

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МОМЕНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. П. ЛЯНЗБУРГ, В. И. ПАНТЕЛЕЕВ, Б. П. СОУСТИН

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ)

В релейных системах управления моментом асинхронного двигателя (а. д.) при динамической нагрузке зачастую возникает задача формирования момента в широком динамическом диапазоне. При этом скважность импульсов изменяется от 0 до 1, то есть длительность импульсов может измеряться единицами периодов питающего напряжения. Кроме того, необходимо выполнение требования экономического регулирования. Принципы экономического регулирования, разработанные для обычных приводов при непрерывном управлении в режиме минимального тока [1], в этом случае неприменимы.

При исследовании подобных импульсных систем обычно предполагается, что при подключении статора к источнику питания с неизменным напряжением в двигателе мгновенно возникает момент неизменной амплитуды в течение всего действия импульса, то есть форма момента повторяет форму импульсов управления. Видимо, это допущение справедливо, если время импульса управления во много раз превышает время переходного процесса. При уменьшении времени импульса управления необходимо учитывать влияние переходных электромагнитных процессов, что в литературе в настоящее время не освещено.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при скважности импульсов управления меньше единицы, электромагнитные процессы за время паузы затухают, и каждое новое включение происходит при нулевых начальных условиях. Это условие может не соблюдаться при скважности, весьма близкой к единице, однако в этом случае время переходного процесса, как правило, занимает доли процента от времени действия импульса и следует воспользоваться допущением о пренебрежении электромагнитными переходными процессами.

При анализе предполагается, что источник питания может формировать либо синусоидальное напряжение, либо синусоидальный ток, скольжение а. д. за время действия импульса остается неизменным, так как не меняется частота питающего напряжения и скорость вращения ротора из-за большого приведенного момента инерции.

Для исследования поведения а. д. при питании от источника с синусоидальным напряжением уравнения двигателя записываются через потокосцепления статора и ротора для двух осей  $\alpha$  и  $\beta$  [2].

$$\frac{d\Psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - \alpha_s' \Psi_{\alpha s} + k_r \alpha_s' \Psi_{\alpha r} + \omega_k \Psi_{\beta s};$$

$$\frac{d\Psi_{\beta s}}{dt} = -\alpha_s' \Psi_{\beta s} + k_r \alpha_s' \Psi_{\beta r} - \omega_k \Psi_{\alpha s};$$

$$\frac{d\Psi_{\beta s}}{dt} = -\alpha_s' \Psi_{\alpha r} + k_s \alpha_r' \Psi_{\beta s} + (\omega_k - \omega) \Psi_{\beta r};$$

$$\frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} = -\alpha_r' \Psi_{\beta r} + k_s \alpha_r' \Psi_{\beta s} + (\omega_k - \omega) \Psi_{\alpha r};$$

$$i_{\alpha s} = \frac{\Psi_{\alpha s} - k_r \Psi_{\alpha r}}{\sigma L_s}; \quad i_{\beta s} = \frac{\Psi_{\beta s} - k_r \Psi_{\beta r}}{\sigma L_s};$$

$$M = \frac{k_r}{\sigma L_s} (\Psi_{\beta s} \Psi_{\alpha r} - \Psi_{\alpha s} \Psi_{\beta r});$$

$$P_{\alpha s} = \frac{m}{2} (i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2) r_s; \quad P_{\alpha r} = M \cdot \Delta \omega.$$

Здесь

$k_s, k_r$  — коэффициенты связи ротора и статора;

$U_{\alpha s}, i_{\alpha s}, i_{\beta s}, \Psi_{\alpha s}, \Psi_{\beta s}, \Psi_{\alpha r}, \Psi_{\beta r}$  — напряжение, токи статора, потокосцепления статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;

$\alpha_s', \alpha_r'$  — коэффициенты затухания статора и ротора;

$L_s, L_r, L_m, r_s, r_r$  — относительные параметры двигателя по Т-образной схеме замещения;

$\sigma$  — коэффициент рассеяния по Блонделю.

Решение приведенной системы уравнений обычным способом вызывает значительные трудности и поэтому уравнения а. д. решались на АВМ. Для этого потребовались две машины МН-7, включенных последовательно.

При анализе использовались параметры трехфазного двигателя, имеющего следующие данные:  $U_H = 27$  В,  $I_{\Phi} = 2,88$  А,  $r_1 = 0,807$  Ом,

$$r_2 = 0,862 \text{ Ом}; \quad L_s = \frac{x_1 + x_0}{Z_0} = 3,12; \quad L_r = \frac{x_2 + x_0}{Z_0} = 3,14;$$

$$L_m = \frac{x_0}{Z_0} = 2,99; \quad Z_0 = \frac{U_H}{I_H} = 9,38 \text{ Ом}.$$

На рис. 1 приведена модель вычисления всех промежуточных и основных величин при подключении вращающегося двигателя с затухшим полем на постоянное синусоидальное напряжение статора. Осциллографировались следующие величины: момент двигателя, электрические потери в статоре  $P_{\alpha s}$ , роторе  $P_{\alpha r}$  и их сумма  $P_{\alpha \Sigma}$ , полезная мощность  $P_{\text{пол}}$ .

При анализе считается, что потери в стали постоянны при всех значениях скольжения и незначительны, поэтому они не учитывались. Для вычисления энергии потерь необходимо включение блоков, объединенных пунктирной линией.

Для оценки экономичности использования источника вводится следующий критерий:

$$K_{\text{ин}} = \frac{\int_0^{\text{tn}} M(t) dt}{\int_0^{\text{tn}} P_{\alpha \Sigma}(t) dt}$$

отношение среднего значения момента а. д. к среднему значению электрических потерь за время действия импульса управления.

Очевидно, в установившемся режиме коэффициент использования источника равен  $K_{\text{ин}} = \frac{M}{P_{\alpha \Sigma}}$

$$K_{\text{ин}} = \frac{M}{P_{\Sigma}}$$

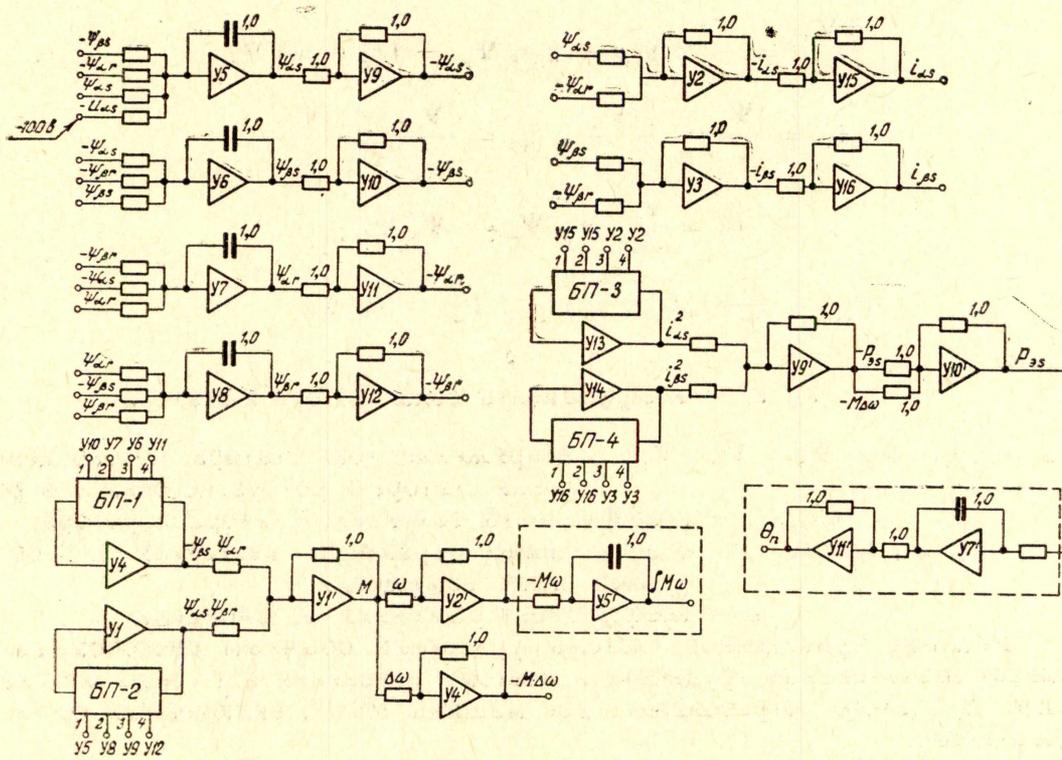
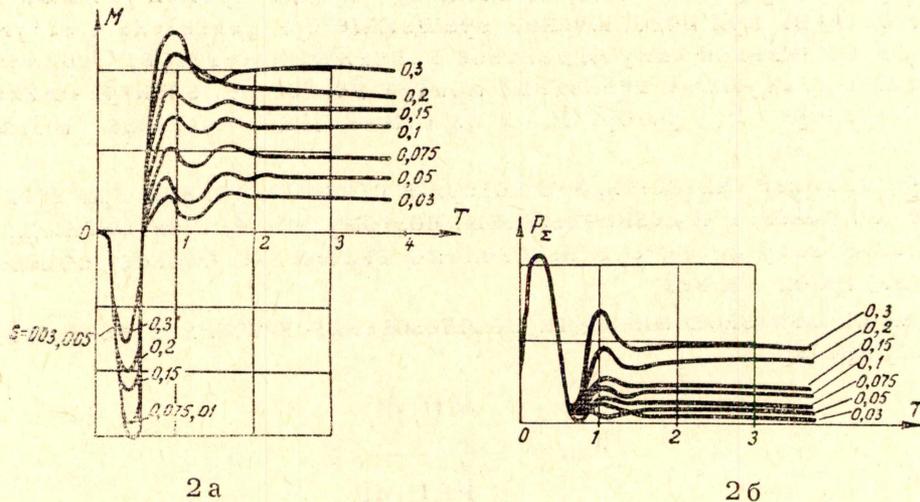


Рис. 1.

На рис. 2, а приведена зависимость момента во времени при подключении двигателя к синусоидальному напряжению для различных скольжений, на рис. 2, б — электрические потери в двигателе при тех же скольжениях, на рис. 3 — коэффициент использования источника.



Из рис. 2, 3 видно, что в момент подключения двигателя к источнику с синусоидальным напряжением возникает отрицательный момент при значительных потерях в двигателе, и, хотя переходный процесс заканчивается быстро, начальный участок оказывает большое влияние на средние значения момента, полные электрические потери в двигателе и на коэффициент использования источника. Из рис. 3 видно также, что

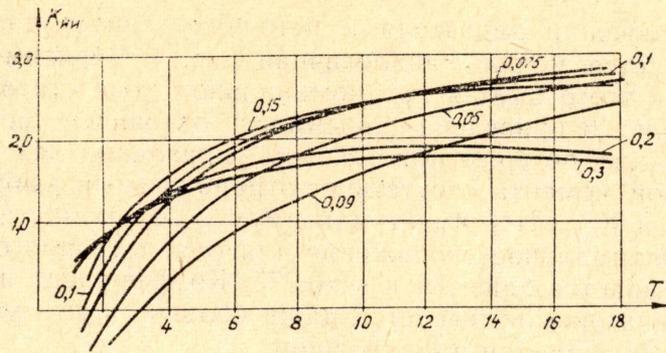


Рис. 3.

при известной ширине импульса управления для получения максимального коэффициента  $K_{ин}$  необходимо выбирать свое скольжение. Предположение о постоянстве среднего значения момента за время действия импульса будет справедливо для длительности импульса более 150 периодов питающего напряжения, причем с меньшей погрешностью при большем скольжении.

Оптимальное скольжение с точки зрения минимальных потерь в установившемся режиме равно 0,06—0,09 (рис. 4). В момент подключения двигателя к источнику напряжения невозможно получить отношение момента к полным потерям более, чем в установившемся режиме при любых скольжениях.

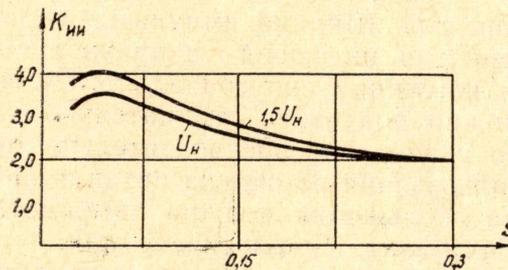


Рис. 4.

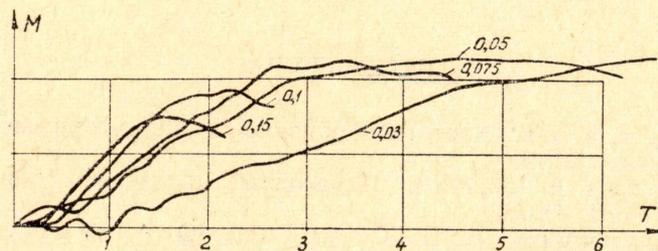


Рис. 5.

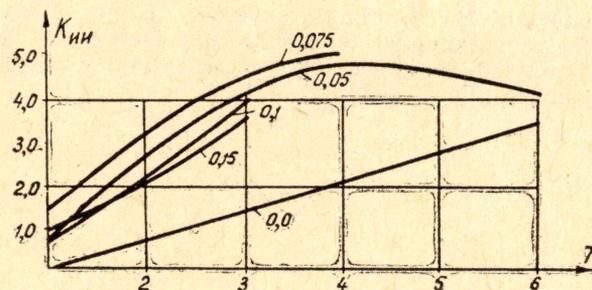


Рис. 6.

При подключении двигателя к источнику синусоидального тока [3, 4] составляется модель, аналогичная рис. 1. Зависимость момента во времени для этого случая при номинальном токе статора приведена на рис. 5, на рис. 6 приведена зависимость отношения момента к полным электрическим потерям при токовом управлении. Из рис. 5, 6 видно, что в кривой момента отсутствует отрицательный выброс и зависимость  $M=f(t)$  и  $K_{\text{ин}}=f(t)$  имеет максимум в зависимости от величины скольжения. Оптимальное скольжение для рассмотренного двигателя в динамике оказывается близким к  $s=0,075$ . Коэффициент использования источника в динамике оказывается даже больше, чем в установившемся режиме при управлении напряжением.

Повышение напряжения в первом случае уменьшает использование источника в динамике из-за значительного увеличения отрицательного момента, в статике же увеличение напряжения увеличивает  $K_{\text{ин}}$ . Так, для  $s=0,1$  при  $U=1,5U_N$   $K_{\text{ин}}=4,8$  вместо 3,2 при  $U=U_N$ . При увеличении тока улучшаются динамические показатели. Экспериментальные данные оказываются ниже приведенных из-за неучета потерь в стали и нелинейности кривой намагничивания.

Подключение а. д. к источникам с несинусоидальным выходом дает дополнительные погрешности и требует дополнительных исследований.

### Выводы

При импульсном управлении а. д. обязателен учет электромагнитных переходных процессов. Ширина импульсов управления длительностью менее 2—3 периодов питающего напряжения не допустима при подключении а. д. к источнику синусоидального напряжения, так как в этом случае возможно получение отрицательного эффекта. Во всех случаях импульсного управления предпочтительно токовое управление. Для увеличения использования источника питания при узких импульсах управления величина скольжения должна выбираться в зависимости длительности этого импульса. Допущение о прямоугольной форме момента при импульсном управлении справедливо лишь при значительной продолжительности импульса (при  $s=s_N$  не менее 150—200 периодов питающего напряжения).

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Булгаков. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., «Наука», 1966.
2. К. П. Ковач и И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л., ГЭИ, 1963.
3. В. И. Иванчура, Б. П. Соустин, Ю. А. Шурыгин. Исследование мостовых инверторов при формировании синусоидального тока. Сб. «Повышение эффективности устройств преобразовательной техники». Ч. 3. Киев, «Наукова думка», 1972.
4. И. Ф. Калинин, В. И. Пантелеев, Б. П. Соустин. Исследование динамики пуска асинхронного двигателя при частотно-токовом управлении. Доклады юбилейной научно-технической конференции факультета автоматических систем. Томск, изд-во ТГУ, 1970.