

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИСТОЧНИКА НИЗКОЧАСТОТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Резник Д.В., ассист., Резник Е.А., ассист.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского*

*39600, г. Кременчуг, Полтавская обл., ул. Первомайская, 20*

*E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

**Введение.** Настройка любой электромеханической системы на оптимальные режимы работы требует точного знания ее параметров. К электромеханическим системам относятся и электрические машины, так как они являются основными потребителями энергии электрической системы.

Определять электромагнитные параметры необходимо как новым машинам, которые только создаются, так и машинам, которые длительное время находятся в эксплуатации.

Отдельным классом можно провести двигатели, прошедшие ремонт, поскольку после проведения ряда ремонтных операций изменяются электромагнитные параметры электрической машины.

На сегодняшний день существует большое количество методов, направленных на определение электромагнитных параметров электрических машин [1-5]. Среди большого количества методов существует метод, базирующийся на применении низкочастотного питающего напряжения [6, 7].

В основном частотные методы определения параметров асинхронных двигателей базируются на использовании полигармонического питания в области частот 50 ÷ 150 Гц и выше. Как показал анализ в этой области частот, наблюдается незначительное изменение кривых эквивалентных активного, реактивного и полного сопротивлений асинхронного двигателя, что приводит к снижению точности определения электромагнитных параметров.

В области низких частот питающего напряжения наблюдается значительное изменение выходного сигнала при незначительном входном воздействии.

**Цель работы.** Разработка алгоритма по определению электромагнитных параметров (ЭМП) асинхронного двигателя (АД) с использованием низкочастотного испытательного напряжения.

**Материал и результаты исследования.** В работах [6, 7] предложен метод по определению электромагнитных параметров, базирующийся на рассмотрении Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя (рис. 1) при питании от источника напряжения пониженной частоты.

В области низких частот потери в стали незначительны, поэтому ими можно пренебречь.

Тогда сопротивление контура намагничивания запишем в виде  $Z_m(n) = nX_m$ . Сопротивление статора и ротора соответственно будут равны

$$Z_1(n) = \sqrt{R_1^2 + (nX_1)^2}, \quad Z_2(n) = \sqrt{R_2^2 + (nX_2)^2}.$$

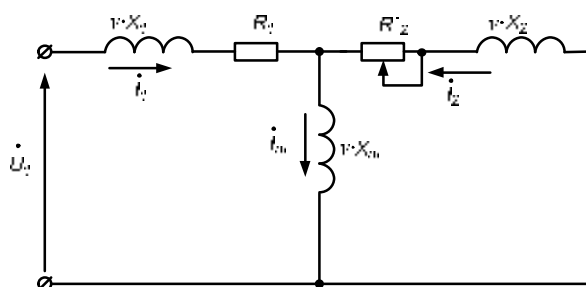


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Тогда выражение комплексного сопротивления схемы замещения:

$$Z_{\Sigma 1}(n) = Z_1(n) + \frac{Z_2(n) \cdot Z_m(n)}{Z_2(n) + Z_m(n)} = \sqrt{(R_{\Sigma}(n))^2 + (X_{\Sigma}(n))^2}, \quad (1)$$

откуда эквивалентное реактивное сопротивление:

$$X_{\Sigma 1}(n) = nX_1 + \frac{n^3(X_m X_2^2 + X_m^2 X_2) + nX_m R_2^2}{R_2^2 + (nX_2 + nX_m)^2}; \quad (2)$$

эквивалентное активное сопротивление:

$$R_{S1}(n) = R_1 + \frac{n^2 X_m^2 R_2}{R_2^2 + (nX_2 + nX_m)^2}. \quad (3)$$

Метод реализуется по следующему алгоритму (рис. 2).

В разработанном методе необходимо заторможенную асинхронную машину подключить к источнику напряжения, у которого независимо изменяется как величина напряжения, так и частота. На первоначальном этапе необходимо подать на испытываемую машину пониженное напряжение величиной  $U_{min} = s_H U_C$  с частотой от 0 до  $\nu_{min} = s_H f_H$ , шаг изменения частоты 0,001, где  $U_C$  – напряжение сети,  $s_H$  – номинальное скольжение,  $f_H$  – промышленная частота сети.

Величина  $s_H$  определяется экспериментально, или по каталогу двигателей, или по паспорту двигателя, или по методу видеоидентификации.

Применение пониженного напряжения вызвано

тем фактом, что при подаче номинального напряжения на заторможенную машину в ее обмотках протекает ток короткого замыкания, который в 6-8 раз превышает номинальный ток.

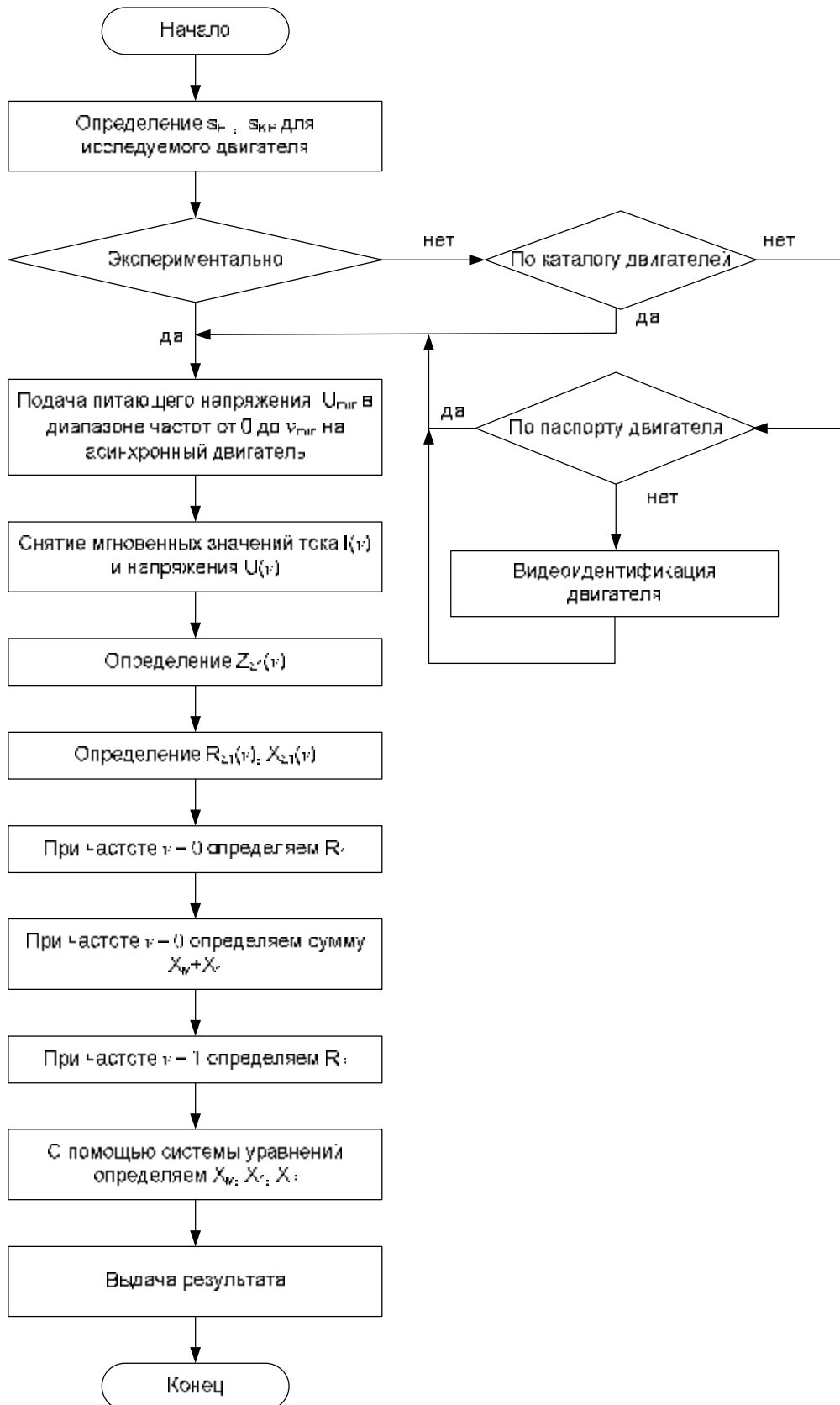


Рисунок 2 – Алгоритм определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя

В свою очередь, при длительном протекании тока короткого замыкания из строя выходят обмотки статора. Величина пониженного напряжения находится в пределах 10-20% от номинального напряжения. Величина частоты  $\nu_{min} = s_H f_H$  определена тем, что в области от 0 до  $\nu_{min}$  происходит перераспределение энергии между контуром ротора и контуром намагничивания [8].

Из схемы замещения рис. 1, ток статора определим следующим выражением:

$$I_1(n) = \frac{U}{Z_{\Sigma 1}} \quad (4)$$

$$= \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} + \sqrt{R_m^2 + n^2 X_m^2} \cdot \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}} =$$

$$= \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} + \frac{n^2 X_m^2 \cdot \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}{\sqrt{n^2 X_m^2 + \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}}},$$

где  $\nu$  – относительная частота,  $R_m = 0$  – в области низких частот потери в стали незначительны, активным сопротивлением контура намагничивания можно пренебречь.

Реактивная мощность статорной цепи:

$$Q_1(n) = I_1^2 \cdot n \cdot X_1 = \left( \frac{U}{Z_{\Sigma 1}} \right)^2 \cdot n \cdot X_1. \quad (5)$$

Активная мощность статорной цепи:

$$P_1(n) = I_1^2 \cdot R_1 = \left( \frac{U}{Z_{\Sigma 1}} \right)^2 \cdot R_1. \quad (6)$$

Полная мощность статорной цепи:

$$S_1(n) = \sqrt{P_1(n)^2 + Q_1(n)^2}. \quad (7)$$

Электродвижущая сила параллельного контура:

$$E(n) = U - I_1 \cdot Z_1 = U - \quad (8)$$

$$= \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} + \frac{\sqrt{R_m^2 + n^2 X_m^2} \cdot \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}{\sqrt{R_m^2 + n^2 X_m^2} + \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}} \times$$

$$\times \sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} = U - \sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} \times$$

$$\times \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + n^2 X_1^2} + \frac{n^2 X_m^2 \cdot \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}{\sqrt{n^2 X_m^2 + \sqrt{R_2^2 + n^2 X_2^2}}}.$$

Роторную цепь можно описать совокупностью следующих выражений:

– ток ротора,

$$I_2(n) = \frac{E(n)}{\sqrt{R_2^2 + n^2 \cdot X_2^2}}; \quad (9)$$

– реактивная мощность роторной цепи,

$$Q_2(n) = I_2^2 \cdot n \cdot X_2 \quad (10)$$

$$= \left( \frac{E(n)}{\sqrt{R_2^2 + n^2 \cdot X_2^2}} \right)^2 \cdot n \cdot X_2;$$

– активная мощность роторной цепи,

$$P_2(n) = I_2^2 \cdot R_2 = \quad (11)$$

$$= \left( \frac{E(n)}{\sqrt{R_2^2 + n^2 \cdot X_2^2}} \right)^2 \cdot R_2;$$

– полная мощность роторной цепи,

$$S_2(n) = \sqrt{P_2(n)^2 + Q_2(n)^2}. \quad (12)$$

Контур намагничивания описывается соответствующими соотношениями:

– ток контура намагничивания:

$$I_m(n) = \frac{E(n)}{\sqrt{R_m^2 + n^2 \cdot X_m^2}} = \frac{E(n)}{n \cdot X_m}; \quad (13)$$

– реактивная мощность контура намагничивания,

$$Q_m(n) = I_m^2 \cdot n \cdot X_m = \quad (14)$$

$$= \left( \frac{E(n)}{\sqrt{R_m^2 + n^2 \cdot X_m^2}} \right)^2 \cdot n \cdot X_m = \frac{E(n)}{n \cdot X_m};$$

– активная мощность контура намагничивания,

$$P_m(n) = I_m^2 \cdot R_m = \quad (15)$$

$$= \left( \frac{E(n)}{\sqrt{R_m^2 + n^2 \cdot L_m^2}} \right)^2 \cdot R_m = 0;$$

– полная мощность контура намагничивания,

$$S_m(n) = \sqrt{P_m(n)^2 + Q_m(n)^2}. \quad (16)$$

Суммарная активная мощность схемы замещения:

$$\Sigma P(n) = P_1(n) + P_2(n) + P_m(n). \quad (17)$$

Суммарная реактивная мощность схемы замещения:

$$\Sigma Q(n) = Q_1(n) + Q_2(n) + Q_m(n). \quad (18)$$

По выражениям (4) – (18) на рис. 3 – 5 построены зависимости токов, мощностей и сопротивлений для асинхронного двигателя. При построении характеристик пренебрегаем активным сопротивлением контура намагничивания, так как при использовании низкочастотного питающего напряжения потери в стали пренебрежительно малы. Наличие характерных точек перегибов в кривой реактивной мощности можно объяснить тем, что на низких частотах ток контура намагничивания возрастает при  $\nu \rightarrow 0$  и по величине больше значения тока ротора. При этом параллельный контур представляет собой индуктивную нагрузку (рис. 5). С увеличением частоты питающего напряжения ток роторной цепи растет, т.е. происходит перераспределение энергии между контуром намагничивания и контуром ротора, а значит, параллельный контур приобретает характер активно-индуктивной нагрузки за счет активного и реактивного сопротивлений контура ротора. Это позволило установить зависимость изменения эквивалентного реактивного сопротивления с частотой питающего напряжения, связанную с энергопроцессами при низко-

частотном питании. Точки перегиба кривых сопротивлений смещаются в сторону меньших частот с увеличением мощности анализируемых двигателей, кроме электрических машин с повышенным скольжением (МТК, МТКВ, МТКМ). Машины этих серий характеризуются увеличением относительных частот, при которых наблюдаются перегибы кривых составляющих полного сопротивления.

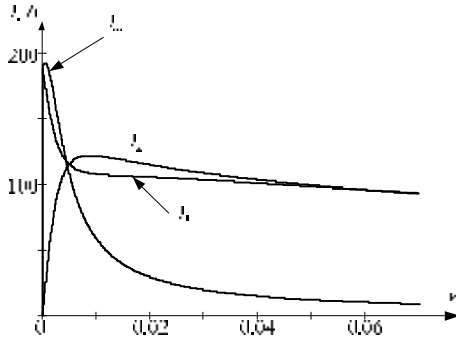


Рисунок 3 – Зависимости изменения токов для Т-образной схемы замещения

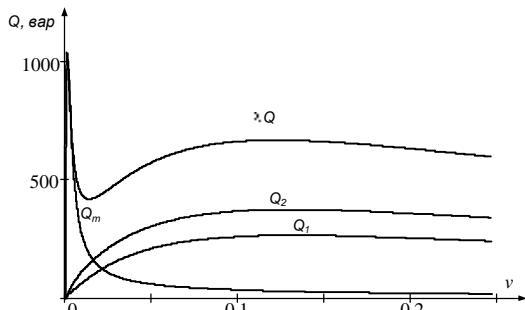


Рисунок 4 – Зависимости изменения реактивной мощности для Т-образной схемы замещения

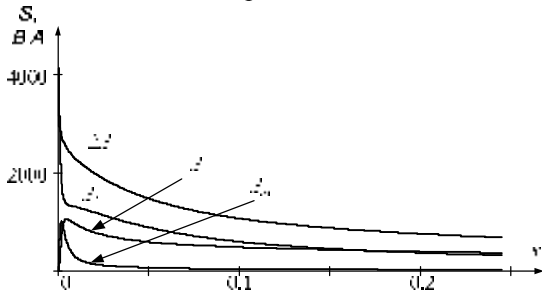


Рисунок 5 – Зависимости изменения полной мощности для Т-образной схемы замещения

Проведенные исследования показали, что номинальное и критическое скольжения асинхронных двигателей изменяются в зависимости от мощности и типа двигателя. В общем виде зависимости изменения скольжений приведены на рис. 6.

Полученные зависимости изменения скольжений от мощности можно аппроксимировать. Для исключения нагромождения коэффициентами аппроксимационных выражений зависимости скольжений от мощности можно разбить на два диапазона: первый диапазон 0 – 15 кВт; второй диапазон 15 – 350 кВт.

Каждый диапазон описывается своим аппроксимационным выражением. Первый диапазон описывается аппроксимационным выражением 4-го порядка, а второй диапазон – 3-го порядка.

В общем виде аппроксимационные выражения для первого диапазона:

для номинального скольжения,

$$s_H = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3 + a_4 P^4, \quad (19)$$

где  $P$  – мощность двигателя, кВт;

для критического скольжения,

$$s_K = b_0 + b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3 + b_4 P^4. \quad (20)$$

Второй диапазон аппроксимируется следующими выражениями:

для номинального скольжения,

$$s_H = d_0 + d_1 P + d_2 P^2 + d_3 P^3, \quad (21)$$

для критического скольжения:

$$s_K = c_0 + c_1 P + c_2 P^2 + c_3 P^3. \quad (22)$$

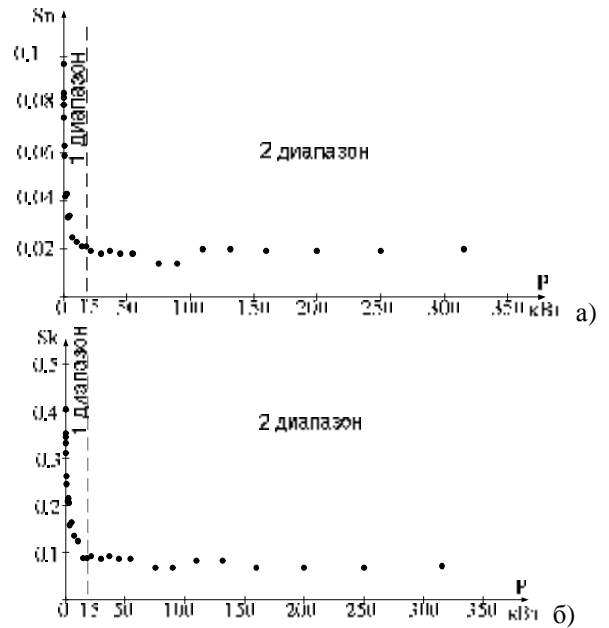


Рисунок 6 – Зависимость номинального (а) и критического (б) скольжений асинхронного двигателя от мощности двигателя

Электромагнитные параметры асинхронного двигателя определяют в соответствии с алгоритмом. Вначале, при частоте  $n = 0$  определяется значение активного сопротивления статора  $R_1$ , рис. 7. Математически параметр  $R_1$  определяется из выражения эквивалентного активного сопротивления:

$$\lim_{n \rightarrow 0} (R_{\Sigma}(n)) = R_1 + \frac{n^2 X_m^2 R_2}{R_2^2 + (nX_2 + nX_m)^2} = \lim_{n \rightarrow 0} \left( R_1 + \frac{n^2 X_m^2 R_2}{(R_2 + R_m)^2 + (nX_2 + nX_m)^2} \right) = R_1. \quad (23)$$

Сумма индуктивных сопротивлений контуров намагничивания и статора определяется по выражению производной от эквивалентного реактивного сопротивления, при  $\lim_{n \rightarrow 0} (X_{\Sigma}(n))'$ , рис. 8:

$$\lim_{n \rightarrow 0} (X_{\Sigma}(n))' = X_1 + \frac{R_2^2 X_m}{R_2^2} = X_1 + X_m. \quad (24)$$

Активное сопротивление ротора  $R_2$  определяется при напряжении питания  $U_{max} = s_K U_H$  с относительной частотой  $\nu = 1$ , рис. 3:

$$R'_2 = R_\Sigma(\nu_1) - R_1, \quad (25)$$

где  $\nu_1$  – частота, соответствующая номинальной частоте сети.

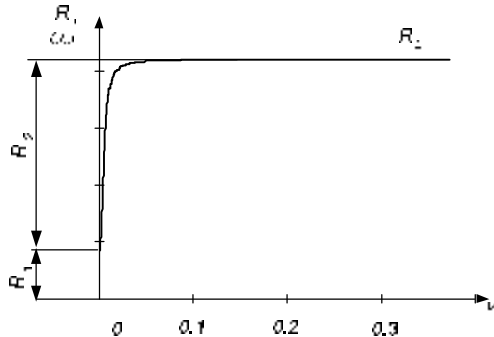


Рисунок 7 – Определение активных сопротивлений статора  $R_1$  и ротора  $R_2$

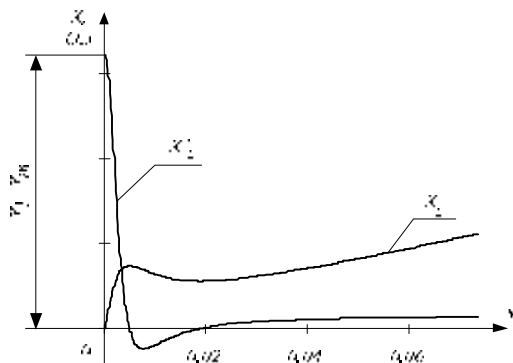


Рисунок 8 – Определение индуктивных сопротивлений контуров намагничивания и статора

Электромагнитные параметры ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_m$ ) Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя определяются из системы уравнений (11), которая включает в себя выражения для зависимостей эквивалентных активного и реактивного сопротивлений и производной реактивного сопротивления от частоты. Воспользовавшись аппроксимационными выражениями (19)–(22), рассчитываем номинальное или критическое скольжения, с последующим определением частоты  $\nu_1 = s_H \cdot f_H$ , при которой вычисляются значения  $R_\Sigma(\nu_1)$ ,  $X_\Sigma(\nu_1)$ . Подставляя ранее определенные значения ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_\Sigma(\nu_1)$ ,  $X_\Sigma(\nu_1)$  и  $\lim_{n \rightarrow 0} (X_\Sigma(n))'$ ) в систему уравнений (25),

определяем неизвестные параметры:

$$\begin{cases} X_\Sigma(\nu_1) = \nu_1 X_1 + \frac{\nu_1^3 (X_m X_2^2 + X_m^2 X_2) + \nu_1 X_m R_2^2}{R_2^2 + (\nu_1 X_2 + \nu_1 X_m)^2}; \\ R_\Sigma(\nu_1) = R_1 + \frac{\nu_1^2 X_m^2 R_2}{R_2^2 + (\nu_1 X_2 + \nu_1 X_m)^2}; \\ \lim_{n \rightarrow 0} (X_\Sigma(n))' = X_1 + X_m. \end{cases} \quad (25)$$

**Выводы.** В ходе выполнения работы:

- разработан алгоритм метода, позволяющий повысить точность определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя при использовании низкочастотного питающего напряжения;
- с целью определения испытательного напряжения и частоты для асинхронных двигателей получены коэффициенты и аппроксимационные выражения для номинального и критического скольжений в зависимости от мощности двигателя;
- получены рекомендуемые частоты питающего напряжения, при которых в отличие от известных методов, повышается точность определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7217-87 (СТ СЭВ 168-85) Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. – М. 1987.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
3. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2005. – Вип. 5 (34). – С. 43–46.
4. Родькин Д.И., Здор И.В. Современные методы определения параметров асинхронных двигателей после их ремонта // Вестник КГПУ. Труды КГПИ. – Кременчук, 2000. – Вип. 1. – С. 76–81.
5. Рогозин Г.Г. Визначення електромагнітних параметрів машин змінного струму. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
6. Калинов А.П., Резник Д.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Определение электромагнитных параметров асинхронных двигателей при питании напряжением низких частот // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2006. – Вип. 4 (39). – Ч. 1. – С. 117 – 121.
7. Резник Д.В., Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Особенности определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей при использовании низкочастотного испытательного напряжения // Электроприводы переменного тока: Тр. междунар. 14 НТК. – Екатеринбург, 2007. – С. 279 – 283.
8. Резник Д.В., Родькин Д.И., Калинов А.П. Повышение точности определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей при использовании низкочастотного испытательного напряжения // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2007. – Вип. 3 (44). – Ч. 2. – С. 144 – 149.

Стаття надійшла 10.04.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькінін Д.Й.