

УДК 621.313.322-82

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОГЕНЕРАТОРА

© 2019 г. Н. В. Коровкин¹, С. Л. Гулай^{1, *}, Д. А. Верховцев¹¹Санкт-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 12.12.2019 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 рис. 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.

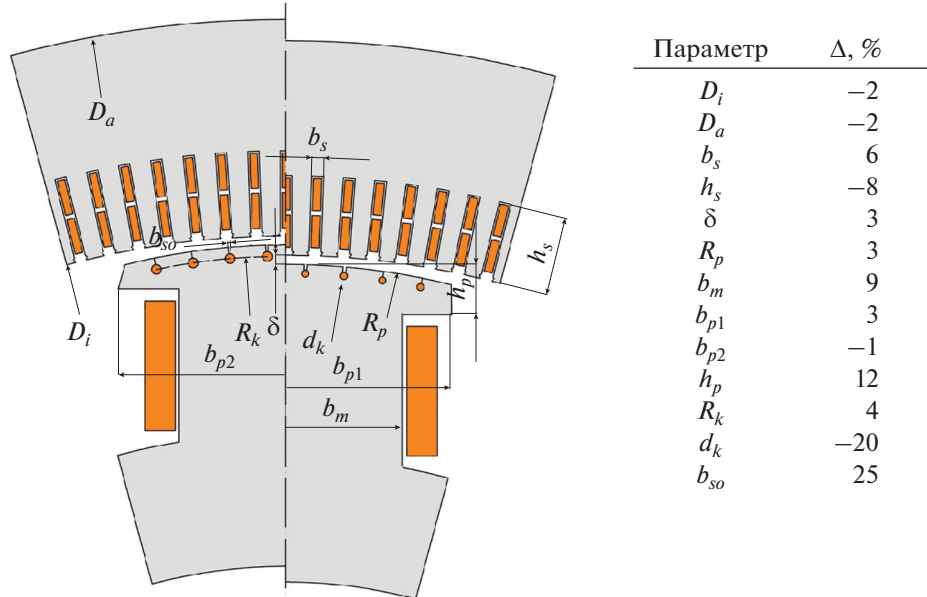


Рис. 1. Геометрия линейной части генератора: слева — базисный (референсный) генератор, справа — рассчитанный с помощью предложенной методики, с таблицей относительных отклонений от базисного генератора.

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 Бертогги 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 [Вт · м⁻³];

$P_c = k_c (B_m f)^2$ — удельные потери от вихревых токов [Вт · м⁻³];

$P_e = k_e (B_m f)^{1.5}$ — удельные добавочные потери [Вт · м⁻³];

k_h — коэффициент потерь от гистерезиса [Вт · м⁻³ · Тл⁻² · с];

k_c — коэффициент потерь от вихревых токов [Вт · м⁻³ · Тл⁻² · с²];

k_e — коэффициент добавочных потерь [Вт · м⁻³ · Тл^{-1.5} · 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 σ — удельная электрическая проводимость стали [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:

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

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

U_n — номинальное действующее линейное напряжение статора [В];

P' — расчетные потери в стали [Вт].

Ток ротора приведен к номинальному напряжению статора по уравнению:

$$i_p = i'_p \frac{U_n}{U'}, \quad [\text{А}],$$

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 Ψ — потокосцепление обмотки статора [Вб];

I — ток обмотки статора [А].

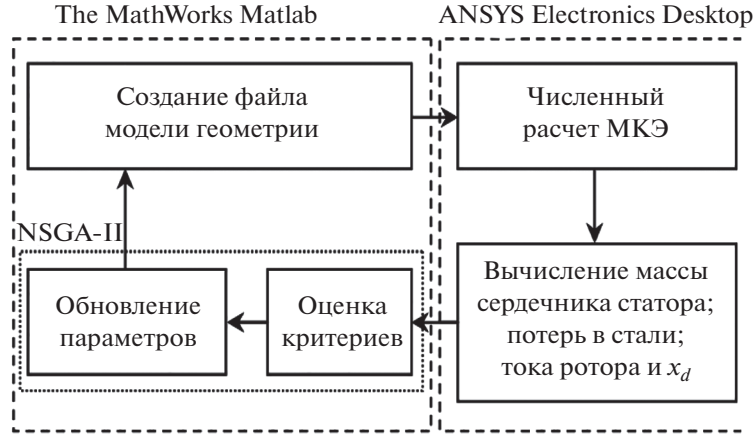


Рис. 2. Принципиальная схема решения задачи оптимизации.

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_δ – 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) [м²];

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.

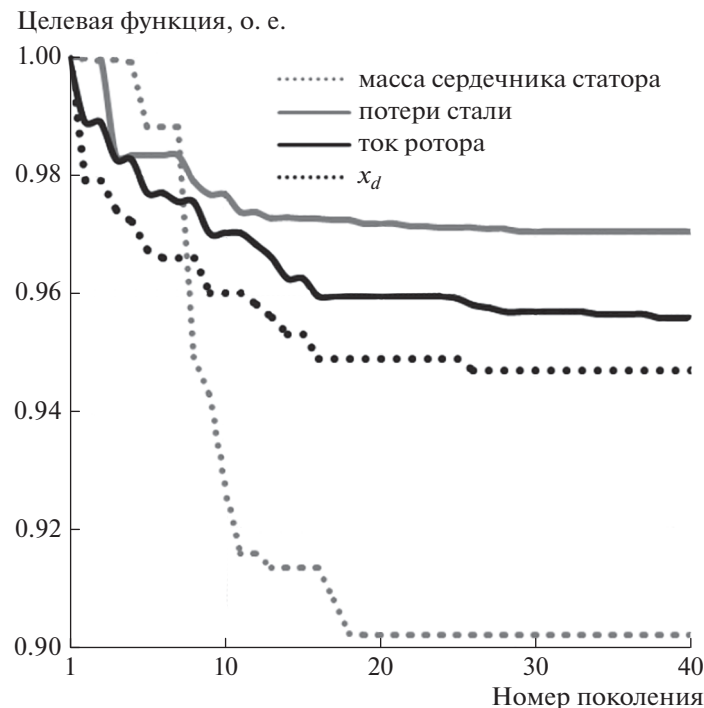


Рис. 3. Зависимость наименьших значений целевых функций от номера поколения.

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 проекция на поверхность Парето-множества показывает, 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%.

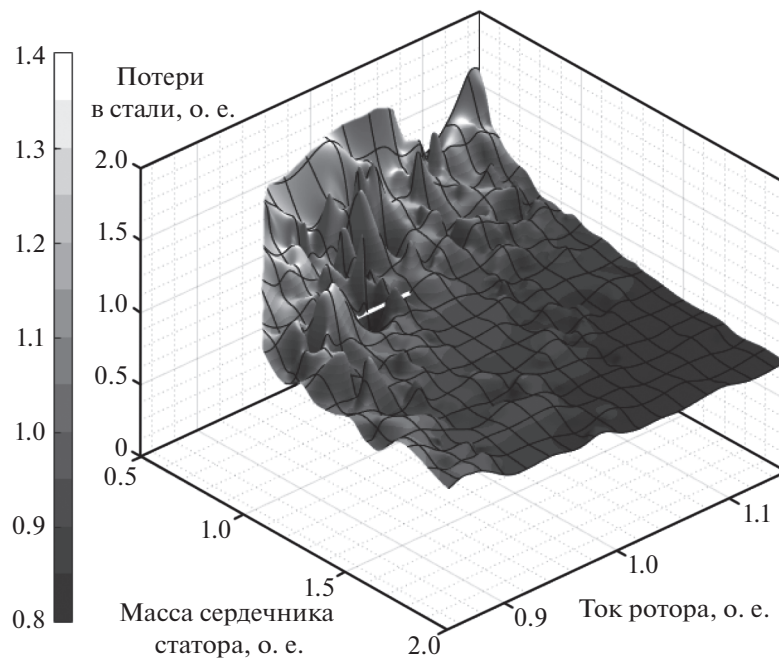


Рис. 4. Множество Парето второго поколения.

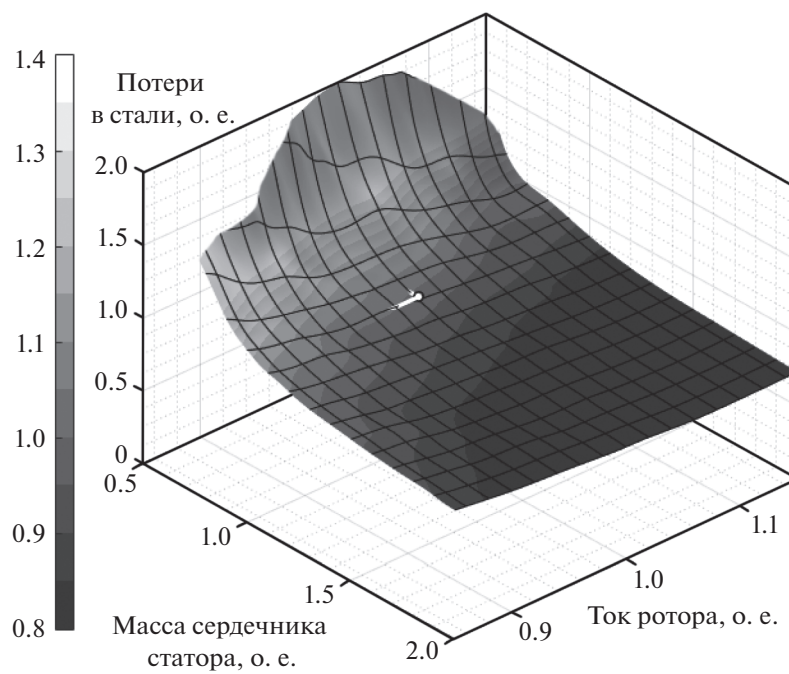


Рис. 5. Множество Парето сорокового поколения для потерь в стали по оси z.

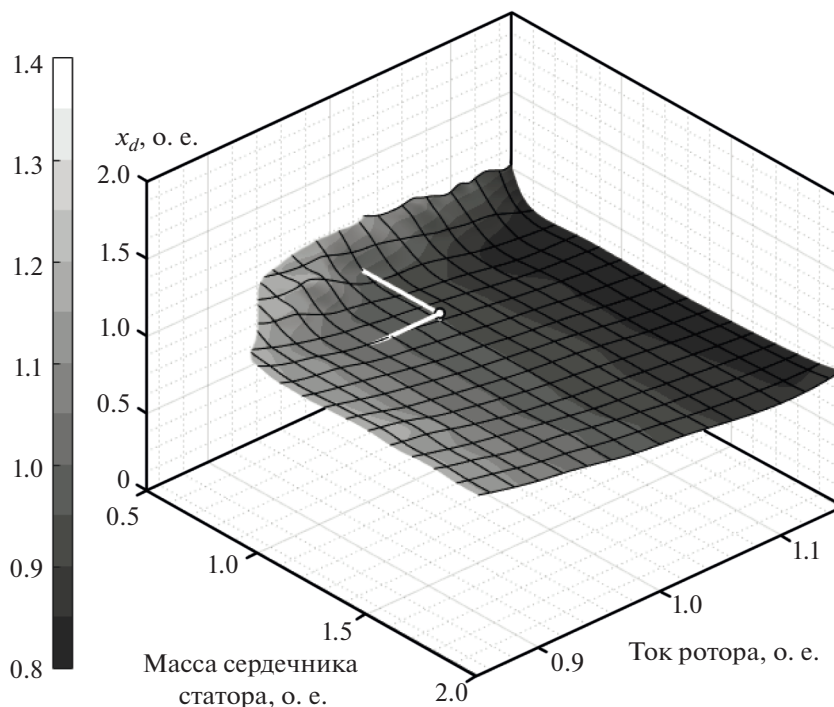


Рис. 6. Множество Парето сорокового поколения для x_d по оси z .

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*. October 2012. V. 56(13). P. 975–8887.
 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 International Symposium on Industrial. Electronics* 6864921. 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. Рухтер Р. *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^a, S. L. Gulay^{a, *}, and D. A. Verkhovtsev^a

^a*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia*

^{*}*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