

16. Kolosok I.N., Glazunova A.M. *Sbornik trudov Vserossiskoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Energosistema: upravleniye, kachestvo, bezopasnost»* — in Russ. (Proc. of the All-Russian scientific and technical conf. «Power system: management, quality, safety»). Ekaterinburg (Russia). Ural State Technical University, 2001, pp. 122–126.

17. Hadis Karimipour, Venkata Dinavahi. Extended Kalman filter-based parallel dynamic state estimation. — IEEE transactions on smart grid, May 2015, vol. 6, No. 3, pp. 1539–1549.

18. Gamm A.Z., Glazunova A.M., Grishin Yu.A., Kurbatskii V.G., Sidorov D.V., Spirayev V.A., Tomin N.V. *Elektrichestvo* — in Russ. (*Electricity*), 2011, No. 5, pp. 17–26.

19. Bramer K., Ziffing G. *Fil'tr Kalmana—B'yusi* (Filter Kalman—Bucy). Moscow, Publ. «Nauka», 1982, 198 p.

20. Amit Jain, Shivakumar N.R. Impact of PMU in dynamic state estimation of power systems. — Trans. of Power Symposium, 2008, NAPS 08.40th North American.

21. GOST R 50779—2000. *Statisticheskiye metody. Veroyatnost' i osnovy statistiki. Terminy i opredeleniya* (State Standard R50779—2000: Statistical methods. Probability and foundations of statistics. Terms and definitions). Moscow, Gosstandart, 2000, 26 p.

22. S'yemshchikov Ye.S., Glazunova A.M. *Nauchnye trudy V Mezhdunarodnoi molodezhnoi konf. «Energetika glazami molodezhi»* (Proc. of the V Intern. youth conf. «Power engineering through the youth's eyes»). Tomsk (Russia), 10–14 November, vol. 1, 2014, pp.

\* \* \*

*Электричество*, 2017, № 2, с. 27–32.

## Метод расчета нелинейных искажений электродвижущей силы явнополюсного генератора<sup>1</sup>

БОГУСЛАВСКИЙ И.З., КРУЧИНИНА И.Ю., ЛЮБИМЦЕВ А.С., ШТАЙНЛЕ Л.Ю.

*Изложен метод расчета формы кривой линейного напряжения явнополюсного синхронного генератора в режиме холостого хода с учетом насыщения его магнитной цепи, несимметрии трехфазной обмотки статора (с целым или дробным числом пазов  $Q$  на полюс и фазу), а также с учетом формы полюсов ротора и его эксцентриситета. При расчете принимается во внимание реальная геометрия машины, в том числе геометрия его полюсного наконечника (различные воздушные зазоры под его серединой и по краям), зубчатость статора и др. При расчете использован пакет программ, в котором реализован метод конечных элементов. Обеспечение формы кривой, близкой к синусоидальной, вызвано требованиями эксплуатации [1]; эти требования особенно актуальны для современных генераторов в широком диапазоне мощностей и скоростей вращения: гидрогенераторов, мощных низкооборотных дизельных генераторов (10–50 МВт, 100–250 об/мин), генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (в том числе высокооборотных для газовых турбин) и др. В результате расчета этим методом становится возможным принять в процессе проектирования генератора решение о необходимости усложнения его конструкции за счет применения скоса пазов статора (полюсов ротора) или сдвига полюсов в тангенциальном направлении.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** явнополюсный генератор, несимметричная обмотка статора, воздушный зазор, нелинейные искажения, метод расчета

В практике проектирования явнополюсных синхронных генераторов возникает проблема обеспечения формы кривой линейного напряжения, близкой к синусоидальной [1]. Она связана с тем, что высшие гармоники в кривой ЭДС генератора вызывают:

помехи в телефонных линиях, расположенных вблизи линий электропередачи (ЛЭП) [2];

перенапряжения в этих ЛЭП, связанные с явлением резонанса [3];

добавочные потери в обмотках и активной стали генераторов [4];

вибрации их обмоток и активной стали; шумы, фиксируемые в окружающем пространстве [4, 5].

Цель расчета формы кривой линейного напряжения — спроектировать конструкцию генератора так, чтобы она соответствовала требованиям ГОСТ

и МЭК [1]. Это касается не только генераторов с электромагнитной системой возбуждения, но и современных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов; практика показывает, что придание конструкции полюсов этих генераторов традиционной формы (с различным зазором под серединой полюса и по его краям) встречает иногда технологические трудности. Если форма кривой требованиям [1] не удовлетворяет, то приходится принимать дополнительные меры, которые усложняют конструкцию генератора и увеличивают его стоимость в связи с использованием:

скоса пазов статора (полюсов ротора) в осевом направлении на одно пазовое деление статора [4, 7];

сдвига полюсов в тангенциальном направлении (локального или группового) [2, 7];

обмотки с дробным числом пазов  $Q$  на полюс и фазу [6].

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 14–08–00817\_a).

Вычисление коэффициента нелинейных искажений. Нормы. Степень отклонения линейного напряжения генератора от синусоидального определяется коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{dist} = \sqrt{|E_{N1} / E_{N2}|^2 + \dots + |E_{N3} / E_{N2}|^2 + \dots} \rightarrow \dots + |E_{N4} / E_{N2}|^2 + \dots \quad (1)$$

Значение коэффициента  $K_{dist}$  зависит, следовательно, от гармоник в кривой ЭДС генератора  $E_{N1}$ , ...,  $E_{N3}$ , ...,  $E_{N4}$ , ..., т.е. от формы потока взаимной индукции (потока в зазоре), здесь  $E_{N1}$ , ...,  $E_{N3}$ , ...,  $E_{N4}$ , ... — средние из модулей трех значений линейных ЭДС ( $E_{AB}$ ,  $E_{BC}$ ,  $E_{AC}$ ) для каждой гармоники  $N_1$ ,  $N_3$ ,  $N_4$ ; этот порядок гармоник (с учетом зубцовых) приведен далее.

Для генераторов свыше 100 кВА в [1] предусмотрено  $K_{dist \text{ доп}} \leq 5\%$ , для генераторов от 10 до 100 кВА —  $K_{dist \text{ доп}} \leq 10\%$ .

Факторы, влияющие на форму потока взаимной индукции; два типа гармоник потока взаимной индукции. Радиальная составляющая потока взаимной индукции  $b_{R(\theta)}$  определяется гармониками двух типов: гармониками низшего порядка  $1 < s < N_{z \text{ min}}$  и гармониками зубцового [4] порядка  $s > N_{z \text{ min}}$ , где  $N_{z \text{ min}}$  — минимальная гармоника зубцового порядка;  $\theta$  — угловая координата вдоль расточки статора ( $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ).

Амплитуды и фазы гармоник зубцового порядка  $s \geq N_{z \text{ min}}$  определяются, в основном, зубчатостью статора [2]. При целом числе пазов  $Q$  на полюс и фазу минимальный их порядок равен:  $N_{z \text{ min}} = 6Q \pm 1$ , например, при  $Q=2$   $N_{z \text{ min}(1)} = 11$ ;  $N_{z \text{ min}(2)} = 13$ ; соответственно, при минимальных порядках  $N_{z \text{ min}}$  амплитуда этих зубцовых гармоник максимальна; она и определяет значение коэффициента  $K_{dist}$ . Отметим, что при дробном числе пазов  $Q$  на полюс и фазу минимальный их порядок возрастает: т.е.  $N_{z \text{ min}} = 6MQ \pm 1$ ; здесь  $M$  — целое число, при котором произведение  $(6MQ)$  — четное [2], например, при  $Q=2,25$  имеем:  $N_{z \text{ min}(1)} = 53$ ;  $N_{z \text{ min}(2)} = 55$ . Из этого примера следует важный практический вывод: усложнение конструкции обмотки (за счет выбора дробного числа  $Q$ ) значительно увеличивает порядок зубцовых гармоник и, следовательно, приводит к уменьшению их амплитуды. Соответственно, значительно уменьшается и коэффициент  $K_{dist}$ .

Амплитуды и фазы гармоник низшего порядка  $1 < s < N_{z \text{ min}}$  («дозубцовых») в основном определяются:

формой полюсного наконечника (радиусом  $R_p$  и шириной  $b_p$ ), средним значением воздушного за-

зора  $\delta_{EQ}$ , а также насыщением магнитной цепи машины [5];

несимметрией обмотки статора;

значением возможного эксцентриситета ротора.

Радиусом  $R_p$  описывается сектор окружности с центром на продольной оси полюса; он занимает часть полюсного деления  $\tau$ :  $\alpha = b_p / \tau$ , где  $b_p$  — ширина полюса. В выполненных генераторах обычно  $0,55 \leq \alpha \leq 0,80$  [5].

Расчетное выражение для радиуса  $R_p$  [5]:

$$R_p = \frac{D_{IN}}{2 + \frac{8D_{IN}(\delta_{\max} - \delta_{\min})}{b_p^2}}, \quad (2)$$

где  $D_{IN}$  — диаметр расточки статора;  $\delta_{\min}$ ,  $\delta_{\max}$  — минимальный и максимальный зазор под полюсом соответственно.

Отношение  $\Lambda_{GAP} = \delta_{\max} / \delta_{\min}$  выбирается обычно в пределах  $1,2 \leq \Lambda_{GAP} \leq 2,0$  [5]. Размер эквивалентного зазора вычисляется по формуле

$$\delta_{EQ} = \delta_{\min} + \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{3}. \quad (3)$$

В практике проектирования генераторов при вычислении коэффициента  $K_{dist}$  обычно диаметр  $D_{IN}$  и зазор  $\delta_{EQ}$  уже предварительно выбраны, исходя из уровня электромагнитного и теплового использования его активной части [5] и, следовательно, исходя из габаритов и конкурентоспособности машины. Поэтому при расчете конструкции с минимальным значением коэффициента  $K_{dist}$  обычно рассматривают ряд вариантов для радиуса  $R_p$  согласно (2) с различными сочетаниями величин  $\Lambda_{GAP}$  и  $b_p$  в указанных ранее пределах при диаметре  $D_{IN} = \text{const}$  и зазоре  $\delta_{EQ} = \text{const}$ .

Несимметрия обмотки статора многополюсных машин с целым или дробным числом  $Q$  вызвана в практике сборки ее в цехе завода-изготовителя следующим: для сокращения длины многочисленных перемычек между фазными зонами (катушечными группами) иногда соединяют последовательно катушечные группы, расположенные рядом, но принадлежащие разноименным фазам. Для таких машин не исключаются и ошибки при сборке, которые удается установить только после пайки лобовых частей («головок»). Все это влияет на форму кривой ЭДС машины и несимметрию ЭДС фаз.

Рассмотрим для определенности обмотку с целым числом  $Q=2$  десятиполюсной машины ( $2p=10$ ). Такая обмотка подразделяется на  $p=5$  синфазных единичных обмоток [2, 4], каждая из которых содержит шесть фазных зон:  $A$ ,  $C'$ ,  $B$ ,  $A'$ ,  $C$ ,  $B$ ; фазные зоны  $A$  и  $A'$  сдвинуты на  $180^\circ$  эл.; то же справедливо и для фазных зон  $B$  и  $B'$ ,  $C$  и  $C'$ .

При этом ЭДС фазных зон *A* и *B* сдвинута на 120° эл., а ЭДС зон *A* и *C* — на 240° эл.; соответственно, ЭДС зон *A* и *C'* — на 60° эл. Для сокращения длины переемычек, по крайней мере в одной из единичных обмоток, например для первой пары полюсов (*p'*=1) в практике проектирования и сборки соединяют, например, последовательно не зоны *A* и *A'*, а зоны *A* и *C'*. Это приводит к несимметрии ЭДС линейных напряжений.

Обычно в практике относительное значение несимметрии  $\varepsilon_{EMF}$  линейных ЭДС определяют из соотношения

$$\varepsilon_{EMF} = \frac{E_{\text{лин. max}}^* - E_{\text{лин. min}}^*}{E_{\text{лин. ср}}^*} \leq 0,03. \quad (4)$$

Здесь  $E_{\text{лин. max}}^*$ ,  $E_{\text{лин. min}}^*$  — максимальное и минимальное значение модулей трех линейных ЭДС;  $E_{\text{лин. ср}}^*$  — среднее их значение (в долях номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ ).

Если  $\varepsilon_{EMF} < 0,03$ , то длину переемычки можно таким же путем сократить и для остальных единичных обмоток ( $p' \leq 5$ ).

Несимметрия линейных ЭДС приводит также к изменению коэффициента  $K_{\text{dist}}$  согласно (1).

Эксцентриситет ротора  $\varepsilon$  практически неизбежен при монтаже машины большой мощности (с моментом на валу  $M_B > 5\text{тМ}$ ). При проектировании генератора приходится учитывать возможный эксцентриситет в этих пределах. Эксцентриситет ротора влияет на форму потока взаимоиндукции и, следовательно, на форму кривой ЭДС машины. Нормы, ограничивающие значение  $\varepsilon$ , отсутствуют, однако в практике принимают  $\varepsilon \leq 10\%$ .

*Особенности выбора периода разложения при вычислении гармоник радиальной составляющей индукции в зазоре. Результаты гармонического анализа.* Вычисление амплитуд и фаз гармоник радиальной составляющей индукции в зазоре (обоих порядков  $1 < s < N_{z \text{ min}}$  и  $s \geq N_{z \text{ min}}$ ) может быть выполнено как аналитическим методом [8], так и численным [9]. Обычно их вычисляют на окружности с радиусом  $\rho = D_{IN} - \delta_{EQ}$ . При численном методе удобно воспользоваться одним из прикладных пакетов (2D) по расчету полей МКЭ [10].

Для обмоток с целым числом  $Q$  при отсутствии несимметрии, а также и эксцентриситета ротора достаточно в качестве периода разложения потока взаимоиндукции в ряд выбрать период  $T_{EL} = \pi(D_{IN} - 2\delta_{EQ})/p$ . Однако для обмотки при наличии в ее схеме несимметрии, а также и при эксцентриситете ротора он должен охватывать все пары полюсов:

$$T_{GM} = \pi(D_{IN} - 2\delta_{EQ}). \quad (5)$$

Отметим, что при разложении потока взаимоиндукции в гармонический ряд с периодом  $T_{EL}$  номера гармоник:  $N'_1=1$  (основная гармоника);  $N'_2=s=3; 5; \dots$  (низшие «дозубцовые» гармоники);  $N'_3=N_{z \text{ min}}$  (зубцовая гармоника). Однако при его разложении в ряд с периодом  $T_{GM}$  нумерация гармоник изменяется в соответствии с числом пар полюсов [11]; кроме того, при наличии несимметрии в магнитной цепи (эксцентриситета ротора) появляются дополнительно низшие гармоники [11], так что нумерация гармоник будет:  $N_1=1; 2; 3; \dots$  (низшие гармоники);  $N_2=p$  (основная гармоника);  $N_3=sp=3p; 5p; 7p; \dots$  (низшие «дозубцовые» гармоники);  $N_4=N_{z \text{ min}}p$  (зубцовая гармоника).

*Примечание.* Номерам гармоник  $N_1, N_3, N_4$  соответствуют индексы при линейных ЭДС ( $E_{N_1}, \dots, E_{N_3}, \dots, E_{N_4}$ ) в формуле (1).

В результате разложения радиальной составляющей индукции  $b_R(\theta)$  в ряд с периодом  $T_{GM}$  в координатах ротора получаем (суммирование ведется по номерам  $N$  гармоник):

$$b_R(\theta) = \sum B_N \exp(j\Psi_N), \quad (6)$$

где  $B_N = |B_N| \exp(j\Theta_N)$  — комплексная амплитуда (фазор) гармоники порядка  $N$  радиальной составляющей индукции;  $\Psi_N$  — ее фазовый угол.

Для расчетов гармоник ЭДС фаз обмотки статора в зависимости от их номеров ( $N$ ) выражение (6) удобно представить в виде таблицы, где приводятся комплексные амплитуды  $B_N$  гармоник радиальной составляющей индукции и их фазовые углы  $\Psi_N$  при разложении с периодом согласно (5):

$B_N$	$B_M$	$B_R$	...	$B_S$	$B_U$	$B_W$	...	$B_K$	$B_L$
$\Psi_N$	$\Psi_M$	$\Psi_R$	...	$\Psi_S$	$\Psi_U$	$\Psi_W$	...	$\Psi_K$	$\Psi_L$

Индексы  $M, R, \dots, S, U, W, \dots, K, L$  в таблице обозначают номера гармоник с учетом разложения с периодом согласно (5); индексы  $M, R$  — гармоники низшего порядка ( $N_1$ ); индекс  $S$  — основную гармонику (порядка  $N_2$ ); индексы  $U, W$  — «дозубцовые» гармоники (порядка  $N_3$ ), а индексы  $K, L$  — зубцовые (порядка  $N_4$ ) и выше.

*Последовательность вычисления коэффициента нелинейных искажений  $K_{\text{dist}}$ .* 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), значение эксцентриситета ротора.

Требуется вычислить<sup>2</sup> ЭДС, индуктируемую в обмотке статора гармониками взаимной индукции порядка  $N_1 - N_4$ , и коэффициент  $K_{dist}$ .

1. Задаются ток холостого хода, соответствующий насыщению магнитной цепи генератора при его номинальном напряжении (для генераторов с электромагнитным возбуждением), либо — значение коэрцитивной силы магнитов в соответствии с номинальным напряжением (для генераторов с возбуждением от постоянных магнитов); геометрические размеры активной части генератора в поперечном сечении; пределы изменения значений  $\Lambda_{GAP}$  ( $1,2 \leq \Lambda_{GAP} \leq 2,0$ ) и  $\alpha$  ( $0,55 \leq \alpha \leq 0,8$ ); шаги  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\Lambda_{GAP}$ , определяющие число рассчитываемых значений коэффициента  $K_{dist}$  при изменении параметров  $\alpha$  и  $\Lambda_{GAP}$  в указанных пределах.

2. Вычисляются:

1) гармоники порядка  $N_1 - N_4$  радиальной составляющей потока взаимной индукции  $b_R(\theta)$ ; заполняется таблица, аналогичная приведенной ранее таблице;

2) три значения фазных и линейных ЭДС обмотки статора генератора для гармоник порядка  $N_1 - N_4$  (по формулам (П-1) и (П-2) Приложения);

3) коэффициент нелинейных искажений  $K_{dist}$  согласно (1).

*Примечание.* Если  $K_{dist} > K_{dist\text{доп}}$  для одного или нескольких значений  $\Lambda_{GAP}$  и  $\alpha$  (при их изменении в указанных пределах), то конструкция генератора для этих значений  $\Lambda_{GAP}$  и  $\alpha$  должна быть усложнена согласно п. 1);

4) относительные значения линейных ЭДС для основной гармоники (порядка  $N_2 = p$ ) (по формулам (П-1) и (П-2) Приложения):

$$\frac{E_{AB}}{U_{\text{ном}}} = E_{AB}^*; \quad \frac{E_{BC}}{U_{\text{ном}}} = E_{BC}^*; \quad \frac{E_{AC}}{U_{\text{ном}}} = E_{AC}^*;$$

5) значение относительной несимметрии линейных ЭДС  $\varepsilon_{EMF}$  обмотки согласно (4).

*Примечание.* Если относительная несимметрия  $\varepsilon_{EMF}$  не удовлетворяет соотношению (4) для одного или нескольких значений  $\Lambda_{GAP}$  и  $\alpha$  (при их изменении в указанных пределах), то для этих значений  $\Lambda_{GAP}$  и  $\alpha$  обмотка статора — несимметрична; требуется доработка конструкции генератора.

**Приложение. Методика вычисления гармоник ЭДС порядка  $N$ .** 1. *Представление схемы соединений стержней (катушек) обмотки статора.* Гармоники ЭДС фазы обмотки вычисляются как сумма ЭДС её стержней (катушек), расположенных в пазах. Ранее отмечалось, что схемы обмотки статора в практике проектирования многополюсных генераторов не всегда выполняются «по правилам» [4, 5]: в фаз-

ную зону, например зону  $A$ , включаются полностью или несколько стержней (катушек) из ближайшей фазной зоны, например  $C$ , для того, чтобы сократить длину переемычек между фазными зонами; это приводит к несимметрии ЭДС фаз. Степень этой несимметрии можно установить, если вычислять ЭДС каждой из фаз для основной гармоники (порядка  $N_2 = p$ ); в практике это позволяет, кроме того, выявить возможные ошибки при сборке схемы обмотки в цехе, особенно для обмоток многополюсных машин и обмоток с дробным числом  $Q$ , в том числе и при  $Q < 1$ .

Схему соединений стержней (катушек) обмотки статора удобно представить в виде последовательности номеров пазов для каждой из шести фазных зон трехфазной обмотки; число этих номеров равно числу пазов  $Z$ . Для фазной зоны  $A$ , например, она имеет вид:  $A_1; A_2; A_3; A_4; \dots; A_L$ . Рассмотрим в качестве примера обмотку генератора с дробным числом  $Q$  на полюс и фазу [12]:  $Z=66$ ,  $p=4$ . Для этой фазной зоны соответствующая последовательность номеров стержней (катушек) в пазах имеет вид: 10; 11; 26; 27; 28; 42; 43; 44; 59; 60; 61 [4, 5]. Разность между двумя произвольными номерами пазов, например между номером  $A_2 = 11$  и  $A_5 = 28$ , определяет фазовый угол между ЭДС этих стержней (катушек). Следует отметить, что очередность номеров пазов в этой последовательности — произвольна, например, справедлива и последовательность вида: 28; 11; 43; 27; 10; 61; 26; 44; 59; 60; 42; тогда  $A_2 = 11$  и  $A_5 = 10$ .

2. *Расчетные выражения для ЭДС гармоник порядка  $N$ .* Вычисление ЭДС фаз обмотки. Выражение для комплексной амплитуды (фазора) ЭДС гармоники порядка  $N$  фазной зоны  $A$  обмотки имеет вид:

$$E_{A,N} = \frac{1}{2} \{ b_{(R),N} [\exp(jA_1 \Theta_{\text{стат}} N) + \exp(jA_2 \Theta_{\text{стат}} N) + \exp(jA_3 \Theta_{\text{стат}} N) + \dots + \exp(jA_L \Theta_{\text{стат}} N) + \dots] \} K_E K_{sk} = \\ = |E_{A,N}| \exp(j\varphi_{A,N}). \quad (\text{П-1})$$

Здесь  $b_{(R),N} = |B_N| \exp(j\Psi_N)$  — согласно (6) и таблице;  $\Theta_{\text{стат}} = 2\pi / Z$ ;  $K_{sk}$  — коэффициент скоса [4];  $K_E = \frac{2}{\pi} \omega L t W_K$ , где  $L$  — расчетная длина сердечника [5];  $\omega$  — круговая частота сети;  $W_K$  — число витков в катушке.

Выражение для комплексной амплитуды (фазора) ЭДС гармоники порядка  $N$  фазной зоны  $A'$  обмотки записывается аналогично:

<sup>2</sup> Вычисление предполагается выполнять методом [10].

$$E_{A',N} = \frac{1}{2} \{ b_{(R),N} [\exp(jA'_1 \Theta_{\text{стат}} N) + \exp(jA'_2 \Theta_{\text{стат}} N) + \exp(jA'_3 \Theta_{\text{стат}} N) + \dots + \exp(jA'_L \Theta_{\text{стат}} N) + \dots] \} K_E K_{sk} = |E_{A',N}| \exp(j\varphi_{A',N}). \quad (\text{П-2})$$

Если обмотка двухслойная, то ЭДС  $E_{A,N}$  и  $E_{A',N}$  необходимо домножить на  $T = 1 - \exp\left(j\beta\pi \frac{N}{p}\right)$ .

Расчетное выражение для комплексных амплитуд ЭДС остальных фазных зон обмотки статора (B и C) записываются аналогично.

3. *Пример расчета коэффициента  $K_{dist}$* . Далее приведены результаты расчета зависимости  $K_{dist} = f(\Lambda_{GAP})$  для генератора 1250 кВт; 6,3 кВ; 600 об/мин; 50 Гц (вариант при отсутствии несимметрии в обмотке статора и эксцентриситета); при условии  $\delta_{EQ} = idem$ ,  $K_{sk} = 1$ ; коэффициент  $K_{dist}$  вычислен при обоих предельных значениях отношения  $\alpha$ :

Отношение $\Lambda_{GAP}$	Значение $K_{dist}$	
	$\alpha = 0,7$	$\alpha = 0,8$
1,2	0,01480	0,01084
1,4	0,01400	0,01089
1,6	0,01346	0,01119
1,8	0,01314	0,01137
2,0	0,01310	0,01156

Из приведенных данных следует, что в этом диапазоне значений  $\Lambda_{GAP}$  коэффициент искажений  $K_{dist}$  удовлетворяет требованиям ГОСТ и МЭК [1].

Для генератора 1250 кВт; 6,3 кВ; 600 об/мин; 50 Гц были рассчитаны зависимости  $\varepsilon_{EMF} = f(p'/p)$  и  $K_{dist} = f(p'/p)$  при соединении фазных зон A и C' для одной и нескольких единичных обмоток ( $p'=1$ ;  $p'=2$ ;  $p'=3$ ); расчет выполнен при максимально допустимом эксцентриситете ротора (10%), при  $\Lambda_{GAP} = 1,6$ , при  $k_{sk} = 1$ :

Отношение $p'/p$	Значение	
	несимметрии $\varepsilon_{EMF}$	Коэффициент $K_{dist}$ ( $\alpha = 0,7$ )
0	0	0,01348
1/5	0,052	0,01376
2/5	0,107	0,01447
3/5	0,167	0,01536

Из приведенных данных следует, что для генератора с числом полюсов  $2p=10$  сокращение длины переключки даже для одной единичной обмотки ( $p'/p = 1/5$ ) не удовлетворяет требованию (4); анализ зависимости  $\varepsilon_{EMF} = f(p'/p)$  подтверждает, что этому требованию удовлетворяет генератор с соот-

ношением  $p'/p < 1/10$ , т.е. со скоростью вращения  $n < 300$  об/мин. Однако коэффициент  $K_{dist}$  в рассматриваемом диапазоне изменения  $p'/p$  соответствует требованиям [1].

**Выводы.** 1. Предложенный метод расчета формы кривой линейного напряжения явнополюсных генераторов с электромагнитным возбуждением или с постоянными магнитами на роторе позволяет учесть основные физические факторы, определяющие значение коэффициента нелинейных искажений и степень несимметрии обмотки статора. При этих расчетах используется один из прикладных пакетов (2D) по расчету полей, в котором реализован МКЭ [10].

2. В результате расчета этим методом становится возможным в процессе проектирования генератора принять решение о необходимости усложнения его конструкции путем:

изменения формы полюсов ротора; применения скоса пазов статора, полюсов ротора либо сдвига полюсов в тангенциальном направлении (с учетом требований ГОСТ и МЭК относительно значения коэффициента нелинейных искажений);

применения соответствующих переключек между фазными зонами обмотки статора (с учетом требований о симметрии ЭДС фаз генератора в режиме холостого хода).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60034-1-2004). Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики.
- Бергер А.Я. Синхронные машины. — Л.; М.: ГОНТИ, 1938, 662 с.
- Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники (в трех томах). С. Петербург: Питер, 2004.
- Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, т. 2. — М.; Л.: ГЭИ, 1973, 655 с.
- Проектирование электрических машин/Под ред. И.П. Копылова. — М.: Энергия, 1980, 495 с.
- 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.
- Арсеньев И.А., Богуславский И.З., Коровкин Н.В. Методы исследования зубцовых гармоник ЭДС многофазной обмотки с целым числом  $Q$ . — Научно-технические ведомости СПбГТУ, 2010, № 1, с. 75–86.
- Богуславский И.З. Двигатели и генераторы переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами. — С. Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2006, т. 1, 390 с., том 2, 130 с.
- Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей/Пер. с англ. — М.: Энергия, 1970, 376 с.
- ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя. — С. Петербург: ООО «Тор», 2013, 295 с.

11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике/Пер. с англ. — М.: Наука, 1970, 720 с.

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

[19.10.2016]

*А в т о р ы*: **Богуславский Илья Зеликович** окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ) — ныне С. Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ) в 1957. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка методов исследования мощных частотно-регулируемых электрических машин». Ведущий научный сотрудник Институ-

та химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН).

**Кручинина Ирина Юрьевна** окончила электромеханический факультет ЛПИ в 1984 г. В 2013 г. защитила докторскую диссертацию «Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований». Заместитель директора по научной работе ИХС РАН.

**Любимцев Александр Сергеевич** окончил электромеханический факультет СПбГПУ в 2001 г. Научный сотрудник ИХС РАН.

**Штайнле Любовь Юрьевна** окончила электромеханический факультет СПбГПУ в 2000 г. Научный сотрудник ИХС РАН.

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2017, No 2, pp. 27–32.

## Method of Calculation of Non-Linear Distortion of The Electromotive Force of the Salient-Pole Generator

**BOGUSLAWSKY Iliya Zelikovich** (*Institute of Silicate Chemistry, Russia Academy of Sciences (IChS RAS), St. Petersburg, Russia*) — *Leading scientific researcher, Dr. Sci. (Eng.)*

**KRUCHININA Irina Yur'yevna** (*IChS RAN, St. Petersburg, Russia*) — *Deputy director, Dr. Sci. (Eng.)*

**LYUBIMTSEV Aleksandr Sergueyevich** (*IChS RAN, St. Petersburg, Russia*) — *Scientific researcher*

**SHTAYNLE Lyubov' Yur'yevna** (*IChS RAN, St. Petersburg, Russia*) — *Scientific researcher*

The calculating technique of the no-load salient pole synchronous generator line voltage shape curve is presented. Asymmetry of three-phase stator winding (with integer or fractional number of slots  $Q$  per pole and phase), rotor pole shoe shape and rotor eccentricity are taken into account. The actual generator geometry, including the geometry of its pole shoe (different air gaps under its middle and at the edges), slotted stator, etc. is used. The actual modelling is done using commercial package implementing FEM analysis. The operation requirements [1] states that the output voltage form should be close to sinusoidal. The requirements are relevant for all modern generators in a wide range of power and speed: hydro generators operating in power lines, low-speed diesel generators (10–50 MW, 100–250 rpm), generators with permanent magnet excitation (incl. high-speed generators for gas turbine) and others. As a result of using the developed calculating technique it is possible to make a decision concerning necessity of implementing skewed stator slots, skewed rotor poles and poles tangential shift [2] in the generator design.

**Key words**: salient pole generator, nonsymmetrical stator winding, AIR GAP, harmonic distortion, calculating method

### REFERENCES

1. GOST R 52776–2007 (MEK 60034-1–2004). *Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiyesya. Nominal'nye dannye i kharakteristiki* (Rotating electrical machines. Rated data and characteristics). Moscow, Gosstandart, 2007.

2. **Berger A.Ya.** *Sinkhronnye mashiny* (Synchronous machines). — L.; M.: GONTI, 1938, 662 p.

3. **Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.** *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki* (Theoretical foundation of electrical engineering). Leningrad, Publ. «Piter», 2004.

4. **Kostenko M.P., Piotrovskiy L.M.** *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Vol. 2. — M.; L: GEI, 1973, 655 p.

5. **Kopylov I.P.** *Proektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of electrical machines). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 495 p.

6. **Kruchinina I.Yu., Shtaynle L.Yu.** *Elektrotekhnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2010, No. 8, pp. 9–15.

7. **Arsen'yev I.A., Boguslawsky I.Z., Korovkin N.V.** *Nauchno-tekhnikeskiye vedomosti SPbGTU — in Russ. (Scientific and technical gazette SPbGTU)*, 2010, No. 1, pp. 86–96.

8. **Boguslawsky I.Z.** *Dvigateli i generatory peremennogo toka: teoriya i metody issledovaniya pri rabote v setyakh s nelineinymi elementami* (Motors and generators of alternating current: the theory and investigation methods by their operation in networks with non-linear elements). SPb, Publ. SPbGTU, 2006, vol. 1 — 390 p., vol. 2—130 p.

9. **Bins K., Laurenson P.** *Analiz i raschet elektricheskikh i magnitnykh polei* (Analysis and calculation electric and magnetic fields). Moscow, Publ. «Energiya», 1970, 376 p.

10. **ELCUT.** *Modelirovaniye elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh polei metodom konechnykh elementov. Versiya 6.0* (Modeling of electromagnetics, thermal and elastic fields by finite element analysis system. Version 6.0), 2013. ООО «Тор», St. Petersburg, 295 p.

11. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike* (Mathematical Handbook). Moscow, Publ. «Nauka», 1970, 720 p.

12. **Boguslawsky I.Z., Kuss G.** *Izvestiya RAN. Energetika — in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2000, No. 1, pp. 75–86.