



УДК 621.311

*И.А. Арсеньев, И.З. Богуславский,  
В.В. Попов, В.В. Суханов*

## **ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МОЩНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ**

*I.A. Arsenjev, I.Z. Boguslawsky,  
V.V. Popov, V.V. Sukhanov*

## **FEATURES OF CREATION AND OPERATION OF POWERFUL ALTERNATING CURRENT MACHINES IN OFF-LINE POWER SUPPLY NETWORKS**

Рассмотрены особенности электромагнитных процессов в мощных машинах переменного тока, работающих в составе автономных сетей. Выработаны рекомендации по эксплуатации, расчету и проектированию таких машин, учитывающие эти особенности.

КОЭФФИЦИЕНТ ИСКАЖЕНИЯ. НЕЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА. ВЫСШИЕ ВРЕМЕННЫЕ ГАРМОНИКИ. ДОПУСТИМАЯ МОЩНОСТЬ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК В ЗАЗОРЕ. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ. ВНЕЗАПНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ НАГРУЗКИ. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ.

Peculiar properties of electromagnetic processes of high-powered alternating current machines, functioning within off-line networks, are presented. Recommendations for operation, calculation and designing, worked out with account of specific characteristics of machines are proposed.

DISTORTION FACTOR. NON-LINEAR LOAD. HIGH TEMPORARY HARMONIC. POWER CARRYING CAPACITY. FLUX IN THE AIR-GAP. HANDLIND OF SPEED OF ROTATION. SUDDEN LOAD EXTENSION. VOLTAGE CHANGE.

В последние годы в энергетике находят широкое распространение автономные сети, в которых применяется преобразовательная техника. В связи с этим возникают проблемы оптимизации режимов мощных высокоиспользованных машин переменного тока при их эксплуатации в автономных сетях и учета особенностей их проектирования [1].

Практика решения этих проблем выдвигает прежде всего следующие задачи: определение допустимых режимов работы таких машин при эксплуатации; выбор оптимальных законов регулирования низкочастотных двигателей с целью обеспечения максимального КПД; ограничение провала напряжения при внезапных изменениях нагрузки и др. Рассмотрим результаты решения некоторых из этих задач и сформулируем вытекающие из них рекомендации по проектированию.

### **Выбор номинальной мощности машины переменного тока при работе в нелинейной сети**

Опыт эксплуатации синхронных генераторов, асинхронных и синхронных двигателей, предназначенных заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, подтверждает, что мощность  $P_{\text{лин}}$  этих машин, указанную в каталоге, оказывается необходимым снизить до величины  $P_{\text{доп}}$ , если эти машины эксплуатируются в нелинейной сети с коэффициентом искажений  $k_{\text{иск}} > 0,05$ .

Мощность генератора или двигателя, которые выпущены заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, мы назовем модельной —  $P_{\text{мод}}$ , а допустимую для нее мощность  $P_{\text{доп}}$  с учетом указанного влияния высших временных гармоник — номинальной; ее величина зависит

при одной и той же модельной мощности от амплитуды этих высших гармоник. Далее изложены методы для определения допустимой (номинальной) мощности этих машин в зависимости от характеристики нелинейности сети.

В последние годы при большом объеме поставляемых заказчиком одноступенчатых машин, предназначенных для работы в нелинейной сети, целесообразно проектировать и изготавливать такие машины, определяя их номинальную мощность с учетом параметров сети, которые обычно указываются в технических условиях на поставку. Особенности проектирования таких машин также излагаются далее.

#### **Допустимая мощность машины с учетом коэффициентов искажения по току и напряжению.**

В рамках решения этой задачи обычно различают следующие возможные режимы работы машин:

работа генераторов только на нелинейную нагрузку (например, преобразователи частоты или выпрямители) и двигателей, питающихся от преобразователей частоты;

работа генераторов на смешанную нагрузку, состоящую из линейной (например, осветительной) и нелинейной (например, частотно-регулируемые двигатели).

**Работа генераторов и двигателей в сети только с нелинейной нагрузкой.** При наличии в сети преобразователей частоты актуальна проблема влияния высших временных гармоник на потери в машине, ее нагрев, шумы и вибрации. Эти гармоники индуктируют в обмотке и активной стали статора ЭДС и токи частотой  $f_{\text{стат}} = f_{\text{сет}} N$ , где  $f_{\text{сет}}$  — частота первой гармоники тока (основная частота сети),  $N$  — порядок временных гармоник. Среди них различают гармоники порядков  $N_1 = 1; 7; \dots, (6k - 5)$  и порядков  $N_2 = 5; \dots, 6 \cdot k - 1$  ( $k = 1; 2; \dots$ ). Первые из них создают вращающий момент машины, а вторые — тормозной. В контурах ротора синхронной машины обе «соседние» гармоники (например,  $N_1 = 7$  и  $N_2 = 5$ ;  $N_1 = 13$  и  $N_2 = 11$ ) индуктируют ЭДС и токи одинаковой частоты  $f_{\text{рот}} = f_{\text{сет}} (N_1 - 1) = f_{\text{сет}} (N_2 + 1)$ . В длительном эксплуатационном режиме асинхронной машины (при скольжениях  $s < 0,01$ ) частоты ЭДС и токов, индуктируемых обеими «соседними» гармониками, близки по величине.

Например, при частоте сети  $f_{\text{сет}} = 50$  Гц и  $s = 0,075$  эти частоты равны  $f_{\text{рот}1} = 296,25$  Гц (при  $N = N_2 = 5$ ),  $f_{\text{рот}2} = 303,25$  Гц (при  $N = N_1 = 7$ ).

Отметим, что для генераторов малой и средней мощности, работающих в сетях промышленной частоты (50 Гц), стандартами [2] предусмотрен коэффициент мощности, равный  $\cos \varphi = 0,8$ ; однако, если в автономной (например, судовой) сети имеются нелинейные элементы, а ее основная частота составляет  $f_{\text{сет}} = 50$  Гц (то есть,  $N = 1$ ), то для генератора в такой сети обычно  $\cos \varphi < 0,8$ .

Рассмотрим предварительно для примера нелинейную сеть с высшими временными гармониками порядков  $N = 5$  и  $N = 7$ , представляющими наибольший практический интерес. Оценим их влияние на допустимую мощность синхронного генератора, который предусмотрен заводом-изготовителем для работы в промышленной сети. Примем дополнительно, что коэффициент Фильда обмотки статора этого генератора при основной частоте  $f_{\text{стат}} = 50$  Гц ( $N = 1$ ) равен  $K_{F1} = 1,2$ . Тогда из-за высших гармоник основные и добавочные потери в обмотке статора этого генератора увеличатся согласно [3] в  $Q_{\text{общ}N}^* \approx 1,25 - 1,3$  раза (в зависимости от формы кривой тока). Увеличатся также потери в активной стали статора и ротора. Соответственно, чтобы сохранить перегрев обмотки статора, согласно [2] необходимо снизить мощность генератора в нелинейной сети примерно в 1,15 раза только из-за потерь и перегрева обмотки статора.

Перейдем к общей задаче определения допустимой мощности машины в нелинейной сети [3]. Эту мощность  $P_{\text{доп}}$  удобно в практических расчетах представить в относительных единицах ( $P_{\text{доп}}^*$ ), т. е. в долях ее модельной мощности  $P_{\text{мод}}$ , определяемой заводом-изготовителем для работы в линейной сети. В [3] показано, что она может быть представлена в виде

$$P_{\text{доп}}^* = P_{\text{обм}}^* P_{\text{серд}}^* \quad (1)$$

Здесь  $P_{\text{обм}}^*$  — отношение допустимой мощности машины при работе в нелинейной сети к модельной при одинаковых токах и потерях в обмотке статора;  $P_{\text{серд}}^*$  — аналогичное отношение потерь в активной стали статора и ротора. Отметим, что выражение (1) предполагает для асинхронных машин с фазным ротором дополнительную проверку перегрева обмотки ротора

в соответствии с требованиями стандартов [2], а для асинхронных с короткозамкнутым ротором — проверку нагрева стержней (их перегрев стандартами не нормируется); обычно для асинхронных машин перегревы обмотки ротора при этой дополнительной проверке удовлетворяют требованиям эксплуатации: в связи со снижением мощности согласно (1) они не превосходят допустимых значений. Расчеты показывают, что такая проверка перегрева обмотки ротора необходима и для синхронных машин, если в нелинейной сети  $\cos \varphi < 0,7$ . Для проверки удобно воспользоваться диаграммой Потье [4], представленной аналитически.

Выражение для  $P_{обм}^*$  получено в [3] в виде

$$P_{обм}^* = \sqrt{\frac{K_{F1}}{\sum Q_{очн N}^* + \sum \Delta Q_{очн N}^*}}. \quad (1')$$

Здесь  $\sum Q_{очн N}^*$  — сумма основных потерь;  $\sum \Delta Q_{очн N}^*$  — сумма дополнительных потерь;  $K_{F1}$  — коэффициент Фильда [4, 10]. Оба вида потерь выражены в относительных единицах, как и мощность  $P_{обм}^*$ :

$$\begin{aligned} \sum Q_{очн N}^* &= 1 + \dots + \left(\frac{K_5}{K_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{K_N}{K_1}\right)^2 + \dots; \quad (2) \\ \sum \Delta Q_{очн N}^* &= \\ &= \Delta K_{F1} \left[ 1 + \dots + \left(\frac{K_5}{K_1}\right)^2 (5)^2 + \dots + \left(\frac{K_N}{K_1}\right)^2 (N)^2 + \dots \right], \quad (3) \end{aligned}$$

где  $\Delta K_{F1} = K_{F1} - 1$ ;  $K_N$  — отношение амплитуды гармоники порядка ( $N = 1; 5; \dots$ ) к амплитуде несинусоидального фазного тока.

Выражение (1) для  $P_{серд}^*$  согласно [3] имеет вид

$$P_{серд}^* = \frac{1}{\sqrt{\sum W_{N ст}^*}}, \quad (4)$$

где  $\sum W_{N ст}^* =$

$$= 1 + \left(\frac{s_5 K_5}{s_1 K_1}\right)^2 (5)^{1,3} + \dots + \left(\frac{s_N K_N}{s_1 K_1}\right)^2 (N)^{1,3}; \quad (4')$$

$s_N = \frac{F_{N рез}}{K_{нас N} F_{N ст}}$ ;  $F_{N рез}$  — амплитуда гармоники МДС результирующего поля в зазоре порядка  $N$ ;

$F_{N ст}$  — амплитуда МДС обмотки статора того же порядка;  $K_{нас N}$  — коэффициент насыщения магнитной цепи, определяемый из характеристики холостого хода. Отметим, что для временной гармоники порядка  $N = 1$  синхронной машины величина  $s_N$  обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению  $X_{AD}$ ; для гармоник порядка  $s_N > 1$  она может быть вычислена согласно схеме замещения для соответствующей гармоники МДС [4]. Для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором из этой схемы получаем

$$s_N = \frac{1}{1 + \frac{Z_M}{Z_2'}}, \quad (5)$$

где  $Z_M$  — полное сопротивление намагничивающего контура, а  $Z_2'$  — приведенное сопротивление вторичного контура (номер гармоники  $N$  у обоих сопротивлений опущен). У асинхронных машин, используемых в автономных сетях, для гармоник порядка  $N > 1$  коэффициент насыщения  $K_{нас N} \approx 1$ , а величина  $s_N < 0$ . Это означает, что беличья клетка ротора в значительной мере экранирует поле высших временных гармоник взаимной индукции (поля в зазоре). Поэтому с достаточной для практики точностью выражение для  $s_N$  при  $N > 1$  может быть использовано и для расчета режимов синхронных машин, если стержни демпферной обмотки расположены равномерно по периферии ротора.

В табл. 1 для примера приведены результаты расчета мощности  $P_{доп}^*$  асинхронной машины с формой фазного тока в виде трапеции с различной шириной ее верхнего основания  $b_b = \text{var}$  при ширине нижнего основания  $b_n = 180$  гр. эл.; расчеты проведены для трех значений коэффициента  $K_{F1}$ : 1,075 (вариант 1); 1,15 (вариант 2); 1,25 (вариант 3).

Из табл. 1 следует, что при изменении верхнего основания трапеции до значений  $b_b \leq b_n \cdot 2/3$  вследствие уменьшения амплитуд высших гармоник можно увеличить мощность машины до  $P_{доп}^* \approx 0,93-0,95$ . Такому снижению амплитуды ряда гармоник (с порядком  $N = 5; 7; 17; 19; \dots$ ) способствует и использование «двенадцатипульсовой» схемы инвертора.

Для синхронных машин при  $\cos \varphi < 0,7$  дополнительно требуется определить ток ротора

Таблица 1

**Мощность  $P_{\text{доп}}^*$  при форме фазного тока в виде трапеции с различной шириной верхнего основания ( $b_{\text{в}} = \text{var}$ )**

Параметр $b_{\text{в}}$ трапециидальной формы тока, эл. град.	$P_{\text{доп}}^*$ , о. е., при трех значениях коэффициента $K_{\text{Ф1}}$		
	1,075	1,15	1,25
140	0,90	0,88	0,85
120	0,93	0,92	0,91
100	0,95	0,94	0,93

$i_{\text{рот нел}}$ , который соответствует мощности  $P_{\text{доп}}$ . Если  $i_{\text{рот нел}} > I_{\text{рот лин}}$ , то мощность  $P_{\text{доп}}$  необходимо снизить дополнительно, чтобы обеспечить допустимый по [2] уровень перегрева обмотки ротора; здесь  $I_{\text{рот лин}}$  — ток ротора, соответствующий мощности  $P_{\text{мод}}$  машины, предназначенной заводом-изготовителем для работы в линейной сети (при коэффициентах искажения  $K_{\text{иск}} \leq 0,05$  согласно [2]).

**Работа генераторов на смешанную нагрузку.**

Оценим теперь допустимые режимы синхронных генераторов при работе на смешанную нагрузку, состоящую из линейной ( $Z_{\text{лин}}$ ) и нелинейной ( $Z_{\text{нел}}$ ). Решение этой задачи [3] — частный случай предыдущей. Особенность решения состоит в том, что обе нагрузки отличаются не только амплитудами токов и их гармоническим составом, но и значениями  $\cos\phi$  (для нагрузки  $Z_{\text{нел}}$  значение  $\cos\phi$  вычисляется при  $N=1$ ). Поэтому предварительно необходимо определить эквивалентный коэффициент мощности  $\cos\phi_{\text{экв}}$  на выводах генератора (для  $N=1$ ). Практика расчетов показывает, что в этих режимах достаточно часто оказывается, что  $\cos\phi_{\text{экв}} < 0,7$ , и тогда допустимая мощность генератора определяется как потерями и нагревом обмотки и активной стали статора, так и потерями и нагревом обмотки ротора.

В последние годы широкое применение в промышленности находят преобразователи частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Характерно, что работа этих преобразователей отрицательно воздействует на пазовую изоляцию обмотки статора электрических машин, в связи с чем их дополнительно комплектуют фильтрами высших гармоник (порядков  $N > 20$ ) [1, 5].

**Частный случай: машина проектируется для работы в автономной сети с нелинейными элементами.** Обычно в практике проектирования такой машины выбирают один из двух путей:

1. За базу принимают машину с той же по величине модельной мощностью (предназначенной для работы в линейной сети). В ее конструкцию вносят изменения в соответствии с результатами расчета по соотношениям (1)–(5); их используют как исходные данные для вентиляционного и теплового расчетов. Обычно такие изменения сводятся к следующим: повышению эффективности вентиляции машины; увеличению сечения меди обмотки статора и размеров паза; увеличению сечения меди витков ротора (для синхронной машины при низких значениях  $\cos\phi$ ); увеличению сечения стержней короткозамкнутой обмотки ротора (беличьей клетки, демпферной обмотки).

Весьма часто эти изменения связаны с переводом машины в больший габарит [4].

2. За базу принимают машину из каталога завода-изготовителя, у которой на 20–25 % модельная мощность больше номинальной (предназначенной для работы в нелинейной сети). В соответствии с результатами расчета по соотношениям (1)–(5) в конструкцию машины вносят, если необходимо, изменения, которые аналогичны перечисленным в п. 1.

**Выбор оптимальных законов регулирования низкочастотных синхронных двигателей с целью обеспечения максимального КПД**

Для таких двигателей с номинальным моментом на валу свыше 100 т·м (например, для двигателя в автономной системе электродвижения ледокола — 12000 кВт, 110 об/мин) актуаль-

ной оказывается проблема обеспечения КПД в режимах, когда скорость вращения меньше номинальной ( $n_{вр} \leq n_{ном}$ ), т. е. при регулировании скорости вращения «вниз».

Обычно при частотном регулировании скорости синхронного двигателя с электромагнитной системой возбуждения (статической или бесщеточной) напряжение на выводах  $U_{дв}$  и его частота  $f_{дв}$  выбираются такими, чтобы выполнялось условие

$$U_{дв} = U_{ном} \frac{f_{дв}}{f_{ном}}, \quad (6)$$

где  $U_{ном}$  — номинальное линейное напряжение двигателя. Для низкочастотных двигателей (при номинальной частоте  $f_{ном} < 16$  Гц) индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора оказывается сопоставимым с омическим, поэтому вместо соотношения (5) более корректно следующее:

$$E_{дв} = E_{ном} \frac{f_{дв}}{f_{ном}}.$$

Здесь  $E_{дв}$  — ЭДС обмотки статора. Из последнего выражения следует, что при изменении скорости вращения результирующий поток  $\Phi$  в расточке и степень насыщения магнитной цепи двигателя сохраняются постоянными:

$$\Phi = \Phi_{ном}. \quad (5')$$

Исследования показывают [6], что сохранение условия (5') для низкочастотных двигателей оказывается неоптимальным, если механизм, сочлененный с валом двигателя, имеет квадратичную зависимость момента сопротивления  $M_{сопр}$  от скорости  $n_{дв}$ . При этом следует принимать во внимание следующие особенности режимов работы двигателей с такими механизмами:

мощность двигателя  $P_2$  при изменении скорости вращения  $n_{дв}$  изменяется по кубическому закону

$$P_2 = k_p n_{дв}^3; \quad (6)$$

ток статора  $I_{ст}$  при изменении напряжения согласно соотношению (5') изменяется по квадратичному закону  $I_{ст} \approx k_I n_{дв}^2$  ( $k_p, k_I$  — коэффициенты пропорциональности [4]);

потери  $Q_{кз}$  короткого замыкания (в обмотке статора и добавочные)

$$Q_{кз} = k_Q n_{дв}^4, \quad (7)$$

где  $k_Q$  — коэффициент пропорциональности [4].

Одной из особенностей мощных низкочастотных двигателей является структура потерь: доля потерь короткого замыкания и омических потерь в обмотке ротора составляет свыше 85–90 % общих потерь в машине.

Анализ выражений (6)–(7) показывает, что в эксплуатационных режимах при уменьшении скорости вращения  $n_{дв} < n_{ном}$  и, соответственно,  $f_{дв} < f_{ном}$ , потери короткого замыкания резко уменьшаются по сравнению с потерями возбуждения. Вместе с тем в пределах ограничений по перегреву обмотки статора и по насыщению магнитной цепи возможно для каждого эксплуатационного режима ( $P_2 = idem, n_{дв} < n_{ном}$ ) получить примерное равенство потерь  $Q_{кз} \approx Q_{возб}$ . Нетрудно показать, что этому равенству соответствует максимальное значение КПД при малых потерях холостого хода, что справедливо при низкой частоте  $f_{дв} < f_{ном}$ .

Для того чтобы обеспечить это равенство потерь, достаточно вместо соотношения (5) и соответственно (5') выполнить следующие:

$$U < U_{ном} \frac{f}{f_{ном}}; \quad \Phi < \Phi_{ном}. \quad (8)$$

При уменьшении потока  $\Phi < \Phi_{ном}$  величина  $F_{мц} = k_{F мц}(\Phi)$  тоже уменьшается (по сравнению со значением в номинальном режиме) согласно характеристике холостого хода.

Одновременно для выбранного режима при  $P_2 = idem$  возрастают МДС  $F_{ст}$  и потери  $Q_{кз}$ . В результате выполнение соотношений (8) приводит к изменению обеих составляющих потерь —  $Q_{кз}$  и  $Q_{возб}$ .

При определенном соотношении МДС  $F_{ст}$  и  $F_{рот}$  для напряжения  $U$  согласно (8) можно получить примерное равенство потерь  $Q_{кз}, Q_{возб}$  и максимальное значение КПД.

Нелинейные зависимости МДС обмоток от скорости вращения, а потерь — от напряжения позволяют лишь приближенно найти аналитическое решение задачи поиска значений напряжения  $U \leq U_{ном} f/f_{ном}$  для обеспечения максимального КПД при  $P_2 = idem, n_{дв} = idem$ . Однако численная реализация ее дает возможность получить результаты при условии строгого учета указанных нелинейных зависимостей, а также падения напряжения в активном сопротивлении и в индуктивном сопротивлении рассеяния обмотки статора.

В табл. 2 приведены для примера значения КПД низкочастотного двигателя (номинальные данные — 20 мВт; 5,8 кВ; 140 об/мин; 11, 67 Гц), спроектированного для системы электродвижения судна [6]; диапазон изменения скоростей вращения —  $40 \leq n_{\text{дв}} \leq 70$ ; мощность  $P_2$  изменяется согласно (6).

Таблица 2

**Зависимость оптимальных значений КПД низкочастотного двигателя от частоты вращения**

$n_{\text{дв}}$ , об/мин	КПД, %	
	При $U = \text{var}$ согласно (8)	При $U = \text{var}$ согласно (5')
70	97,9	97,8
65	97,8	97,6
60	97,7	97,4
55	97,6	97,1
50	97,5	96,6
45	97,3	95,9
40	97,0	94,9

При использовании условия (8) изложенный метод поиска максимального КПД низкочастотного двигателя в эксплуатационных режимах (при  $n_{\text{дв}} < n_{\text{ном}}$ ) может быть применен и при иной зависимости мощности  $P_2$  от частоты вращения  $n$ , например квадратичной.

**Динамические характеристики генераторов**

В соответствии с требованиями стандарта [7] генераторы, работающие в автономных сетях, должны иметь определенные ограничения величины  $\Delta U$  переходного отклонения напряжения по сравнению с номинальным при внезапных набросах и сбросах нагрузки; ограничено и время переходного процесса восстановления напряжения. Отметим, что генераторы для потребителей, работающих в автономных сетях, часто выполняются на низкое напряжение (400 В, 690 В). Подробные исследования показывают [8], что величина  $\Delta U$  определяется эквивалентным индуктивным сопротивлением генератора  $X^*$ , причем  $X''_D \leq X^* \leq X'_D$ , где  $X''_D$ ,  $X'_D$  — соответственно сверхпереходное и переходное индуктивные сопротивления генератора по продольной оси. Величины  $X''_D$ ,  $X'_D$  зависят от индуктивного сопротивления рассеяния об-

мотки статора  $X_S$ . Одним из конструктивных мероприятий, позволяющих снизить сопротивление  $X_S$  и, следовательно,  $X^*$ , является применение для низковольтных машин однослойных обмоток, выполняемых по типу двухслойных с равномерным шагом [9, 10]. Уравнение для расчета сопротивления  $X_S$ , о. е., может быть представлено в виде [4, 10]

$$X_S = (AS/B_{\text{зав}}) \cdot [K_1 h / (\Delta \tau) + K_2 \tau / L_{\text{акт}}], \quad (9)$$

где  $AS$  — линейная нагрузка статора;  $B_{\text{зав}}$  — амплитуда индукции в зазоре;  $K_1, K_2$  — коэффициенты пропорциональности, определяемые параметрами обмотки (сокращением шага и др.);  $h$  — высота паза статора;  $\Delta$  — отношение ширины паза к зубцовому делению статора;  $\tau, L_{\text{акт}}$  — соответственно полюсное деление и длина активной стали статора. Отметим, что оптимальное значение отношения  $\Delta$  лежит в пределах  $0,4 \leq \Delta \leq 0,5$ . Из уравнения (9) следует, что «вынесение из паза второго слоя» двухслойной обмотки с одновременным удвоением числа пазов статора позволяет снизить величину  $h$  и, следовательно, уменьшить пазовое рассеяние машины.

Изложенные особенности электромагнитных процессов в машинах, работающих в составе автономных сетей, необходимо учитывать как при их эксплуатации, так и при проектировании.

При эксплуатации машин:

1. Номинальную мощность  $P_{\text{лин}}$  машины переменного тока, предназначенной заводом-изготовителем для работы в промышленной сети, необходимо снижать до величины  $P_{\text{доп}}$ , если эта машина эксплуатируется в нелинейной сети с коэффициентом искажений  $K_{\text{иск}} > 0,05$ . Степень снижения мощности  $K_p = P_{\text{доп}} / P_{\text{лин}} < 1$  определяется нелинейностью сети; например, при коэффициентах искажения в ней  $K_{\text{иск}} \approx 0,18-0,25$  величина  $K_p$  может составить  $K_p \approx 0,85-0,9$ . Мощность  $P_{\text{доп}}$  для синхронной машины может быть дополнительно снижена, если коэффициент мощности на ее выводах  $\cos \varphi_{\text{нел}} < \cos \varphi_{\text{лин}}$ .

2. Для машин, работающих с преобразователями частоты, построенными по принципу широтно-импульсной модуляции, следует принимать дополнительные меры по уменьшению

амплитуды высших временных гармоник (устанавливать фильтры и др.).

3. При скоростях вращения менее номинальной у мощных частотно-регулируемых двигателей с электромагнитной системой возбуждения целесообразно для повышения КПД уменьшить насыщение магнитной цепи (по сравнению с ее насыщением в номинальном режиме) до уровня, при котором потери в обмотках ротора  $Q_{\text{возб}}$  и статора  $Q_{\text{КЗ}}$  составят отношение  $Q_{\text{КЗ}}/Q_{\text{возб}} \approx 1$ .

При проектировании машин:

1. Для машин, предназначенных для эксплуатации в нелинейной сети ( $K_{\text{иск}} > 0,05$ ), необходимо предусмотреть более низкие значения

коэффициента Филда обмотки статора, чем для машин общепромышленного назначения ( $K_{\text{иск}} \leq 0,05$ ); соответственно должна быть усилена короткозамкнутая обмотка ротора (беличья клетка, демпферная обмотка).

2. Для синхронных генераторов, чтобы обеспечить их динамические режимы (величины переходного отклонения напряжения  $\Delta U$  при внезапном изменении его нагрузки согласно [7]), необходимо принимать меры по снижению индуктивного сопротивления  $X''_D$  до уровня  $X''_D \approx 0,18-0,22$ ; для этого целесообразным оказывается применение однослойных обмоток для машин низкого напряжения (400 В и 690 В).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богуславский, И.З.** Проблемы создания машин переменного тока для работы в сетях с нелинейными элементами [Текст] / И.З. Богуславский, Я.Б. Данилевич, В.В. Попов, Г. Кусс (ФРГ) // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2006. № 2(44).

2. **ГОСТ Р 52776–2007 (МЭК 60 034–1–2004).** Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики [Текст] / Госстандарт России.— М., 2004.

3. **Богуславский, И.З.** Метод определения допустимой мощности двигателя переменного тока при работе в нелинейной сети [Текст] / И.З. Богуславский // Электротехника.— 2009. № 5.— С. 22а–28.

4. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов.— М. — С.-Петербург: Питер, 2006.

5. **Ватаев, А.С.** Высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения в частотно-регулируемых асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором [Текст]: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / А.С. Ватаев / СПбГПУ.— СПб., 2009.

6. **Богуславский, И.З.** Метод минимизации потерь мощных низкочастотных двигателей в эксплуатационных режимах при нелинейной зависимости момента сопротивления от частоты вращения [Текст] / И.З. Богуславский // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 5.— С. 172–175.

7. Российский морской Регистр судоходства [Текст]: Т. 1–3.— М., 2012.

8. **Boguslawsky, I.Z.** Generators for independent power plants: performance and trends [Text] / I.Z. Boguslawsky // Archiv fuer Elektrotechnik.— 2006. № 5.— Springer Verlag, Berlin.

9. **Кручинина, И.Ю.** Высокоиспользованные электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований [Текст]: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.— Изд-во Лема, 2013.

10. **Титов, В.В.** Турбогенераторы. Расчет и конструкция [Текст] / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий, Г.А. Загородная [и др.] / Под ред. Н.П. Иванова, Р.А. Лютера.— Л.: Энергия. 1967.— 895 с.

## REFERENCES

1. **Boguslavskiy I.Z., Danilevich Ya.B., Popov V.V., Kuss G. (FRG).** Problemy sozdaniya mashin peremennogo toka dlya raboty v setyakh s nelineynymi elementami [Text] // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.— 2006. № 2(44). S. 37–47. (rus.)

2. **GOST R 52776–2007 (MEK 60 034–1–2004).** Mashiny elektricheskiye vrashcha-yushchiyesya. Nominalnyye dannyye i kharakteristiki [Text] / Gosstandart Rossii.— Moskva, 2004. (rus.)

3. **Boguslavskiy I.Z.** Metod opredeleniya dopustimoy moshchnosti dvigatelya peremennogo toka pri rabote v nelineynoy seti [Text] // Elektrotehnika.— 2009. № 5. (rus.)

4. **Voldek A.I., Popov V.V.** Elektricheskiye mashiny [Text]. M. — S.-Peterburg: Piter, 2006.— T. 1–462 s. T. 2–575 s. (rus.)

5. **Vatayev A.S.** Vysokochastotnyye elektromagnitnyye protsessy i perenapryazheniya v chastotno — reguliruyemykh asinkhronnykh dvigatelyakh s korotkozamknutym rotorom [Text]: Avtoreferat dissertatsii ... kand techn nauk.— SPb.: Izdatelstvo SPbGPU, 2009. (rus.)

6. **Boguslavskiy I.Z.** Metod minimizatsii poter moshchnykh nizkochastotnykh dvigateley v ekspluatatsionnykh rezhimakh pri nelineynoy zavisimosti momenta soprotivleniya ot chastoty vrashcheniya [Text] // Izvestiya RAN. Energetika.— 2006. № 5. (rus.)

7. Rossiyskiy morskoy Registr sudokhodstva [Tekst] // Vol. 1–3.— Moskva, 2012. (rus.)

8. **Boguslawsky I.Z.** Generators for independent power plants: performance and trends / [Text] // Archiv fuer Elektrotechnik.— 2006. № 5.— Springer Verlag, Berlin. (rus.)

9. **Kruchinina I.Yu.** Vysokoispolzovannyye elektricheskiye mashiny dlya sovremennoy energetiki: problemy

sozdaniya i issledovaniy [Tekst]: Avtoreferat dissertatsii ... dokt. techn. nauk. Izdatelstvo Lema, 2013. (rus.)

10. **Titov V.V., Khutoretskiy G.M., Zagorodnaya G.A., Vartanyan G.P., Zaslavskiy D.I., Smotrov I.A.** Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiya [Tekst] / Pod red. N.P. Ivanova, R.A. Lyutera.— L.: Energiya, 1967.— 895 s. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРСЕНЬЕВ Игорь Александрович** — ведущий программист кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

**БОГУЛАВСКИЙ Илья Зеликович** — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; заслуженный деятель науки и техники РФ; Senior Member of IEEE; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: B-IZ@yandex.ru

**ПОПОВ Виктор Васильевич** — доктор технических наук профессор кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; заслуж. деятель науки и техники РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: em@eef.spbstu.ru

**СУХАНОВ Виктор Васильевич** — кандидат технических наук доцент кафедры электрических машин Института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: V.Suchan@rambler.ru

#### AUTHORS

**ARSENJEV Igor A.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

**BOGUSLAWSKY Il'ja Z.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: B-IZ@yandex.ru

**POPOV Viktor V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: elmash@mebil.stu.neva.ru

**SUKHANOV Viktor.V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: V.Suchan@rambler.ru