

УДК 621.313.323

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Миллер Н.Д., аспирант гр. ЭТа-251, I курс
Научный руководитель: Григорьев А.В., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Синхронные реактивные двигатели (СРД) в последние годы привлекают значительное внимание благодаря высокой эффективности, отсутствию постоянных магнитов и простоте конструкции ротора. Отсутствие редкоземельных материалов делает такие машины экономически привлекательными и устойчивыми к температурным воздействиям [1]. Основной особенностью СРД является выраженная магнитная анизотропия ротора [2], обеспечивающая разницу индуктивностей по продольной и поперечной осям. Именно эта разница позволяет создавать электромагнитный момент без использования возбуждения от магнитов или обмотки ротора. Однако сложность алгоритмов управления СРД обусловлена глубоким насыщением магнитной цепи и существенной зависимостью индуктивностей по осям d и q от токов статора. Переход от упрощенных схем замещения к учету реальных физических процессов невозможен без точного описания геометрии магнитной цепи. Для проведения исследования в программном комплексе Ansys Motor-CAD была разработана модель синхронного реактивного двигателя с номинальными параметрами $P_n=25$ кВт, $U_n=660$ В, $n_n=3000$ об/мин. Геометрия и свойства используемых материалов были заданы максимально приближенными к характеристикам реального двигателя (рис. 1).

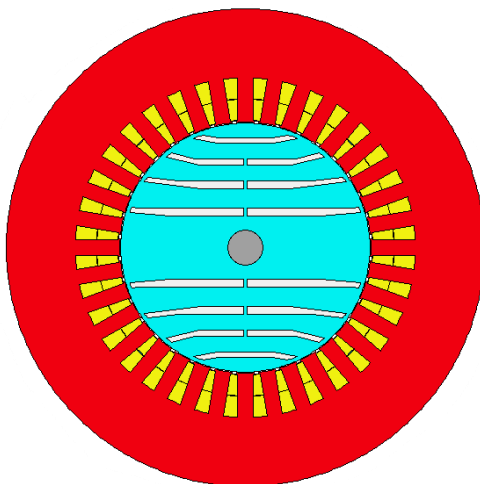


Рисунок 1 - Общий вид исследуемого СРД

Общепринятая математическая модель СРД [3] в синхронной системе координат (d, q) описывается уравнениями напряжений:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_{эл} \psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_{эл} \psi_d$$

При этом компоненты потокосцепления статора ψ_d и ψ_q являются нелинейными функциями относительно обоих токов. Поэтому есть 3 модели индуктивности [4]:

- 1) L_d и L_q – константы,
- 2) $L_d=f(i_d)$, $L_q=f(i_q)$,
- 3) $L_d=f(i_d, i_q)$, $L_q=f(i_d, i_q)$.

Стандартные модели часто пренебрегают взаимным влиянием осей, полагая, что ψ_d зависит только от i_d . Однако для современных высокоэффективных приводов необходимо учитывать перекрестное насыщение.

Для сравнения влияния точности определения индуктивностей на корректность управлением моментом двигателя используем выражение электромагнитного момента через потокосцепление и токи [3]:

$$M = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q$$

Согласно модели двигателя при номинальном установившемся режиме работы индуктивности L_d и L_q соответственно равны 52 и 15 мГн. Считаем эти параметры за константу согласно модели 1.

Измерив параметры индуктивности согласно модели 2, получим графики зависимостей $L_d(i_d)$ и $L_q(i_q)$ (рисунок 2).

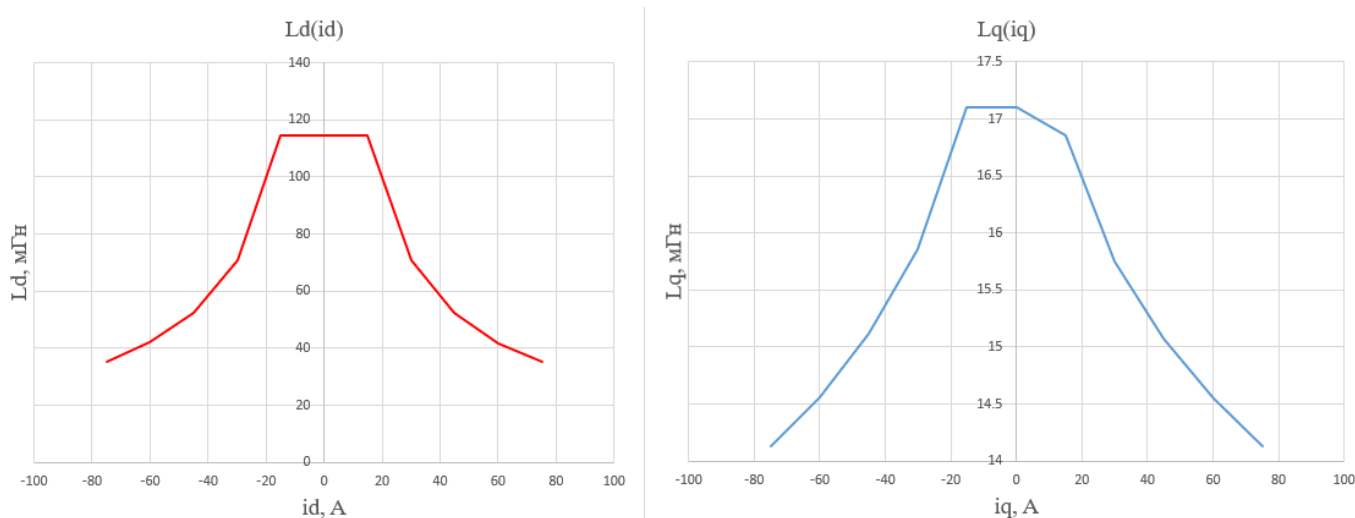


Рисунок 2 – Зависимости индуктивностей $L_d(i_d)$ и $L_q(i_q)$

Для получения наиболее точной зависимости, требуется построить трехмерную плоскость зависимостей L_d и L_q одновременно и от i_d и от i_q . Также измерим для токов d и q общий вектор тока $i_{об}$. Получившиеся в ходе моделирования плоскости представлены на рисунке 3. Данная модель является наиболее полной и точной из всех вышеперечисленных, поэтому для сравнения остальных моделей будем считать ее эталоном.

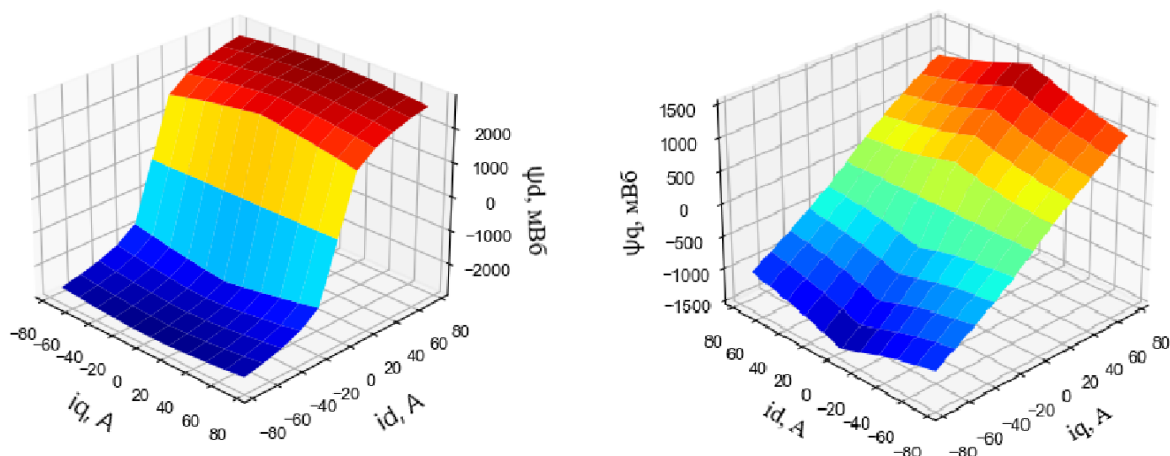


Рисунок 3 – Трехмерная поверхность зависимостей $\psi_d(i_d, i_q)$ (слева), $\psi_q(i_d, i_q)$ (справа)

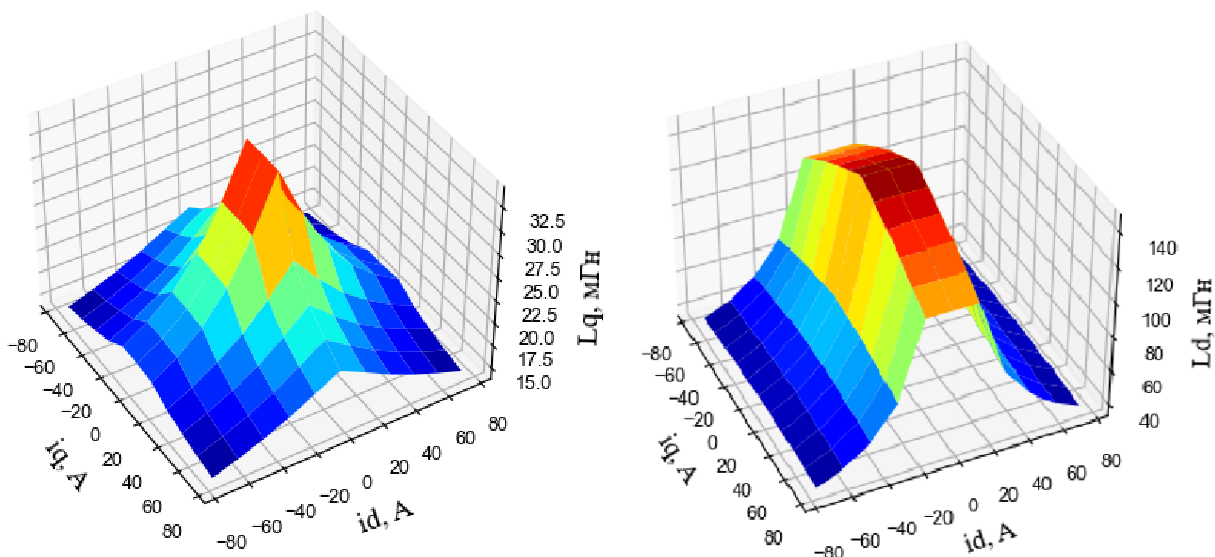


Рисунок 4 – Трехмерная поверхность зависимостей $L_d(i_d, i_q)$ (слева), $L_q(i_d, i_q)$ (справа)

Используя формулу электромагнитного момента, подставляем для каждой модели значения индуктивностей для разных токов. Отклонением считаем процент отклонения момента по сравнению с моментом, полученном при использовании трехмерной плоскости. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1 – сравнение отклонений расчетных моментов двигателя при разных моделях зависимостей индуктивностей

			Модель зависимостей индуктивностей от токов										
			Ld, Lq – const.				Ld=f(id), Lq=f(iq)				Ld=f(id, iq), Lq=f(id, iq)		
Iq, A	Id, A	Io6	Ld	Lq	M	ΔM , %	Ld	Lq	M	ΔM , %	Ld	Lq	M
15	15	21.21	0.052	0.015	24.98	67.37	0.114	0.017	65.61	14.29	0.142	0.029	76.55
15	45	47.43	0.052	0.015	74.93	-0.28	0.052	0.017	71.69	4.06	0.058	0.021	74.72
15	75	76.49	0.052	0.015	124.88	-80.49	0.035	0.017	61.43	11.22	0.038	0.017	69.19
45	15	47.43	0.052	0.015	74.93	66.02	0.114	0.015	201.1	8.82	0.13	0.021	220.5
45	45	63.64	0.052	0.015	224.78	2.63	0.052	0.015	227.8	1.32	0.056	0.018	230.9
45	75	87.46	0.052	0.015	374.63	-72.9	0.035	0.015	205.5	5.14	0.037	0.015	216.7
75	15	76.49	0.052	0.015	124.88	61.21	0.114	0.014	337.2	-4.71	0.114	0.019	322
75	45	87.46	0.052	0.015	374.63	-2.78	0.052	0.014	385.8	-5.83	0.052	0.016	364.5
75	75	106.1	0.052	0.015	624.38	-76.19	0.035	0.014	352.7	0.48	0.035	0.014	354.4
15	15	21.21	0.052	0.015	24.98	67.37	0.114	0.017	65.61	14.29	0.142	0.029	76.55
15	45	47.43	0.052	0.015	74.93	-0.28	0.052	0.017	71.69	4.06	0.058	0.021	74.72
15	75	76.49	0.052	0.015	124.88	-80.49	0.035	0.017	61.43	11.22	0.038	0.017	69.19

Из таблицы 1 видно, что при использовании постоянных значений индуктивностей отклонение рассчитанного электромагнитного момента от эталонного значения может достигать 80%. Это свидетельствует о недостаточной точности такой модели при анализе динамических режимов двигателя и ограничивает ее применение в задачах управления. В модели, где индуктивности зависят только от одного токового компонента, погрешность снижается и составляет в среднем около 5%, не превышая при этом 15%. Такой подход может быть использован для упрощенных расчетов и предварительного анализа в случаях, когда отсутствуют достоверные данные о двухмерных зависимостях параметров двигателя. Для более точного описания электромагнитных процессов предпочтительно применение трехмерной зависимости индуктивностей от токов. Такой вариант позволяет корректнее учитывать влияние насыщения магнитной системы.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что применение программных комплексов моделирования и расчета параметров электрических машин позволяет повысить точность математических моделей и улучшить характеристики электропривода. Использование данных, полученных методом конечных элементов, позволяет снизить погрешность определения индуктивностей и более корректно описывать нелинейные свойства магнитной системы. В конечном итоге, применение моделей с повышенной точностью описания параметров позволяет полностью реализовать потенциал двигателей в широком диапазоне нагрузок, сохраняя при этом высокую точность управления.

Список литературы:

1. Alex V., Rammohan A. Adaptive MTPA Curve Fitting with Anti-Windup Current Control [Электронный ресурс] // Results in Engineering 27. 2025. №106658. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106658>

2. Шрейнер Р.Т., Шилин С.И., Медведев А.В. Математическое моделирование синхронных реактивных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода // Тезисы материалов конференции «Электроприводы переменного тока» 2018. 26-30 марта 2018 г. Екатеринбург. С. 58-63.
3. Gieras J., Wang R., Kamper M. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines [Электронный ресурс] // Archives of Electrical Engineering. 2011. URL: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-df3d609c-de76-4d65-8ee5-64e388d2dc65/c/pdf_control-156181-83200.pdf
4. Tsujii Y., Inoue Y., Moromoto S., Sanada M. Effect of Inductance Model on Sensorless Control Performance of SynRM with Magnetic Saturation // IEEJ Journal of Industry Applications. Vol. 12. No. 5. Pp. 596-602. DOI: 10.1541/ieejia.22007253.