель по второй гармонике работает в режиме холостого хода, с достаточным приближением можно считать, что угол сдвига фаз между основной и всеми высшими гармониками равен нулю [2]. Учтем также и то, что угол сдвига фаз между второй и четвертой гармониками выпрямленного напряжения равен четверти периода четвертой гармоники. Поэтому сдвиг фаз между четвертыми гармониками напряжений удвоителя и выпрямителя принимаем также равным 90° .

При таких допущениях получим следующее выражение для определения напряжения пульсаций на нагрузке при наличии фильтра:

$$U_{п.вых} = \sqrt{U_{п.в}^2 + U_{п.у}^2}. \quad (11)$$

Напряжение пульсации, зависящее от напряжения четвертой гармоники на выходе удвоителя частоты:

$$U_{п.у} = \frac{U_{4у} R_n}{\sqrt{(R_n + R_y)^2 + (X_y + X'_{вн})^2}}. \quad (12)$$

Здесь $X'_{вн}$ — внутреннее сопротивление удвоителя частоты, определяемое по параметрам холостого хода и короткого замыкания [3],

$$X'_{вн} = \frac{U_{4у}}{I_{4к}}. \quad (13)$$

Ток короткого замыкания $I_{4к}$ определим при помощи функций Бесселя нулевого и четвертого порядка от чисто мнимого аргумента [3]:

$$I_{4к} = \sqrt{2} I_0 \frac{\tau_4(\varphi \Theta_1)}{\tau_0(\varphi \Theta_1)}. \quad (14)$$

В выражении (14):

I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока;

Θ_1 — величина первой гармоники индукции, выраженная в относительных единицах,

$$\Theta_1 = \beta B_1, \quad (15)$$

где α и β — коэффициенты аппроксимации характеристики намагничивания $H = \alpha \operatorname{sh} \Theta$.

Напряжение пульсации, зависящее от тока четвертой гармоники выпрямителя:

$$U_{п.в} = \frac{U_{4в} R_n}{\sqrt{(R_n + R_y)^2 + (X_y + X''_{вн})^2}}. \quad (16)$$

Сопротивление $X''_{вн}$ зависит от параметров удвоителя частоты и достаточно строго может быть определено только по экспериментальным характеристикам одновременного намагничивания, учитывающим магнитный режим сердечников удвоителя частоты.

В первом приближении, как показали дополнительный анализ и результаты исследования экспериментальных образцов активного компенсационного фильтра, можно принять

$$X''_{вн} = K_x X'_{вн}, \quad (17)$$

где K_x — коэффициент пропорциональности.

Для сердечников из стали Э-41:

$$K_x = 0,3 \div 0,5. \quad (18)$$

Постоянное напряжение на нагрузке при включенном фильтре будет меньше напряжения выпрямителя из-за падения напряжения на сопротивлении фильтра:

$$U'_0 = \frac{U_0}{R_y + R_n} \cdot R_n. \quad (19)$$

В работе [1] отмечено, что применение рассматриваемого фильтра перспективно в основном только при низкоомной нагрузке. В этом слу-

чае $(R_n + R_y)$ значительно меньше, чем $(X_{вн} + X_y)$. При указанном допущении можно пренебречь активным сопротивлением по сравнению с индуктивным. При этом из выражений (4), (11), (12), (16) и (19) получим:

$$p_\phi = \sqrt{\frac{U_{4в}^2}{(X_y + X_{вн})^2} + \frac{U_{4у}^2}{(X_y + X_{вн}')^2}} \cdot \frac{R_n + R_y}{U_0}. \quad (20)$$

Аналогично из выражений (2), (9), (11), (12) и (16)

$$K_\phi = \frac{1,02 U_{2в}}{R_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{U_{4в}^2}{(X_y + X_{вн})^2} + \frac{U_{4у}^2}{(X_y + X_{вн}')^2}}}. \quad (21)$$

Соответственно из выражений (1), (10), (20)

$$q_c = \frac{1,02 U_{2в}}{(R_n + R_y)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{U_{4в}^2}{(X_y + X_{вн})^2} + \frac{U_{4у}^2}{(X_y + X_{вн}')^2}}}. \quad (22)$$

Для установления связи между напряжениями $U_{2в}$, $U_{4в}$ и $U_{4у}$ используем очевидные соотношения

$$\frac{U_{2у}}{U_{4у}} = K_y; \quad (23)$$

$$U_{2в} = U_{2у}, \quad (24)$$

$$\frac{U_{2в}}{U_{4в}} = 5, \quad (25)$$

где K_y — расчетный коэффициент, зависящий от рабочего режима удвоителя частоты.

Из выражений (21) ÷ (25) получим расчетные выражения для коэффициентов фильтрации и сглаживания:

$$K_\phi = \frac{1,02}{R_n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{0,04}{(X_y + X_{вн})^2} + \frac{1}{K_y^2 (X_y + X_{вн}')^2}}}, \quad (26)$$

$$q_c = \frac{1,02}{(R_n + R_y)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{0,04}{(X_y + X_{вн})^2} + \frac{1}{K_y^2 (X_y + X_{вн}')^2}}}. \quad (27)$$

Для определения K_y используем метод, описанный в [2], где для режима холостого хода получены уравнения:

$$\Theta_2 = 0,5 \left(\operatorname{arsh} h_0 - \operatorname{arsh} \frac{h_0}{\operatorname{ch} \Theta_1} \right), \quad (28)$$

$$\Theta_4 = 0,25 \left(\operatorname{arsh} h_0 + \operatorname{arsh} \frac{h_0}{\operatorname{ch} \Theta_1} - 2 \operatorname{arsh} \frac{h_0}{\operatorname{ch} \frac{\Theta_1}{\sqrt{2}}} \right). \quad (29)$$

При выводе уравнений (28) ÷ (29)

а) не учитывались потери на гистерезис и вихревые токи, не учитывалось и рассеяние;

б) напряженность учитывалась относительной величиной h_0 :

$$h_0 = \frac{H_0}{\alpha} = \frac{I_0 W_0}{\alpha l_c}, \quad (30)$$

где W_0 — число витков нагрузочной обмотки, выполняющей роль обмотки подмагничивания;
 l_c — длина средней силовой линии.

В [2] проведен анализ и построены зависимости $\theta_4 = \varphi(\theta_1)$ при $h_0 = \text{const}$ в диапазоне $4 \leq \theta_1 \leq 8$. Для нас представляет больший интерес зависимость $K_y = \varphi(\theta_1)$ в диапазоне $1 \leq \theta_1 \leq 3$, так как при $\theta_1 > 3$, $K_y < 3,8$ и малы коэффициенты сглаживания и фильтрации. Используя уравнения (28), (29), были подсчитаны значения θ_2 и θ_4 . Но

$$K_y = \frac{B_2}{2B_4} = \frac{\theta_2}{2\theta_4}, \quad (31)$$

где B_1 , B_2 — максимальные значения индукции соответствующей гармоники.

На рис. 2 приведены полученные зависимости $\theta_2 = \varphi(\theta_1)$ и $K_y(\theta_1)$.

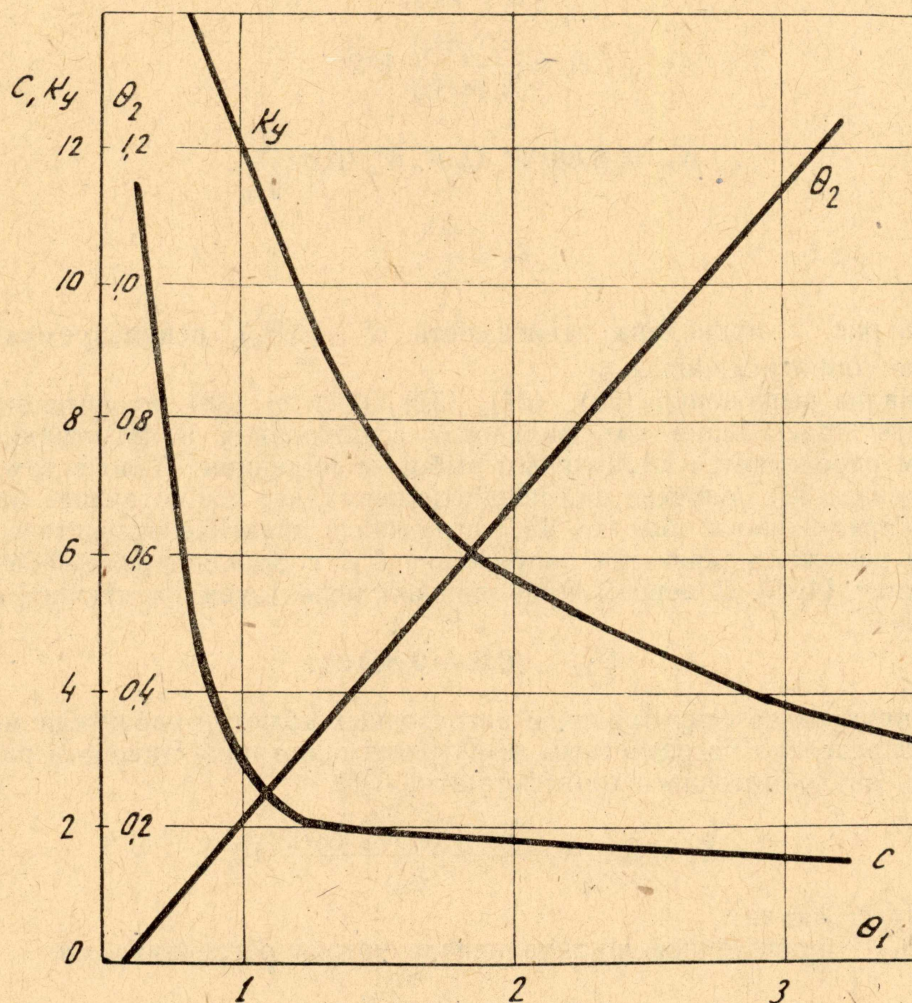


Рис. 2

При выбранном диапазоне изменения θ_1 изменение подмагничивания в диапазоне $50 \leq h_0 \leq 500$ практически не влияет на величину K_y , что упрощает расчет и настройку рассматриваемого фильтра.

Для определения индукции Θ_1 используем соотношение (32).

$$\Theta_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4 \cdot \beta}{8,88 f_c Q_c K_c W_1}, \quad (32)$$

где W_1 — число витков намагничивающей обмотки, подключенной к источнику переменного тока;

U_1 — напряжение, приложенное к намагничивающим обмоткам;

Q_c — геометрическое сечение сердечника, см^2 ;

K_c — коэффициент заполнения сталью.

По индукции Θ_1 могут быть легко определены все расчетные величины, необходимые для нахождения сопротивления $X'_{\text{вн}}$ по выражению (13).

Действительно

$$U_{4y} = 8,88 \cdot 4 f_c \cdot Q_c \cdot K_c \cdot W_0 \cdot 10^{-4} \cdot B_4, \quad (33)$$

$$B_4 = \frac{\Theta_4}{\beta}, \quad (34)$$

$$I_{4к} = I_0 A, \quad (35)$$

$$A = \frac{\tau_4(\varphi \Theta_1)}{\tau_0(\varphi \Theta_1)} \sqrt{2}, \quad (36)$$

$$X'_{\text{вн}} = 8,88 \cdot 4 f_c Q_c K_c W_0 \cdot 10^{-4} \frac{C}{\beta I_0}, \quad (37)$$

$$C = \frac{\Theta_4}{A}. \quad (38)$$

На рис. 2 приведена зависимость $C = \varphi(\Theta_1)$, используемая при расчете сопротивления $X'_{\text{вн}}$.

Анализ выражений (26), (27), (31), (37) и (38) показывает, что точность определения коэффициентов сглаживания и фильтрации во многом определяется правильным выбором индукции. Дело в том, что выражение (32) получено при предположении, что все питающее напряжение приложено к обмотке W_1 , тогда как в практике вследствие рассеяния расчетное первичное напряжение U_1 , составляет $0,85 \div 0,65$ приложенного [4, 5]. В первом приближении используем следующее соотношение:

$$U_{1p} = (0,8 \div 0,85) U_1. \quad (39)$$

Индуктивное сопротивление нагрузочных обмоток удвоителя может быть определено по расчетным выражениям для индуктивности рассеяния X_p двухобмоточного трансформатора [6]:

$$X_y = 2X_p = \frac{2 \cdot 4 \cdot 4 f_c \cdot W_0^2 \delta_{12} l_0}{h_d} 10^{-8}, \quad (40)$$

где $4 f_c = 200 \text{ гц}$;

δ_{12} — приведенная ширина канала потока рассеяния, мм ;

$$\delta_{12} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2}; \quad (41)$$

a_1 и a_2 — ширина соответственно обмотки нагрузочной и намагничивающей;

a_{12} — ширина канала потока рассеяния;

l_0 — длина среднего витка нагрузочной обмотки, мм;
 h_d — высота катушки, мм:

$$h_d = (h - 1) - 2\Delta_{из}; \quad (42)$$

h — высота окна обмотки;

$\Delta_{из}$ — толщина щечки каркаса.

Для проверки полученных расчетных выражений был сделан расчет коэффициента фильтрации для активного фильтра, описанного в работе [1]. При этом были использованы следующие данные; $W_0 = 300$; $a_1 = 5$ мм; $a_2 = 10,0$ мм; $a_{12} = 0,5$ мм; $h = 44$ мм; $l_0 = 138$ мм (нагрузочная обмотка намотана поверх обмотки намагничивающей); $f_c = 50$ гц; $\Delta_{из} = 1,0$ мм.

По выражению (1) было получено $\delta_{12} = 8,0$ мм; по выражению (42) — $h_d = 41$ мм; по выражению (40) — $X_y = 39$ ом.

Θ_1 подсчитано по выражению (32) с учетом выражения (39) при $W_1 = 3000$; $K_c = 0,88$;

$$Q_c = 3,2 \text{ см}^2; \beta = 6,28 \frac{1}{\text{мл}};$$

$$\alpha = 38,1 \text{ а/м.}$$

$X_{вн}$ подсчитывалось по выражению (37) при соответствующих значениях l_0 .

k_f подсчитывалось по выражению (23).

Основные этапы расчета коэффициента фильтрации отражены в табл. 1. Здесь же для сопоставления приведены соответствующие результаты экспериментов из [1] — значения $K_{экс}$.

Таблица 1

	0,4	0,8	1,2
I_0 [а]			
U_1 [в]	92	104	109
U_{1p} [в]	76,3	86,4	90,5
B_1 [мл]	0,203	0,231	0,242
Q_1	1,27	1,44	1,51
K_y	9,2	7,7	7,5
R_n [ом]	11,0	4,0	2,0
C	2,02	2,0	1,98
$X'_{вн}$	121	59,6	39,4
X_y	39,0	39,0	39,0
$X''_{вн}$	48,3	23,8	15,7
k_f	38,8	73,5	127
$k_{экс}$	38,7	69,9	139,7

Выводы

1. Показана возможность ориентировочной оценки возможностей активного компенсационного фильтра при помощи полученных расчетных выражений для коэффициентов сглаживания и фильтрации.

2. Целесообразно проведение отдельного изучения вопросов о влиянии рассеяния на характеристики фильтра и о методике определения индуктивного сопротивления удвоителя четвертой гармонике выпрямленного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Гольдштейн, А. И. Кутявин. Активный компенсационный фильтр для сглаживания пульсаций в цепи нагрузки однофазного двухполупериодного выпрямителя. «Известия ТПИ», т. 155, 1966.
2. В. А. Раюшкин. Расчет режима холостого хода удвоителя частоты. «Электричество», № 5, 1959.
3. В. А. Раюшкин. Аналитический расчет режимов холостого хода и короткого замыкания удвоителя частоты с учетом высших гармонических. Труды Харьковского политехнического института, том XXVII, серия электротехническая, вып. 1, 1959.
4. Л. Л. Рожанский. Статические электромагнитные преобразователи частоты. Госэнергоиздат, 1959.
5. В. Г. Тихомиров. Исследование вопроса возможности создания умножителя частоты в диапазоне 50—10000 гц для индукционного нагрева и методика его расчета. Диссертация, ЛЭТИ, 1953.
6. И. И. Белополюский, Л. Г. Пикалова. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Госэнергоиздат, 1963.