

Тарутин Никита Алексеевич¹. Зубков Юрий Валентинович¹

¹Самарский государственный технический университет, г.Самара, Россия

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SPM-ГЕНЕРАТОРА

Аннотация: В статье представлено исследование влияния температуры постоянных магнитов (ПМ) на магнитные и электромеханические характеристики синхронного генератора с поверхностно установленными постоянными магнитами (SPM). Анализ выполнен с помощью численного моделирования в ПО Ansys Maxwell в диапазоне температур от 20 до 200 °С. Рассмотрены номинальный режим работы и режим холостого хода. Получены зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре, ЭДС холостого хода, выходного напряжения и электромагнитного момента от температуры магнитов.

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты, SPM, ANSYS Maxwell, температура, электромагнитные характеристики.

Annotation: This article presents a study of the effect of permanent magnet (PM) temperature on the magnetic and electromechanical characteristics of a synchronous generator with surface-mounted permanent magnets (SPM). The analysis was performed using numerical simulation in Ansys Maxwell software over a temperature range of 20 to 200°C. Nominal and no-load operating modes are considered. The dependences of air-gap magnetic flux density, no-load EMF, output voltage, and electromagnetic torque on magnet temperature are obtained.

Keywords: synchronous generator, permanent magnets, SPM, ANSYS Maxwell, temperature, electromagnetic characteristics.

Введение

Синхронные электрические машины с ПМ находят широкое применение в современных системах электроснабжения, автономных энергетических установках и электростанциях собственных нужд, благодаря высокому КПД и

простоте конструкции. Одним из основных факторов, влияющих на рабочие характеристики таких машин являются магнитные свойства ПМ, формирующих основной магнитный поток в машине. Известно, что магнитные характеристики ПМ существенно зависят от температуры. Повышение температуры приводит к снижению остаточной магнитной индукции и оказывает влияние на электромагнитные процессы в машине. На данный момент широко применяются высокоэнергетические редкоземельные магниты на основе неодим-железо-бора, в том числе магниты повышенной температурной стойкости. В данной работе в качестве материала ПМ рассматривается магнит марки N38UH.

В условиях реальной эксплуатации генераторы могут работать в широком диапазоне температур, которые зависят как от внешних погодных условий, так и внутренних тепловых процессов. В этой связи актуальной является задача исследования влияния температуры ПМ на магнитные и электромеханические характеристики генератора.

Материалы и методы

Для проведения исследования рассматривался следующий диапазон температур: 20, 60, 100, 140, 180 и 200 °С. Моделирование в 2D постановке выполнено методом численного моделирования в ПО Ansys Maxwell. Для анализа магнитного состояния генератора использовались магнитостатические расчетные задачи, в ходе которых были получены распределения магнитной индукции в воздушном зазоре, а также численные значения максимально и средней индукции. Для оценки электромеханических характеристик генератора решалась задача переходного процесса (transient).

Результаты

В режиме холостого хода магнитное поле в генераторе формируется исключительно ПМ, из-за чего возможно оценить влияние температуры на их магнитное состояние без учета реакции якоря. На рисунке 1 представлена картина магнитного поля в ПМ для режима холостого хода для различного диапазона температур.

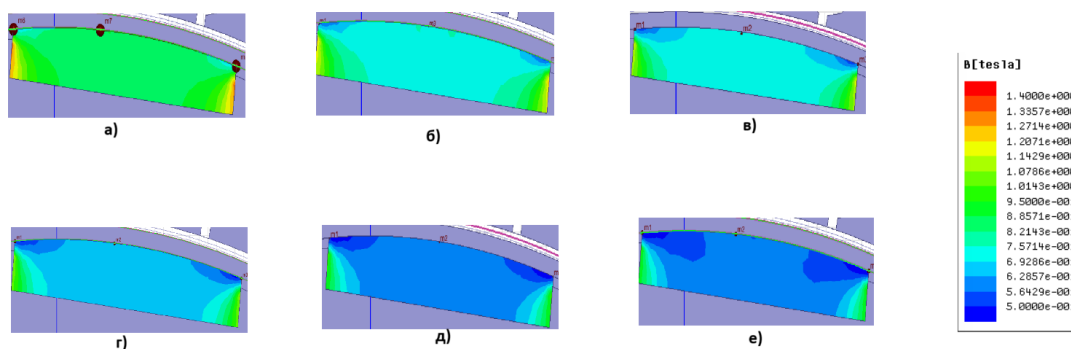


Рисунок 1 Картины магнитного поля для режима холостого хода: а) 20; б) 60; в) 100; г) 140; д) 180; е) 200

В номинальном режиме работы на распределение магнитного поля дополнительно влияет магнитодвижущая сила обмотки статора, что приводит к изменению характера температурных эффектов по сравнению с режимом холостого хода. На рисунке 2 представлена картина магнитного поля в ПС для номинального режима работы.

Согласно расчетам, полученным в результате моделирования, при наличии нагрузки, с ростом температуры сохраняется снижение магнитной индукции в ПМ, но абсолютные значения индукции в зазоре оказываются выше за счет действия реакции якоря.

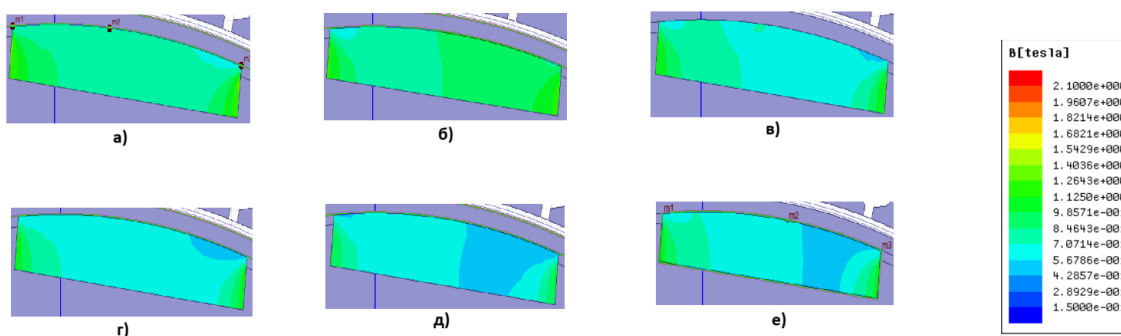


Рисунок 2 Картины магнитного поля для номинального режима: а) 20; б) 60; в) 100; г) 140; д) 180; е) 200

Параметры индукции для различных температур, полученных в ходе моделирования, приведены в таблице 1. B_1 , B_2 , B_3 – значения индукции под сбегающим краем, в центре и набегающем крае магнита соответственно.

Таблица 1. Параметры индукции при различной температуре ПМ

Т, °С	Режим холостого хода					Номинальный режим				
	Индукция			В _{max} , Тл	В _{ср} , Тл	Индукция			В _{max} , Тл	В _{ср} , Тл
	В ₁ , Тл	В ₂ , Тл	В ₃ , Тл			В ₁ , Тл	В ₂ , Тл	В ₃ , Тл		
20	0,80	0,87	0,79	0,87	0,52	0,80	0,81	0,72	0,95	0,55

60	0,73	0,81	0,71	0,82	0,49	0,71	0,69	0,75	0,84	0,48
100	0,71	0,79	0,72	0,80	0,47	0,67	0,64	0,72	0,81	0,46
140	0,66	0,75	0,65	0,74	0,44	0,61	0,59	0,64	0,76	0,43
180	0,61	0,68	0,60	0,69	0,41	0,56	0,54	0,59	0,71	0,40
200	0,58	0,66	0,55	0,66	0,39	0,56	0,53	0,49	0,68	0,36

В режиме холостого хода форма кривой ЭДС при всех исследуемых температурах остается близкой к синусоидальной, что говорит об отсутствии существенных искажений магнитного поля. Зависимость ЭДС от времени на холостом ходу представлена на рисунке 3

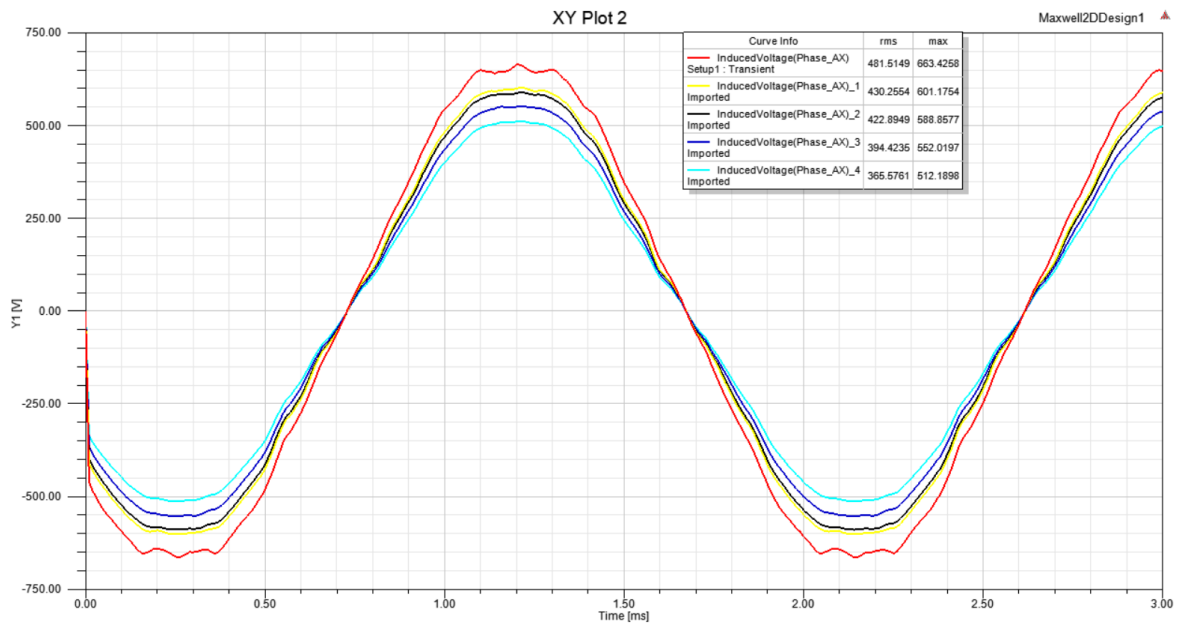


Рисунок 3 Кривая ЭДС генератора при различных температурах ПМ

При работе в номинальном режиме форма фазного напряжения искажается (рисунок 4), что связано с появлением тока нагрузки и воздействием магнитного поля якоря на основное поле ПМ. В результате локального магнитного насыщения элементов магнитопровода изменяется распределение магнитной индукции в воздушном зазоре, что приводит к отклонению формы напряжения от синусоидальной

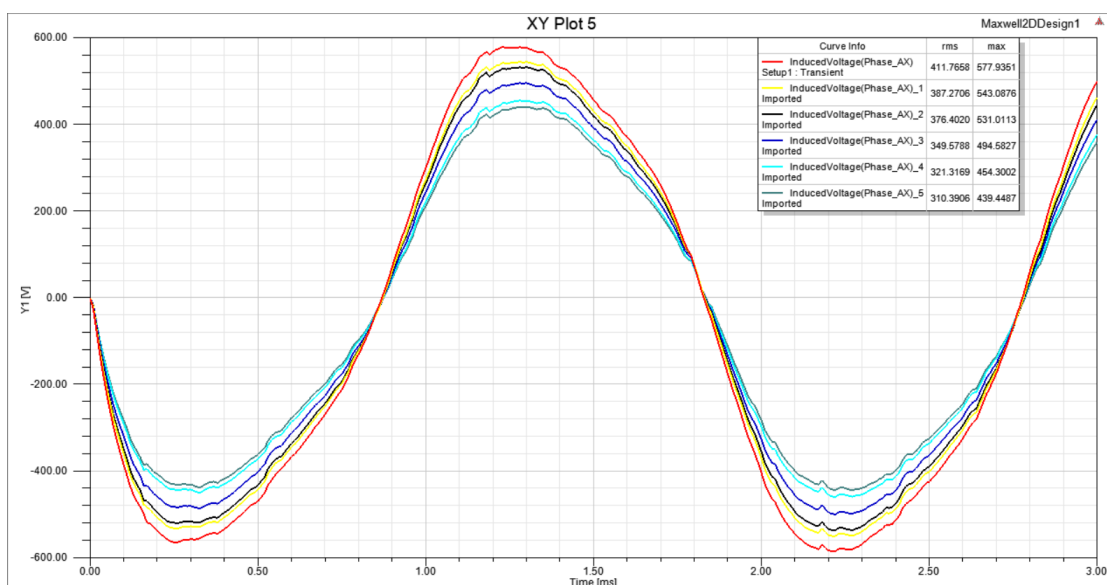


Рисунок 4 Кривая напряжения генератора при различных температурах ПМ

Параметры ЭДС, напряжения и момента, полученных в результате моделирования, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Электромеханические параметры для различных температур ПМ

Т, °С	Режим холостого хода		Номинальный режим		
	Максимальное значение E, В	Действующее значение E, В	Максимальное значение U, В	Действующее значение U, В	Момент, кН*м
20	632,5	454,6	577,9	411,8	0,91
60	601,2	430,3	543,1	387,3	0,80
100	588,9	422,9	531	376,4	0,76
140	552	394,4	494,6	349,6	0,65
180	512,2	365,6	454,3	321,3	0,55
200	498,9	363	439,4	310,4	0,51

Заключение.

В статье представлено исследование влияния температур ПМ на основные электромагнитные и электромеханические показатели синхронного генератора с поверхностным расположением магнитов. Анализ показал, что рост температуры ПМ приводит к устойчивому снижению магнитной индукции как в режиме холостого хода, так и в номинальном режиме. Результаты расчетов переходного процесса показали, что при увеличении температуры с 20 до 200 °С, действующие значения ЭДС и напряжения уменьшаются на 20% и 25% соответственно, в то время как значение момента уменьшается на 44% при том же изменении температуры. Данный фактор указывает на высокую чувствительность электромеханических характеристик SPM генератора к температуре ПМ.

Литература

1. Tun, Z.M.; Seangwong, P.; Fernando, N.; Siritaratiwat, A.; Khunkitti, P. Power Generation Enhancement of Surface-Mounted Permanent Magnet Wind Generators Using Eccentric Halbach Array Permanent Magnets. *Sustainability* 2025, *17*, 5893. <https://doi.org/10.3390/su17135893>
2. Rehman, A.; Kim, B. Design and Analysis of 15 MW SPM Vernier Generator for Direct-Drive Wind Turbine Applications. *Energies* 2023, *16*, 1094. <https://doi.org/10.3390/en16031094>
3. Nam, Phan Hoai & Chuyên, Trần. (2025). Research on optimal design of surface permanent magnet synchronous generator. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 14. 4115-4124. 10.11591/eei.v14i5.10305.
4. Özmen, T., & Onat, N. (2021). Comparative Performance Analysis of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generators. *Celal Bayar University Journal of Science*, 17(4), 429-436. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.959474>
5. Kana Padinharu, D.K., Li, G.-J. , Zhu, Z.Q. et al. (2020) Scaling effect on electromagnetic performance of surface mounted permanent magnet Vernier machine. *IEEE Transactions on Magnetics*, 56 (5). 8100715. ISSN 0018-9464

Literature

6. Tun, Z.M.; Seangwong, P.; Fernando, N.; Siritaratiwat, A.; Khunkitti, P. Power Generation Enhancement of Surface-Mounted Permanent Magnet Wind Generators Using Eccentric Halbach Array Permanent Magnets. *Sustainability* 2025, *17*, 5893. <https://doi.org/10.3390/su17135893>
7. Rehman, A.; Kim, B. Design and Analysis of 15 MW SPM Vernier Generator for Direct-Drive Wind Turbine Applications. *Energies* 2023, *16*, 1094. <https://doi.org/10.3390/en16031094>
8. Nam, Phan Hoai & Chuyên, Trần. (2025). Research on optimal design of surface permanent magnet synchronous generator. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 14. 4115-4124. 10.11591/eei.v14i5.10305.

9. Özmen, T., & Onat, N. (2021). Comparative Performance Analysis of Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generators. Celal Bayar University Journal of Science, 17(4), 429-436.
<https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.959474>

10. Kana Padinharu, D.K., Li, G.-J. , Zhu, Z.Q. et al. (2020) Scaling effect on electromagnetic performance of surface mounted permanent magnet Vernier machine. IEEE Transactions on Magnetics, 56 (5). 8100715. ISSN 0018-9464