

## Улучшение формы кривой ЭДС фаз обмотки статора и снижение добавочных потерь в явнополюсном синхронном генераторе

КРУЧИННИНА И.Ю., ШТАЙНЛЕ Л.Ю.

*Рассматриваются актуальные вопросы обеспечения синусоидальной формы кривой линейного напряжения, возникающие при проектировании широко применяемых в энергосистемах явнополюсных синхронных генераторов. Как известно, применение магнитных клиньев в пазах статора генератора позволяет улучшить основные электрические характеристики машины, снизить влияние высших гармоник, уменьшить добавочные потери, моменты от высших гармоник магнитного поля, шумы и вибрации, снизить температуру обмотки и активной стали статора и повысить КПД. Проведено исследование влияния магнитных свойств материала клиньев в пазах статора на коэффициент нелинейных искажений с помощью расчетного пакета прикладных программ ELCUT. Установлено, что значение относительной магнитной проводимости существенно влияет на коэффициент нелинейных искажений кривой ЭДС фаз обмотки статора и добавочных потерь в стали статора. Выбраны оптимальные значения магнитной проводимости материала клина, обеспечивающие форму кривой ЭДС генератора, соответствующую требованиям ГОСТ.*

*Ключевые слова: явнополюсный синхронный генератор, магнитный клин, нелинейные искажения, полюсный наконечник, воздушный зазор, обмотка статора*

При проектировании явнополюсных синхронных генераторов возникает проблема обеспечения формы кривой линейного напряжения, близкой к синусоидальной. Это вызвано требованиями эксплуатации, наиболее актуальными для современных генераторов в широком диапазоне значений мощности и частоты вращения: гидрогенераторов, мощных низкооборотных дизельных генераторов, генераторов с возбуждением от постоянных магнитов и др.

Высшие гармоники в кривой ЭДС генератора вызывают добавочные потери в обмотках и активной стали машины, шумы и вибрации, помехи в телефонных линиях, расположенных рядом с ЛЭП, перенапряжения в ЛЭП, связанные с явлением резонанса [1–4].

Исследование влияния магнитных свойств материала клиньев в пазах статора на коэффициент нелинейных искажений проведено с помощью расчетного пакета прикладных программ ELCUT [5] с целью определения значений магнитной проводимости материала клина, обеспечивающих форму кривой ЭДС в зазоре генератора, соответствующую требованиям ГОСТ [6].

Степень отклонения кривой линейного напряжения генератора от синусоидального определяется коэффициентом нелинейных искажений [7]:

$$K_{\text{DIST}} =$$

$$= \sqrt{|E_{N1}/E_{N2}|^2 + \dots + |E_{N3}/E_{N2}|^2 + \dots + |E_{N3}/E_{N2}|^2 + \dots} \quad (1)$$

Значение коэффициента  $K_{\text{DIST}}$  зависит от гармоник в кривой ЭДС генератора  $E_{N1}, \dots, E_{N3}, \dots, E_{N4}, \dots$ , т.е. от формы потока взаимной индукции (потока в зазоре); здесь  $E_{N1}, \dots, E_{N3}, \dots, E_{N4}, \dots$  – средние из модулей трех  $E_{AB}, E_{BC}, E_{AC}$  значений линейной ЭДС для каждой гармоники  $N_1, N_3, N_4$ . Этим номерам гармоник соответствуют индексы при линейных ЭДС  $E_{N1}, \dots, E_{N3}, \dots, E_{N4}$  в формуле (1) для вычисления коэффициента нелинейных искажений  $K_{\text{DIST}}$ .

Нумерация гармоник в этом выражении имеет вид  $N_1=1; 2; 3; \dots$  (низшие гармоники);  $N_2=p$  (основная гармоника);  $N_3=Sp=3p; 5p; 7p; \dots$  (низшие «дозубцовые» гармоники). Такая нумерация объясняется тем, что используется разложение потока взаимной индукции в гармонический ряд с периодом  $T_{GM} = \pi(D_{IN} - 2\delta_{EQ})$ , где  $D_{IN}$  – диаметр рашотки статора;  $\delta_{EQ}$  – эквивалентный зазор под полюсом [8–10].

Номерам гармоник  $N_1, N_3, N_4$  соответствуют индексы при линейных ЭДС  $E_{N1}, \dots, E_{N3}, \dots, E_{N4}$  в (1) для вычисления коэффициента нелинейных искажений  $K_{\text{DIST}}$ . В этом исследовании был использован метод расчета коэффициента нелинейных

искажений ЭДС явнополюсного синхронного генератора, изложенный в [11].

Для вычисления  $K_{DIST}$  заданными предполагаются: номинальные данные генератора, геометрические размеры его активной части, число полюсов, схема обмотки статора (последовательность соединения стержней или катушек для каждой из шести фазных зон). Вычисление выполняется численным методом, с помощью пакета ELCUT [5]. Последовательность этих вычислений такова:

**Этап 1.** Вычисление гармоник радиальной составляющей потока взаимоиנדукции

$$b_R(\theta) = \sum B_N \exp(j\psi_N).$$

**Этап 2.** Вычисление трех значений фазных и трех значений линейных ЭДС обмотки статора генератора. Выражение для комплексной амплитуды (фазора) ЭДС гармоники порядка  $N$  фазной зоны  $A$  обмотки имеет вид:

$$E_{AN} = \frac{1}{2} \{ b_{(R),N} [\exp(jA_1 \theta_{СТАТ} N) + \exp(jA_2 \theta_{СТАТ} N) + \exp(jA_3 \theta_{СТАТ} N) + \dots + \exp(jA_L \theta_{СТАТ} N) + \dots] \} K_E K_{SK} = \\ = |E_{A,N}| \exp(j\varphi_{A,N}),$$

где  $b_{(R),N} = |B_N| \exp(j\psi_N)$ ;  $B_N = |B_N| \exp(j\theta N)$  – комплексная амплитуда (фазор) гармоники порядка  $N$  радиальной составляющей индукции;  $\psi_N$  – ее фазовый угол;  $\theta_{СТАТ} = 2\pi / Z$ , где  $Z$  – число пазов статора;  $K_{SK}$  – коэффициент скоса (согласно [3]);  $K_E = \frac{2}{\pi} \omega L \tau W_K$ ;  $L$  – расчетная длина сердечника [4];  $\omega$  – круговая частота сети;  $W_K$  – число витков в катушке.

Выражение для комплексной амплитуды (фазора) ЭДС гармоники порядка  $N$  фазной зоны  $A'$  обмотки имеет аналогичный вид:

$$E_{A'N} = \frac{1}{2} \{ b_{(R),N} [\exp(jA'_1 \theta_{СТАТ} N) + \exp(jA'_2 \theta_{СТАТ} N) + \exp(jA'_3 \theta_{СТАТ} N) + \dots + \exp(jA'_L \theta_{СТАТ} N) + \dots] \} K_E K_{SK} = \\ = |E_{A',N}| \exp(j\varphi'_{A',N}). \quad (2)$$

Если обмотка двухслойная, то ЭДС  $E_{A,N}$  и  $E_{A',N}$  необходимо еще умножить на  $T = 1 - \exp\left(j\beta\pi \frac{N}{p}\right)$ , где  $\beta$  – относительное укорочение шага обмотки статора.

Комплексные значения амплитуды ЭДС остальных фазных зон обмотки статора ( $B$  и  $C$ ) рассчитываются аналогично.

**Этап 3.** Вычисление коэффициента нелинейных искажений  $K_{DIST}$  согласно (1). Для генераторов свыше 100 кВА нормами ГОСТ и МЭК [6] предусмотрено  $K_{DIST,доп} \leq 5\%$ , для генераторов от 10 до 100 кВА значение  $K_{DIST,доп} \leq 10\%$ .

На рис. 1 показана картина поля в четверти сечения генератора, полученная с помощью расчетного пакета ELCUT [5] для электрической машины с параметрами: 1250 кВт; 6,3 кВ; 600 об/мин; 50 Гц (расчет при отсутствии несимметрии в обмотке статора и эксцентриситета) при  $\alpha = 0,70$  и  $\Lambda_{GAP} = 1,6$  ( $\Lambda_{GAP} = \delta_{max} / \delta_{min}$  – отношение максимального к минимальному значению зазора под полюсом).

Были проведены численные эксперименты для расчета коэффициента искажения для различных вариантов проводимости магнитных клиньев. Рассматривались соотношения  $\mu_{кл} / \mu_0 = 10, 20, 30, 50, 70, 90$ , где  $\mu_{кл}$  – магнитная проводимость материала магнитного клина. Результат расчета  $K_{DIST}$  в зависимости от значения относительной магнитной

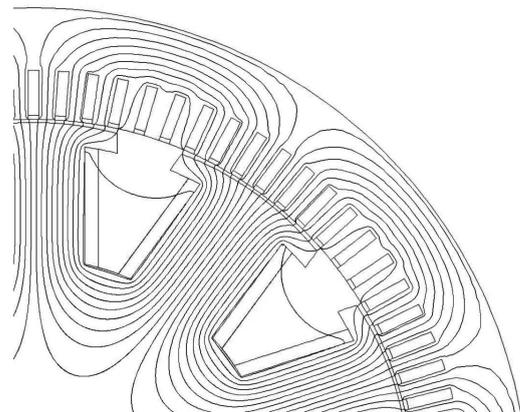


Рис. 1. Картина поля в случае магнитного клина

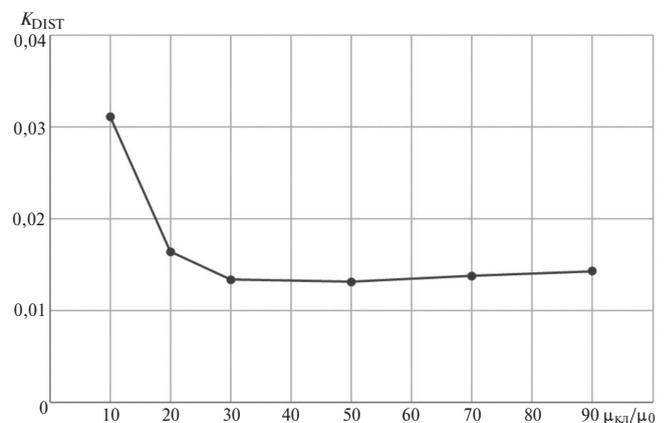


Рис. 2. Зависимость коэффициента нелинейных искажений  $K_{DIST}$  от значений относительной магнитной проницаемости материала клина  $\mu_{кл} / \mu_0$

проницаемости клина для генератора с указанными выше параметрами представлены на рис. 2.

Для сравнения было рассчитано значение  $K_{DIST}$  в случае использования немагнитного клина. Оно составило 0,2099, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ и МЭК. Для случая выполнения паза полузакрытым с раскрытием  $0,2b_{п}$  (где  $b_{п}$  – ширина паза) значение  $K_{DIST} = 0,0166$ .

Таким образом, расчет коэффициента нелинейных искажений для явнополюсного синхронного генератора с магнитными клиньями, имеющими различные значения магнитной проводимости, показал, что для вариантов со значением относительной магнитной проводимости материала клина свыше 30, коэффициент искажений  $K_{DIST}$  удовлетворяет требованиям ГОСТ и МЭК. Его значение сравнимо с аналогичным для варианта конструкции с полузакрытым пазом, имеющим раскрытие около  $0,2b_{п}$ .

Выполнение клиньев из магнитного материала позволяет избежать усложнения конструкции, вызванного выполнением паза полузакрытым либо применением скоса пазов, и одновременно выполнить требования ГОСТ и МЭК к значению коэффициента нелинейных искажений. Для рассмотренной в статье задачи материал клина должен иметь значение относительной магнитной проводимости около 50.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергер А.Я. Синхронные машины. Л.; М.: ГОНТИ, 1938, 662 с.
2. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Л.: Изд-во «Питер», 2004.
3. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, т. 2. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1973, 655 с.

4. Проектирование электрических машин/Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, 1980, 495 с.

5. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя, Санкт-Петербург: ООО «Тор», 2013, 295 с.

6. ГОСТ Р 52776 – 2007 (МЭК 60034-1 – 2004). Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики.

7. Iija Boguslawsky, Irina Kruchinina, Alexander Lyubimtcev, Lyubov Shtainle. Method of EMF Total Harmonic Distortion Calculation of the Salient Pole Synchronous Generator (using 2D simulation package)//Technical Transactions. Electrical Engineering. Iss. 3-E. p. 25–38. 2016. DOI: 10.4467/2353737XCT.16.263.6062.

8. Кручинина И.Ю., Штайнле Л.Ю. МДС многофазных обмоток статора с дробным числом  $Q$  пазов на полюс и фазу. – Электротехника, 2010, № 8, с. 9–15.

9. Богуславский И.З. Двигатели и генераторы переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами. Изд.-во СПбГПУ, 2006, т. 1, 390 с.; т. 2, 130 с.

10. Богуславский И.З., Кусс Г. (ФРГ). Исследование структуры  $m$ -фазной обмотки статора с дробным числом  $Q$ . – Известия РАН. Энергетика, 2000, №1, с. 75–86.

11. Богуславский И.З., Кручинина И.Ю., Любимцев А.С., Штайнле Л.Ю. Метод расчета нелинейных искажений электро-движущей силы явнополюсного генератора. – Электричество, 2017, № 2, с. 27–32.

[10.05.2018]

*А в т о р ы: Кручинина Ирина Юрьевна окончила электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ) в 1984 г. Докторскую диссертацию «Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований» защитила в 2013 г. Временно исполняющая обязанности директора Института химии силикатов им. И.В. Гребенищикова РАН.*

*Штайнле Любовь Юрьевна окончила электромеханический факультет СПбГПУ в 2000 г. Научный сотрудник лаборатории химических проблем энергетики Института химии силикатов им. И.В. Гребенищикова РАН.*

*Elektrichestvo, 2018, No. 11, pp. 45–48*

*DOI:10.24160/0013-5380-2018-11-45-48*

## On Decreasing the Stator Winding Phase EMF Waveform Distortion Factor and Additional Iron Losses in the Stator of a Salient Pole Synchronous Generator

**KRUCHININA Irina Yu.** (Institute of Silicate Chemistry, Russia Academy of Sciences (ICH S RAS), St. Petersburg, Russia) – Acting director, Dr. Sci. (Eng.)

**SHTAINLE Lyubov' Yu.** (ICH S RAS, St. Petersburg, Russia) – Scientific researcher

*The article considers topical matters of ensuring asinusoidal shape of the line-to-line voltage waveform, which arise in designing salientpole synchronous generators, machines that are widely used in power systems. As is well known, the use of magnetic wedges in the generator stators lotsmakes it possible to improve the machine's basic electrical characteristics; to decrease the influence of higher harmonic*

components; to decrease additional losses, the torques produced by the magnetic field higher harmonic components, noise and vibration; to decrease the winding temperature and the stator active steel temperature, and to increase the efficiency. The effect the magnetic properties of wedge material in the stator slots have on the nonlinear distortion factor is investigated using the ELCUT applied computation software package. It has been determined that the relative permeance value has an essential effect on the stator winding phase EMF waveform distortion factor and on the additional loss in the stator iron. The optimal wedge material permeance value with which the generator EMF waveform complies with the requirements of the relevant Russian state standard (GOST) have been selected.

Key words: salient pole synchronous generator, magnetic wedge, nonlinear distortions, pole shoe, air gap, stator winding

## REFERENCES

1. **Berger A.Ya.** *Sinkhronnye mashiny* (Synchronous machines). Leningrad; Moscow, GONTI, 1938, 662 p.
2. **Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* (Theoretical foundation of electrical engineering). Leningrad, Piter, 2004.
3. **Kostenko M.P., Piotrovskii L.M.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Vol. 2. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1973, 655 p.
4. **Proektirovaniye elektricheskikh mashin/Pod red. I.P. Kopylova** (Design of electrical machines/Edit. by I.P. Kopylov). Moscow, Energiya, 1980, 495 p.
5. **ELCUT.** *Modelirovaniye elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 6.0. Rukovodstvo pol'zovatelya* (Modeling of Electromagnetic, Thermal, and Elastic Fields Using the Finite Element Method. Version 6.0. User Manual). St. Petersburg, LLC «Tor», 2013, 295 p.
6. **GOST R 52776–2007** (MEK 60034-1 – 2004). *Mashiny elektricheskkiye vrashchayushchiyesya. Nominal'nye dannye i kharakteristiki* (GOST R 52776–2007 (IEC 60034-1-2004). Rotating Electrical Machines. Rating and Performance).
7. **Ilya Boguslawsky, Irina Kruchinina, Alexander Lyubimtsev, Lyubov Shtainle.** Method of EMF Total Harmonic Distortion Calculation of the Salient Pole Synchronous Generator (using 2D simulation package)/Technical Transactions. Electrical Engineering. Iss. 3-E. p. 25–38. 2016. DOI: 10.4467/2353737XCT.16.263.6062.
8. **Kruchinina I.Yu., Shtainle L.Yu.** *Elektrotekhnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2010, No. 8, pp. 9–15.
9. **Boguslavskii I.Z.** *Dvigateli i generator peremennogo toka: teoriya i metody issledovaniya pri rabote v setyakh s nelineinymi elementami* (AC Motors and Generators: Theory and Investigation Methods during Operation in Networks Containing Nonlinear Elements). Publ. of St. Petersburg State Polytechnic University, 2006, vol. 1, 390 p.; vol. 2, 130 p.
10. **Boguslavskii I.Z., Kuss G.** (FRG). *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Energetics)*, 2000, No. 1, pp. 75–86.
11. **Boguslavskii I.Z., Kruchinina I.Yu., Lyubimtsev A.S., Shtainle L.Yu.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 2, pp. 27–32.

[10.05.2018]