Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIV, 1982 г.

УДК 621.3.078

АНАЛИЗ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОДИНАКОВОЙ ЧАСТОТЫ

В.Вик.РУДАКОВ

Последовательное включение двух источников переменного тока одинаковой частоты позволит регулировать величину и фазу питающего асинхронный двигатель напряжения. В векторной форме напряжение источников энергии одинаковой частоты можно записать в следующем виде:

$$\dot{U}_1 = U_{m1} e^{j(\omega t - \varphi_1)};$$
$$\dot{U}_2 = U_{m2} e^{j(\omega t - \varphi_2)}. \qquad (1)$$

Суммарное напряжение на зажимах асинхронного двигателя

$$\dot{U}_\Sigma = U_{m\Sigma} e^{j(\omega t - \varphi_\Sigma)}, \qquad (2)$$

где

$$U_{m\Sigma} = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m2}^2 + 2 U_{m1} U_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)};$$

$$\varphi_\Sigma = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_{m1}\sin\varphi_1 + U_{m2}\sin\varphi_2}{U_{m1}\cos\varphi_1 + U_{m2}\cos\varphi_2}\right).$$

Векторные уравнения асинхронного двигателя для этого напряжения можно записать в виде [2].

$$\dot{U}_{АД} = \dot{U}_\Sigma = \dot{I}_1(z_\Sigma + z_1) + \dot{I}_0 z_0;$$
$$0 = \dot{I}_2' z_2' + \dot{I}_2' r_2 \frac{1-s}{s} + \dot{I}_0 z_0; \qquad (3)$$
$$I_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2,$$

где z_Σ – внутреннее сопротивление источников.

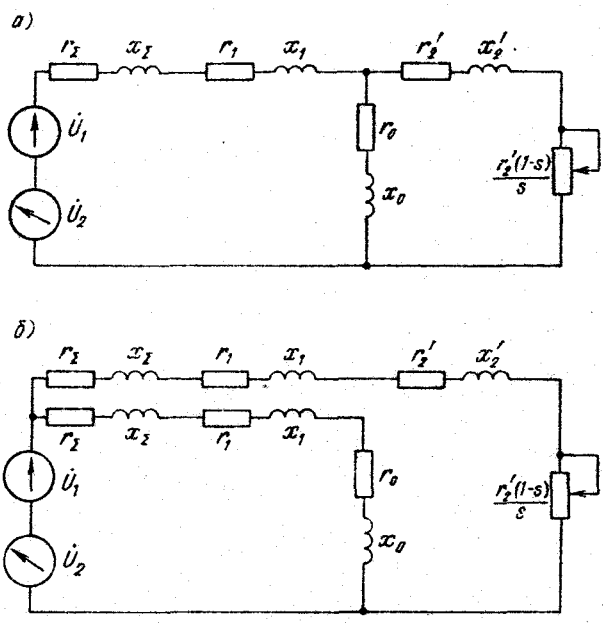


Рис.1. Эквивалентные схемы асинхронного двигателя при питании от двух последовательно включенных источников напряжения: а - исходная; б - преобразованная

На основании системы уравнений (3) может быть составлена эквивалентная схема (рис.I, а)

На рис.I, а предполагается, что один источник $\dot{U}_1$ бесконечной мощности с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением, а второй $\dot{U}_2$ имеет внутреннее сопротивление $z_\Sigma = r_\Sigma + jx_\Sigma$. Для анализа свойств асинхронного двигателя в его эквивалентной схеме намагничивающий контур выносят на неизменяющийся источник питания [2], т.е. на суммарное напряжение $\dot{U}_\Sigma = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$ (рис.I, б). В результате такого преобразования добавляется сопротивление z_Σ как в контур намагничивающего тока двигателя, так и в контур главного тока двигателя.

Предположим для дальнейшего исследования, что параметры асинхронного двигателя и второго источника питания неизменные. В этом случае исследование свойств асинхронного двигателя при работе от двух последовательно включенных источников можно выполнить методом наложения посредством круговых диаграмм. На рис.2 приведено построение круговых диаграмм асинхронного двигателя при работе от основного источника питания $\dot{U}_1$ и вспомогательного источника питания, напряжение $\dot{U}_2$ которого упреждает напряжение $\dot{U}_1$ на угол $\varphi = +\pi/2$. Токи холостого хода от основного и вспомогательного напряжения

$$\dot{I}_{01} = -\frac{\dot{U}_1}{z_\Sigma + z_1 + z_0}; \qquad \dot{I}_{02} = \frac{\dot{U}_2}{z_\Sigma + z_1 + z_0}.$$

Диаметры круговых диаграмм от основного и вспомогательного напряжений соответственно

$$\overline{Д}_1 = m_i\left(\frac{U_1}{x_\Sigma + x_1 + x_2'}\right); \quad \overline{Д}_2 = m_i\left(\frac{U_2}{x_\Sigma + x_1 + x_2'}\right).$$

При фазовом сдвиге напряжения $\dot{U}_2$ относительно напряжения $\dot{U}_1$ на упреждающий угол $\frac{\pi}{2}$ основной полукруг расположится в 1-м квадранте, а вспомогательный - во 2-м квадранте.

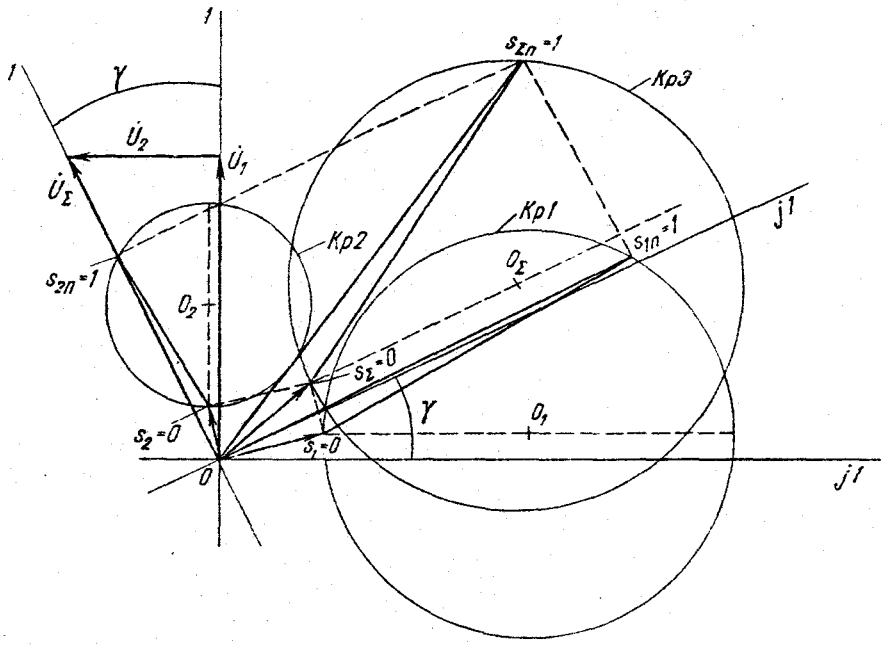


Рис.2. Круговая диаграмма асинхронного двигателя при работе от двух источников напряжения

Для получения суммарной круговой диаграммы асинхронного двигателя можно выполнить сложение векторов тока двигателя от основного напряжения $\dot{U}_1$ и вспомогательного $\dot{U}_2$ для одних и тех же значений скольжения. В результате получится круг бо́льшего диаметра, чем основной, и повернутый относительно оси абсцисс на угол $\gamma = \operatorname{arctg}(U_2/U_1)$. На рис.2 суммарная круговая диаграмма асинхронного двигателя при питании от двух источников напряжения обозначена КрЭ. Поворот круговой диаграммы на угол γ указывает на возможность повышения $\cos\varphi$ двигателя относительно основного напряжения питания $\dot{U}_1$.

Выполняя построение суммарной круговой диаграммы от эквивалентного суммарного напряжения $U_\Sigma = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$, учет фазового сдвига этого напряжения относительно напряжения сети на угол γ можно выполнить поворотом на угол γ вектора суммарного напряжения и ориентированных по нему осей координат. В этом случае на угол γ будет повернут круг оценки $\cos\varphi$ двигателя относительно основного напряжения $\dot{U}_1$. На рис.3 приведено построение суммарной круговой диаграммы асинхронного двигателя при питании от двух напряжений, сдвинутых на угол $\pi/2$.

Исходные соотношения для построения следующие. При скорости идеального холостого хода двигателя $s = 0$ ток определяется выражением

$$\dot{I}_{10} = \frac{\dot{U}_\Sigma}{z_\Sigma + z_1 + z_0}. \qquad (4)$$

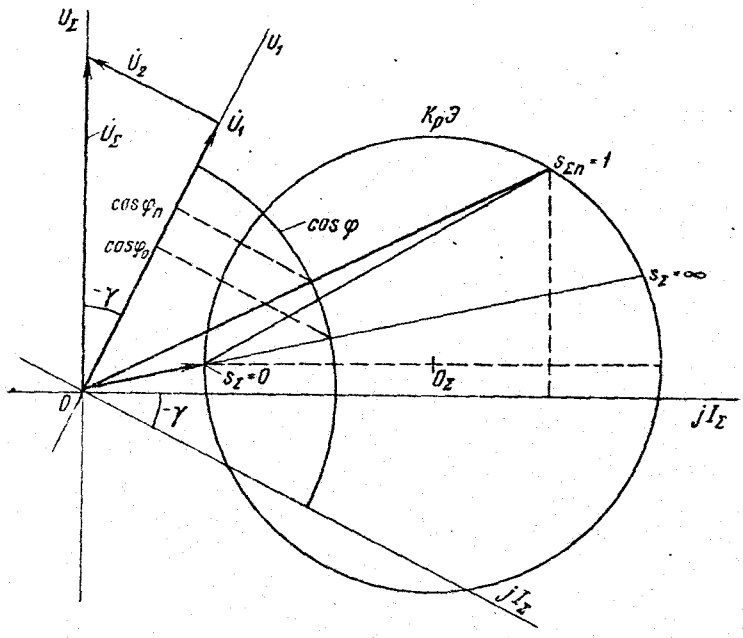


Рис.3. Эквивалентная круговая диаграмма асинхронного двигателя при питании от двух источников напряжения

Пусковой ток двигателя при $s_{\Sigma n}=1$ определяется выражением

$$\dot{I}_{1n}=\frac{\dot{U}_\Sigma}{z_\Sigma+z_1+\dfrac{z_0 z_2'}{z_0+z_2'}}. \qquad (5)$$

Отсюда сопротивление короткого замыкания асинхронного двигателя

$$z_к=z_\Sigma+z_1+\frac{z_0 z_2'}{z_0+z_2'}. \qquad (6)$$

Для упрощения преобразований введем следующие комплексные коэффициенты:

$$\dot{c}_1=\frac{z_\Sigma+z_1+z_0}{z_0}; \qquad \dot{c}_2=\frac{z_0+z_2'}{z_0} \qquad (7)$$

или

$$\dot{c}_1=c_{1m}e^{j\Psi_1}; \qquad \dot{c}_2=c_{2m}e^{j\Psi_2}, \qquad (8)$$

где

$$c_{1m}=\sqrt{\frac{(r_\Sigma+r_1+r_0)^2+(r_1+r_\Sigma)^2+(x_\Sigma+x_1+x_0)^2+(x_\Sigma+x_1)^2}{r_0^2+x_0^2}};$$

$$\Psi_1=\operatorname{arctg}\left(\frac{r_\Sigma+r_1+r_0}{x_\Sigma+x_1+x_0}\right);$$

$$c_{2m} = \sqrt{\frac{(r_0 + r_2')^2 + r_2'^2 + (x_0 + x_2')^2 + x_2'^2}{r_0^2 + x_0^2}};$$

$$\Psi_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{r_0 + r_2'}{x_0 + x_2'}\right).$$

С учетом выражений (7)-(8) уравнения для токов асинхронного двигателя получаются следующие:

$$\dot{I}_{10} = \frac{\dot{U}_\Sigma}{c_1 z_0}; \quad \dot{I}_{1n} = \frac{\dot{U}_\Sigma}{z_\Sigma + z_1 + \frac{z_2'}{c_2}}. \qquad (9)$$

Для сохранения уровня токов двигателя и диаметра его круговой диаграммы необходимо, чтобы зависимость между параметрами источников, удовлетворяла условию

$$\frac{\dot{U}_\Sigma}{x_\Sigma + x_{ke}} = \frac{\dot{U}_н}{x_{ke}}$$

или

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \ln\frac{x_\Sigma}{x_{ke}} + \ln\frac{U_{1m}}{U_{2m}},$$

где $\dot{U}_н$ – номинальное напряжение асинхронного электродвигателя; x_{ke} – сопротивление короткого замыкания асинхронного электродвигателя.

Соотношение фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ позволяет установить максимально возможное значение тока ротора асинхронной машины I_2' неизменным. Оно показывает также, что при формировании искусственных характеристик асинхронного двигателя в системе питания от двух последовательно включенных источников одинаковой частоты с различными амплитудами и фазами воздействовать можно на три физические величины: соотношение напряжений источников по амплитуде; соотношение реактивных сопротивлений короткого

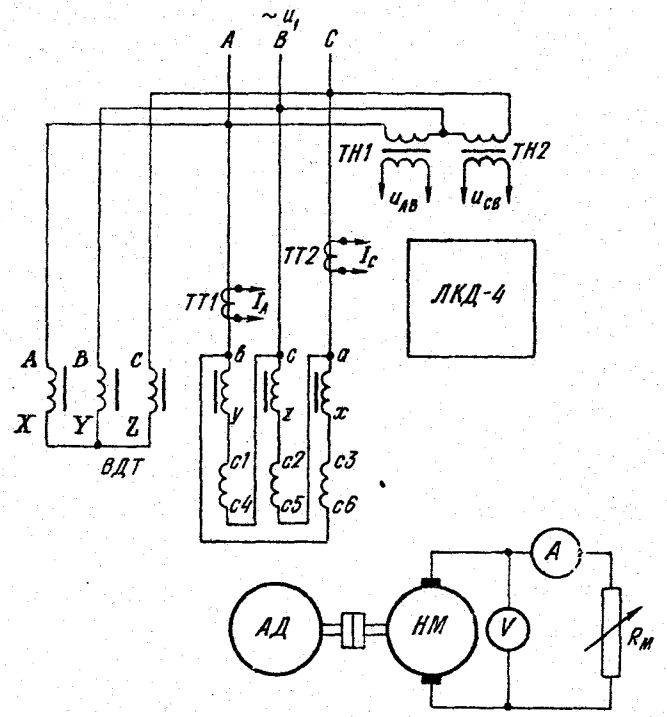


Рис.4. Схема экспериментальной установки питания асинхронного двигателя от двух источников напряжения

замыкания асинхронного электродвигателя и суммарного внутреннего сопротивления источников; разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ между напряжениями источников.

При питании от двух последовательно включенных источников одной частоты с разными амплитудой и фазой напряжения можно, помимо регулирования $\cos\varphi$ относительно основного сетевого напряжения, изменять вид механической характеристики двигателя. Для оценки этих возможностей было выполнено экспериментальное исследование круговых диаграмм асинхронного двигателя при питании от двух последовательно включенных источников напряжения с фазовым сдвигом второго напряжения на упреждающий угол $\pi/2$ (рис.4). Второе напряжение на зажимы асинхронного двигателя в экспериментальной установке подавалось от вольтдобавочного трансформатора, включенного по квадратурной схеме [3].

Использовался двигатель типа А 42-4, $P_н$ = 2,8 кВт, $n_н$ = 1420 об/мин, соединение обмоток Δ $U_{1н}$ = 220 В, $I_{1н}$ = 10,5 А, $\cos\varphi_н$ = 0,84, $\eta_н$ = = 0,835. Вольтдобавочный трансформатор типа ТСШ 2,3/0,3; $P_н$ = 2,5 кВ·А, $c_к$ = 4,5 %, $U_{1ф}$ = 220 В, $I_{1н}$ = 3,8 А, $U_{2ф}$ = 133 В, $I_{2н}$ = 6,3 А. Первичная обмотка трансформатора была соединена в звезду и включена на напряжение сети 220 В. Вторичные обмотки были включены последовательно в цепь питания двигателя так, что к его фазному напряжению 220 В добавлялось под

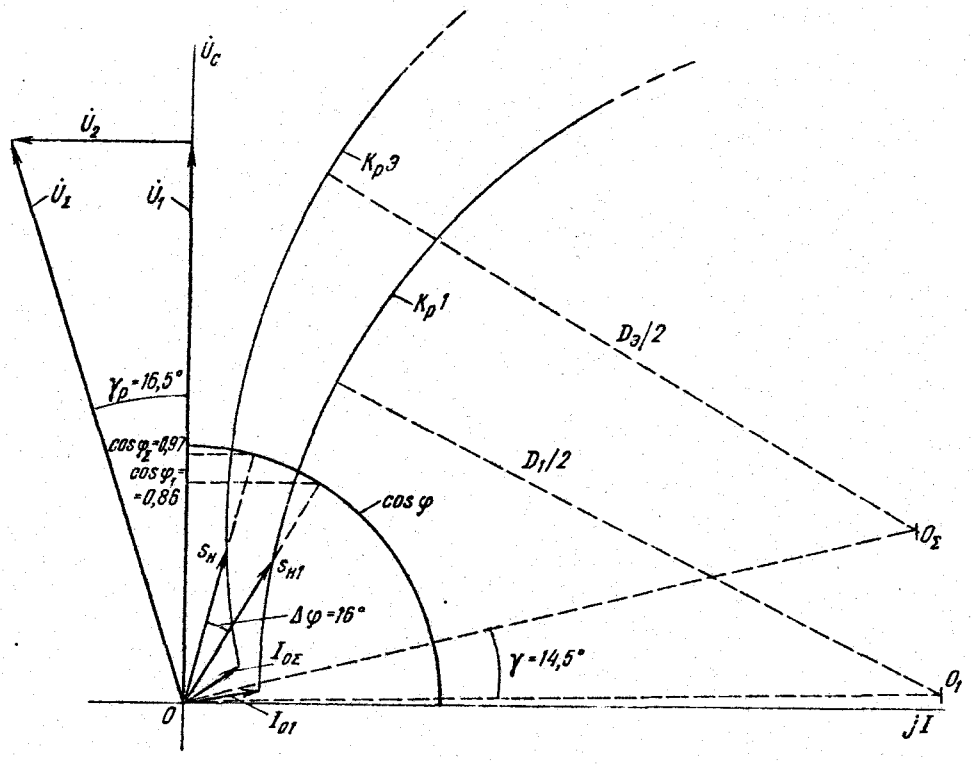


Рис.5. Экспериментальные круговые диаграммы асинхронного двигателя типа А 42-4 при работе с вольтдобавочным трансформатором (ВДТ)

углом $\frac{\pi}{2}$ в сторону упреждения напряжение 77 В. В результате на испытуемый двигатель подавалось эквивалентное напряжение $U_{1д} = 233$ В с фазовым сдвигом относительно сетевого напряжения $\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{77}{220}\right) = 19{,}5^{\circ}$.

Круговые диаграммы были записаны с помощью двухкоординатного потенциометра по датчикам активной и реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем из сети (рис.5). Включение второго напряжения $\dot{U}_2$ от ВДТ под углом $\pi/2$ вызвало поворот круговой диаграммы на угол $\gamma_э = 20^{\circ}$. При этом параметры ВДТ $\dot{U}_2$ и z_{Σ} выбраны такими, что диаметры круговых диаграмм практически оказались одинаковыми. Введение дополнительного z_{Σ} вызвало некоторое уменьшение тока холостого хода и существенное увеличение $\cos\varphi_0$ по отношению к основному напряжению $\dot{U}_1$. Ток короткого замыкания по значению в данном случае сохранился почти неизменным, а $\cos\varphi_к$ повысился до 0,9.

Достроенные круги диаграмм из центров по точкам пересечения нормалей (рис.5) дают возможность найти рабочие и механические характеристики двигателя. На рис.6 по диаграммам рис.5 построены рабочие характеристики испытуемого двигателя при питании от одного и двух источников напряжения. Питание двигателя от двух напряжений со сдвигом на угол $\pi/2$ позволяет существенно увеличить $\cos\varphi$ двигателя по отношению к основному напряжению питания $\dot{U}_1$. При номинальной нагрузке двигателя получено: $\cos\varphi_{\Sigma н} / \cos\varphi_{eн} = 0{,}94/0{,}83 = 1{,}14$. Расчетное повышение $\cos\varphi$ составляет $\cos\varphi_{\Sigma нр} / \cos\varphi_{eнр} = 0{,}97/0{,}84 = 1{,}15$.

Практическое совпадение результатов повышения $\cos\varphi_н$ свидетельствует о достаточной точности оценки свойств асинхронных двигателей при питании от двух источников напряжения предложенным методом эквивалентной круговой диаграммы асинхронного двигателя.

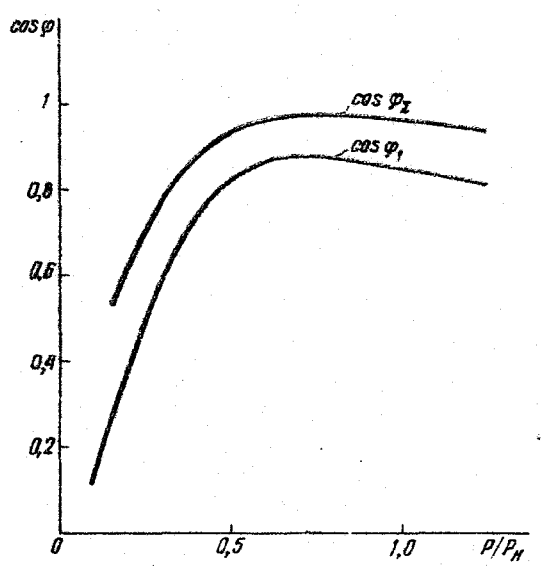


Рис.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя типа А 42-4 при питании от одного и двух источников напряжения

Для более крупных машин, где существенно изменение параметров ротора асинхронного двигателя, эквивалентная круговая диаграмма, очевидно, будет содержать две окружности - одну основную (рабочую) и вторую для точек пусковых токов двигателя. Принципиальных изменений в анализ свойств асинхронного двигателя при питании от двух источников напряжения по эквивалентным круговым диаграммам не вносится.

При регулировании величины квадратурного, второго, напряжения изменяются как диаметр кру-

говой диаграммы, так и угол поворота осей координат, т.е. получаются семейство круговых диаграмм и семейство косинусных кругов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.П. Электрические машины. М., Госэнергоиздат, 1949.

2. Петров Г.Н. Электрические машины. М., Госэнергоиздат, 1963.

3. Рудаков В.В., Павлов Ю.П. Оптимизация режимов асинхронного привода с тиристорными коммутаторами. – Известия вузов, Горный журнал, 1981, № 3.