Записки Ленинградского горного института.
Т. 128. СПб., 1991

УДК 621.316.7

А.П.ЕМЕЛЬЯНОВ, З.Б.СЛЕПЦОВА

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для увеличения возможностей применения электроприводов переменного тока с различными системами управления, в том числе и для тех механизмов, где установка тахогенератора недопустима или нежелательна, на кафедре электрических машин и автоматизированного привода ЛГИ разработано устройство, позволяющее косвенным методом определить скорость вращения, а также составляющие потокосцеплений статора и ротора асинхронного двигателя (АД) [2].

Исходным для вывода алгоритма работы устройства является уравнение равновесия ЭДС для роторной цепи АД в неподвижной системе координат

$$\frac{d\bar{\psi}_r}{dt} - \frac{k_s}{T_r'}\bar{\psi}_s + \frac{1}{T_r'}\bar{\psi}_r - jz\omega\bar{\psi}_r = 0, \qquad (1)$$

где z - число пар полюсов; ω - скорость вращения ротора; T_r', k_s - величины, определяемые параметрами двигателя, $T_r' = L_r'/R_r$, $L_r' = L_r - L_m^2/L_s$, $k_s = L_m/L_s$.

Используя уравнения связи

$$\bar{\psi}_s = L_s\bar{I}_s + L_m\bar{I}_r,$$
$$\bar{\psi}_r = L_m\bar{I}_s + L_r\bar{I}_r,$$

запишем уравнение (1) в следующей форме:

$$L_s'\frac{d\bar{I}_s}{dt} - \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + \frac{L_s'}{T_r'}\bar{I}_s - \frac{1}{T_r}\bar{\psi}_s + jz\omega\bar{\psi}_s - j\omega zL_s'\bar{I}_s = 0,$$

где

$$L_s' = L_s - L_m^2/L_s; \quad T_r = L_r/R_r.$$

В проекции на неподвижную ось α статора получим

$$L_s'\frac{dI_{s\alpha}}{dt} - \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + \frac{L_s'}{T_r'}I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r}\psi_{s\alpha} - z\omega\psi_{s\beta} + z\omega L_s'I_{s\beta} = 0.$$

Отсюда

$$z\omega = \frac{\frac{d}{dt}(L_s'I_{s\alpha} - \psi_{s\alpha}) + \left(\frac{L_s'}{T_r'}I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r}\psi_{s\alpha}\right)}{\psi_{s\beta} - L_s'I_{s\beta}}. \qquad (2)$$

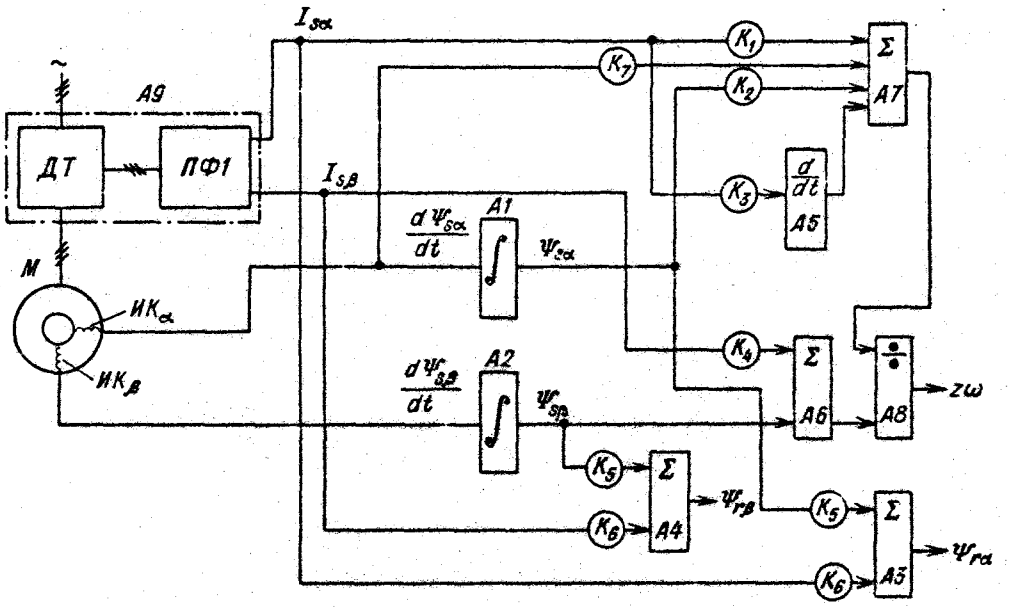


Рис.1. Устройство для определения координат АД с датчиком тока и измерительными катушками

На рис.I представлена схема, реализующая этот алгоритм, для случая непосредственного измерения производных $d\phi_{s\alpha}/dt$ и $d\phi_{s\beta}/dt$ с помощью измерительных катушек $ИК_\alpha$, $ИК_\beta$. Сигналы с измерительных катушек подаются на интеграторы со стабильным нулем AI и A2, где вычисляются составляющие вектора потокосцепления статора $\phi_{s\alpha}$, $\phi_{s\beta}$. Составляющие потокосцепления ротора $\phi_{r\alpha}$, $\phi_{r\beta}$ вычисляются соответственно с помощью сумматоров A3, A4 по алгоритмам

$$\phi_{r\alpha} = \frac{1}{k_r}\phi_{s\alpha} - \frac{L'_s}{k_r} I_{s\alpha}\,,$$

$$\phi_{r\beta} = \frac{1}{k_r}\phi_{s\beta} - \frac{L'_s}{k_r} I_{s\beta}\,, \qquad (3)$$

где $k_r = L_m / L_r$.

Составляющие тока статора $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ получаются с помощью трехфазного датчика тока ДТ и преобразователя фаз ПФI. Коэффициенты (рис.I) в соответствии с алгоритмами (2) и (3) равны:

$$k_1 = L'_s/T'_r\,, \quad k_2 = -1/T_r\,, \quad k_3 = L'_s\,, \quad k_4 = -L'_s\,,$$

$$k_5 = 1/k_r\,, \quad k_6 = -L'_s/k_r\,, \quad k_7 = -1\,.$$

На выходе делителя A8 по алгоритму (2) с помощью сумматоров A6 и A7 и дифференциатора A5 формируется сигнал, пропорциональный скорости вращения двигателя.

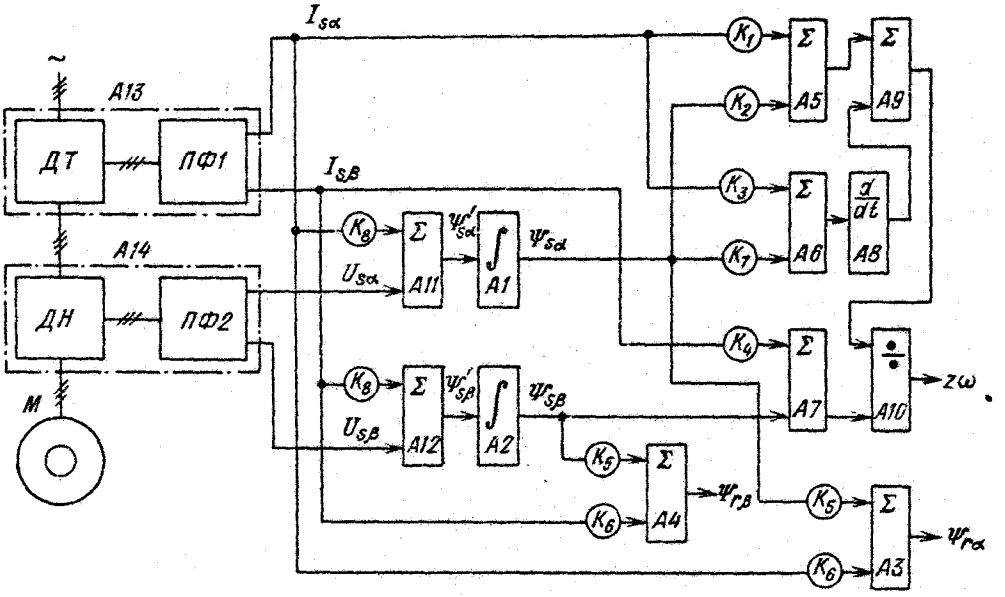


Рис.2. Устройство для определения координат АД с датчиками тока и напряжения

При отсутствии в двигателе измерительных катушек сигналы, пропорциональные производным от составляющих вектора потокосцепления статора, могут быть вычислены по алгоритмам

$$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - I_{s\alpha} R_s ,$$

$$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - I_{s\beta} R_s \qquad (4)$$

сумматорами A11 и A12, как показано на рис.2. Составляющие вектора напряжения статора получаются с помощью трехфазного датчика напряжения ДН и преобразователя фаз ПФ2.

В схеме, изображенной на рис.2, коэффициенты $k_1 - k_7$ такие же, как на рис.I, а $k_8 = R_S$.

Оценим точность определения параметров двигателя по рис.2. Исходные данные для расчета (значения погрешностей отдельных вычислительных модулей в конкретном исполнении) приведены в табл.I [I, 4]. Основные формулы и результаты расчета относительных погрешностей определения $\omega, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ даны в табл.2.

Пояснения к пунктам I, 2, 5-9 табл.2. Относительная погрешность разности $y = x_1 - x_2$ равна

$$\delta y = \frac{x_1}{y}\delta(x_1) + \frac{x_2}{y}\delta(x_2), \qquad (5)$$

где $\delta(x_1)$ и $\delta(x_2)$ - относительные погрешности слагаемых x_1 и x_2.

Исходные данные для расчета погрешности устройства по рис.2

Наименование и обозначение на рис.2	Относительная погрешность, %	Вариант реализации
Датчик токов А13	$\delta(I_{s\alpha}) = 1,5$ $\delta(I_{s\beta}) = 1,5$	Включает в себя трехфазный датчик фазных токов ДТ по схеме модулятор-демодулятор (погрешность около 1 % не зависит от частоты) и преобразователь фаз ПФ1, представляющий собой сумматор (погрешность около 0,5 %)
Датчик напряжений А14	$\delta(U_{s\alpha}) = 1,5$ $\delta(U_{s\beta}) = 1,5$	Включает в себя трехфазный датчик напряжений ДН по схеме модулятор-демодулятор (погрешность около 1 % не зависит от частоты) и преобразователь фаз ПФ2, представляющий собой сумматор (погрешность около 0,5 %)
Сумматоры А3-А7, А9-А12	$\delta_{\Sigma} = 0,5$	Сумматоры на микросхеме 140УД6 с прецизионными резисторами С2-29В (погрешность 0,05-1 %)
Интеграторы А1 и А2	$\delta_{инт} = 1$	Интеграторы со стабильным нулем
Дифференциатор А8	$\delta_{диф} = 1$	Дифференциатор на микросхемах 1100СК2 и 153УД2 по схеме для сигналов низкой частоты [1, с. 125]
Делитель А10	$\delta_{дел} = 1$	Делитель, построенный по методу переменной крутизны на усилителях 1401УД2 и дифференциальном каскаде [1, с. 114] с прецизионными резисторами С2-29В. Погрешность вычисления 1 % обеспечивается при диапазоне изменения значений знаменателя 10 мВ-1 В.

Таблица 2

Расчет погрешности устройства по рис.2

№ п/п	Элемент схемы, обозначение на рис.2	Реализуемая зависимость	Относительная погрешность на выходе, %	Расчетная формула
1	A11	$\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - I_{s\alpha}R_s$	$\delta\left(\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}\right) = 2$	$\delta\left(\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}\right) \approx \delta(U_{s\alpha}) + \delta_{\Sigma}$
2	A12	$\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - I_{s\beta}R_s$	$\delta\left(\frac{d\psi_{s\beta}}{dt}\right) = 2$	$\delta\left(\frac{d\psi_{s\beta}}{dt}\right) \approx \delta(U_{s\beta}) + \delta_{\Sigma}$
3	A1	$\psi_{s\alpha} = \int \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}\, dt$	$\delta(\psi_{s\alpha}) = 3$	$\delta(\psi_{s\alpha}) \approx \delta\left(\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}\right) + \delta_{\text{инт}}$
4	A2	$\psi_{s\beta} = \int \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}\, dt$	$\delta(\psi_{s\beta}) = 3$	$\delta(\psi_{s\beta}) \approx \delta\left(\frac{d\psi_{s\beta}}{dt}\right) + \delta_{\text{инт}}$
5	A3	$\psi_{r\alpha} = \frac{1}{k_r}\psi_{s\alpha} - \frac{L'_s}{k_r} I_{s\alpha}$	$\delta(\psi_{r\alpha}) = 3{,}5$	$\delta(\psi_{r\alpha}) \approx \delta(\psi_{s\alpha}) + \delta_{\Sigma}$

№ п/п	Элемент схемы, обозначение на рис.2	Реализуемая зависимость	Относительная погрешность на выходе, %	Расчетная формула
6	А4	$\psi_{r\beta} = \frac{1}{k_r}\psi_{s\beta} - \frac{L'_s}{k_r} I_{s\beta}$	$\delta(\psi_{r\beta}) = 3{,}5$	$\delta(\psi_{r\beta}) \approx \delta(\psi_{s\beta}) + \delta_{\Sigma}$
7	А5	$U_{A5} = \frac{L'_s}{T'_r} I_{s\alpha} - \frac{1}{T_r}\psi_{s\alpha}$	$\delta(U_{A5}) = 3{,}5$	$\delta(U_{A5}) \approx \delta(\psi_{s\alpha}) + \delta_{\Sigma}$
8	А6	$U_{A6} = L'_s I_{s\alpha} - \psi_{s\alpha}$	$\delta(U_{A6}) = 3{,}5$	$\delta(U_{A6}) \approx \delta(\psi_{s\alpha}) + \delta_{\Sigma}$
9	А7	$U_{A7} = \psi_{s\beta} - L'_s I_{s\beta}$	$\delta(U_{A7}) = 3{,}5$	$\delta(U_{A7}) \approx \delta(\psi_{s\beta}) + \delta_{\Sigma}$
10	А8	$U_{A8} = \frac{d}{dt}(U_{A6})$	$\delta(U_{A8}) = 4{,}5$	$\delta(U_{A8}) \approx \delta(U_{A6}) + \delta_{диф}$
11	А9	$U_{A9} = U_{A5} + U_{A8}$	$\delta(U_{A9}) = 5$	$\delta(U_{A9}) \approx \delta(U_{A8}) + \delta_{\Sigma}$
12	А10	$z\omega = \frac{U_{A9}}{U_{A7}}$	$\delta\omega = 9{,}5$	$\delta\omega \approx \delta(U_{A9}) + \delta(U_{A7}) + \delta_{дел}$

Из выражения (5) видно, что если $x_2 \ll x_1$, то $\delta y \approx \delta(x_1)$ [3].

В сумматорах AII, AI2 вычисляются разности $(U_{s(\alpha,\beta)} - I_{s(\alpha,\beta)} R_s)$, а в сумматорах A4-A7 – разности $(\phi_{s(\alpha,\beta)} - L'_s I_{s(\alpha,\beta)})$. При этом $I_{s(\alpha,\beta)} R_s \le k U_{s(\alpha,\beta)}$ (k = 0,I для машин мощностью до I5 кВт и k = = 0,03-0,05 для машин большей мощности) и $L'_s I_{s(\alpha,\beta)} \le 0{,}1\,\phi_{s(\alpha,\beta)}$ (поток рассеяния относительно полного потока). Поэтому можно считать, что относительная погрешность на выходе AII, AI2

$$\delta(U_{A11,A12}) = \delta(U_{s(\alpha,\beta)}) + \delta_{\Sigma},$$

где δ_{Σ} = 0,5 % – относительная погрешность, вносимая сумматором; соответственно относительная погрешность разностей на выходе A3–A7

$$\delta(U_{A3-A7}) = \delta(\phi_{s(\alpha,\beta)}) + \delta_{\Sigma}.$$

Пояснение к пункту II табл.2. Относительная погрешность суммы на выходе A9

$$\delta(U_{A9}) = \frac{U_{A5}\delta(U_{A5}) + U_{A8}\delta(U_{A8})}{U_{A5} + U_{A8}},$$

где $\delta(U_{A5})$= 3,5 %, $\delta(U_{A8})$ = 4,5 % – относительные погрешности на выходе A5 и A8; принимая завышенное значение $\delta(U_{A5}) \approx \delta(U_{A8})$ = 4,5 %, получим

$$\delta(U_{A9}) \approx \delta(U_{A8}) + \delta_{\Sigma}.$$

Из данных табл.2 видно, что в устройстве по схеме на рис.2 относительная погрешность определения скорости вращения менее I0 %, а относительная погрешность определения составляющих потокосцепления ротора 3,5 %.

Точность работы схемы по рис.I выше, так как в ней выше точность определения производных от составляющих потокосцепления статора и выполнение того же алгоритма осуществляется с меньшим количеством сумматоров.

Аналогичным способом может быть получен алгоритм определения скорости вращения машины двойного питания. Учитывая, что

$$\frac{L'_s}{T'_r} = \frac{L_s}{T_r}, \qquad \psi_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} + L_m I_{r\alpha}$$

и

$$\psi_{s\beta} = L_s I_{s\beta} + L_m I_{r\beta},$$

из выражения (2) получим

$$z\omega = \frac{\frac{d}{dt}(L'_s I_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha} - L_m I_{r\alpha}) + \frac{1}{T_r}(L_s I_{s\alpha} - L_s I_{s\alpha} - L_m I_{r\alpha})}{L_s I_{s\beta} + L_m I_{r\beta} - L'_s I_{s\beta}}, \quad (6)$$

где $I_{r\alpha}$, $I_{r\beta}$ – составляющие вектора тока ротора.

Так как

$$L'_s I_{s\alpha} = L_s I_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} I_{s\alpha},$$

$$L'_s I_{s\beta} = L_s I_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} I_{s\beta},$$

можно выражение (6) упростить:

$$z\omega = \frac{\frac{d}{dt}\left(-\frac{L_m^2}{L_r} I_{s\alpha} - L_m I_{r\alpha}\right) + \frac{1}{T_r}\left(-L_m I_{r\alpha}\right)}{L_m I_{r\beta} + \frac{L_m^2}{L_r} I_{s\beta}} =$$

$$= -\frac{\frac{d}{dt}\left(k_r I_{s\alpha} + I_{r\alpha}\right) + \frac{1}{T_r} I_{r\alpha}}{I_{r\beta} + k_r I_{s\beta}}. \qquad (7)$$

Схема, реализующая алгоритм (7), представлена на рис.3. Она содержит два трехфазных датчика тока ДТ1, ДТ2, два преобразователя фаз ПФ1, ПФ2, три сумматора, дифференциатор и делитель. Значения коэффициентов: $k_1 = k_4 = k_r$; $k_2 = k_5 = 1$; $k_3 = 1/T_r$. Относительная погрешность определения скорости вращения для машины двойного питания по рис.3, рассчитанная при тех же исходных данных, составит менее 7 %.

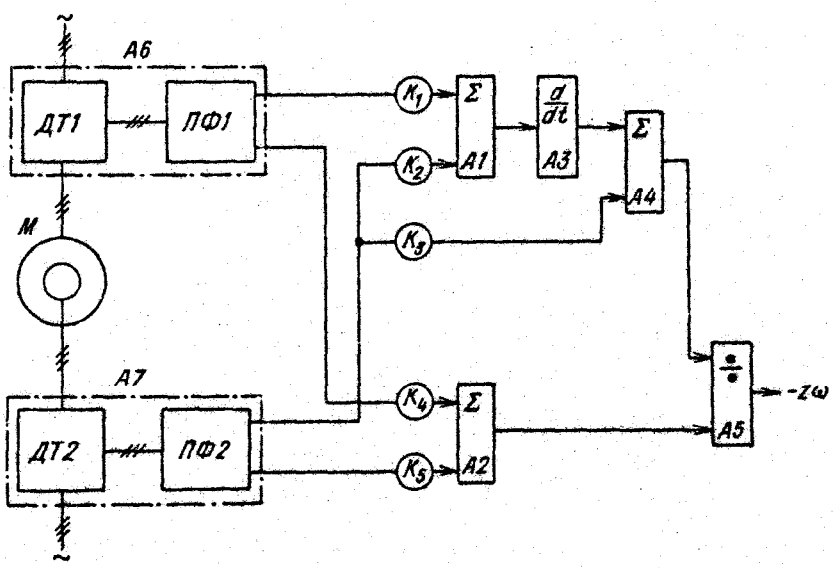


Рис.3. Устройство для определения скорости вращения машины двойного питания

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985.

2. А.с. 1283926 СССР. Устройство для определения координат асинхронного двигателя / И.М.Столяров, А.П.Емельянов, Г.А.Синельников, Н.И.Литвинов //Бюл. изобр. 1987, № 2.

3. Математический практикум / Г.Н.Положий, Н.А.Пахарева, И.З.Степаненко, П.С.Бондаренко, И.М.Великоиваненко. М.: ГИФМЛ, 1960.

4. Нестеренко Б.К. Интегральные операционные усилители: Справочное пособие по применению. М.: Энергоиздат, 1982.