

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДУЛЯЦИОННОМ ИСТОЧНИКЕ ПРИ РАБОТЕ ЕГО НА АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В. С. САЯПИН, В. А. ДЕНИСОВ, Ш. С. РОИЗ

В последние годы создаются источники стабильной частоты, в которых стабилизация частоты осуществляется с помощью амплитудной модуляции э. д. с. синхронного генератора. В связи с этим особый интерес представляет работа асинхронного двигателя при питании его от модуляционного источника.

При анализе электромагнитных процессов систему модуляционный источник — асинхронный двигатель представляем схемой замещения рис. 1. Здесь асинхронный двигатель изображен Т-образной схемой замещения без учета потерь в стали.

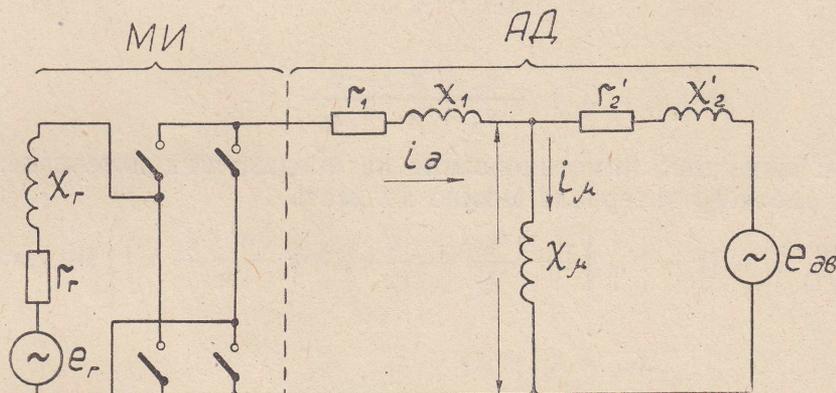


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения системы модуляционный источник — асинхронный двигатель: МИ — модуляционный источник; АД — асинхронный двигатель

На схеме приняты следующие обозначения:

- r_g — активное сопротивление обмотки генератора;
- x_g — индуктивное сопротивление рассеяния генератора;
- e_g — э. д. с. генератора;
- r_1 — активное сопротивление статора двигателя;
- x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния статора двигателя;
- x_μ — индуктивное сопротивление цепи намагничивания;
- r_2' — приведенное активное сопротивление ротора двигателя;
- x_2' — приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора двигателя.

В данной схеме замещения ток двигателя может быть найден как сумма намагничивающего тока и тока ротора:

$$i_d = i_u + i'_p. \quad (1)$$

Выражения для i_u и i'_p с учетом коммутации вентилей циклопреобразователя получим, пользуясь методикой [1].

Тогда уравнение, описывающее переходный процесс в контуре намагничивания в момент коммутации, имеет вид

$$k(x_1 + x_u) \frac{di_u}{d(\omega t)} - kx_\Gamma \frac{di'_\Gamma}{d(\omega t)} + i_u r_1 - i'_\Gamma r_\Gamma = E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin k \omega t, \quad (2)$$

где i'_Γ — доля тока генератора, идущая на создание основного магнитного потока двигателя;

$$E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin k \omega t —$$

э. д. с. модуляционного источника [2];

a — глубина амплитудной модуляции э. д. с. генератора;

m — номер интервала ($m=0, 1, 2, \dots, k-1$);

k — отношение несущей частоты к модулирующей.

После интегрирования (2) в пределах от $t=0$ до $t=\varepsilon$, где ε — угол коммутации ($\varepsilon \rightarrow 0$), получим уравнение, позволяющее определить ток намагничивания двигателя после коммутации

$$i_u(\varepsilon) = \zeta_u I_{0,u}, \quad (3)$$

где

$$\zeta_u = \frac{x_u + x_1 - x_\Gamma}{x_u + x_1 + x_\Gamma};$$

$I_{0,u}$ — значение тока намагничивания на предыдущем интервале.

Для рабочего интервала можно записать

$$kx_{\Sigma p} \frac{di_p}{d(\omega t)} + r_{\Sigma p} i_p = E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin k \omega t, \quad (4)$$

где

$$x_{\Sigma p} = x_\Gamma + x_1 + x_u;$$

$$r_{\Sigma p} = r_\Gamma + r_1.$$

Решением уравнения (4) с учетом начальных условий (3) является выражение

$$i_p(\omega t) = \frac{E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right]}{\sqrt{r_{\Sigma p}^2 + (kx_{\Sigma p})^2}} [\sin(k \omega t - \varphi_{\Sigma p}) + \sin \varphi_{\Sigma p} \times \\ \times \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t)] + \zeta_u I_{0,p} \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t),$$

$$\text{где } \varphi_{\Sigma p} = \operatorname{arctg} \frac{kx_{\Sigma p}}{r_{\Sigma p}}, \quad \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} = \frac{r_{\Sigma p}}{kx_{\Sigma p}}. \quad (5)$$

Чтобы рассчитать кривую тока намагничивания на всех интервалах, используем метод припасовывания.

Аналогично запишется уравнение для цепи ротора в момент коммутации

$$i_p'(r_1 + r_2') - i_{r'} r_{r'} + k(x_1 + x_2') \frac{di_p'}{d(\omega t)} - kx_{r'} \frac{di_{r'}}{d(\omega t)} =$$

$$= E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin k \omega t - e_{дв}(\omega t), \quad (6)$$

где $i_{r'}$ — доля тока генератора, идущая на создание тока ротора двигателя;

$e_{дв}$ — э. д. с. вращения двигателя;

$$e_{дв}(\omega t) = \frac{r_2'(1-s)}{s} i_2 \quad \text{или} \quad e_{дв} = U_{12} k_{\sigma}(1-s),$$

$$\text{где } k_{\sigma} = 1 - \frac{x_2'}{x_p},$$

s — скольжение двигателя,

$$U_{12} = x_p \frac{di_p}{d(\omega t)}. \quad (7)$$

Подставив (5) в (7), определяем э. д. с.

$$e_{дв}(\omega t) = \frac{k^2 x_p (1-s) k_{\sigma}}{\sqrt{r_{\Sigma p}^2 + (kx_{\Sigma p})^2}} E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \times$$

$$\times [\cos(k \omega t - \varphi_{\Sigma p}) - \sin \varphi_{\Sigma p} \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p})] +$$

$$+ k^2 x_p \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} \zeta_p k_{\sigma} (1-s) I_{op} \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t). \quad (8)$$

После подстановки (8) в (6) и интегрирования в пределах от $t=0$ до $t=\varepsilon$ получаем

$$i_p'(\varepsilon) = \zeta_p I_{op}', \quad (9)$$

где

$$\zeta_p = \frac{x_1 + x_2' - x_{r'}}{x_1 + x_2' + x_{r'}};$$

I_{op}' — значение тока ротора на предыдущем интервале.

На рабочем интервале приведенный ток ротора определяется из выражения

$$kx_{\Sigma p} \frac{di_p'}{d(\omega t)} + r_{\Sigma p} i_p' = E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin k \omega t - e_{дв}(\omega t), \quad (10)$$

где $x_{\Sigma p} = x_{r'} + x_1 + x_2'$, $r_{\Sigma p} = r_{r'} + r_1 + r_2$.

Решение уравнения (10) с учетом (8) и (9) запишется

$$i_p'(\omega t) = E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \left| \frac{1}{\sqrt{r_{\Sigma p}^2 + (kx_{\Sigma p})^2}} \times \right.$$

$$\times \left\{ \sin(k \omega t - \varphi_{\Sigma p}) - \frac{k^2 x_p (1-s) k_{\sigma}}{\sqrt{r_{\Sigma p}^2 + (kx_{\Sigma p})^2}} [\cos(k \omega t - \varphi_{\Sigma p}) - \right.$$

$$\left. - \cos \varphi_{\Sigma p} \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t)] \right\} - k r_{\Sigma p} \zeta_p (1-s) k_{\sigma} \times$$

$$\times I_{op} \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t) + \left| \zeta_p I_{op}' + \frac{kx_p k_{\sigma} (1-s)}{\sqrt{r_{\Sigma p}^2 + (kx_{\Sigma p})^2}} \right| \times$$

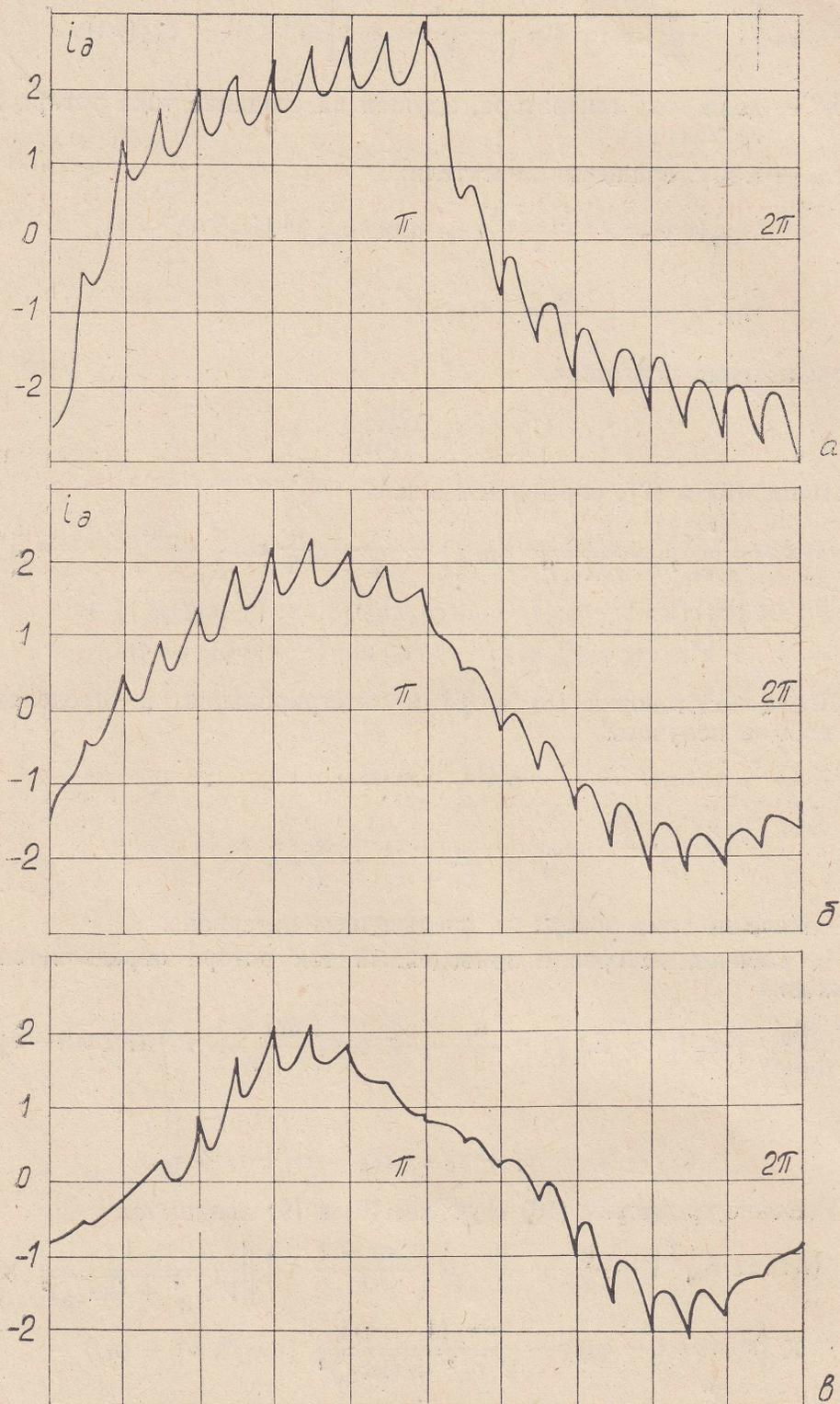


Рис. 2. Кривые тока двигателя при различной глубине амплитудной модуляции э. д. с. генератора: а) при $a=0$, б) при $a=0,6$, в) при $a=1$

$$\times \left\{ E_m \left[1 - \frac{a}{2} - \frac{a}{2} \cos \left(\frac{2m+1}{k} \pi \right) \right] \sin \varphi_{\Sigma p} + k \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma \mu} \zeta_{\mu} I_{0\mu} \right\} \times \exp(-\operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} k \omega t), \quad (11)$$

где $\varphi_{\Sigma p} = \operatorname{arctg} \frac{kx_{\Sigma p}}{r_{\Sigma p}}, \operatorname{ctg} \varphi_{\Sigma p} = \frac{r_{\Sigma p}}{kx_{\Sigma p}}.$

Решая совместно (5), (11) и (1), можно по интервалам рассчитать кривую тока двигателя при различной глубине амплитудной модуляции э. д. с. синхронного генератора с учетом э. д. с. вращения асинхронного двигателя. На рис. 2 приведены расчетные кривые при $a=0$, $a=0,6$ и $a=1$. Во всех случаях можно наблюдать искажение формы тока, вызванное влиянием э. д. с. двигателя. Следует отметить, что форма тока также существенно зависит и от глубины амплитудной модуляции.

Выводы

1. В результате проведенного анализа электромагнитных процессов получены уравнения, позволяющие построить кривую тока двигателя при различной глубине модуляции э. д. с. синхронного генератора с учетом коммутации вентилей циклопреобразователя.

2. В модуляционном источнике существенное влияние на коммутационные процессы оказывают индуктивные сопротивления рассеяния асинхронного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Коробицин, В. Н. Кочнев, Б. А. Лопато, Г. Г. Ордуянц, И. М. Серый, А. А. Янко-Триницкий. Метод расчета электромагнитных процессов в управляемых вентильных преобразователях. Респ. межвед. научн. техн. сб.: «Теоретическая электротехника», вып. 12, Львов, 1971.
2. В. А. Денисов, Ш. С. Ройз, Н. Ф. Жмаев. «Анализ выходного напряжения модуляционных автономных источников стабильной частоты». Известия ТПИ, т. 284, Томск, изд-во ТГУ, 1974.