

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Пеньков О. В.

Донецкий государственный технический университет

R504A@FCITA.DN.UA.

*In paper the mathematical model allowing to analyze regularity of influence of dynamic transition electromagnetic processes on power performances of a regulated induction motor is submitted. The results of account of losses in windings of the machine are submitted in view of a degree of saturation of a magnetic circuit. The obtained results allow making a conclusion, that the varying saturation of a magnetic circuit of a drive essentially influences power performances of a drive and driving as a whole*

Разработка и модернизация действующих машин нестандартного, специализированного исполнения и для двигателей общепромышленного применения требует решения задач оптимизации режимов работы (статические и переходные) по следующим критериям, как точность поддержания технологических параметров, производительность, надежность, энергосбережение и срок окупаемости. Для достижения высоких технико-экономических показателей электроприводов решить задачу оптимального использования двигателя в широком диапазоне регулирования угловой скорости и изменения нагрузочного момента.

Одним из важнейших путей энергосбережения является снижение потерь электроэнергии, потребляемой асинхронными электродвигателями (более 50%), величина которых изменяется в зависимости от интенсивности их использования. Затраты на экономию единицы вырабатываемой электроэнергии примерно в два раза меньше затрат на ее производство [1]. Согласно [4] работа асинхронного двигателя при номинальном напряжении и номинальной нагрузке характеризуется наименьшими энергетическими потерями. В современных технологических процессах очень часто необходимо регулировать угловую скорость при значительных изменениях статического момента. Следовательно, необходимо анализировать работу электродвигателя в большом спектре изменения его выходных координат.

Уменьшение энергопотребления можно достичь путем проектирования новых видов электрических машин или модернизации действующих приводов. Современные достижения в силовой электронике существенно облегчают решение данных задач на стадии проектирования, когда выбраны основные элементы автоматизированного электропривода [2]. Одним из главных элементов является электрическая машина, которая представляет собой динамическую многопараметрическую систему. Анализ литературных источников свидетельствует, что правильный выбор математической модели позволит в полной мере исследовать и раскрыть преимущества разрабатываемых или модернизируемых электроприводов [3].

Применение современных методов расчета, основанных на углубленном изучении физических процессов, протекающих в двигателе в различные моменты времени, позволяют повысить точность расчета параметров и характеристик электрических машин, что необходимо при возросших требованиях к увеличению электромагнитных нагрузок. Кроме того, в настоящее время проводится большое количество исследований, связанных с динамическими режимами электрических машин [2, 4, 5]. Их цель – получение более точной информации о реальных потерях энергии в двигателе.

Формулы, рекомендуемые для расчета мощности потерь энергии в обмотках асинхронных двигателей в стационарных и динамических режимах работы, описываются следующими уравнениями:

$$\Delta P_s = 3 I_1^2 R_s \approx 3 R_s (I_\mu^2 + I_2'^2), \quad (1)$$

$$\Delta P_r = 3 I_2'^2 R_r, \quad (2)$$

где  $\Delta P_s$ ,  $\Delta P_r$  – мощности потерь в обмотках статора и ротора;  $R_s$ ,  $R_r$  – активное сопротивление фазы статора и приведенное активное сопротивление фазы ротора;  $I_\mu$  – намагничивающий ток. Соотношения (1) и (2) получены на основании предположения, что в обмотках статора и ротора в переходных режимах протекают такие же токи, как и в установившихся режимах при соответствующих скольжениях.

Теоретические и экспериментальные исследования установили, что данное допущение во многих случаях приводит к значительным расхождениям между действительными потерями в переходных режимах и потерями, определенными по (1) и (2) (до 35 %) [2, 1]. Изучение электромагнитных явлений в динамических режимах асинхронных двигателей показывают, что погрешность определения  $\Delta P_s$  и  $\Delta P_r$  зависит от различных внешних и внутренних факторов. Следовательно, расчет энергетических характеристик двигателя – задача важная и достаточно сложная. Так, например, электромагнитные параметры асинхронной машины не постоянны по величине. Это главным образом относится к сопротивлению цепи намагничивания, которое с изменением режима работы двигателя может измениться в 5 – 7 раз при изменении магнитного потока в 3 раза [3]. В этой связи появляется необходимость создания математической модели асинхронного двигателя, позволяющей определять потери в обмотках статора и ротора с учетом наиболее существенных возмущающих факторов.

Основные векторные уравнения для насыщенной асинхронной машины в координатных осях вращающихся с произвольной скоростью  $\omega_k$  имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \underline{U}_s = \underline{I}_s R_s + L_{\sigma s} p \underline{I}_s + p \underline{\Psi}_\mu + j \omega_k \underline{\Psi}_s, \\ \underline{U}_r = \underline{I}_r R_r + L_{\sigma r} p \underline{I}_r + j(\omega_k - \omega) \underline{\Psi}_r, \\ p \underline{\Psi}_\mu = p(L_{\mu} \underline{I}_\mu(t)) = L_{\mu}(\underline{I}_\mu) p \underline{I}_\mu(t) + \underline{I}_\mu(t) p L_{\mu} = L_{\mu}^s p \underline{I}_\mu(t) - \Delta E_{\mu}(t), \\ p\omega = p_2 (M - M_c(t)) J^{-1}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\underline{I}_s, \underline{I}_r, \underline{\Psi}_s, \underline{\Psi}_r, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$  – соответственно результирующие векторы токов, потокосцеплений, индуктивностей рассеяния статора и ротора;  $M$  – электромагнитный момент;  $M_c(t)$  – момент сопротивления на валу;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $p_2$  – число пар полюсов;  $J$  – суммарный момент инерции привода;  $p$  – символ дифференцирования.

В системе дифференциальных уравнений (3) коэффициент  $L_{\mu}^s = L_{\mu}(\underline{I}_\mu)$  и ЭДС  $\Delta E_{\mu}(t) = \underline{I}_\mu(t) p L_{\mu} - L_{\mu}(\underline{I}_\mu)$  отражают учет переменного насыщения магнитопровода (статическая и динамическая индуктивности). Исходная информация о характеристике намагничивания представляется в графической либо табличной форме [3], представляющей совокупность точек ( $\Psi_{\mu}$  и  $I_{\mu}$ ). Аналитическое выражение данной зависимости может быть выполнена на основании аппроксимации при помощи различных математических функций. Значения индуктивностей  $L_{\mu}^s$  и  $L_d(\underline{I}_\mu)$  получены из экспериментальной характеристики намагничивания. На рис.1 представлены графики изменения статической и динамической индуктивностей.

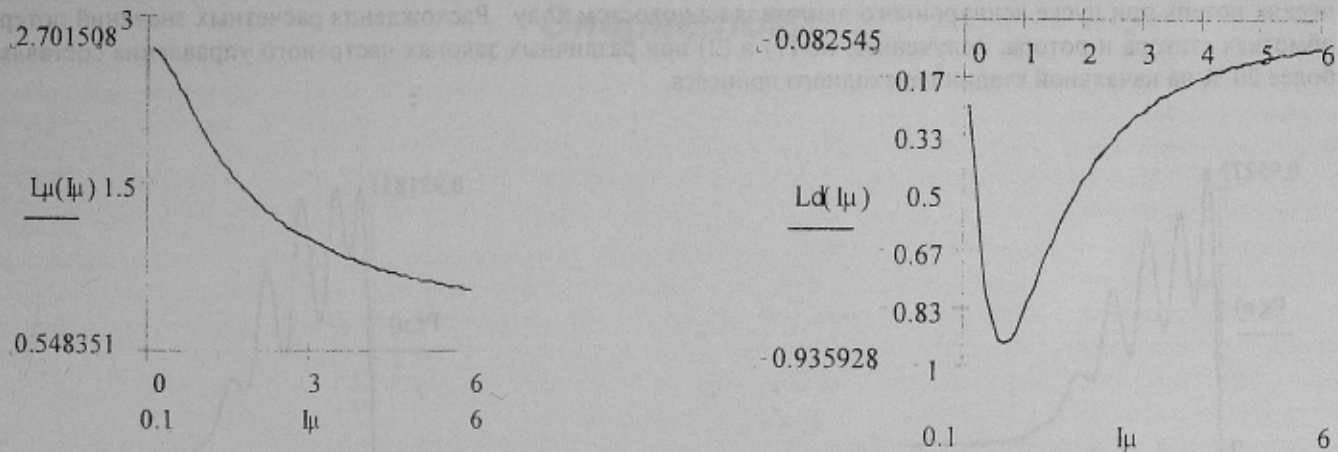


Рисунок 1 – Изменения статической  $L_{\mu}(I_{\mu})$  и динамической  $L_d(I_{\mu})$  индуктивностей от намагничивающего тока

Потери в обмотках статора и ротора асинхронного двигателя за время одного динамического режима определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} \Delta P_s = R_s \int_0^t (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) dt; \\ \Delta P_r = R_r \int_0^t (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) dt, \quad \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_s + \Delta P_r. \end{cases} \quad (4)$$

Совместное решение системы дифференциальных уравнений (3) и системы (4) позволяет выявлять закономерности влияния электромагнитных процессов на потери в обмотках двигателей с учетом меняющейся во времени степени насыщения магнитопровода. В случае работы двигателя в циклических режимах полные потери в общем случае могут быть определены по следующему выражению:

$$\Sigma P = \sum_1^N \Delta P_{\Sigma n}, \quad (5)$$

где  $N$  – число пусков двигателя за единицу времени,  $\Delta P$  суммарные потери за время одного динамического режима. Если переходные режимы начинаются при нулевых начальных условиях (вращение вала отсутствует и предыдущий электромагнитный динамический режим завершился) соотношение (5) можно записать следующим образом:  $\Sigma P = N \Delta P_{\Sigma}$ .

В качестве исследуемого асинхронного двигателя был выбран двигатель типа АИР160М2 с номинальными каталожными данными:  $P_{2n} = 18.5$  кВт,  $I_{2n} = 34.6$  А,  $\eta_n = 0.907$ ,  $\cos \varphi_n = 0.9$ ,  $s_n = 1.8\%$ . Используя описанную

в [3,5], методику расчета электромагнитных параметров схемы замещения асинхронного двигателя, получены следующие параметры:  $R_s = 0.167 \text{ Ом}$ ,  $R_r = 0.117 \text{ Ом}$ ,  $X_s = 0.52 \text{ Ом}$ ,  $X_r = 0.81 \text{ Ом}$ ,  $X_m = 21.87 \text{ Ом}$ . Так как данная модель разрабатывалась для исследования переходных электромагнитных состояний частотно-управляемого двигателя при частотах до 50 Гц, то в нее не включены математические операции, позволяющие учитывать изменение активного сопротивления фазы ротора. Значения  $M_c(t)$  моделировались для различных видов промышленных механизмов по соотношениям, представленным в [2]. Статическая и динамическая индуктивности получены на основании экспериментальной характеристики холостого хода асинхронного двигателя. Для уменьшения времени расчета переходных режимов их значения были аппроксимированы по методу наименьших квадратов. С целью сопоставления полученных экспериментально и аналитически величин выше упомянутых индуктивностей был проведен сравнительный анализ. Расхождения не превышают 2%, что допустимо для проведения расчетов.

Проведенные расчеты динамических процессов частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных возмущающих внешних и внутренних факторах показали, что учет изменения насыщения магнитопровода особенно необходим при частотах ниже 25 Гц. В этой области начинается резкое увеличение намагничивающего тока (в 2 и более раз), то есть возрастают демпфирующие свойства. Существенно увеличивается время переходного процесса исследуемого двигателя, как при  $M_c(t) = 0$ , так и при  $M_c(t)$ , изменяющемся по одному из моделируемых законов. Следовательно, магнитный поток, соответствующий критическому моменту и холостому ходу двигателя, должен значительно возрастать с понижением частоты, но вследствие насыщения магнитной цепи двигателя необходимое значение потока не может быть достигнуто.

Резко возрастают потери в обмотках статора и ротора, что вызывает значительный перегрев всех конструктивных частей машины. Анализ расчетных данных показывает, что значения предельно допустимых потерь должны устанавливаться при холостом ходе двигателя, но тогда уменьшается максимальный момент, что не всегда целесообразно. На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие характер изменения электрических потерь при пуске асинхронного двигателя на холостом ходу. Расхождения расчетных значений потерь в обмотках статора и ротора, полученные по (1) и (2) при различных законах частотного управления составляют более 20 % на начальной стадии переходного процесса.

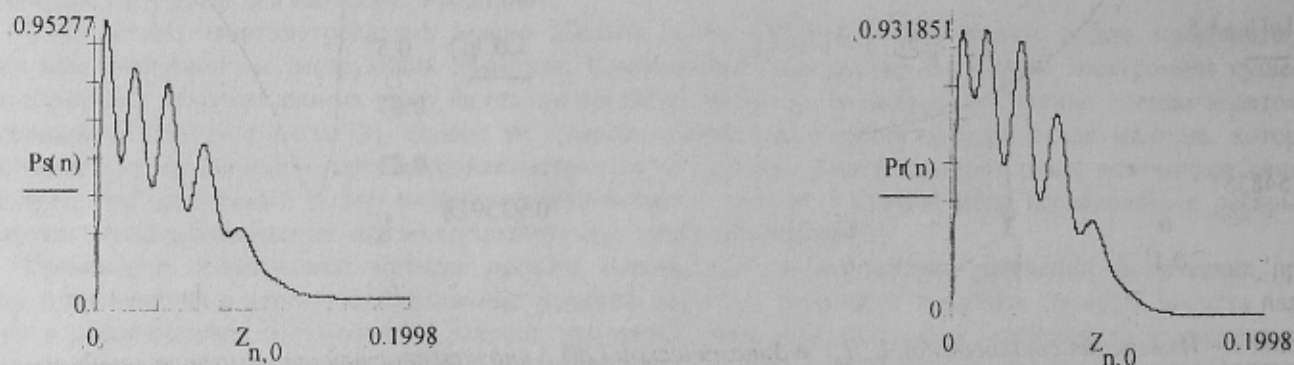


Рисунок 2 – Потери в статоре  $P_s(n)$  и потери в роторе  $P_r(n)$ , полученные на математической модели

Описанная в статье математическая модель регулируемого асинхронного двигателя может применяться для расчета пусковых потерь в обмотках и на стадии проектирования, и при анализе действующих приводов. Расчеты могут проводиться с учетом изменяющегося насыщения магнитопровода и при постоянных значениях сопротивления намагничивающего контура ( $\Delta E_m(t) = 0$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаинцев Ю. В. Состояние и перспективы развития низковольтных асинхронных двигателей. – М.: Информэлектро, 1989. – 40 с.
2. Петрушин В. С. Асинхронные короткозамкнутые двигатели в системах полупроводникового электропривода. – О.: 1997. – 146 с.
3. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В. И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Д.: 1979. – 110 с.
4. Поздеев Д. А. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары.: ЧГУ. 1998.
5. Корниенко В. П. и Корниенко Ю. В. Приближенная модель для исследования пуска асинхронного двигателя с тиристорным регулятором напряжения. - Д.: Сб. трудов ЭнФ ДонГТУ, 1996. – 49–51 с.