

УДК 621.313

**С. Н. Пирковский**

### **ПРОЕКТНЫЙ СИНТЕЗ ОДНОФАЗНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ**

***Аннотация.** Проанализированы существующие методы проектной оптимизации однофазных коллекторных двигателей. Предложен подход к проектному синтезу однофазного коллекторного двигателя на основе комбинированного алгоритма, сочетающий преимущества метода упорядоченного перебора и эволюционного алгоритма поиска оптимальных значений управляемых переменных.*

***Ключевые слова:** математическая модель, автоматизированное проектирование, системный подход, управляемые переменные, многоэкстремальность, минимизируемый функционал, коллекторный двигатель, генетические алгоритмы, декомпозиция, проектный синтез*

**S. N. Pirkovskiy**

### **DESIGN SYNTHESIS OF SINGLE-PHASE COMMUTATION MOTOR USING A COMBINATION OF OPTIMIZATION ALGORITHM**

***Abstract.** Analyzed the existing methods of design optimization of single-phase commutator motors. An approach to the synthesis of single-phase project commutator motor based on the combined algorithm that combines the advantages of an orderly enumeration and evolutionary algorithm search for optimal values of controlled variables.*

***Keywords:** mathematical model, computer-aided design, system approach, the controlled variables, multiextremal, functional to be minimized, commutator motor, genetic algorithms decomposition, design synthesis.*

**С. М. Пірковський**

### **ПРОЕКТНИЙ СИНТЕЗ ОДНОФАЗНОГО КОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ**

***Анотація.** Проаналізовані існуючі методи проектної оптимізації однофазних колекторних двигунів. Запропонований підхід до проектного синтезу однофазного колекторного двигуна, який суміщує переваги метода упорядкованого перебору та еволюційного алгоритму пошуку оптимальних значень керованих змінних.*

***Ключові слова:** математична модель, автоматизоване проектування, системний підхід, керовані змінні, багатоекстремальність, мінімізуємий функціонал, колекторний двигун, генетичні алгоритми, декомпозиція, проектний синтез*

**Введение.** Однофазные коллекторные двигатели (ОКД) несмотря на их относительно конструктивную простоту необходимо рассматривать как сложные технические системы и реализовать их проектный синтез на основе принципов системного подхода. Это обусловлено следующими основными причинами

1. К ОКД в соответствии с их назначением предъявляется комплекс противоречивых технических требований, регламентирующих определенную совокупность свойств в стационарном и нестационарном режиме.

2. Современные математические модели (ММ) ОКД характеризуются значительным числом управляемых переменных (УП), сложными взаимосвязями параметров, характеристиками материалов, конструктив-

ными исполнениями, технологией производства и другими факторами.

Постоянное совершенствование ОКД при ужесточении показателей качества приводит к необходимости все большего уточнения и усложнения их проектных ММ.

3. Применяемые в практике инженерного проектирования ОКД критерии для оценки их технико-экономического уровня и выбора оптимального проектного решения зачастую несовершенны, противоречивы и недостаточно обоснованы. Поэтому в ряде случаев требуется их адаптивная корректировка в самом процессе проектирования для получения оптимальных технических решений, что многократно увеличивает число обращений к проектной ММ [1-2].

Анализ работ по теории автоматизированного проектирования ОКД показывает, что даже при наличии программного обеспечения (ПО) всех видов проектных работ и диалогового взаимодействия с ПЭВМ этот

Пирковский С.Н., 2015

процесс требует значительных затрат труда высококвалифицированных специалистов, а результаты его во многом определяются интуицией и творческими способностями проектировщиков. Поэтому крайне необходимо развитие и применение новых технологий автоматизированного проектирования ОКД, основанных на комплексном и научно обоснованном применении идей и методов системного анализа [3 – 6].

**Цель работы.** Создание высокоэффективной технологии автоматизированного проектного синтеза на основе структурного, функционального и характеристического анализа задачи проектирования, а также исследования самого процесса проектирования ОКД.

**Материалы исследования.** Математически задача определения оптимальных параметров ОКД формулируется следующим образом: найти вектор  $x$  независимых параметров, обеспечивающий минимальное значение критерия оптимальности  $F(x)$  при соблюдении условий

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ \Phi_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для однозначности принимаем, что чем меньше значение целевой функции, тем лучше устройство при прочих равных условиях.

Более компактно задача может быть записана так:

$$\min_{x \in R_1} \{F(x) \mid \Phi_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m\}; \quad (2)$$

$$R_1 = \{x \mid \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (3)$$

где  $F(x)$  – целевая функция, являющаяся критерием оптимальности исследуемого ОКД и построенная на основе его показателей качества;  $\Phi_j(x)$  – функциональные ограничения;  $R_1(x)$  – область задания независимых параметров ОКД.

Характерной особенностью задач по оптимизации ОКД является существенное различие в степени влияния на величину функционала одинакового приращения по разным переменным. В результате функционал име-

ет на  $n$ -мерной поверхности области с «пологими» участками и крутыми «обрывами», что приводит к плохой дифференцируемости. Недифференцируемость функционала чаще всего связана с тем, что один или несколько параметров оптимизации меняются дискретно. При этом обычно другие параметры оптимизации могут принимать любые численные значения из допустимой области [1; 7]. Следует также учесть увеличение сложности вычислительного процесса с увеличением числа переменных оптимизации  $n$ , которое в современных задачах по оптимизации ОКД исчисляется десятками. Наличие у задач по оптимизации ОКД одновременно нескольких (а иногда и всех) указанных выше особенностей существенно усложняет процесс оптимизации.

Существующие в настоящее время методы оптимизации, при всем их многообразии, можно разделить на два типа: т.н. классические (градиентные) методы и эволюционные («мягкие») методы оптимизации. К классическим методам оптимизации [2; 8; 13] относятся такие широко известные и повсеместно используемые методы, как метод градиентного спуска, метод наискорейшего спуска, метод Ньютона, метод секущих и др. методы. Подход к решению задач оптимизации, реализованный в градиентных методах, накладывает определенные условия на минимизируемый функционал. Он должен существовать и быть непрерывным во всех точках области оптимизации, также он должен быть хорошо дифференцируем (для методов второго порядка – дважды дифференцируем). В качестве вектора переменных должны использоваться переменные вещественного типа. Неустойчивый поиск глобального минимума в случае многоэкстремальных задач следует отнести к главным недостаткам градиентных методов. К их достоинствам относятся быстрая сходимость вблизи локального минимума, универсальность, простота и высокая отлаженность алгоритмов.

Последние годы все более активно используются альтернативные эволюционные методы оптимизации [6 – 12] не основанные на вычислении градиента, а использующие

принципиально иные способы нахождения минимума функционала.

Эволюционные методы работают не с отдельными объектами (особями), а с популяциями этих объектов. Каждый алгоритм вначале создает некоторым способом популяцию объектов. Дальнейший процесс представляет собой генерацию последовательности поколений. Внутри каждого поколения все индивиды оцениваются, и в зависимости от оценки участвуют в создании новой популяции. Процесс эволюции останавливается, когда построенная в данной эпохе новая популяция удовлетворяет критерию завершения.

Основные преимущества эволюционных методов:

- на минимизируемый функционал не накладывается условия дифференцируемости; вектор варьируемых переменных может содержать дискретные и непрерывные переменные;

- естественным образом решается проблема ограничения переменных (без необходимости вводить новые переменные или штрафные функции); слабая зависимость количества вычислений от степени «жесткости» задачи;

- работа на каждом шаге ведется одновременно с группой рабочих точек (популяцией), что значительно повышает вероятность нахождения глобального минимума в многоэкстремальных задачах.

Основным недостатком всех эволюционных методов является медленная сходимость к точному решению, т.е. требование для решения задачи больших вычислительных затрат.

Одним из первых для оптимального проектирования ОКД был использован метод упорядоченного перебора, который ввиду практической нечувствительности к функциональным свойствам проектной задачи дает необходимую уверенность в отыскании глобального оптимального решения. Применение упорядоченного перебора для проектирования ОКД оказалось ограниченным из-за большого числа параметров оптимизации. Количество расчетных вариантов при боль-

ших  $n$  возрастает настолько, что даже современные ПЭВМ не в состоянии справиться с ним за приемлемое время.

Но поскольку при оптимизации ОКД часть параметров (число полюсов, пазов якоря и т.д.) могут принимать лишь дискретные значения, то использование идей упорядоченного перебора в той или иной степени является целесообразным.

Использовать преимущества отдельных методов и компенсировать их недостатки возможно за счет разработки алгоритма оптимального проектирования на основе комбинации различных поисковых методов при проектном синтезе ОКД. Находят применение различные комбинации методов с целью преодоления критических овражных и граничных ситуаций, а также трудностей, связанных с пологостью гиперповерхности целевой функции в области поиска.

В настоящей работе алгоритм поиска оптимальных значений независимых параметров ОКД основывается на сочетании метода рационализованного перебора с генетическим алгоритмом оптимизации.

Для ОКД поперечная геометрия которого приведена на рис. 1. Для выбранного напряжения  $U_{1n}$ , расхода охлаждающего воздуха, заданных активных материалах список независимых параметров будет следующий:  $p$  – число пар полюсов;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре;  $z_2$  – число зубцов якоря;  $Q_{n2}$  – площадь паза якоря;  $w_{c2}$  – число витков в секции якоря;  $D_{n2}$  – наружный диаметр якоря;  $u_\delta$  – число коллекторных пластин на паз;  $h_n$  – высота полюса;  $b_n$  – ширина полюса;  $h_{c1}$  – высота спинки статора;  $b_{z2}$  – ширина зубца якоря.

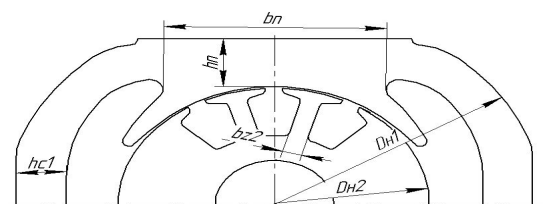
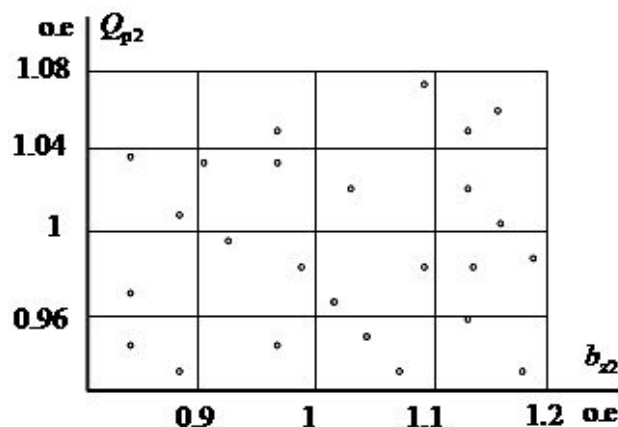


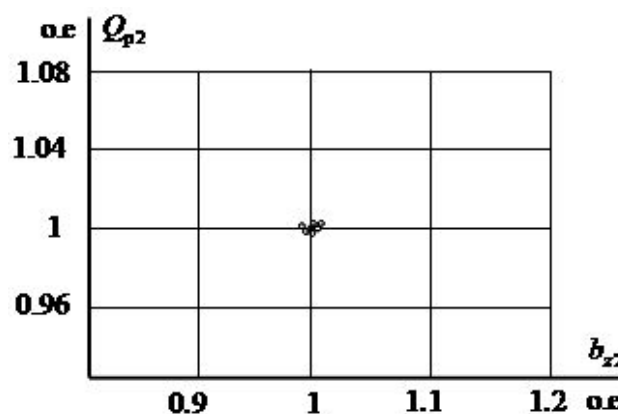
Рис. 1. Поперечная геометрия ОКД

После определения списка независимых параметров произведем их разделение на дискретно варьируемые и непрерывно варьируемые. По дискретно варьируемым переменным  $p$ ,  $z_2$ ,  $D_{H2}$ ,  $u_k$  выполняется упорядоченный перебор. Определение пределов варьирования дискретных переменных покажем на примере ОКД привода электродрели с потребляемой мощностью  $P_{лр} = 800$  Вт и частотой вращения якоря  $n = 23000$  об/мин. Анализ изготовленных ОКД с номинальной потребляемой мощностью  $P_{лр} = 800$  Вт как отечественных, так и зарубежных показал, что число пар полюсов, как правило,  $2p = 2$ , так как переход на большее число полюсов увеличивает трудоемкость изготовления и затраты на обслуживание коллекторно-щеточного узла в эксплуатации. Наружный диаметр якоря  $D_{H2}$  из технологических соображений (для снижения отходов электротехнической стали, а также унификации) имеет небольшое число значений. Так для ОКД с потребляемой мощностью  $P_{лр} = 800$  Вт, обычно принимают  $D_{H2} = 32; 35$  мм. Число пазов якоря  $z_2$ , определяется с учетом ограничений по коллекторному делению  $t_k$ . Обычно при этом варьируется  $3 \div 4$  значения числа пазов. Так, например, при  $D_{H2} = 35$  мм,  $P_{лр} = 800$  Вт,  $u_k = 2 \div 3$  будет следующий набор чисел пазов якоря  $z_2$ : 9; 10; 11; 12. Число коллекторных пластин на паз  $u_k$  принимается в зависимости от номинального напряжения. Например, при  $U_{нл} = 220$  В обычно  $u_k = 2 \div 3$ . Для дискретно варьируемых параметров устанавливается ряд сочетаний (вариантов). Для каждого варианта в отдельности с помощью генетического алгоритма осуществляется оптимизация непрерывно варьируемых параметров. Затем с помощью сравнения выбирается наилучший вариант. На рис. 2 приведены результаты оптимизации геометрии зубцовой зоны якоря ОКД привода электродрели с  $P_{лр} = 800$  Вт. и частотой вращения якоря  $n = 23000$  об/мин.

В качестве независимых параметров выступали площадь паза  $Q_{p2}$  и ширина зубца якоря  $b_{z2}$ .



а



б

Рис. 2. Значения управляемых переменных  $Q_{p2}$  и  $b_{z2}$  в начале (а) и после 100 эпох (б) процесса оптимизации ОКД

В качестве функции цели была суммарное падение магнитного потенциала в якоря и воздушном зазоре  $\Sigma F_{\delta_{za}}$ . В качестве ограничений выступали реактивная и трансформаторная ЭДС, минимальная ширина зубца якоря, максимальная индукция в зубце и спинке якоря.

На рис. 2 показаны значения управляемых переменных (УП)  $D_{H2}$  и  $b_{z2}$  в начале (а) и после 100 эпох (б) процесса оптимизации ОКД. В дальнейшем уточнение значений УП продолжается до тех пор, пока изменение функции цели не удовлетворит условию остановки процесса оптимизации ОКД.

На рис. 3 приведена блок-схема предложенного комбинированного алгоритма оптимизации ОКД.

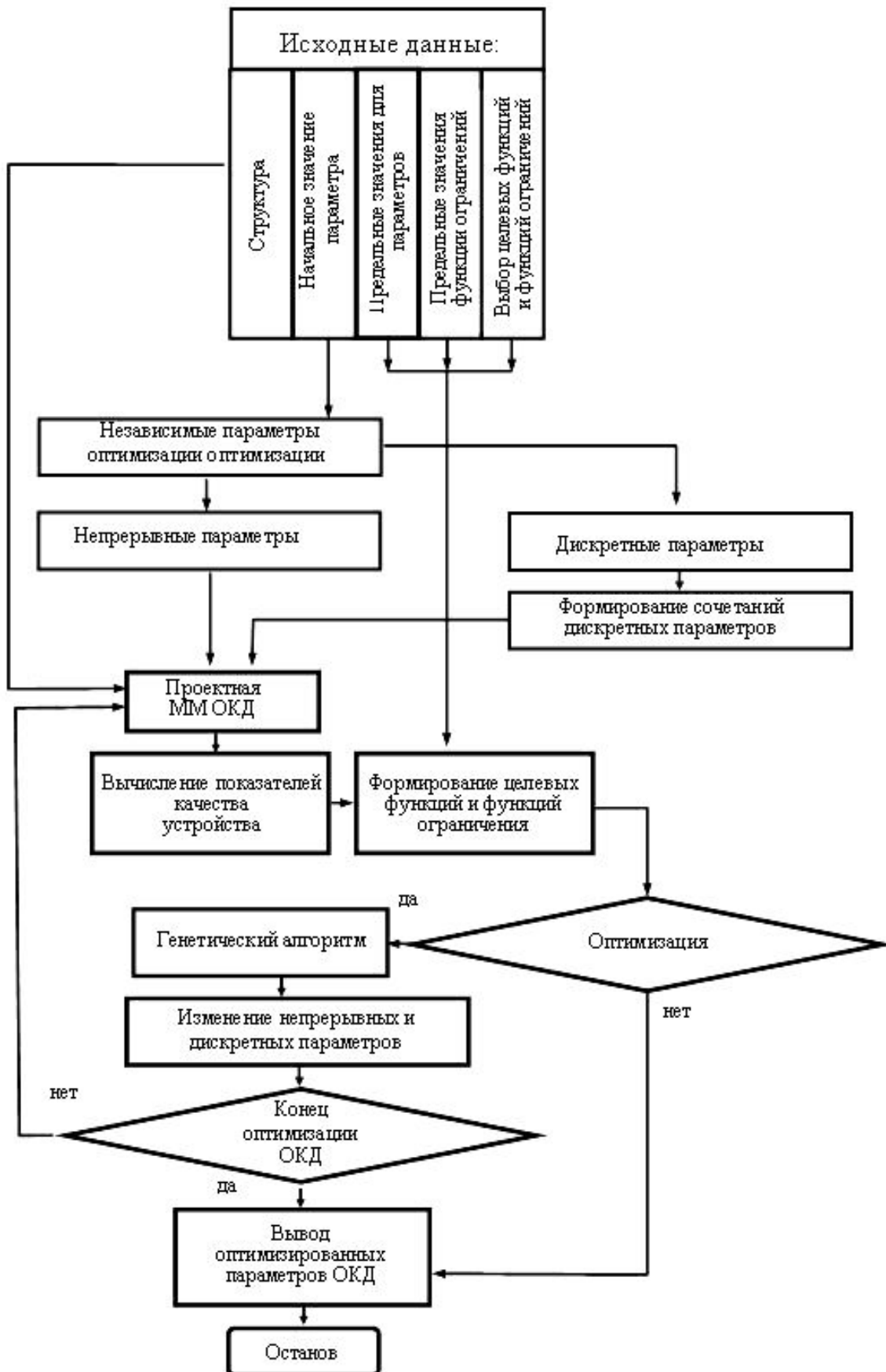


Рис. 3. Блок-схема комбинированного алгоритма оптимизации ОКД

Реализация предложенного комбинированного подхода при проектном синтезе ОКД показала, что его применение существенно сокращает затраты машинного времени при одинаковой точности поиска оптимального варианта по сравнению с методом упорядоченного перебора и применяемыми независимо эволюционными методами.

#### Выводы

1. Реализованный в работе подход, сочетающий метод упорядоченного перебора с генетическим методом оптимизации дает возможность более гибкой настройки алгоритма под конкретные задачи, а также позволяет совместить достоинства обоих методов.

2. Исследование предложенного подхода для проектного синтеза ОКД показало хорошую его приспособленность для решения оптимизационных задач и достижения необходимых уровней технических требований.

#### Список использованной литературы

1. Растрингин Л. А. – М. : Советское радио, 1980. 232 с.

2. Вермишев Ю. Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем / Ю. Х. Вермишев. – М. : Радио и связь, 1982. – 152 с.

3. Пуйло Г. В. Проектный синтез однофазных коллекторных двигателей с адаптацией обобщенного показателя качества / Г. В. Пуйло, С. Н. Пирковский // *Электротехнічні та електромеханічні системи. Вісник НУ «Львівська політехніка»*. – 2003. – № 485. – С. 12 – 16.

4. Пирковский С. Н. Определение оптимальных размеров однофазных коллекторных двигателей / С. Н. Пирковский // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2000. – Одесса : – Вып. 1. – С. 45 – 49.

5. Пуйло Г. В. Параметрический синтез однофазного коллекторного двигателя переменного тока / Г. В. Пуйло, С. Н. Пирковский // *Электротехніка та електромеханіка. НТУ «ХПІ»*. – 2002. – Харьков : – № 2. – С. 56–59.

6. Пирковский С. Н. Оценка качества однофазных коллекторных двигателей на стадии проектирования / С. Н. Пирковский // *Труды*

*Одесского политехнического университета*. – 2003. – Одесса : – Вып. 1. – С. 45 – 49.

7. Mitchell M., (1996), *An Introduction to Genetic Algorithm. MIT Press, Portsmut, USA*, 269 p.

8. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы / В. М. Курейчик // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – Харьков : – 1999, – № 1. – 175 с.

9. Батищев Д. И. Глобальная оптимизация с помощью эволюционно - генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, Л. Н. Скидкина, Н. В. Трапезникова // *Межвузовский сборник, ВГТУ*. – Воронеж : – 1994. – С. 34 – 39.

10. Bently P.J., and Wakefield J.P., (1997), *Finding Acceptable Solution in the Pareto Optimal Range using Multiobjective Genetic Algorithms, In proceeding of the 2<sup>nd</sup> On-Line World Conference on Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, pp. 74 – 79.

11. Zizler E., and Thiele L., (1999), *Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No.4, pp. 257 – 271.

12. Пуйло Г. В. Оптимальный параметрический синтез однофазных коллекторных двигателей на основе генетического алгоритма / Г. В. Пуйло, С. Н. Пирковский, З. П. Процына // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техніка. – 2004. – Вып. 62. – С. 129 – 132.

13. Пирковский С. Н. Проектный синтез однофазных коллекторных двигателей на основе векторного показателя качества / С. Н. Пирковский, О. Б. Бабийчук, З. П. Процына // *Електромашинобудування та електрообладнання* – К. : Техніка. – 2005. – Вып. 64. – С. 67 – 71.

Получено 12.01.2015

#### References

1. Rastrigin L.A. *Sovremennye printsipy upravleniya slozhnymi ob'ektami [Modern Principles of Management by Difficult Objects]*,

(1980), Moscow, Russian Federation, *Sovetskoe Radio*, 232 p. (In Russian).

2. Vermishev Ju.H. *Metody avtomaticheskogo poiska reshenij pri proektirovanii slozhnyh tehniceskikh system* [Methods for Automatic Search of Decisions at Planning of the Difficult Technical Systems], (1982), Moscow, Russian Federation, *Radio i Svyaz'*, 152 p. (In Russian).

3. Pujlo G.V., and Pirkovskij S.N. *Proektnyj sintez odnofaznyh kollektornyh dvigatelej s adaptaciej obobshhennogo pokazatelja kachestva* [Project Synthesis of Single-Phase Commutation Motor with Adaptation of the Generalized index of Quality], (2003), *Elektroenergetichni ta Elektromehanični Sistemi. Visnik NU "L'vivs'ka politehnika"*, Lviv, Ukraine, No. 485, pp. 12 – 16 (In Russian).

4. Pirkovskij S.N. *Opređenje optimal'nyh razmerov odnofaznyh kollektornyh dvigatelej* [Determination of Optimal Size of Single-Phase Commutation Motors], (2000), Odessa Ukraine, *Trudy Odesskogo Politehnicheskogo Universiteta*, Vyp. 1, pp.45 – 49 (In Russian).

5. Pujlo G.V., and Pirkovskij S.N. *Parametricheskij sintez odnofaznogo kollektornogo dvigatelja peremennogo toka* [Parametric Synthesis of Single-Phase Commutation Motor], (2002), Kharkov, Ukraine, NTU "HPI", *Elektrotehnika ta Elektromehanička*, No. 2, pp. 56 – 59 (In Russian).

6. Pirkovskij S.N. *Ocenka kachestva odnofaznyh kollektornyh dvigatelej na stadii proektirovanija* [Assessment of the Quality of Single-Phase Commutation Motors at the Design Stage.] (2003), Odessa, Ukraine, *Trudy Odesskogo Politehnicheskogo Universiteta*, Vyp. 1, pp. 45 – 49 (In Russian).

7. Mitchell M., (1996), *An Introduction to Genetic Algorithm*. *MIT Press*, pp. 45 – 49.

8. Kurejchik V.M. *Geneticheskie algoritmy. Sostojanie. Problemy. Perspektivy* [Genetic Algorithms. State. Problem. Prospects], (1999), *Izvestija RAN. Teorija i Sistemy Upravljenja*, No. 1, 175 p.

9. Batishhev D.I., Skidkina L.N., and Trapeznikova N.V. *Global'naja optimizacija s pomoshh'ju jevoljucionno - geneticheskikh algoritmov* [Global Optimization Using Evolutionary – Genetic Algorithms], (1994), Voronezh

Russia, *Mezhvuzovskij Sbornik, VGTU*, pp. 34 – 39 (In Russian).

10. Bently P.J., and Wakefield J.P., (1997), *Finding Acceptable Solution in the Pareto Optimal Range using Multiobjective Genetic Algorithms*. In *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> On-Line World Conference on Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, pp. 74 – 79.

11. Zizler E., and Thiele L., (1999), *Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 4, pp. 257 – 271.

12. Pujlo G.V., Pirkovskij S.N, and Procyna Z.P. *Optimal'nyj parametricheskij sintez odnofaznyh kollektornyh dvigatelej na osnove geneticheskogo algoritma* [Optimal Parametric Synthesis of Single-Phase Commutation Motors Based on Genetic Algorithm], 2004, Kiev, Ukraine, *Elektromashinobuduvannja ta Elektroobladnannja*, Vyp. 62, pp. 129 – 132 (In Russian).

13. Pirkovskij S.N., Babijchuk O.B., and Procyna Z.P. *Proektnyj sintez odnofaznyh kollektornyh dvigatelej na osnove vektornogo pokazatelja kachestva* [Project Synthesis of Single-Phase Commutation Motors on the Basis of Vectorial index of Quality], 2005, Kiev, Ukraine, *Elektromashinobuduvannja ta Elektroobladnannja*, Vyp. 64, pp. 67 – 71 (In Russian).



Пирковский  
Сергей Николаевич,  
ст. преподаватель каф.  
электрических машин  
Одесского нац. политехн.  
ун-та  
E-mail: psn@ukr.net