ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 132 1965

ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА В АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ

А. И. ЗАЙЦЕВ, А. П. ЗАЙЦЕВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры ЭПП электромеханического факультета)

Введение

В последнее время широкое распространение получают регуляторы тока, действующие по принципу широтно-импульсной модуляции. В случае активно-индуктивной нагрузки, шунтированной неуправляемым вентилем, становится возможным поддерживать ток нагрузки непрерывным в широком диапазоне регулирования при дискретном характере питающего напряжения. В таких регуляторах применяются полупроводниковые усилители, работающие в ключевом режиме и управляемые от широтно-импульсных модуляторов. При этом коэффициент использования полупроводниковых приборов, представляющий собой отношение мощности в нагрузке к потере мощности в приборе, увеличивается в сотни раз по сравнению с линейным режимом усиления. В связи с перспективностью и увеличивающимся распространением импульсного способа регулирования тока в активно-индуктивной нагрузке (обмотки возбуждения электрических машин, стабилизаторы тока и т. д.) вопросы расчета переходных процессов, связанных с установлением тока, и выбор частоты переключений представляют несомненный интерес.

На практике применяется три способа регулирования тока в активно-индуктивной нагрузке:

1) нагрузка подключается по мостовой схеме к источнику с постоянным напряжением, мостовая схема обеспечивает периодическую смену полярности напряжения на нагрузке, регулирование тока осуществляется путем изменения длительности импульсов напряжения как одной, так и другой полярности (реверсивная схема);

2) нагрузка подключается к источнику с постоянным напряжением через периодически открывающийся и закрывающийся полупроводниковый ключ (нереверсивная схема);

3) нагрузка подключается к источнику с постоянным напряжением через добавочное сопротивление, регулирование тока осуществляется периодическим шунтированием полупроводниковым ключом добавочного сопротивления (схема с шунтированием добавочного сопротивления).

При анализе процессов в схемах будем полагать, что:

1) шунтирующий нагрузку неуправляемый вентиль идеальный,

2) индуктивность нагрузки не зависит от тока.

Реверсивная схема

Обозначим

T — период повторения импульсов напряжения нагрузки,

γ — относительная продолжительность включения,

n — дискретный аргумент,

U_0 — амплитуда импульсного напряжения нагрузки,

i — ток нагрузки,

$L_н$ — индуктивность нагрузки,

$R_н$ — активное сопротивление нагрузки,

$$T_н = \frac{L_н}{R_н}, \quad \beta = \frac{T}{T_н}, \quad I = \frac{U_0}{R_н}.$$

В интервалах времени $nT \leqslant t \leqslant T(n+\gamma)$ уравнение цепи имеет вид

$$L_н \frac{di}{dt} + iR_н = U_0. \tag{1}$$

В интервалах времени $T(n+\gamma) \leqslant t \leqslant T(n+1)$ уравнение цепи имеет вид

$$L_н \frac{di}{dt} + iR_н = -U_0. \tag{2}$$

Введем новую зависимую переменную—относительное время

$$\bar{t} = \frac{t}{T}.$$

Тогда (1) и (2) с учетом вышеприведенных обозначений преобразуются как

$$\frac{1}{\beta}\frac{di}{d\bar{t}} + i = I, \qquad n \leqslant \bar{t} \leqslant n+\gamma, \tag{3}$$

$$\frac{1}{\beta}\frac{di}{d\bar{t}} + i = -I, \qquad n+\gamma \leqslant \bar{t} \leqslant n+1. \tag{4}$$

Решением (3) будет

$$i(\bar{t}) = I + C_1 e^{-\beta(\bar{t}-n)},$$
$$n \leqslant \bar{t} \leqslant n+\gamma. \tag{5}$$

Определим постоянную интегрирования, исходя из начальных условий. При $\bar{t} = n$ $i(\bar{t}) = i(n)$. Подставляя эти значения в (5), получим

$$C_1 = i(n) - I. \tag{6}$$

Подставляя (6) в (5), получим

$$i(\bar{t}) = I + [i(n) - I]\, e^{-\beta(\bar{t}-n)}, \tag{7}$$
$$n \leqslant \bar{t} \leqslant n+\gamma.$$

Решением (4) будет

$$i(\bar{t}) = -I + C_2 e^{-\beta(\bar{t}-n-\gamma)},$$
$$n+\gamma \leqslant \bar{t} \leqslant n+1. \tag{8}$$

При $\bar{t} = n+\gamma$ из (7) определим

$$i(n+\gamma) = I + [i(n - I]\, e^{-\beta\gamma}. \tag{9}$$

Минимальное установившееся значение тока ($n=\infty$, $\varepsilon=1$)

$$i_{\text{мин}} = \frac{I(1-e^{-\beta\gamma})\,e^{-\beta(1-\gamma)}}{1-e^{-\beta}}. \tag{33}$$

Полный размах пульсации тока в установившемся режиме

$$\Delta i = I\frac{(1-e^{-\beta\gamma})\,[1-e^{-\beta(1-\gamma)}]}{1-e^{-\beta}}. \tag{34}$$

Коэффициент пульсации тока

$$\varkappa = e^{\beta(1-\gamma)}. \tag{35}$$

Уравнение гладкой составляющей тока

$$i_{\text{г}}(t) = I\gamma\left[1-\frac{(1-e^{-\beta\gamma})\,e^{-\beta(1{,}5-\gamma)}}{\beta\gamma}e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}\right]\approx \tag{36}$$

$$\approx I\gamma\,(1-e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}).$$

Схема с шунтированием добавочного сопротивления

Исходные уравнения

$$L_{\text{н}}\frac{di}{dt}+R_0 i = U_0,\ nT\leqslant t\leqslant(n+\gamma)T; \tag{37}$$

$$L_{\text{н}}\frac{di}{dt}+R_{\text{н}} i = U_0,\ (n+\gamma)\,T\leqslant t\leqslant(n+1)\,T, \tag{38}$$

где

$$R_0 = R_1 + R_{\text{н}}.$$

R_1 — добавочное сопротивление.

Выражения тока через смещенные решетчатые функции

$$i\,[n,\ \varepsilon] = \frac{U_0}{R_0}+\left[R\frac{1-e^{-\beta_{\text{э}}n}}{1-e^{-\beta_{\text{э}}}}-\frac{U_0}{R_0}\right]e^{-\beta'\varepsilon}, \tag{39}$$

$$0\leqslant\varepsilon\leqslant\gamma;$$

$$i\,[n,\ \varepsilon] = \frac{U_0}{R_{\text{н}}}+\left\{\left[R\frac{1-e^{-\beta_{\text{э}}n}}{1-e^{-\beta_{\text{э}}}}-\frac{U_0}{R_0}\right]e^{-\beta'\gamma}-\frac{U_0R_1}{R_0R_{\text{н}}}\right\}e^{-\beta''(\varepsilon-\gamma)}, \tag{40}$$

$$\gamma\leqslant\varepsilon\leqslant 1.$$

Здесь

$$\beta' = \frac{T\cdot R_0}{L_{\text{н}}},$$

$$\beta'' = \frac{TR_{\text{н}}}{L_{\text{н}}},$$

$$\beta_{\text{э}} = \beta'\gamma+\beta''(1-\gamma),$$

$$R = \frac{U_0}{R_0R_{\text{н}}}\,[R_0-R_{\text{н}}e^{-\beta_{\text{э}}}-R_1e^{-\beta''(1-\gamma)}].$$

минимальным установившимся значением тока ($n=\infty$, $\varepsilon=1$)

$$i_{\text{мин}} = -\frac{I\left[1-2e^{-\beta(1-\gamma)}+e^{-\beta}\right]}{1-e^{-\beta}}; \tag{22}$$

полным размахом пульсаций тока

$$\Delta i = i_{\text{макс}} - i_{\text{мин}} = \frac{2I\left[1-e^{-\beta\gamma}-e^{-\beta(1-\gamma)}+e^{-\beta}\right]}{1-e^{-\beta}}; \tag{23}$$

коэффициентом пульсации тока

$$\varkappa = \frac{i_{\text{макс}}}{i_{\text{мин}}} = -\frac{1-2e^{-\beta\gamma}+e^{-\beta}}{1-2e^{-\beta(1-\gamma)}+e^{-\beta}}. \tag{24}$$

Очень часто требуется определить общий характер переходного процесса, который может быть представлен гладкой составляющей согласно выражению

$$i_{\text{г}}(n) = \int_0^{\gamma} i[n, \varepsilon]\, d\varepsilon + \int_{\gamma}^{1} i[n, \varepsilon]\, d\varepsilon. \tag{25}$$

После вычисления определенных интегралов и перехода к действительному времени гладкая составляющая тока имеет вид

$$i_{\text{г}}(t) = I(2\gamma-1)\left\{1-\frac{\left[2e^{-\beta(1-\gamma)}-e^{-\beta}-1\right]e^{-0{,}5\beta}}{\beta(2\gamma-1)}\, e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}\right\}. \tag{26}$$

В том случае, если $T_{\text{н}} \gg T$, применив формулы разложения показательных функций, получим

$$i_{\text{г}}(t) = I(2\gamma-1)\left(1-e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}\right). \tag{27}$$

Нереверсивная схема

Исходные дифференциальные уравнения для тока в различные интервалы времени

$$L_{\text{н}}\frac{di}{dt} + R_{\text{н}} i = U_0, \quad nT \leqslant t \leqslant T(n+\gamma); \tag{28}$$

$$L_{\text{н}}\frac{di}{dt} + R_{\text{н}} i = 0, \quad T(n+\gamma) \leqslant t \leqslant T(n+1). \tag{29}$$

Пользуясь приведенной выше методикой составления разностного уравнения, легко получить выражения для тока нагрузки через смещенные решетчатые функции

$$i[n, \varepsilon] = I + \left[\frac{Ie^{-\beta(1-\gamma)}\left(1-e^{-\beta\gamma}\right)\left(1-e^{-\beta n}\right)}{1-e^{-\beta}} - I\right]e^{-\beta\varepsilon}; \tag{30}$$

$$0 \leqslant \varepsilon \leqslant \gamma;$$

$$i[n, \varepsilon] = \left\{I + \left[\frac{Ie^{-\beta(1-\gamma)}\left(1-e^{-\beta\gamma}\right)\left(1-e^{-\beta n}\right)}{1-e^{-\beta}} - I\right]e^{-\beta\gamma}\right\}e^{-\beta(\varepsilon-\gamma)}; \tag{31}$$

$$\gamma \leqslant \varepsilon \leqslant 1.$$

Максимальное установившееся значение тока ($n=\infty$, $\varepsilon=\gamma$)

$$i_{\text{макс}} = \frac{I\left(1-e^{-\beta\gamma}\right)}{1-e^{-\beta}}. \tag{32}$$

жение определяется из (44) после ряда преобразований и пренебрежения величинами второго порядка малости.

$$T \approx \frac{\varkappa - 1}{\gamma(1-\gamma)} T'. \tag{47}$$

Здесь

$$T' = \frac{L_{\text{н}}}{\varkappa R_0 - R_{\text{н}}} \approx \frac{L_{\text{н}}}{R_1}.$$

Потери мощности в полупроводниковом триоде повышаются с ростом абсолютного значения тока через триод и частоты переключения. Поэтому целесообразно с увеличением абсолютного значения тока частоту переключения снижать с тем, чтобы температура коллекторного перехода оставалась допустимой во всем диапазоне регулирования тока. Этому условию удовлетворяет регулирование тока при постоянном коэффициенте пульсации. При регулировании тока по этому способу режим прерывистых токов невозможен принципиально. Закон изменения $T = f(\gamma)$ при $\varkappa = \text{const}$ строится на основании (45), (46), (47).

Для регулирования тока при $\varkappa = \text{const}$ необходимы широтно-импульсные модуляторы, позволяющие изменять как относительную продолжительность включения, так и частоту повторения широтно-модулированных импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.

Максимальное установившееся значение тока ($n = \infty$, $\varepsilon = 1$)

$$i_{\text{макс}} = \frac{U_0 \left[R_0 - R_1 e^{-\beta'' (1-\gamma)} - R_{\text{н}} e^{-\beta_{\text{э}}}\right]}{R_0 R_{\text{н}} (1 - e^{-\beta_{\text{э}}})}. \qquad (41)$$

Минимальное установившееся значение тока ($n = \infty$, $\varepsilon = \gamma$)

$$i_{\text{мин}} = \frac{U_0 (R_{\text{н}} + R_1 e^{-\beta' \gamma} - R_0 e^{-\beta_{\text{э}}})}{R_0 R_{\text{н}} (1 - e^{-\beta_{\text{э}}})}. \qquad (42)$$

Полный размах пульсации тока в установившемся режиме

$$\Delta i = \frac{U_0 R_1}{R_0 R_{\text{н}}} (1 - e^{-\beta' \gamma}) \left[1 - e^{-\beta'' (1-\gamma)}\right]. \qquad (43)$$

Коэффициент пульсации тока

$$\varkappa = \frac{R_{\text{н}} (1 - e^{-\beta_{\text{э}}}) + R_1 \left[1 - e^{-\beta'' (1-\gamma)}\right]}{R_{\text{н}} (1 - e^{-\beta_{\text{э}}}) + R_1 \left[1 - e^{-\beta'' (1-\gamma)}\right] e^{-\beta' \gamma}}. \qquad (44)$$

Точный вывод уравнения для гладкой составляющей тока приводит к очень сложному выражению. Приближенно гладкую составляющую можно определить согласно формуле.

$$i_{\text{г}} (n) \approx \frac{i [n, \gamma] + i [n, 1]}{2}.$$

Выбор частоты переключения

Основным требованием, предъявляемым в большинстве случаев к системам импульсного регулирования тока в активно-индуктивной нагрузке, является получение в установившемся режиме такой формы кривой тока, которая бы максимально возможно приближалась к гладкой составляющей. С этой точки зрения частоту переключения выгодно выбирать максимально возможной. Однако увеличивать частоту переключения можно до определенного предела, при котором сказываются эффект запаздывания переключения полупроводниковых приборов и потери переключения, приводящие к выводу из строя приборы и ухудшающие регулировочные качества систем. С точки зрения нагрева полупроводниковых приборов и надежности работы систем частоту переключения выгодно выбирать минимально возможной по условию допустимой пульсации тока нагрузки. При выборе минимально возможной частоты переключения основным критерием должен быть заданный допустимый коэффициент пульсации тока $\varkappa$ на нижнем пределе регулирования (при заданной γ). Тогда период частоты переключения для реверсивной схемы

$$T = \left(1 - \frac{1}{\varkappa}\right)\left(1 - \frac{1}{4\gamma - 1}\right) T_{\text{н}} \qquad (45)$$

определяется из (24) путем разложения показательных функций в степенные при пренебрежении величинами третьего порядка малости.

Для нереверсивной схемы T определяется из (35).

$$T = \frac{\ln \varkappa}{1 - \gamma} T_{\text{н}}. \qquad (46)$$

Для схемы с шунтированием добавочного сопротивления точное выражение для T получается довольно сложным. Приближенное выра-