

## КПД МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С.А. Харитонов, А.Г. Гарганеев\*

Новосибирский государственный технический университет

\*Томский политехнический университет

E-mail: Kharit@ntcom.ru; garganeev@rambler.ru

Приведены результаты расчета КПД системы генерирования постоянного тока на базе магнитоэлектрического синхронного генератора и полупроводникового преобразователя (выпрямителя). Пример расчета приведен для системы генерирования электрической энергии мощностью 250 кВт, разработанной для ветроэнергетической установки с переменной частотой вращения вала ветровой турбины.

### Ключевые слова:

КПД, мехатронная система, синхронный генератор с постоянными магнитами, полупроводниковый преобразователь, переменная частота вращения вала, ветроэнергетическая установка.

### Key words:

Efficiency, mechatron system, the synchronous generator with permanent magnets, the semiconductor converter, variable frequency of rotation of a shaft, wind power installation.

Как показано в [1], расчет активных потерь в элементах систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ) и КПД системы в целом является актуальной задачей, так как такие системы находят широкое применение в возобновляемой энергетике, а также в системах электроснабжения автономных объектов, в частности, летательных аппаратов (ЛА).

В данной статье приводится пример расчета активных потерь и КПД в СГЭЭ постоянного тока с использованием методики, предложенной в [1]. Предполагается, что СГЭЭ является частью ветроэнергетической установки (ВЭУ) с переменной частотой вращения  $n$  вала ветровой турбины.

При расчете КПД основное внимание уделяется анализу активных потерь, прежде всего в синхронном генераторе (СГ), при этом учитывается несинусоидальный характер тока и напряжения, обусловленный работой генератора на полупроводниковый преобразователь – ПП (в данной статье это управляемый выпрямитель), подключенный к противоЭДС.

В примере используются данные одного канала СГЭЭ в составе ВЭУ «Радуга-1А» [2], в которой применен модульный принцип построения системы генерирования, в каждом из каналов используется СГ с постоянными магнитами типа ГСВ-260, номинальная мощность генератора составляет 260 кВт (разработка ОАО НПО «ЭЛСИБ»).

На рис. 1 по результатам расчета приведены потери в СГ в составе системы «СГ (МЭГ) – трехфазный мостовой выпрямитель – противоЭДС». При этом номинальные обороты приняты равными  $n_{ном}^* = 3,5^1$ , а добротности элементов системы [1] определялись для генератора типа ГСВ-260 [2] и имели следующие значения:  $Q_{СГст} = 27,78$ ,  $Q_{СГмг} = 37,95$ ,  $Q_{СГмех1} = 4,56 \cdot 10^3$ ,  $Q_{СГмех2} = 1,26 \cdot 10^3$ ,  $Q_{СГлюб} = 178$ . На рис. 1, а, в, д, ж, для раз-

личных значений  $q$ , равно  $2 \frac{L_f}{L_d'' + L_q''}$ , и угла регу-

лирования  $\alpha$  показана зависимость от частоты вращения составляющих потерь в СГ, отнесенных к мощности нагрузки, т. е.  $\delta P_j^* = \Delta P_j^* / P_n^*$ , а на рис. 2, б, г, е, з, для тех же значений  $q$  и  $\alpha$  показана зависимость от  $n^*$  КПД генератора  $\eta_{СГ}$ .

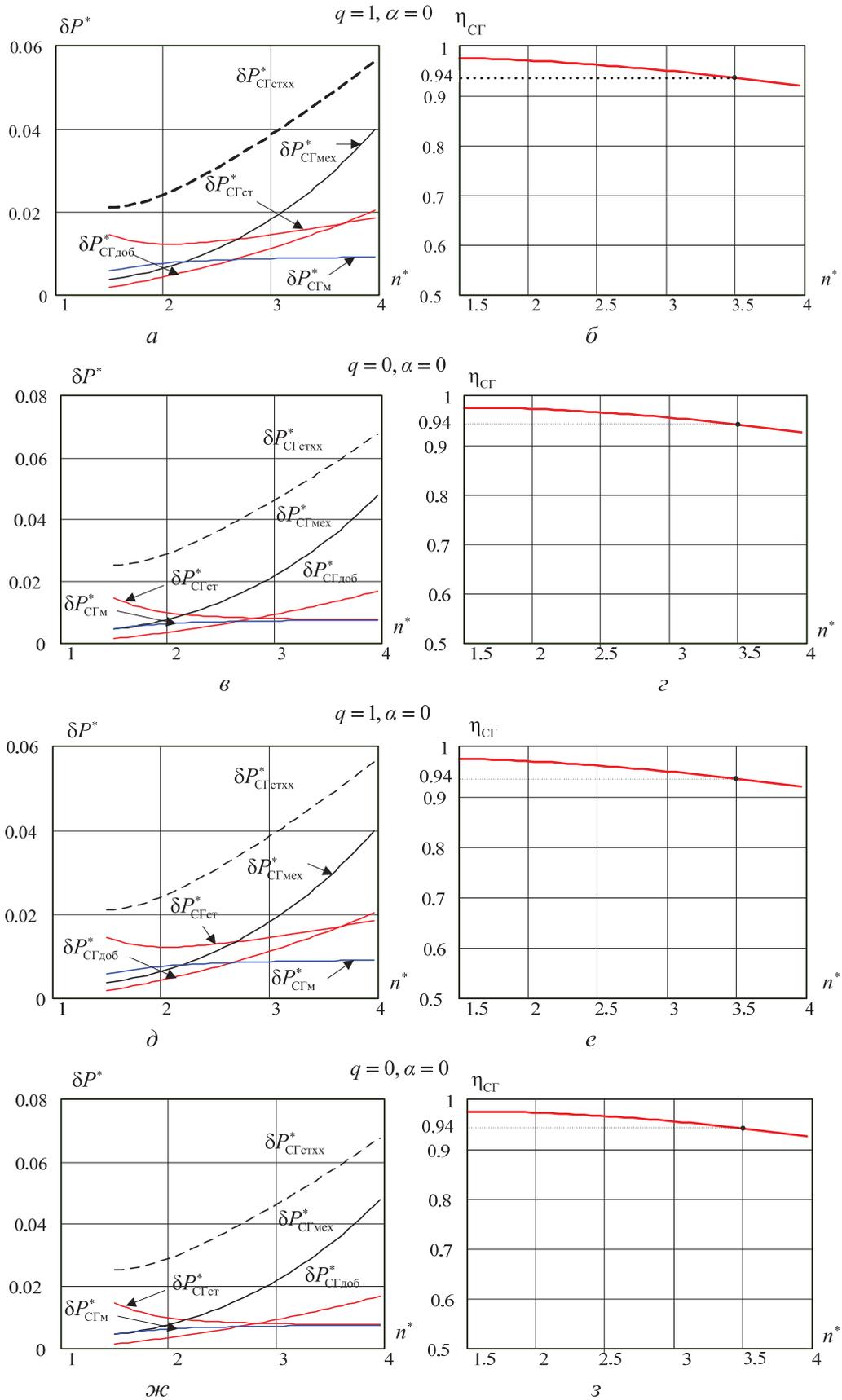
Из анализа составляющих потерь в генераторе следует, что на их величину существенным образом влияют режимы работы ПП, приводя главным образом к уменьшению потерь в стали за счет снижения результирующего потока в зазоре с ростом оборотов в режиме непрерывного тока генератора. Это нетрудно увидеть из сопоставления потерь в стали в режиме холостого хода  $\delta P_{стСГхх}^*$  и аналогичных потерь под нагрузкой  $\delta P_{стСГ}^*$ .

Расчеты показывают, что учет высокочастотных составляющих в потоке зазора при  $\alpha=0$  вносит изменения в уровень потерь в стали не более, чем на 2...3 %.

На малых частотах вращения в связи с незначительным уровнем генерируемой мощности определяющими являются потери в стали, причем их величина, очевидно, приближается к стальным потерям в режиме холостого хода. Эта тенденция отчетливо проявляется с увеличением угла регулирования (рис. 1, д, е).

С ростом величины  $q$  происходит увеличение относительного значения генерируемой мощности (т. к. уменьшается базовая величина  $S_\delta$ ), при этом возрастают потери в стали СГ, приближаясь по величине к  $\delta P_{стСГхх}^*$ . При  $q > 7$  для оценки  $\delta P_{стСГ}^*$  можно пользоваться значением относительных потерь в стали в режиме холостого хода. Изменение  $q$  от 0 до 7 в рассматриваемом примере приводит к уменьшению КПД с 0,94 до 0,92, т. е. темп увели-

<sup>1</sup> В качестве относительных единиц используются величины, предложенные в [1],  $n_n = 1429$  об/мин.



**Рис. 1.** Потери в синхронном генераторе системы «МЭГ – трехфазный мостовой выпрямитель», при номинальных оборотах  $n_{ном} = 3,5$  и различных значениях параметра  $q$  и угла регулирования  $\alpha$

чения генерируемой мощности с ростом  $q$  (рис. 2) значительно выше, нежели рост относительных потерь в стали. При этом данная тенденция сохраняется до  $q$ , равного 2...3. Относительные потери в меди в данной конструкции СГ не являются определяющими; в режимах, близких к номинальному, они примерно равны потерям в стали и имеют тенденцию снижения с уменьшением  $n^*$ .

Работа генератора на высоких частотах приводит к тому, что становятся весьма значимыми механические потери, которые быстро растут с оборотами и становятся практически определяющими.

На рис. 2 в качестве примера представлены расчетные энергетические характеристики МЭГ (его добротности соответствуют генератору ГСВ-260) в составе системы генерирования постоянного тока, работающей на противоЭДС. Первичным источником энергии является ветровая турбина. По-

лупроводниковый преобразователь выполнен по трехфазной мостовой схеме с  $q$ , равным 1. Расчетная частота вращения вала СГ  $n_p=5000$  об/мин,  $n_{\min}=2500$  об/мин и рабочая точка выбрана таким образом, что  $n_p^*=3,5$ . Мощность нагрузки при  $n^*\leq n_p^*$  изменяется пропорционально  $(n^*)^3$ , при  $n_p^*\leq n^*\leq n_p^*$  мощность нагрузки увеличивается пропорционально частоте вращения до  $n_{\text{ном}}^*=3,5$  (рис. 2, а).

Зависимость КПД генератора от частоты вращения приведена на рис. 2, б, а составляющих активных потерь – на рис. 2, в, г. Отличие данных характеристик от ранее приведенных заключается в том, что в схемы включены регуляторы мощности, которые автоматически изменяют угол  $\alpha$  с изменением частоты вращения. Учитывая, что  $k_t$  весьма слабо зависит от частоты вращения [1], полагая его постоянным, можно получить следующее обобщенное выражение для активных потерь в системе

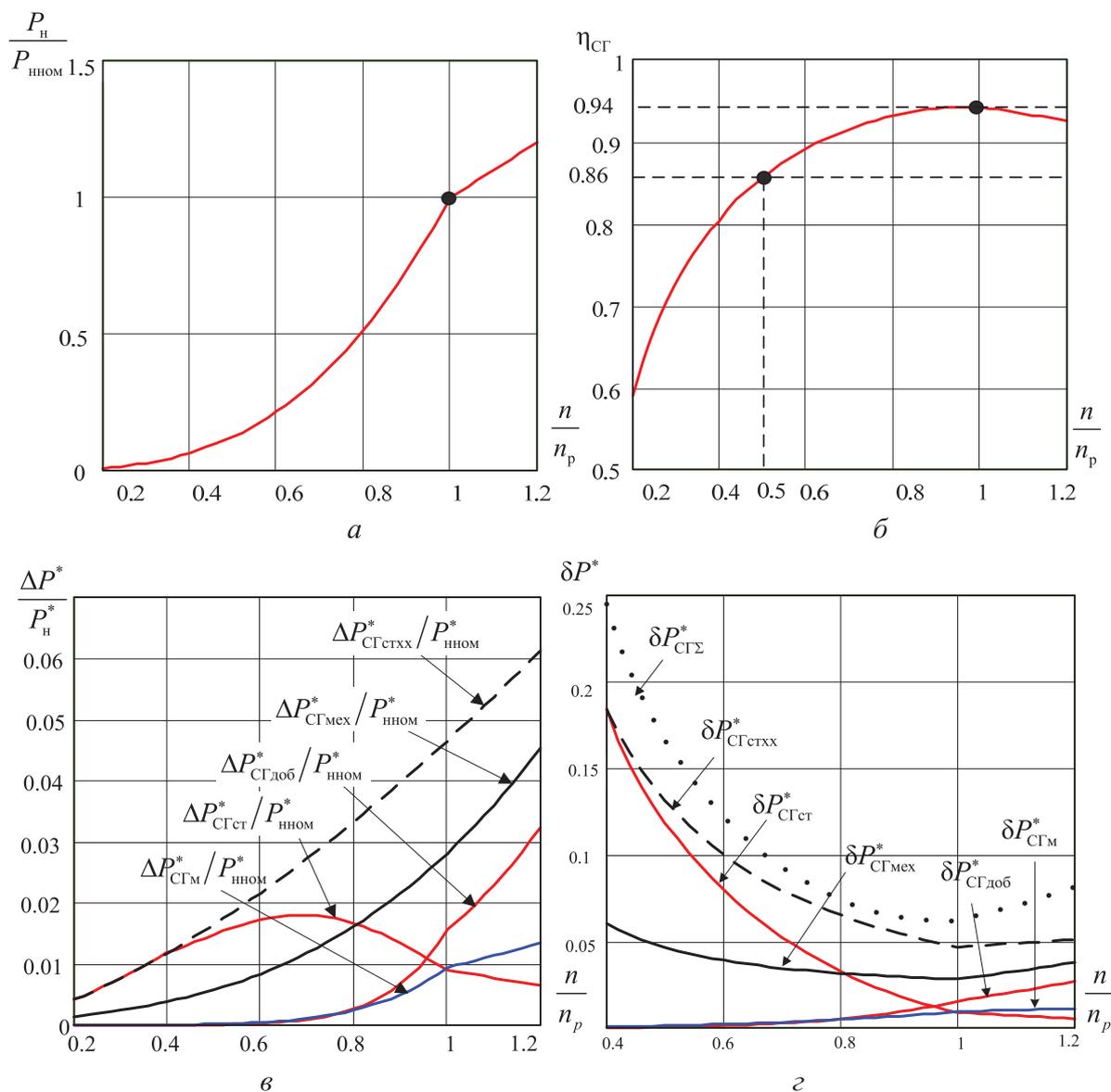


Рис. 2. Расчетные энергетические характеристики магнитоэлектрического синхронного генератора в составе системы генерирования постоянного тока ветроэнергетической установки

$$\Delta P^* = a(n^*)P_n^* + b(n^*),$$

где  $a(n^*)$  и  $b(n^*)$  – полиномиальные функции от относительного значения частоты вращения:

$$an^* = a_0 + a_1(n^*)^{1,5} + a_2(n^*)^2, \\ bn^* = b_0 + b_1n^* + b_2(n^*)^{1,5} + b_3(n^*)^2 + b_4(n^*)^3.$$

Введем следующие величины:  $n_{pmin}^* = n_{pmin}/n_{min}$  – минимальная рабочая частота вращения вала;  $n_p^* = n_p/n_{min}$  – расчетная (номинальная) частота вращения вала;  $D_p = n_p/n_{pmin}$  – рабочий диапазон частот,  $P_{нном}^* = \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^\zeta$  – номинальная (расчетная) мощность системы; коэффициент  $\zeta$  равен 3 для ВЭУ и 1 для ЛА. С учетом этих величин для расчетной точки получим

$$\delta P_p^* = \frac{\Delta P^*}{P_{нном}^*} = a(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^{-\zeta} + \\ + b(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^{-\zeta}, \\ \eta_{cp} = \left[ \frac{1 + a(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^\zeta}{1 + b(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^{-\zeta}} \right]^{-1}.$$

Отсюда следует, что с увеличением рабочего диапазона происходит значительный рост механических и добавочных потерь в генераторе, их роль становится преобладающей.

Полученные соотношения полезны при анализе зависимости потерь и КПД от рабочего диапазона  $D_p$  конкретной системы, а также при параметрической оптимизации на стадии проектирования. В частности, функциональную связь между параметрами системы, обеспечивающую максимальное значение КПД в расчетной точке при заданном диапазоне и минимальной частоте вращения, позволяет определить соотношение

$$[1,5a_1(n_{pmin}^* D_p)^{0,5} + 2a_2 n_{pmin}^* D_p] \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^\zeta + \\ + \zeta a(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^{-\zeta} + \\ + [b_1 + 1,5b_2(n_{pmin}^* D_p)^{0,5} + 2b_3 n_{pmin}^* D_p + 3b_4(n_{pmin}^* D_p)^2] - \\ - \zeta b(n_{pmin}^* D_p) \gamma_c(n_{pmin}^* D_p)^{-\zeta-1} = 0.$$

Для минимальной частоты вращения рабочего диапазона относительные потери и КПД находятся по формуле

$$\delta P_{pmin}^* = \frac{\Delta P^*}{P_{нном}^*} = \\ = a(n_p^*/D_p) \gamma_c(n_p^*/D_p)^\zeta + b(n_p^*/D_p) \gamma_c(n_p^*/D_p)^{-\zeta}, \\ \eta_{cpmin} = \\ = [1 + a(n_p^*/D_p) \gamma_c(n_p^*/D_p)^\zeta + b(n_p^*/D_p) \gamma_c(n_p^*/D_p)^{-\zeta}]^{-1}.$$

Отсюда вытекает, что относительный уровень потерь при снижении оборотов возрастает пропорционально  $D_p^\zeta$ , причем, как это следует из рис. 1 и 3, преобладающими становятся потери в стали генератора и реактора.

Данный вывод весьма важен при построении СГЭЭ для ВЭУ, где  $\zeta=3$  и  $D_p=2...4$ . В системах этого типа по указанной причине предпочтительнее применение модульного принципа построения СГЭЭ с разбиением рабочего диапазона на поддиапазоны в соответствии с мощностью одного модуля. При такой структуре системы с ростом частоты вращения происходит наращивание генерируемой мощности за счет увеличения числа параллельно включенных модулей.

Так, если обозначить через  $N_m$  общее количество модулей, при расчетной мощности модуля  $P_{mp}^* = P_n^*/N_m$ , а через  $N_3$  – количество работающих модулей при  $n_{min}$ , то, полагая все модули одинаковыми, получим следующее выражение для расчетного диапазона одного модуля:

$$D1_p = D_p \left( \frac{N_3}{N_m} \right)^{\frac{1}{\zeta}}.$$

Под расчетным диапазоном  $D1_p$  понимается величина, удовлетворяющая соотношению

$$P_{mp}^* \equiv (n_{pmin}^* D1_p)^\zeta.$$

На рис. 3 для системы СГЭЭ ветроэнергетической установки на базе ГСВ-260 приводится зависимость КПД на минимальных оборотах от диапазона работы одного модуля и их количества. Отсюда вытекает, что для данного типа систем  $(\eta_{cp} - \eta_{cpmin})/\eta_{cp} \leq 0,01$  при  $N_m \geq 4$ .

Отметим, что задача параметрической оптимизации с критерием максимизации КПД при варьировании величины параметра  $q$  и коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  в полученном ранее соотношении [1] и ограничениях вида

$$P_n^*(n^*) \geq P_{nзад}^*(n^*), n^* \in \{n_{min}^*, n_{max}^*\}, k_{тин} \leq k_{тинзад}, \\ M \in \{M_{min}(n^*), M_{max}(n^*)\}$$

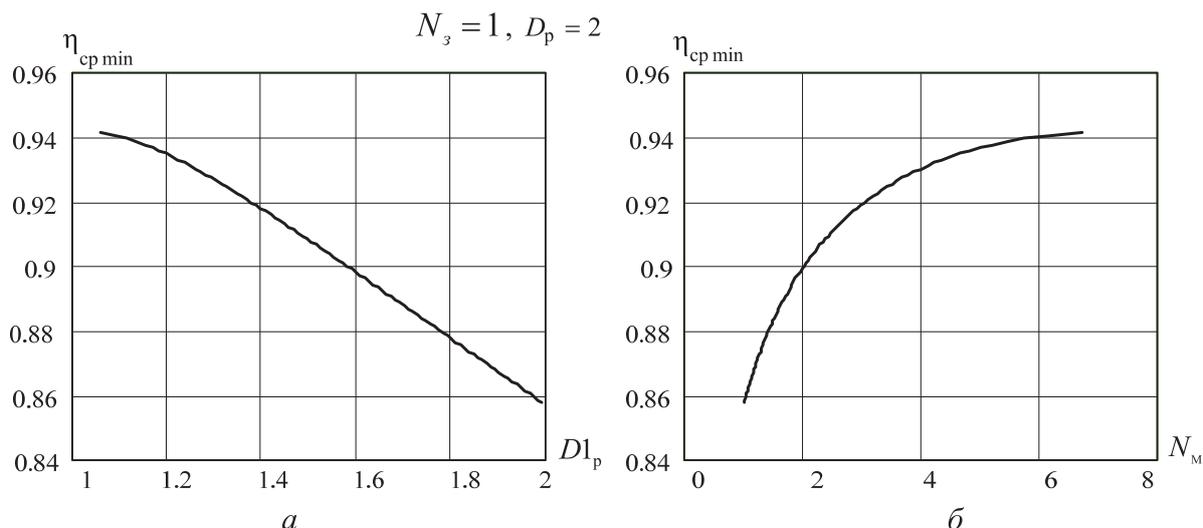
для систем МЭГ НПЧ с ЕК приводит к решению  $q=q_{min}$  при любых значениях величин  $a_i$  и  $b_i$ . Здесь  $q_{min}$  определяется из [1]  $P_{nзад}^*(n^*)$  – заданный характер изменения мощности нагрузки от частоты вращения;  $k_{тинзад}$  – требуемое значение коэффициента гармоник тока нагрузки. При этом проблема параметрической оптимизации сводится к решению стандартной задачи линейного программирования, где искомый результат лежит на границе допустимых параметров и определяется системой уравнений

$$P_n^*(n_{min}^*) = P_{nзад}^*(n_{min}^*), P_n^*(n_{max}^*) = P_{nзад}^*(n_{max}^*).$$

Данное условие обеспечивает также максимальное значение коэффициента мощности СГ в начале и конце рабочего диапазона.

#### Выводы

Приведены результаты расчета КПД системы генерирования постоянного тока на базе магнитоэлектрического синхронного генератора и полупроводникового преобразователя (выпрямителя). Показано, что:



**Рис. 3.** Зависимости КПД СГЭЭ для ВЭУ на минимальных частотах вращения вала ветровой турбины от диапазона работы одного модуля (при  $N_3=1, D_p=2$ ) и количества модулей

1. На величину и соотношение потерь в генераторе существенное влияние оказывают тип полупроводникового преобразователя и режимы его работы. Применение нулевых схем преобразователей приводит к повышенным потерям в меди. Режим прерывистого тока в фазах генератора обусловлен увеличением удельных потерь в стали, к росту которых также приводит увеличение угла регулирования (или уменьшение глубины модуляции в случае циклоконвертора).
2. Расширение рабочего диапазона частот вращения приводит к значительному росту активных потерь и изменению их соотношения. В системе генерирования для ветроэнергетических

установок они изменяются пропорционально пятой степени диапазона частот вращения, а в системах для летательных аппаратов пропорционально третьей.

3. Проблема повышения КПД при увеличении диапазона частот вращения для ветроэнергетических установок может быть решена за счет применения модульного принципа построения системы генерирования.

*Работа выполнена по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г. на тему: «Исследование, разработка и организация промышленного производства мехатронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов С.А., Гарганеев А.Г. Методика расчета коэффициента полезного действия мехатронной системы генерирования электрической энергии постоянного тока // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 135–138.
2. Харитонов С.А., Грабовецкий Г.В., Лучкин В.Ф. Система генерирования типа «синхронный генератор с РЗМ – преобразова-

тель частоты» для ВЭУ мощностью 1000 кВт «Радуга-1» // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Труды III Междунар. научно-техн. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. – Т. 8. – С. 29–33.

Поступила 02.04.2011 г.