

---

---

УДК 621.313.322-82

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

© 2019 г. Н. В. Коровкин<sup>1</sup>, С. Л. Гулай<sup>1, \*</sup>, Д. А. Верховцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: uzu@bk.ru

Поступила в редакцию 10.07.2019 г.

После доработки 12.08.2019 г.

Принята к публикации 12.08.2019 г.

Рассмотрено решение задачи многокритериальной оптимизации гидрогенератора с помощью генетического алгоритма NSGA-II. Оптимальность рассматривается в смысле получения конструкции гидрогенератора, обладающего наилучшими значениями следующих целевых функций (критериев оптимальности): масса сердечника статора; потери в активной стали статора, полюсах ротора и демпферной обмотке; ток ротора; синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси. Численные расчеты магнитного поля гидрогенератора выполнены на базе метода конечных элементов в двумерной нелинейной постановке. Результаты оптимизации сопоставлены с данными действующего генератора.

*Ключевые слова:* гидрогенератор, синхронный, NSGA-II, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, метод конечных элементов

**DOI:** 10.1134/S0002331019040071

## ВВЕДЕНИЕ

Усиление конкуренции на мировом рынке энергомашиностроения, а также увеличение цены на электроэнергию формирует интерес к оптимизации параметров электрических машин. Цель оптимизации, как правило, сводится к минимизации либо начальной цены машины, либо стоимости ее эксплуатации. Процесс проектирования и конструирования электрических машин сопряжен с соблюдением многих взаимоисключающих требований, и классические методы нередко не позволяют найти решение с наилучшим соотношением характеристик. Для более взвешенного решения необходим компромиссный подход, учитывающий важность всех конфликтующих целевых функций. С этой целью в настоящей работе предложено применение методов многокритериальной оптимизации с использованием эффективности по Парето.

В данной работе представлено решение задачи многокритериальной оптимизации параметров гидрогенератора с помощью генетического алгоритма недоминантной сортировки второго поколения (далее NSGA-II) [1]. Для оптимизации предложены четыре критерия: масса сердечника статора; потери в активной стали сердечника статора, полюсах ротора и демпферной обмотке (далее “потери в стали”); ток ротора и синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси (далее  $x_d$ ). Численные расчеты магнитного поля, необходимые для вычисления критериев выполнены на основе метода конечных элементов в двумерной нелинейной постановке. Первые три критерия определялись в режиме холостого хода при напряжении статора близком к номинальному значению;  $x_d$  вычислено при постановке задачи магнитостатики с за-

данием токов обмотки статора. В качестве референсной конструкции выбран действующий гидрогенератор мощностью 9 МВт. Для моделирования магнитного поля и анализа результатов расчета использованы программные пакеты ANSYS Electronics Desktop версии 19 и The MathWorks Matlab версии 15.

## ОБЪЕМ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

### 1.1 Алгоритм оптимизации

Конструкцию гидрогенератора будем описывать вектором варьируемых параметров  $\vec{x}$ , включающим  $D$  переменных, определяющих размер, плотность тока, свойства материалов и т.д. Для ограничения варьируемых параметров используются международные технические стандарты, электромагнитные, тепловые, механические и технологические условия. Концепция состоит в том, чтобы вектор целевой функции  $f(\vec{x})$  принял минимальное значение при сохранении технических показателей в допустимых пределах.

Общую задачу многокритериальной оптимизации можно сформулировать следующим образом:

необходимо найти вектор параметров

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_D], \quad \vec{x} \in \mathbf{R}^D$$

при  $D$  непосредственных:

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, \dots, D$$

и  $m$  функциональных ограничений на его компоненты

$$g_j(\vec{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m$$

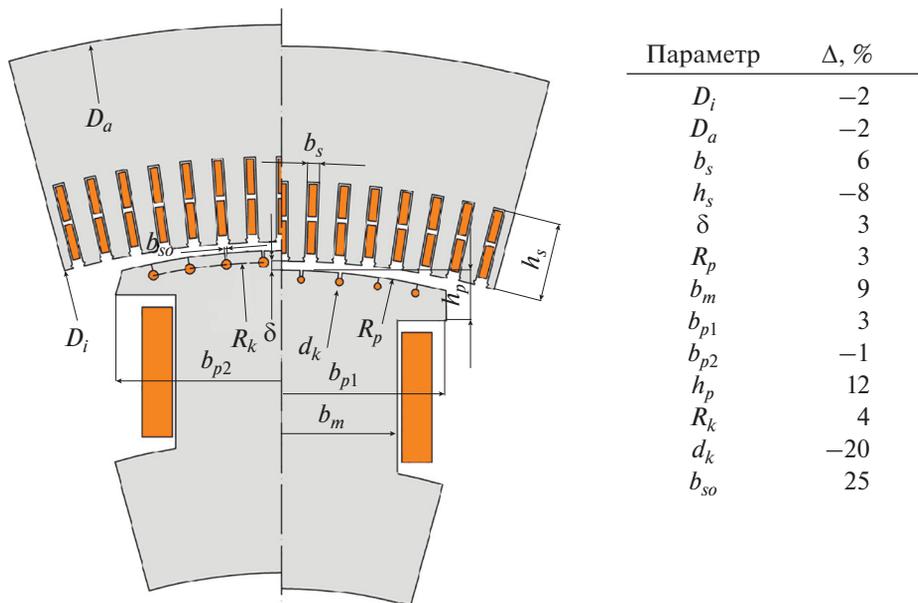
минимизирующий (по Парето) векторную целевую функцию:

$$f(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})].$$

Результатом решения сформулированной многокритериальной задачи оптимизации является множество Парето — включающее в себя все вектора  $\vec{x}$ , при котором значение каждой целевой функции не может быть улучшено без ухудшения других.

Существуют различные способы решения задач многокритериальной оптимизации. В настоящее время наиболее активно развиваются так называемые метаэвристические методы, в число которых входят и эволюционные. Строго говоря, эти методы не гарантируют поиска глобального оптимума, тем не менее, существует высокая вероятность того, что будет определено или оно [2], либо достаточно близкое к нему решение. Одним из наиболее перспективных эволюционных методов является генетический алгоритм недоминантной сортировки, впервые описанный в [3] (1999), усовершенствованный в 2000 г. и названный NSGA-II. Авторы [4]–[8] показывают его эффективность при оптимизации конструкции электрических машин и распределенных энергосистем.

В данной работе вектор конструктивных параметров  $\vec{x}$  включает: внешний и внутренний диаметры сердечника статора; длину активной стали статора; высоту и ширину паза статора; величину воздушного зазора между ротором и статором; ширину, высоту и радиус кривизны полюсного наконечника полюса ротора; ширину сердечника полюса ротора; диаметр, радиус расположения и ширина прорези демпферных стержней. На рисунке 1 представлена параметризованная геометрия модели генератора с изменяемыми размерами. За ограничения  $D$  приняты отклонения  $\pm(5-25)\%$  от расчетных значений определенных по методике 9 в зависимости от величины изменяемого параметра.



**Рис. 1.** Геометрия линейной части генератора: слева – базисный (референсный) генератор, справа – рассчитанный с помощью предложенной методики, с таблицей относительных отклонений от базисного генератора.

Также заданы вектор целевых функции  $f(\vec{x})$  и размер популяции. С одной стороны, теоретическое количество критериев и размер популяции не ограничены – с другой, вычислительная сложность данного алгоритма составляет  $O(kN^2)$ , где  $k$  – размерность вектора целевой функции,  $N$  – число решений (размер популяции, количество особей). Тем самым  $k$  и  $N$  ограничены вычислительной мощностью и временем расчета, поэтому выбраны четыре критерия, характеризующие материалоемкость и общую экономическую эффективность конструкции при размере популяции тысяча особей.

### 1.2. Численный метод расчета

Численный расчет нелинейной задачи нестационарного магнитного поля выполнен в двумерной постановке. Расчетная геометрия модели соответствует поперечному сечению в середине длины сердечника статора. Задание вращающегося магнитного поля выполнено на один период с частотой дискретизации 2 кГц, выбранной на основании теоремы отсчетов 10:

$$f_d > 2f \frac{Z}{p} \text{ [Гц]},$$

где  $f$  – частота [Гц];

$p$  – число пар полюсов ротора;

$Z$  – число пазов сердечника статора.

Потери в стали сердечника статора и полюсов ротора от гистерезиса и вихревых токов определены по уравнению Бертоцци 11:

$$P = P_h + P_c + P_e \text{ [Вт} \cdot \text{м}^{-3}\text{]},$$

где  $P_h = k_h B_m^2 f$  – удельные потери от гистерезиса при максимальной индукции  $B_m$  и частоте  $f$  [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$ ];

$P_c = k_c (B_m f)^2$  – удельные потери от вихревых токов [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$ ];

$P_e = k_e (B_m f)^{1.5}$  – удельные добавочные потери [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$ ];

$k_h$  – коэффициент потерь от гистерезиса [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Тл}^{-2} \cdot \text{с}$ ];

$k_c$  – коэффициент потерь от вихревых токов [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Тл}^{-2} \cdot \text{с}^2$ ];

$k_e$  – коэффициент добавочных потерь [ $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Тл}^{-1.5} \cdot \text{с}^{1.5}$ ];

$B_m$  – максимальная индукция [Тл].

Зависимость потерь  $P$  в стали от индукции  $B$  при различных частотах (далее – кривые  $P(B)$ ) определена на заводе-изготовителе в соответствии со стандартом 12. Однако необходимо отметить, что при определении магнитных свойств в аппарате Эпштейна на кольцевых образцах не учитывают влияние вращающегося магнитного поля на потери в стали (вращательный гистерезис) 13.

Коэффициент потерь от вихревых токов определен по формуле 14:

$$k_c = \frac{\sigma \pi^2 d^2}{6},$$

где  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость стали [ $\text{См/м}$ ];

$d$  – толщина листа стали [м].

Определение коэффициентов  $k_h$  и  $k_e$  является нелинейной задачей, для решения которой необходимо использовать метод нахождения глобального максимума. С этой целью использован генетический алгоритм, где в качестве фитнес-функции выбрано условие максимизации среднего коэффициента детерминации  $R^2$  аппроксимирующих функций и экспериментальных кривых  $P(B)$  15. Подбор коэффициентов потерь для стали статора осуществлен для частоты 50 Гц, ротора – 400 и 1000 Гц.

Потери приведены к номинальному напряжению статора по уравнению 16:

$$P = P' \left( \frac{U_H}{U'} \right)^2, \quad [\text{Вт}],$$

где  $U'$  – расчетное действующее линейное напряжение статора [В];

$U_H$  – номинальное действующее линейное напряжение статора [В];

$P'$  – расчетные потери в стали [Вт].

Ток ротора приведен к номинальному напряжению статора по уравнению:

$$i_p = i_p' \frac{U_H}{U'}, \quad [\text{А}],$$

где  $i_p'$  – расчетный ток ротора [А].

Для определения  $x_d$  решалась задача расчета стационарного магнитного поля. В качестве источника задается ток обмотки статора с ориентацией ротора по продольной оси магнитного потока. Вычисление  $x_d$  выполнено на основе зависимости:

$$x_d = 2\pi f \frac{\Psi}{I}, \quad [\text{Ом}],$$

где  $\Psi$  – потокосцепление обмотки статора [Вб];

$I$  – ток обмотки статора [А].

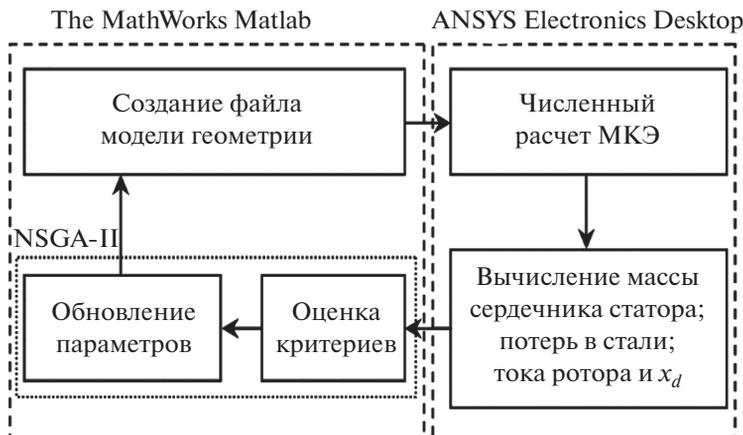


Рис. 2. Принципиальная схема решения задачи оптимизации.

Потокосцепление фазы рассчитано по формуле [17]:

$$\Psi = \frac{2pl_{\delta}}{aS} \left( \sum_{n=1}^{Z/2p} \int_{S^+} A_z dS - \sum_{n=1}^{Z/2p} \int_{S^-} A_z dS \right), [\text{Вб}],$$

где  $l_{\delta}$  – расчетная длина генератора [м];

$a$  – число параллельных ветвей обмотки статора;

$S, S^+, S^-$  – площадь поперечного сечения стержня ( $S^+$  и  $S^-$  соответствуют положительному и отрицательному направлению тока в обмотке статора) [м<sup>2</sup>];

$Z$  – число пазов статора;

$A_z$  – составляющая векторного магнитного потенциала по оси  $z$  [Вб/м].

Пересчет к продольному и поперечному потокосцеплению выполнен по формулам [18]:

$$\Psi_d = \frac{2}{3} [\Psi_a \cos \theta + \Psi_b \cos(\theta - 120^\circ) + \Psi_c \cos(\theta + 120^\circ)], [\text{Вб}],$$

$$\Psi_q = \frac{2}{3} [\Psi_a \sin \theta + \Psi_b \sin(\theta - 120^\circ) + \Psi_c \sin(\theta + 120^\circ)], [\text{Вб}].$$

Численный расчет в плоской постановке не учитывает влияние магнитного поля торцевой зоны – индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки статора определено аналитически [19]. Расчеты выполнены для ненасыщенной магнитной цепи генератора.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема решения задачи оптимизации. Для уменьшения объема вычислений область расчетной модели ограничена пределом одной пары полюсов, с заданием условия периодичности на границах. Расчет задачи выполнен для сорока поколений с количеством особей в популяции  $10^3$ . Анализ характера изменения критериев на рисунке 3 свидетельствует о переходе к установившимся значениям в последнем поколении расчета. Для ускорения решения применен параллельный процесс расчета с использованием одного ядра процессора для каждой задачи. Общее время вычислений при использовании 24-ядерного процессора составило около двух недель.

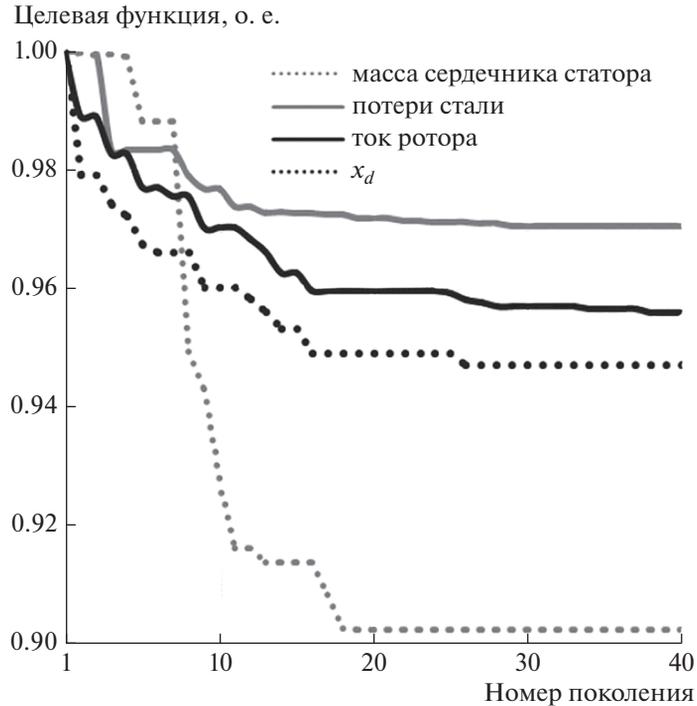


Рис. 3. Зависимость наименьших значений целевых функций от номера поколения.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты оптимизации приведены на рис. 4–6, где в трехкритериальном пространстве приведены Парето-множества, полученные в результате оптимизации конструкции гидрогенератора. В качестве базисных величин приняты результаты численного расчета референсного (базисного) гидрогенератора, спроектированного по методике 9 и эксплуатируемого на объекте Заказчика. Точка, соответствующая базисному генератору, выделена на рисунках белым цветом, с проекциями на плоскости. Также выделенные белым исходящие из нее лучи параллельны соответствующим осям, и их проекции на поверхность Парето-множества показывают, в частности, множество конструкций гидрогенератора, лучших референсного по выбранным критериям.

Множество Парето для первого поколения не представлено, так как имеет типичный для начального этапа оптимизации случайный характер распределения. На рис. 4 представлена популяция второго поколения, на рис. 5 и 6 – последнего сорокового. Анализ распределения свидетельствует о наличии Парето-оптимального состояния. Выбор единственного решения из множества Парето осуществляется лицом, принимающим решение, и основывается на его субъективной оценке критериев качества и их взаимосвязи между собой. При решении практических многокритериальных задач этот вопрос в данной работе не рассматривается.

Тем не менее, сравнение множества Парето и базисного генератора (точка с координатами  $\{1; 1; 1\}$ ) свидетельствует о возможности совершенствования конструкции. Для примера, на рис. 1 слева представлена конструкция базисного генератора, справа геометрия модели, для которой все четыре критерия меньше единицы: масса сердечника статора меньше на 1.5%, ток ротора – 1.5%, потери в стали – 1%,  $x_d$  – 3%.

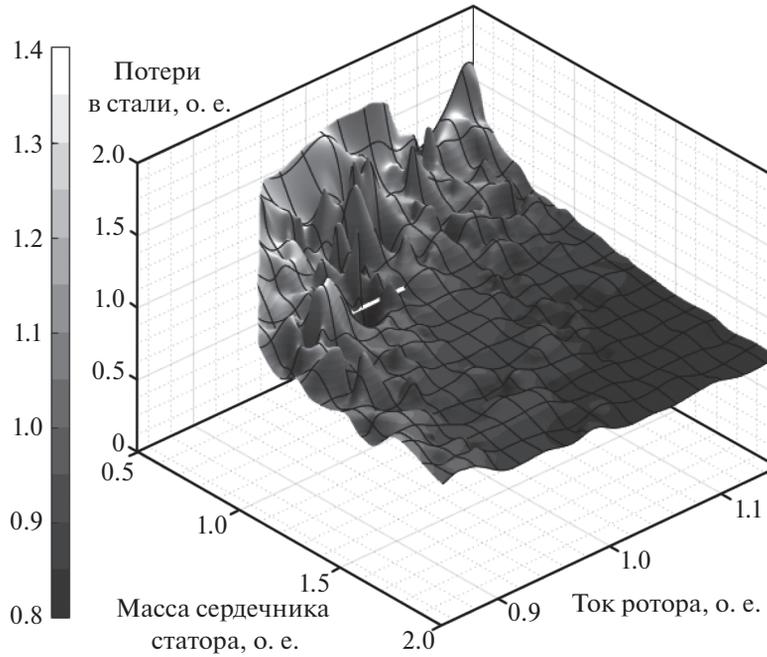


Рис. 4. Множество Парето второго поколения.

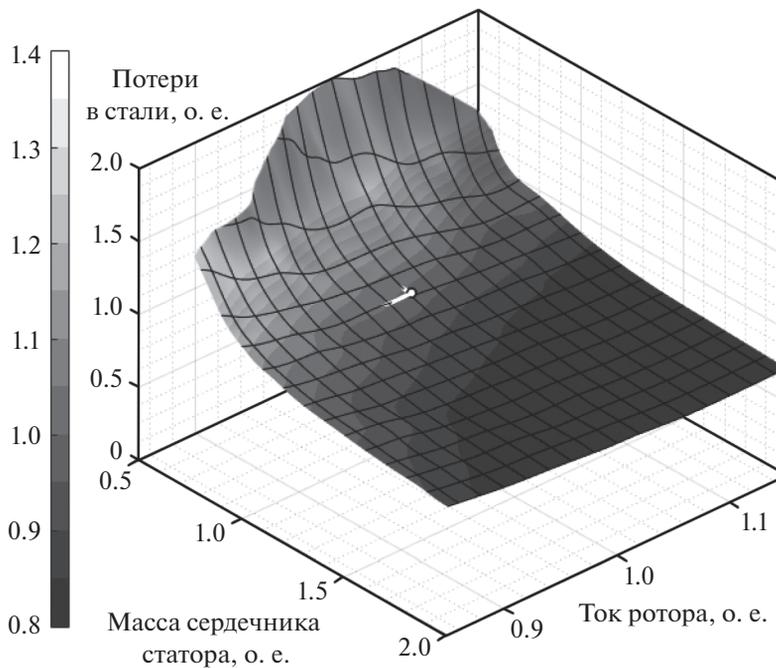


Рис. 5. Множество Парето сорокового поколения для потерь в стали по оси z.

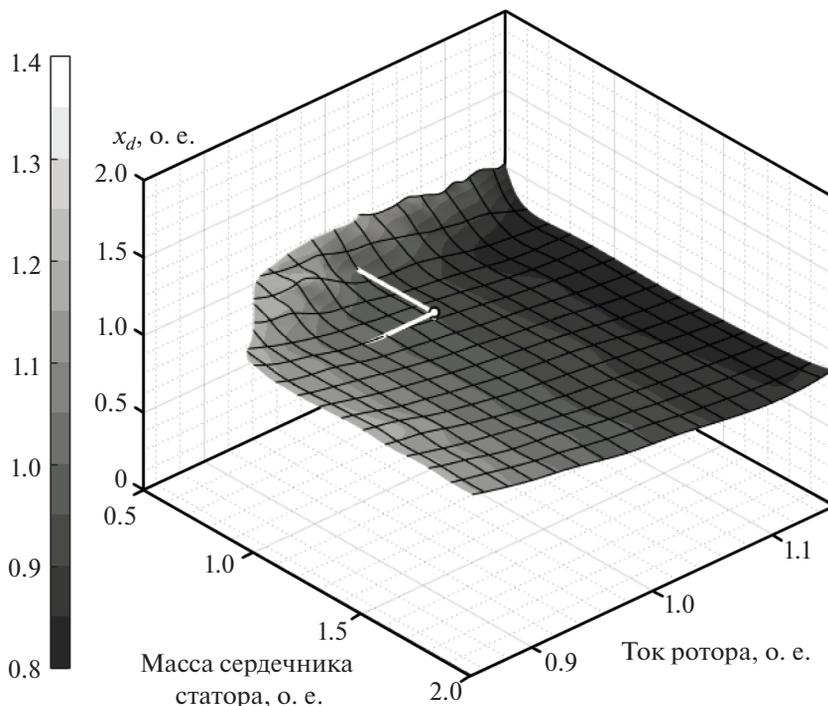


Рис. 6. Множество Парето сорокового поколения для  $x_d$  по оси  $z$ .

## ВЫВОДЫ

Оптимизация – важная часть современного процесса проектирования электрических машин. Зачастую инженеры-проектировщики в первую очередь полагаются на опыт, подходящий для конкретной задачи. Данный “классический” подход обеспечивает функциональность конструкции, но не гарантирует оптимизацию используемого материала, коэффициента полезного действия или первоначальной стоимости. В то же время, это очень важные факторы, которые необходимо учитывать, чтобы сделать электрическую машину более конкурентоспособной на мировом рынке.

Для гидрогенератора мощностью 9 МВт, взятым за прототип, нами показана возможность совершенствования конструкции гидрогенератора для уменьшения потерь в стали, массы сердечника статора, тока ротора и  $x_d$ . Наш подход к оптимизации может быть отнесен к методам искусственного интеллекта и естественным образом обобщается и на близкие по постановке задачи для электрических машин иного типа. Интеллектуальные усилия проектировщика при его применении сосредотачиваются на постановке задачи: выборе и формализации критериев оптимальности, важных для создания конкурентных преимуществ у изделия. Выполненная оптимизация показывает успешность применения методов искусственного интеллекта к решению задач проектирования сложного электротехнического оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Deb K., Agrawal S., Pratap A., Meyarivan T.* A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In: Schoenauer M. et al. (eds) Parallel Problem

- Solving from Nature PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science. V. 1917. Springer, Berlin, Heidelberg.
2. *Andersen S.B., Santos I.F.* “Evolution strategies and multiobjective optimization of permanent magnet motor,” *Applied Soft Computing*. 2012. V. 12. № 2. P. 778–792.
  3. *Deb K.* Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test Functions. *Evolutionary Computation*. V. 7(3). P. 205–230.
  4. *Ponmurugan P.* Multiobjective Optimization of Electrical Machine, a State of the Art Study. *International J. Computer Applications (0975-8887)*. October 2012. V. 56(13). P. 26–30.
  5. *Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S.* Methods for optimization of power-system operation modes. *Russian Electrical Engineering*. 2013. V. 84(2). P. 74–80.
  6. *Belyaev N.A., Korovkin N.V., Chudny V.S., Frolov O.V.* Clustering of electric network for effective management of Smart grid. *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 2014. P. 1987–1990.
  7. *Korovkin N.V., Potiyenko A.A.* The use of a genetic algorithm for solving electrical engineering problems. *Electrical Technology Russia*, 2002.
  8. *Alsofyani I.M., Idris N.R.N., Jannati M., Anbaran S.A., Alamri Y.A.* “Using NSGA II multiobjective genetic algorithm for EKF-based estimation of speed and electrical torque in AC induction machines”, *Proc. Int. Power Engineering and Optimization*. 2014. P. 396–401.
  9. *Глебов И.А., Домбровский В.В.* Гидрогенераторы. Энергоиздат. 1982.
  10. *Котельников В.А.* О пропускной способности “эфира” и проволоки в электросвязи. Сб. Всесоюзный энергетический комитет. Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. 1933.
  11. *Bertotti G.* General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on magnetics*. 1988. V. 24.
  12. ASTM A343/A343M – 03, Standard Test Method for Alternating-Current Magnetic Properties of Materials at Power Frequencies Using Wattmeter-Ammeter-Voltmeter Method and 25-cm Epstein Test Frame, 2008.
  13. *Пухтер П.* Электрические машины. Т. V. Государственное энергетическое издательство, 1961.
  14. *Steinmetz C.* On the law of hysteresis, *AIEE Transactions*, 1892.
  15. *Hargreaves P.A., Mecrow B.C., Hall R.* Calculation of Iron Loss in Electrical Generators Using Finite Element Analysis. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2011.
  16. IEC 60034-2-1. Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), 2007.
  17. *Gieras J.F., Santini E., Wing M.* Calculation of Synchronous Reactances of Small Permanent-Magnet Alternating-Current Motors: Comparison of Analytical Approach and Finite Element Method with Measurements. *IEEE Transactions on magnetics*. September 1998. V. 34. № 5.
  18. *Juha Pyrhönen etc.* Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons Ltd, 2008.
  19. *Ногин В.Д.* Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход (2-е изд., испр. и доп.). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.

### On Optimization Hydro-Generator Parameters by NSGA-II

N. V. Korovkin<sup>a</sup>, S. L. Gulay<sup>a,\*</sup>, and D. A. Verkhovtsev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: uzu@bk.ru*

This paper presents the approach to solve multi-objective optimization problem of hydro-generator parameters by means of the genetic algorithm NSGA-II. There are four objectives (optimization criteria): stator core mass, iron losses, rotor current and direct-axis unsaturated synchronous reactance. The numerical calculations are performed by the finite-element method in 2D and nonlinear statement. The results are compared with the data of the operating generator.

*Keywords:* hydro-generator, synchronous, NSGA-II, multi-objective optimization, genetic algorithm, finite-element method