

## Учет намагничивания асинхронной машины при энергооптимальном управлении

*Н.А. Кулаев, П.С. Зубков, Н.В. Дубов, В.Ю. Артамонов*

*Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

**Аннотация:** В данной работе рассмотрены методы, используемые для учета нелинейности магнитных процессов в стали электрической асинхронной машины. Приведены обоснования, доказывающие необходимость аппроксимации кривой намагничивания асинхронных машин для повышения качества регулирования электропривода, а также улучшения управления по энергетическим критериям. В статье также показан подход применения методов учета насыщения в синхронных машинах для асинхронных с помощью преобразованных уравнений.

**Ключевые слова:** Асинхронный двигатель, электропривод, векторное управление, аппроксимация кривой намагничивания

Исследование характеристик асинхронного двигателя при разработке систем электропривода зачастую предполагает применение моделей, которые не учитывают полную картину происходящих физических процессов в электрической машине. Речь идет о таких процессах, как потери в стали, эффект насыщения магнитных материалов и др. Существуют случаи, когда требуется точное определение характеристик двигателя с учетом нелинейности кривой намагничивания электрической машины. Например, настройка регуляторов системы векторного управления, формирования плавных пусковых характеристик, определение параметров после обслуживания машины, изменение свойств стали [1].

Существующие сейчас системы векторного регулирования с ориентацией по потоку ротора требуют качественного управления в области ослабления поля. Есть несколько методов организации этого управления. Простейший из них – повышение эталонного потока ротора выше базовой скорости, но он не является оптимальным [2 – 4].

Предпочтительным решением данной задачи является изменение эталонного вектора потокосцепления обратно пропорционально скорости. В этом случае структура системы управления остается простой во всем диапазоне регулирования скорости. Изменение индуктивности намагничивания при таком методе влияет на работу привода, поэтому это изменение нужно компенсировать. Для этого производят аппроксимацию кривой намагничивания [5, 6].

Учет эффекта насыщения (намагниченности) в синхронных машинах осуществляется двумя широко известными методами [7], которые можно спроецировать на асинхронные машины с учетом их различий.

На рисунке 1 приведена точная эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя.

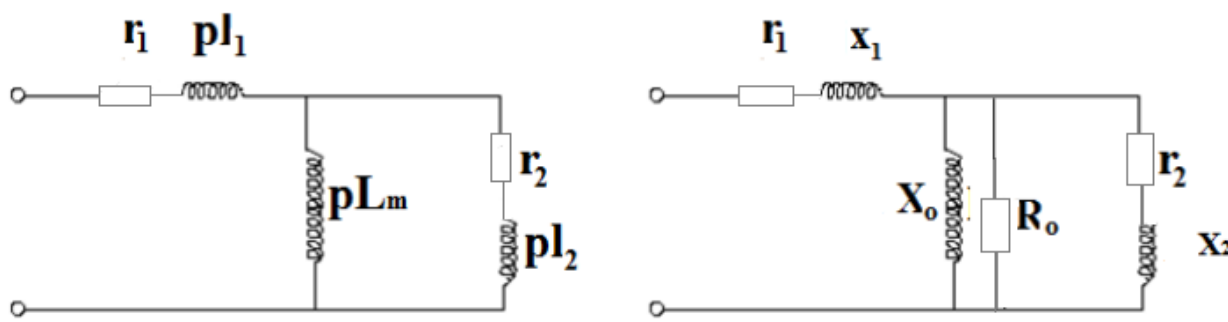


Рис. 1 – Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя в динамическом (слева) и статическом (справа) режимах

Здесь  $r_1$ ,  $pL_1$  – сопротивление и индуктивность статора соответственно;  
 $r_2$ ,  $pL_2$  – сопротивление и индуктивность роторной обмотки;  
 $pL_m$  – реактивное сопротивление намагничивания;  
 $R_0$  – сопротивление потерь в сердечнике;  
 $X_0$  – реактивное сопротивление намагничивания;  
 $X_1$ ,  $X_2$  – реактивное сопротивление статора и ротора.

При работе машины с полной нагрузкой или близко к ней, ЭДС намагничивания падает из-за падения напряжения в статоре. Уровень насыщения при этом уменьшается, а  $X_0$  – увеличивается. Эта особенность не учитывается при расчете параметров двигателя и расчетный ток намагничивания по факту является большим, чем его реальное значение.

Для получения более точной картины, значение  $X_0$  должно меняться в зависимости от степени насыщения, а параметры – оцениваться относительно точной эквивалентной схемы. В данной статье рассмотрены методы математического программирования и численные методы, основанные на линейной регрессии [8, 9].

При проведении опыта короткого замыкания или опыта холостого хода коэффициент мощности падает до очень низких значений. ЭДС при этом вычисляется следующим образом:

$$E_0 = U_0 - I_0(r_1 \cos \varphi_0 + x_1 \sin \varphi_0) \approx U_0 - I_0 x_1 \sin \varphi_0,$$

где  $r_1$ ,  $x_1$  – сопротивление статора и реактивное сопротивление рассеяния;

$I_0$ ,  $U_0$ ,  $\varphi_0$  – ток, напряжение холостого хода и угол между ними.

Влияние первого слагаемого в скобках незначительно. Поэтому ЭДС может быть получена в различных условиях нагрузки экспериментальными методами с использованием следующей формулы:

$$E = U - I_1(r_1 \cos \varphi_1 + x_1 \sin \varphi_1).$$

При увеличении напряжения в опыте холостого хода ток намагничивания вычисляется так:

$$\cos \varphi_0 = \frac{W_0}{\sqrt{3} I_0 U_0};$$

$$\sin \varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0};$$

$$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0,$$

где  $W_0$ ,  $U_0$ ,  $I_0$  – параметры холостого хода.

---

Для того, чтобы применить методы учета кривой намагничивания к асинхронным машинам, рассмотрим существующие методы, успешно применяемые в синхронных:

1. Метод насыщенного синхронного реактивного сопротивления Кингсли – в этом методе значение реактивного сопротивления намагничивания изменяется в зависимости от степени насыщения.

2. Метод Фролича. В этом методе используется соответствующее уравнение для аппроксимации кривой намагничивания.

3. Улучшенный метод Фролича. Здесь используется модифицированное уравнение с повышенной точностью.

4. Экспоненциальный метод – это метод, при котором кривая намагничивания аппроксимируется в экспоненциальной форме.

Подробно эти методы описаны в [7,10].

Некоторые из этих методов могут быть применены к асинхронной машине.

Уравнение Фролича, используемое для синхронной машины может быть применено к асинхронной с помощью следующей формулы:

$$E_p = \frac{a i_\mu}{b + i_\mu},$$

где  $i_\mu$  – ток намагничивания;

$a, b$  – коэффициенты аппроксимации.

Данное уравнение также может быть записано, как:

$$\frac{1}{E_f} = \frac{1}{I_f} \frac{b}{a} + a,$$

где  $I_f$  - ток соответствующей гармоники.

К данной форме записи уравнения можно применить метод линейной регрессии.

Второй метод, называемый экспоненциальным, также может быть применен к асинхронному двигателю с помощью выражения ниже:

$$E_p = a i_\mu^b.$$

Также это уравнение можно записать в логарифмической форме:

$$\log E_p = \log a + b * \log i_\mu.$$

К уравнению, записанному в таком виде, также может быть применен метод линейной регрессии [9].

Намагничивание электрической машины – это вторичный эффект, которым обычно пренебрегают. Двигатель при этом не используется на полную мощность. Поэтому учитывать нелинейность кривой намагничивания в динамических режимах работы необходимо для правильного отображения процессов, которые протекают в асинхронном двигателе.

Используя методы для учета нелинейности в синхронных машинах, описанные выше, можно, не сильно усложняя математические уравнения, аппроксимировать реальную кривую, чем можно добиться лучших регулировочных и энергетических показателей асинхронного двигателя.

### Литература

1. Калинов А.П, Огарь В.А, Характеристики асинхронных двигателей с учетом нелинейности кривой намагничивания // Вестник КДПУ. 2006. С.226-229.
2. Kim, S.H. and S.K. Sui, 1997. Voltage control strategy for maximum torque operation of an induction machine in the field-weakening region. IEEE Trans. on Ind. Electronics, 4(44): pp. 512-518.
3. Grotstollen, H. and J. Wiesing, 1995. Torque capability and control of a saturated induction motor over a wide range of flux weakening. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 4(42): pp. 374-381.

4. Joetten, R. and H. Schierling, 1983. Control of the induction machine in the field weakening range. Symp. Power Electronics and Electric Drives, Proc. IFAC, pp. 297-304.
5. Choi, D.H., S.B. Cho and D.S. Hyun, 1997. Improved torque response by tuning of the magnetising inductance under field weakening operation region. Conf. Rec. IEEE IAS, New Orleans, LA, pp: 418-425.
6. Weiser, R.S., 1997. Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region. Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.IAS, Conf. Rec. IEEE, pp: 401-409.
7. Anderson, P.M. and A.A. Fouad, 2011. Power System Control and Stability. Wiley-Inter science, 664 p.
8. Kambo, N.S., 1991. Mathematical Programming Techniques. East-West Press Pvt. Ltd, pp: 45-49
9. Kreyszi, E., 2001. Advanced Engineering Mathematics. New York: Wiley, 1280 p.
10. Bimbhra, P.S., 2014. Electrical Machinery. Khanna Publishers, 1001 p.
11. Зубков П.С., Кулаев Н.А. Математическое описание управления синхронным двигателем с постоянными магнитами для аппаратной реализации на ПЛИС // Инженерный вестник Дона. 2019. №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6039](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6039)
12. Диаб А.З.З., Котин Д.А., Панкратов В.В. Непосредственное векторное управление асинхронными электроприводами с использованием прогнозирующих моделей // Инженерный вестник Дона. 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2247](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2247)

## References

1. Kalinov A.P., Ogar' V.A. Vestnik KDPU. 2006. 226-229 s.



2. Kim, S.H. and S.K. Sui, 1997. IEEE Trans. on Ind. Electronics, 4(44): pp. 512-518.
3. Grotstollen, H. and J. Wiesing, 1995. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 4(42): pp. 374-381.
4. Joetten, R. and H. Schierling, 1983. Symp. Power Electronics and Electric Drives, Proc. IFAC: pp. 297-304.
5. Choi, D.H., S.B. Cho and D.S. Hyun, 1997. Conf. Rec. IEEE IAS, New Orleans, LA, pp. 418-425.
6. Weiser, R.S., 1997. Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS, Conf. Rec. IEEE, pp. 401-409.
7. Anderson, P.M. and A.A. Fouad, 2011. Power System Control and Stability. Wiley-Inter science, Hoboken: IEEE press: 664 p.
8. Kambo, N.S., 1991. Mathematical Programming Techniques. New Delhi: East-West Press Pvt. Ltd.: pp. 45-49.
9. Kreyszi, E., 2001. Advanced Engineering Mathematics. New York: Wiley: 1280 p.
10. Bimbhra, P.S., 2014. Electrical Machinery. Khanna Publishers: 1001 p.
11. Zubkov P.S., Kulayev N.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6039](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2019/6039)
12. Diab A.Z.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2247](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2247)