

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский  
государственных политехнический университет Петра Великого»**

**ГУЛАЙ СТАНИСЛАВ ЛЕОНИДОВИЧ**

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ  
КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ  
АЛГОРИТМОВ НЕДОМИНИРУЕМОЙ СОРТИРОВКИ**

Направление подготовки: 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность: 13.06.01\_01 Электромеханика и электрические аппараты

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Научный руководитель: Коровкин Николай Владимирович, профессор высшей школы высоковольтной энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. 1, +7 (812) 552-75-72, korovkin\_nv@spbstu.ru), доктор технических наук.

Официальные оппоненты:

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Одна из центральных проблем, решаемая при проектировании электрических машин связана с многократным расчётом зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, множителей, коэффициентов и графических зависимостей с целью поиска оптимальных характеристик путем решения этой системы уравнений.

Как известно, учёт комплементарного взаимодействия параметров на целевые функции при проектировании электрических машин — сложная многовариантная задача, требующая многокритериальной оптимизации. Выбор оптимальных параметров затруднён сложностью методики расчёта электрической машины по формулам проектирования, и необходимостью учитывать стоимость, надежность и технологичность конструкции электрической машины. Это является причиной того, что оптимальные варианты выбираются с использованием электронно-вычислительных машин, а также навыков, интуиции проектировщика и опыта эксплуатации.

**ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИИ:** создание методики проектирования конкурентоспособных на энергомашиностроительном рынке гидрогенераторов, основанной на многокритериальной оптимизации, выполнение апробации данной методики для улучшения референсного проекта гидрогенератора, а также анализ и обобщение полученных результатов. Для достижения поставленной цели требовались:

1. выбор и обоснование набора критериев оптимальности конструкции гидрогенераторов;
2. разработка, обоснование и программная реализация вычислительно эффективной параметризованной модели;
3. разработка и апробация методики, сопоставление результатов её использования с имеющимися конструкциями;

4. разработка методики построения множества Парето в пространстве критериев оптимальности для референсного проекта гидрогенератора;
5. получение для референсного гидрогенератора зависимостей параметров для отдельных кластерных структурных групп.

**ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:**

1. выбрать ряд критериев оптимальности конструкции гидрогенераторов;
2. разработать программную реализацию параметризованной модели;
3. разработать методику многокритериальной оптимизации;
4. разработать методику построения множества Парето в пространстве критериев оптимальности;
5. определить зависимости параметров для отдельных кластерных структурных групп на основе корреляционного анализа;
6. оценить перспективность методики и определить целесообразное место её использования в процессе проектирования гидрогенераторов.

**ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ:** конструкция генератора для гидроэлектростанций, конечно-элементная модель генератора, методы многокритериальной оптимизации и генетический алгоритм.

**ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ:** многокритериальная оптимизация модели конструкции гидрогенератора, формирование кластерных структур, корреляционный и регрессионный анализ на основе полученных данных.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА:**

1. разработана параметризованная двумерная конечно-элементная модель гидрогенератора, позволяющая определить выбранные критерии оптимальности;
2. разработана методика расчета потерь в активной стали сердечника статора и полюсах ротора от гистерезиса и вихревых токов, отличающаяся от традиционно используемой: дискретизацией

расчётной области, учётом насыщения отдельных участков магнитной цепи генератора и разделением потерь на вихревые токи, классические и добавочные;

3. разработана методика расчёта коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения и индуктивных сопротивлений;
4. разработан набор критериев оптимальности для построения множества Парето, отражающий экономические показатели и основные технические параметры;
5. разработан комплекс программных сценарных файлов, реализующих предлагаемые метод МКО и расчет МКЭ с характерными параметрами (50'000÷150'000 конечных элементов, дискретизация по времени — 200 шагов на один период и время расчета одной задачи — 20÷40 минут);
6. получены зависимости параметров для отдельных кластерных структурных групп на основе корреляционного анализа, которые могут быть применены для уменьшения вычислительной сложности, сокращения процессорного времени, создания моделей регрессий и исследования других методов многокритериальной оптимизации.

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:** предложен новый подход к оптимизации конструкций вращающихся электрических машин, выполнена его апробация для гидрогенераторов и подтверждена возможность эффективной алгоритмической реализации нового подхода на современных вычислителях.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:** создан, обоснован и апробирован набор критериев оптимальности. Создан комплекс программных сценарных файлов для реализации МКО, интеграции с расчётным модулем МКЭ, формирования множества Парето, его кластеризация, корреляционный и регрессионный анализ. В отличие от

существующих способов впервые реализована оптимизация параметров гидрогенератора на основе метода, учитывающего комплементарные взаимодействия целевых функций. Реализация методики выполнена на современном вычислителе. Получены конструкции генераторов превосходящие параметры референсной машины. Для модели А: масса сердечника статора уменьшена на 3%, ток ротора  $i_{f0}$  — 2%, потери в стали сокращены на 1%; модели В: масса сердечника статора — 1,5%, ток ротора — 1,5%, потери в стали — 1%,  $x_d$  — 3%; модели С: ток ротора уменьшен на 2%, потери в стали — 7% и  $THD$  — 36%.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:**

1. предложен, обоснован и апробирован набор критериев оптимальности для конструкции гидрогенераторов, отражающий экономические показатели и основные технические параметры;
2. разработана параметризованная двухмерная конечно-элементная модель гидрогенератора, позволяющая определить целевые функции. Вектор конструктивных параметров модели включает 13 геометрических размеров (общее число варьируемых параметров для разных моделей составляет 29);
3. для оптимизационного алгоритма разработана методика расчета потерь в активной стали сердечника статора и полюсах ротора от гистерезиса и вихревых токов. В рамках ПО МКЭ выбрана модель разделения потерь, определяемая по уравнению Бертоцци;
4. для достоверного сопоставления разработана методика расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения и индуктивных сопротивлений;
5. адаптирован к задачам оптимизации электрических машин алгоритм многокритериальной оптимизации;

6. разработан комплекс программных сценарных файлов, реализующих предлагаемые метод МКО и расчет МКЭ, позволивший автоматизировать процесс расчета магнитных полей и целевых функций;
7. на основе корреляционного анализа отдельных кластерных структурных групп получены зависимости параметров гидрогенераторов, которые могут служить основой для уменьшения общего времени расчёта, создания моделей регрессий или исследования других методов многокритериальной оптимизации.

**СООТВЕТСТВИЕ ПАСПОРТУ СПЕЦИАЛЬНОСТИ:** диссертация соответствует специальности 05.09.01 — электромеханика и электрические аппараты. Полученные в работе научные результаты соответствуют п. 1 «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических, электромеханических преобразователей энергии и электрических аппаратов», п. 2 «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов», п. 5. «Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов» паспорта специальности.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ:** по теме диссертации выполнен доклад на международной конференции (г. Санкт-Петербург), материал в виде статьи на английском языке опубликован в журнале IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

**ПУБЛИКАЦИИ:** по теме диссертации опубликовано 3 печатных работы.

**Личный вклад автора:** основные положения работы, выносимые на защиту, получены автором лично.

**Организации, предприятия, заинтересованные в результатах работы:**  
АО «Силовые машины».

**Вычислительная сложность:** количество расчетных случаев для одной модели 40'000 при  $\sim 50'000 \div 150'000$  конечных элементов с дискретизацией по времени — 200 шагов. Время одиночного расчета составляет 20÷40 минут.

**Программная реализация:** комплексная платформа ANSYS Electronics Desktop с расчетным модулем Maxwell и The MathWorks Matlab.

**Объем и структура диссертации:** диссертация общим объемом 125 страниц состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии (99 наименований: отечественных — 27, иностранных — 72), списка сокращений и условных обозначений. В работе приведено 65 рисунков и 11 таблиц.

## II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, представлена научная значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** проведен лапидарный анализ известных моделей, методов и алгоритмов многокритериальной оптимизации. Метаэвристические методы, в число которых входят и эволюционные рассматриваются, как главный инструмент для определения глобального экстремума. Строго говоря, эти методы не гарантируют нахождения глобального оптимума, тем не менее, существует высокая вероятность того, что будет определено или оно, либо достаточно близкое к нему решение.

Одним из передовых эволюционных методов является модифицированный генетический алгоритм недоминируемой сортировки (в иностранной литературе используется термин NSGA-II). Данный алгоритм является одним из часто используемых за счёт того, что позволяет оптимизировать сложные функции и обладает высоким быстродействием. Анализ литературы свидетельствует, что генетический алгоритм эффективно справляется с оптимизацией конструкций электрических машин и распределенных энергосистем.

Также отмечен его существенный изъян, как и большинство эволюционных алгоритмов, основанных на Парето-доминировании, связанный со сложностью решений задач МКО с числом критериев больше трех: не репрезентативность аппроксимации множества Парето и снижение давления отбора. Несмотря на вышеописанный недостаток набор критериев оптимальности, выбранный при решении задач МКО электрических машин, не превышает четырех и не вносит существенный вклад при аппроксимации

множества Парето. В качестве основного алгоритма оптимизации при решении нашей задачи МКО выбран NSGA-II.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** предложен, обоснован и апробирован ряд целевых функций, выбранных по критериям минимальных затрат на изготовление и максимального коэффициента полезного действия:

- потери в стали статора, ротора и демпферных стержнях в режиме холостого хода при номинальном напряжении статора (далее «потери в стали»);
- коэффициент искажения синусоидальности кривой линейного напряжения статора;
- ток обмотки ротора;
- масса сердечника статора;
- синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $x_d$  и отношение короткого замыкания.

Выбраны типы задач для определения целевых функций. В случае первых трех целесообразно использовать нестационарное магнитное поле, для последних — стационарное.

Разработана параметризованная двумерная конечно-элементная модель гидрогенератора. В данной работе вектор конструктивных параметров включает 13 геометрических размеров: внешний и внутренний диаметры сердечника статора ( $D_g$  и  $D_y$ ); длину активной стали статора  $l_1$ ; высоту и ширину паза статора ( $H_{012}$  и  $B_{s2}$ ); величину воздушного зазора между ротором и статором  $\delta$ ; ширину, высоту и радиус кривизны полюсного наконечника полюса ротора ( $h_{ps}$  и  $R_p$ ); ширину сердечника полюса ротора  $b_p$ ; диаметр, радиус расположения и ширина прорези демпферных стержней ( $d_d$ ,  $r_{ld}$  и  $b_{s0}$ ). Их исходные значения, а также геометрические параметры, однозначно определяющие двумерную модель гидрогенератора (общее

число возможных варьируемых параметров составляет 29), находятся по классической методике. На рисунке 1 представлена параметризованная модель гидрогенератора, на которой отмечены основные изменяемые размеры.

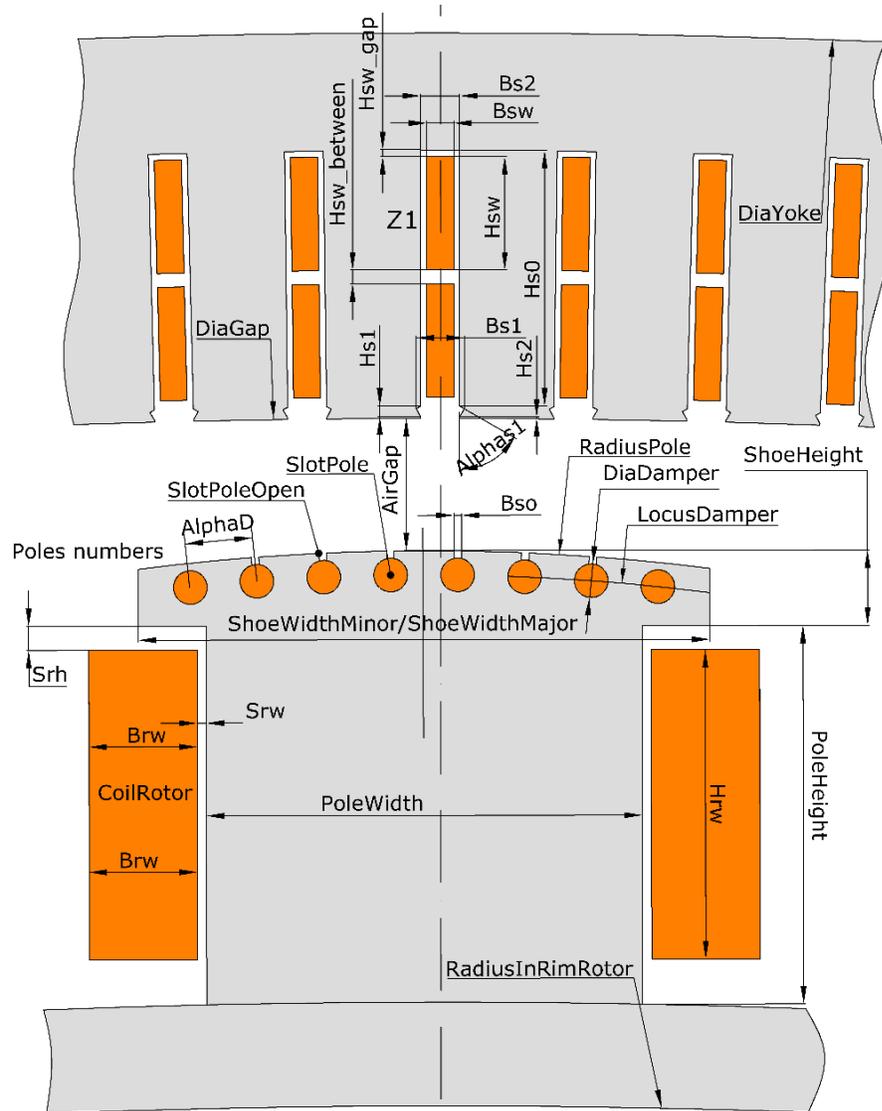


Рисунок 1 — Параметризованная двумерная модель гидрогенератора

Для упрощения построения, постановки и расчёта использованы ряд не критических допущений:

- свойства корпусной электрической изоляции обмоток статора и ротора считаются эквивалентны воздуху;

- свойства стеклотекстолитового клина статора считаются эквивалентны воздуху;
- не учитывается электрическая изоляция элементарных проводников обмоток статора и витков обмотки ротора: элементарные проводники каждого стержня обмотки статора и витки обмотки ротора заданы единым массивом.

В рамках ПО МКЭ выбрана модель разделения потерь в стали сердечника статора и полюсов ротора от гистерезиса и вихревых токов, определяемые по уравнению Бертоцци:

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

$P_h = k_h B_m^2 f$  – 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,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{Тл}^{-1.5} \cdot \text{с}^{1.5}$ .

Для сравнения также представлена модель, учитывающая пространственно-временные характеристики магнитного поля. Известно, что пульсирующий магнитный поток существует только в зубе статора, в то время как остальная часть статора имеет круговой или эллиптический. Коэффициент пропорциональности  $R = B_{\min} / B_{\max}$  используется для различения пульсирующего и вращающегося магнитных полей. Очевидно, в пазах статора преобладает пульсирующее поле  $R \approx 0$ , а в остальной части статора — вращающееся от почти кругового до эллиптического  $R \leq 1$ . Для наглядности сказанного, на рисунке 2 представлены распределение  $R$  и изменение  $B_y = f(B_x)$  за период  $T = 1/f = 0,02 \text{ с}$ .

Феноменологичность модели потерь в стали, учитывающая вращающееся магнитное поле выше модели по Бертотти. Однако сравнительный анализ применения двух моделей потерь в стали для тринадцати гидрогенераторов в диапазоне номинальных мощностей от 9 до 640 МВт и обзор литературы свидетельствует, что допустимо применение модели на основе уравнения Бертотти, отличающаяся высоким быстродействием и достаточной точностью: усредненная сумма квадратичных отклонений модели по Бертотти составляет 16%, по  $R$  — 14%, по классической методике — 38%.

Валидация моделей численного расчета выполнена для тринадцати гидрогенераторов. Основные результаты расчётов представлены в таблице 1.

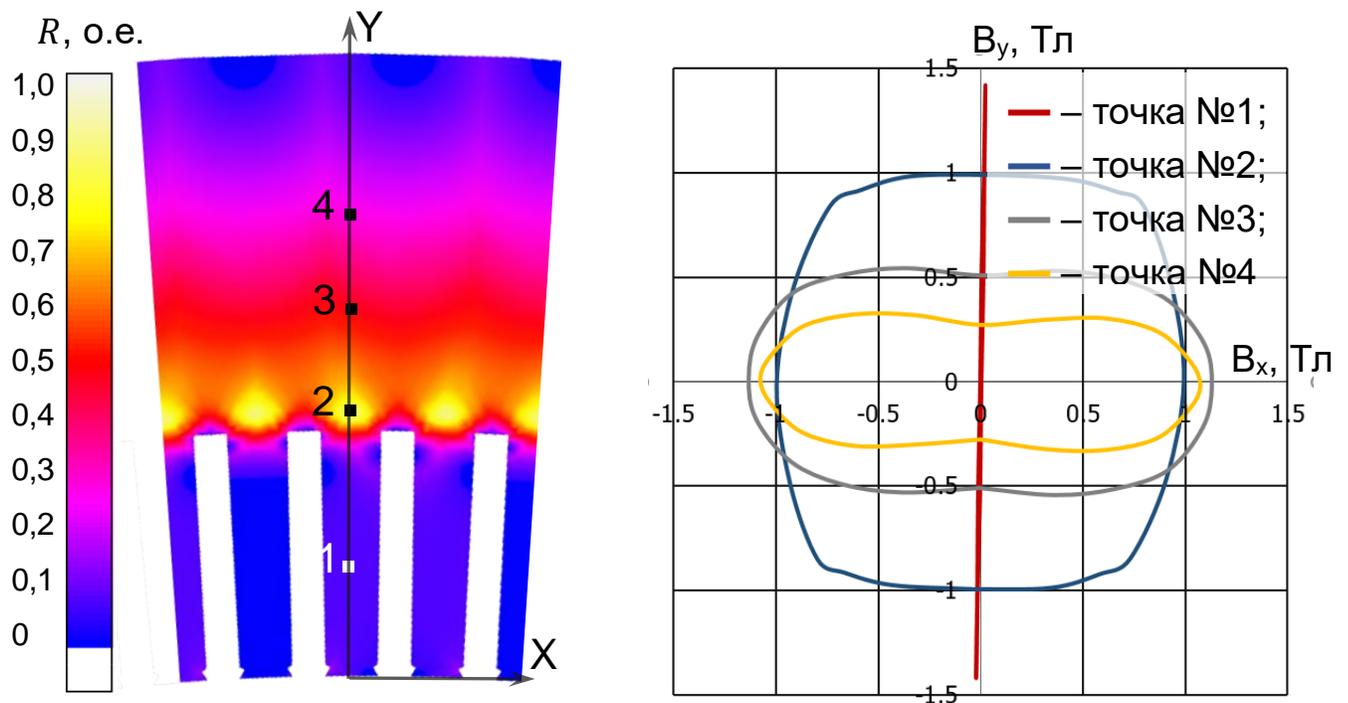


Рисунок 2 — Распределение коэффициента пропорциональности  $R$  (слева) и изменение  $B_y = f(B_x)$  в четырех точках за  $T = 0,02$  с в режиме холостого хода при номинальном напряжении Баксанской ГЭС

Таблица 1 — Основные данные по гидрогенераторам

Станция		Сао Жоао	Саяно-Шушенская	Баксанская	Ла Йеска	Саратовская	Джердап	Рыбинская	Нижнекамская	Волжская	Пунта-Негра	Нуоя	Плявинская	Кыгы	
		Станция	Сао Жоао	Саяно-Шушенская	Баксанская	Ла Йеска	Саратовская	Джердап	Рыбинская	Нижнекамская	Волжская	Пунта-Негра	Нуоя	Плявинская	Кыгы
Параметры	Активная мощность, МВт	39,69	640	9	375	54	190	65	78	125,5	31,45	34,2	96,6	45,9	
	Частота вращения, об/мин	138,46	142,86	500	150	75	71,43	62,5	57,69	68,18	300	136,36	88,24	375	
	Частота, Гц	60	50	50	60	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
	Напряжение статора, кВ	13,8	15,75	6,3	17	10,5	15,75	13,8	13,8	13,8	13,8	10,5	13,8	13,8	
	Тип сборки статора	С	К	К	С	С	К	К	К	К	К	С	К	С	
	Потери в стали														
	$P_{\text{опыт}}$	180	1103	38	1527	225	565	217	282	567	124	127	366	178	
	$P_{\text{расчет аналит.}}$	199	1278	67	1215	222	673	379	446	680	150	160	430	212	
	$P_{\text{расчет МКЭ по Бертогги}}$	161	1135	41	1252	202	554	265	342	508	103	144	273	130	
	$P_{\text{расчет МКЭ по R}}$	148	1133	40	1303	202	540	271	337	514	115	146	306	145	
	$\Delta P_{\text{расчет аналит.}}$	11	16	78	-20	-1	19	74	58	20	21	26	-18	-19	
	$\Delta P_{\text{расчет МКЭ по Бертогги}}$	-10	3	9	-17	-9	-2	22	21	-10	-17	14	-25	-26	
	$\Delta P_{\text{расчет МКЭ по R}}$	-18	3	7	-15	-9	-4	25	20	-9	-8	15	-16	-18	
Электромагнитные параметры															
опыт	$THD$	%	-	0,850	0,970	0,350	0,860	-	-	1,300	0,400	0,450	0,640	-	0,450
	$x_d$	о.е.	1,040	1,803	1,000	0,920	1,180	1,380	0,760	0,760	0,650	1,080	0,855	1,076	1,095
	$i_{f0}$	A	560	1520	350	972	600	897	740	770	1305	530	750	687	412
МКЭ	$THD$	%	0,312	0,544	0,721	0,261	0,593	0,800	0,392	0,987	0,178	0,393	0,550	0,395	0,344
	$x_d$	о.е.	1,029	1,590	1,020	0,805	1,150	1,236	0,713	0,757	0,602	1,057	0,928	0,992	1,063
	$\Delta x_d$	%	-1	-12	2	-13	-3	-10	-6	-1	-7	-2	9	-16	-3
	$i_{f0}$	A	535	1544	334	1119	565	960	770	788	1235	520	635	760	425
	$\Delta i_{f0}$	%	-4	2	-5	15	-6	7	4	2	-5	-2	-15	11	3
аналитический расчет	$x_d$	о.е.	1,070	1,600	1,000	0,800	1,150	1,230	0,780	0,740	0,590	1,100	0,867	1,070	1,050
	$\Delta x_d$	%	3	-11	0	-13	-3	-11	3	-3	-9	2	1	-1	-4
	$i_{f0}$	A	620	1490	385	1000	670	965	825	774	1120	560	730	830	435
	$\Delta i_{f0}$	%	11	-2	10	3	12	8	11	1	-14	6	-3	21	6

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ выполнен расчет трёх задач для сорока поколений с количеством одна тысяча особей в популяции, где Саяно-Шушенская ГЭС — это модель А, Баксанская ГЭС — модель В и ГЭС Ла-Йеска — модель С. Отмечено, что критерии переходят к установившимся значениям в последних поколениях расчёта.

Для ускорения решения применен параллельный процесс расчета с использованием одного ядра процессора для каждой задачи. Время вычислений при использовании 24-ядерного процессора составило около двух недель. Однако нерешенной задачей осталась выполнение параллельного расчета на кластерных вычислительных машинах. Основной сложностью является отсутствие четкого инструментария для формирования параллельных потоков MATLAB и ANSYS Electronics Desktop.

Представлены популяции первого, второго и последнего поколений. Очевидно, что произвольный выбор геометрических параметров характерный для первых поколений не приводит к желаемому результату: на рисунке 3 представлены популяции первого и последнего поколений модели В. В качестве базисных величин приняты результаты численного расчета референсного гидрогенератора, спроектированного по классической методике и эксплуатируемого на объекте Заказчика. Точка, соответствующая базисному генератору выделена на рисунках белым цветом, с проекциями на плоскости. Проекция на аппроксимирующую поверхность Парето-множества ограничивает область с конструкциями гидрогенераторов, превосходящих референсный по выбранным критериям.

Выбор единственного решения из множества Парето осуществляется лицом, принимающим решение (далее ЛПР), и основывается на субъективной оценке критериев качества и взаимосвязи между собой. В общем случае, располагая лишь множеством возможных решений и набором целевых функций многокритериальной задачи, выбрать единственное и обоснованное

Парето-оптимальное решение не может ни один специалист в области по принятию решений, так как необходимо привлечение дополнительной информации о предпочтениях ЛПР. В данной работе этот вопрос не рассматривается.

В тоже время, получены конструкции генераторов превосходящие параметры референсных машин. Для модели А: масса сердечника статора уменьшена на 3%, ток ротора — 2%, потери в стали — 1%; модели В: масса сердечника статора уменьшена на 1,5%, ток ротора — 1,5%, потери в стали — 1%,  $x_d$  — 3%; модели С: ток ротора — 2%, потери в стали — 7% и  $THD$  — 36%.

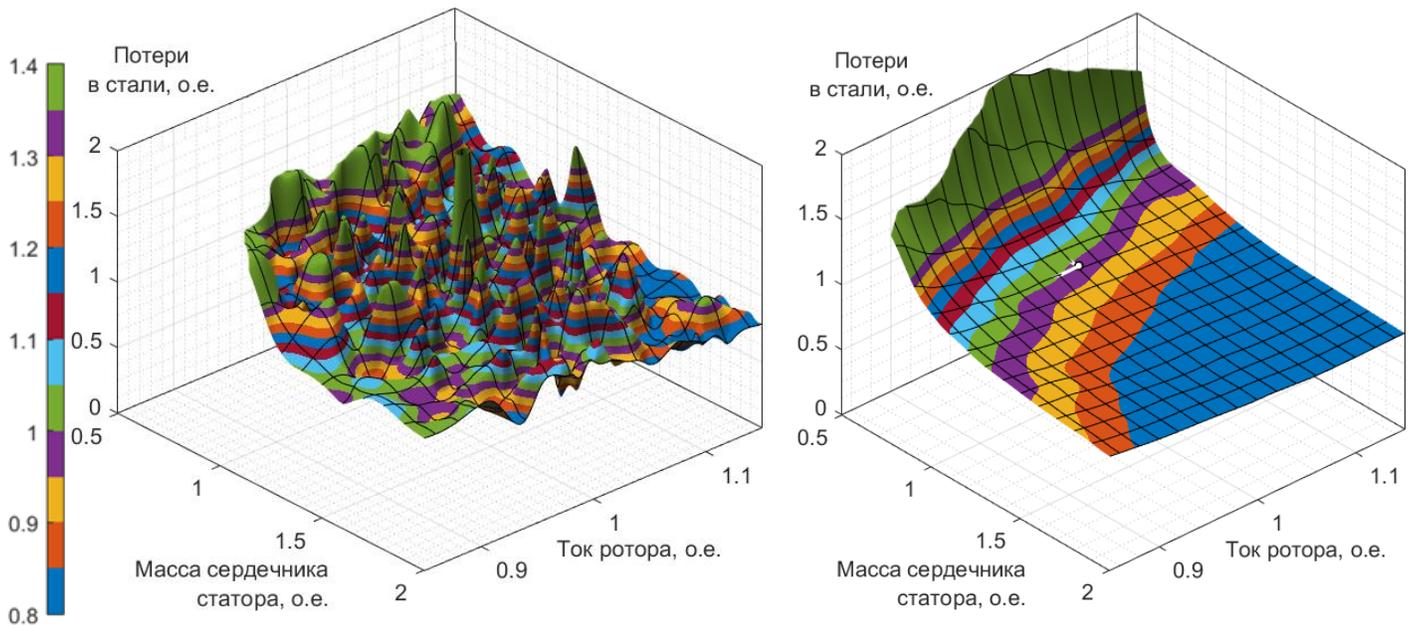


Рисунок 3 — Множество Парето первого (слева) и последнего (справа) поколений модели В

Выполнена кластеризация последних десяти поколений методом  $k$ -средних с выбором количества кластеров по дисперсионному критерию Калински-Харабаша. Если с помощью оптимизации получено множество Парето, то кластеризацией — отдельные группы, и выделение области, представляющий наибольший интерес. Также выполнено обнаружение

и удаление выбросов методом медианного абсолютного отклонения с заданием полосы пропускания [1, 99].

Рассмотрена формализация термина «золотой середины» (на всех моделях соответствует кластеру № 1, рисунок 4) применительно к референсному генератору. Для данного кластера свойственны промежуточные геометрические размеры смежных групп. Целесообразно, на этапе расчёта первых поколений и основании интересующей области сформировать граничные условия геометрических параметров, существенно уменьшающих объем необходимых вычислений: данное решение отчетливо иллюстрируется при сравнении Парето-множества моделей А и В.

Обнаружение мультиколлинеарности по коэффициентам инфляции дисперсии, стандартизированным коэффициентам регрессии, методу Бэлсли, деревьям регрессии и случайному лесу совместно с корреляционным анализом позволяет определить набор основных предикторов регрессионных моделей.

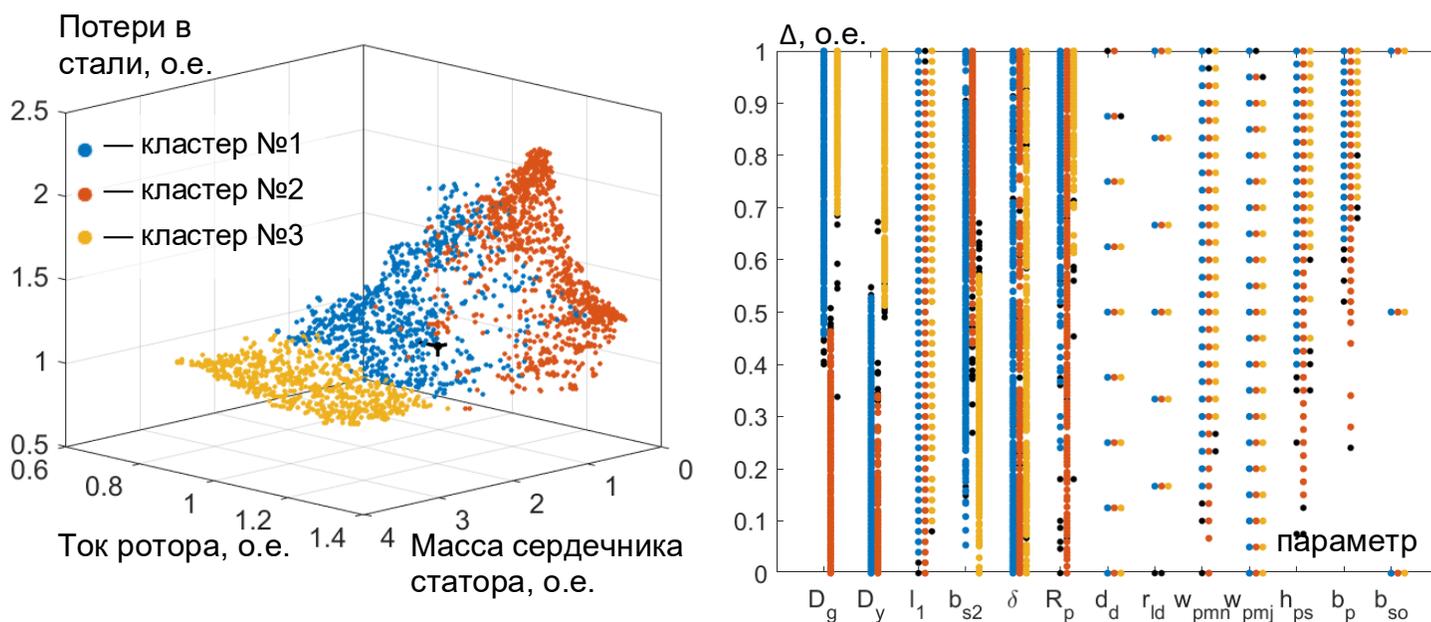


Рисунок 4 — Кластеризация десяти последних поколений целевых функций модели В методом k-средних (слева) и распределение параметров по кластерам (справа). Точки черного цвета — удаленные выбросы.

Перед регрессионным анализом выполнена селекция оптимального набора на примере модели В, кластера № 1. Обнаружена взаимная определённость параметров («детерминизм») и отсутствие существенного вклада части предикторов, что может свидетельствовать как о переобучении моделей, но скорее всего о строгой зависимости предикторов и факторов на множестве Парето-оптимальных решений.

Сравнительный анализ выполнен для трёх моделей регрессий: линейной, квадратичной и случайный лес. Отбор информативных предикторов, учёт возможных взаимодействия между ними, отсутствие необходимости в явном виде задавать форму связи между зависимой переменной и факторными признаками, а также высокий коэффициент детерминации показывают эффективность и простоту в использовании регрессионной модели случайный лес. На рисунке представлена относительная важность предикторов регрессии методом случайного леса. Анализ таблицы 2 свидетельствует, что регрессия методом случайного леса оказывается наиболее устойчивым к уменьшению независимых переменных. Для проверки адекватности модели использован среднеквадратическое отклонение и коэффициент детерминации.

Таблица 2 — Среднеквадратическое отклонение и коэффициент детерминации различных регрессий

Набор предикторов	МЛР		МПР		Случайный лес	
	$\sigma$	$R^2$	$\sigma$	$R^2$	$\sigma$	$R^2$
Масса статора						
$D_g, D_y, b_{s2}$	0,146	0,979	0,060	0,996	0,018	0,999
$D_g, D_y, l_1, b_{s2}$	0,137	0,981	0,040	0,998	0,003	1,000
$D_g, D_y, l_1, b_{s2}, \delta$	0,131	0,983	0,039	0,999	0,003	1,000
все	0,126	0,984	0,030	0,999	0,001	1,000

## Продолжение таблицы 2

Потери в стали						
$D_y, b_{s2}, \delta$	0,235	0,945	0,067	0,996	0,014	0,999
$D_g, D_y, l_1, b_{s2}, \delta$	0,233	0,946	0,063	0,996	0,009	0,999
все	0,215	0,955	0,035	0,999	0,006	1,000
Ток ротора						
$D_g, b_{s2}, \delta$	0,273	0,926	0,192	0,941	0,060	0,996
$D_g, D_y, l_1, b_{s2}, \delta$	0,239	0,943	0,128	0,984	0,010	0,999
все	0,229	0,949	0,093	0,991	0,007	1,000

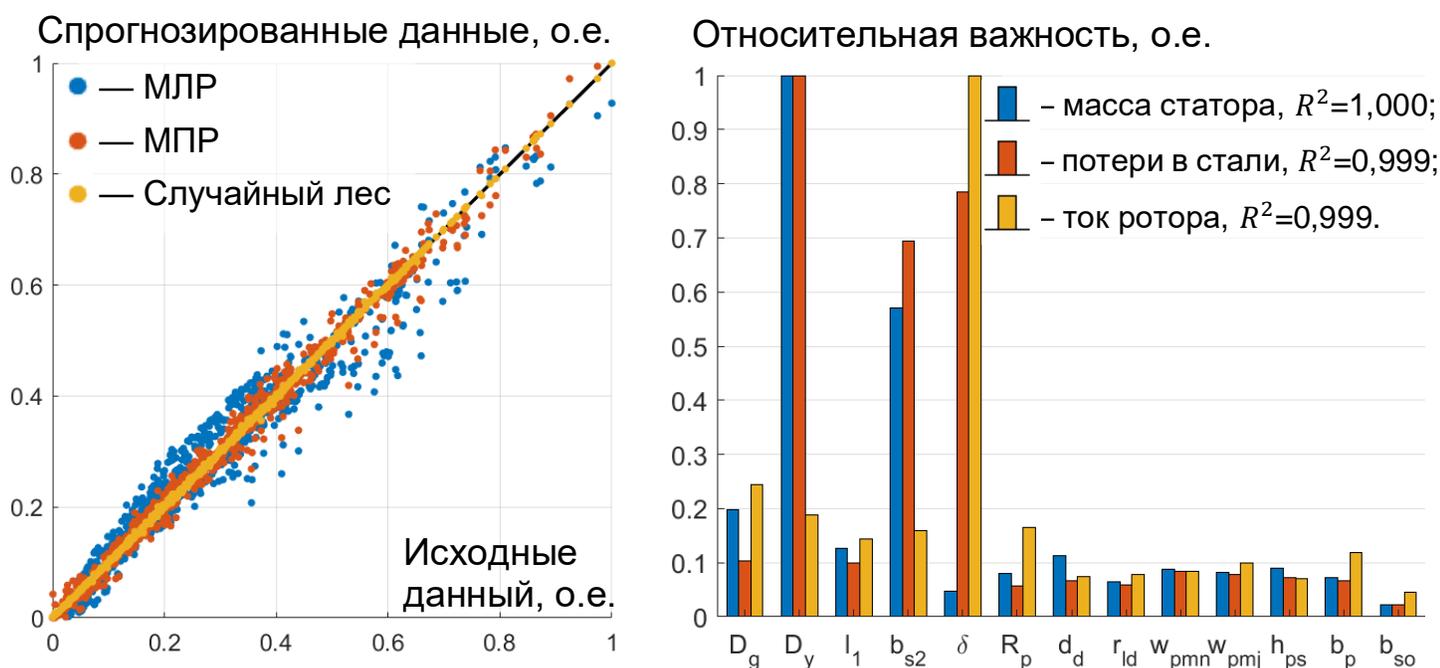


Рисунок 5 — Распределение исходных данных и данных, определенных по трем регрессионным моделям для тока ротора (черная линия — идеальная модель) — слева. Относительная важность предикторов случайного леса для модели В, кластера №1

Для проверки адекватности регрессионной модели сформирована популяция, состоящая из генераторов, превосходящих базисный с координатами  $\{1; 1; 1\}$  по всем критериям в количестве 120. Стоит отметить, что число генераторов после NSGA-II, удовлетворяющих данному условию всего равно трём, рисунок 6.1. На рисунке 6.2 представлена популяция из 120 генераторов, где каждый после оптимизации регрессивной модели находится

ниже референсного; на рисунке 6.3 — результат проверки предыдущей популяции со средней ошибкой 1%. Получены конструкции генераторов превосходящие параметры референсной машины. Масса сердечника статора меньше на 2,8% (1,5% — значение по первоначальному NSGA-II), ток ротора — 1,8% (1,5%), потери в стали — 3,5% (1%),  $x_d$  — 3,5% (3%).

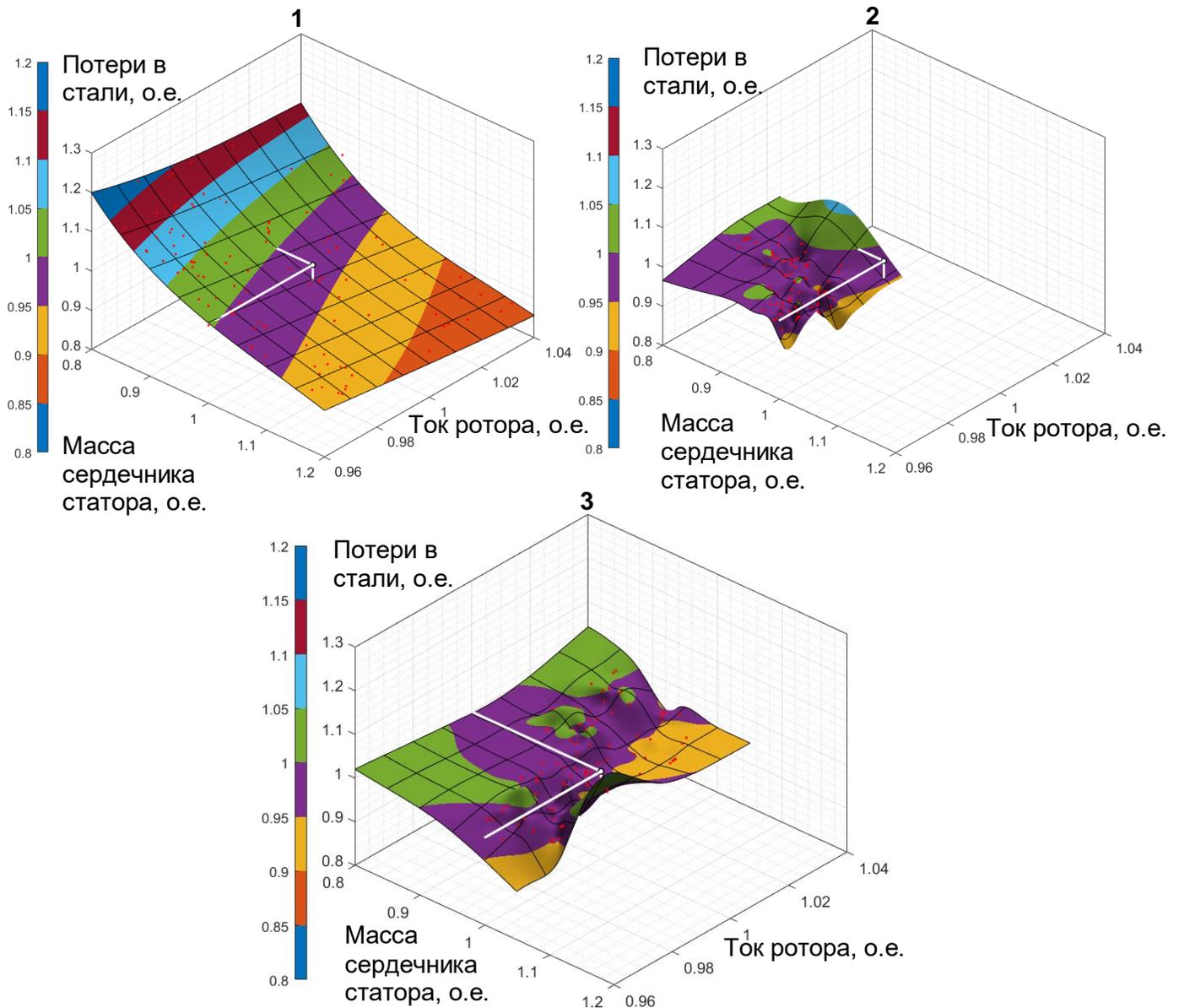


Рисунок 6 — 1 — множество Парето последних десяти поколений модели В; 2 — множество Парето регрессионной модели с генераторами, превосходящими базисный по всем критериям; 3 — проверочное множество Парето на рисунке 6.2.

Определены основные этапы подготовки данных и выбора регрессионной модели:

- кластерный анализ множества Парето-оптимальных решений и выбор подходящего кластера;
- удаление выбросов по медианным абсолютным отклонениям;
- корреляционный анализ и исследование диаграмм рассеяния на нормальность;
- обнаружение мультиколлинеарности по коэффициентам инфляции дисперсии, стандартизированным коэффициентам регрессии, методу Бэлсли, деревьям регрессии и случайному лесу;
- селекция оптимального набора предикторов и выбор подходящей регрессионной модели;
- оценка качества моделей по среднеквадратичным отклонениям и коэффициентам детерминации;
- прогнозирование неизвестных значений зависимых переменных.

Описанные этапы метода решения многофакторной конструкторской задачи позволяют сформировать не просто несколько вариантов решения поставленной проблемы, а определить многомерное множество Парето-оптимальных решений. Регрессионный анализ и определение функций регрессий кластерных групп на основе случайного леса позволяет получить корректные и компактные модели зависимых переменных. Блок-схема, описывающая действия конструктора представлена на рисунке 7.

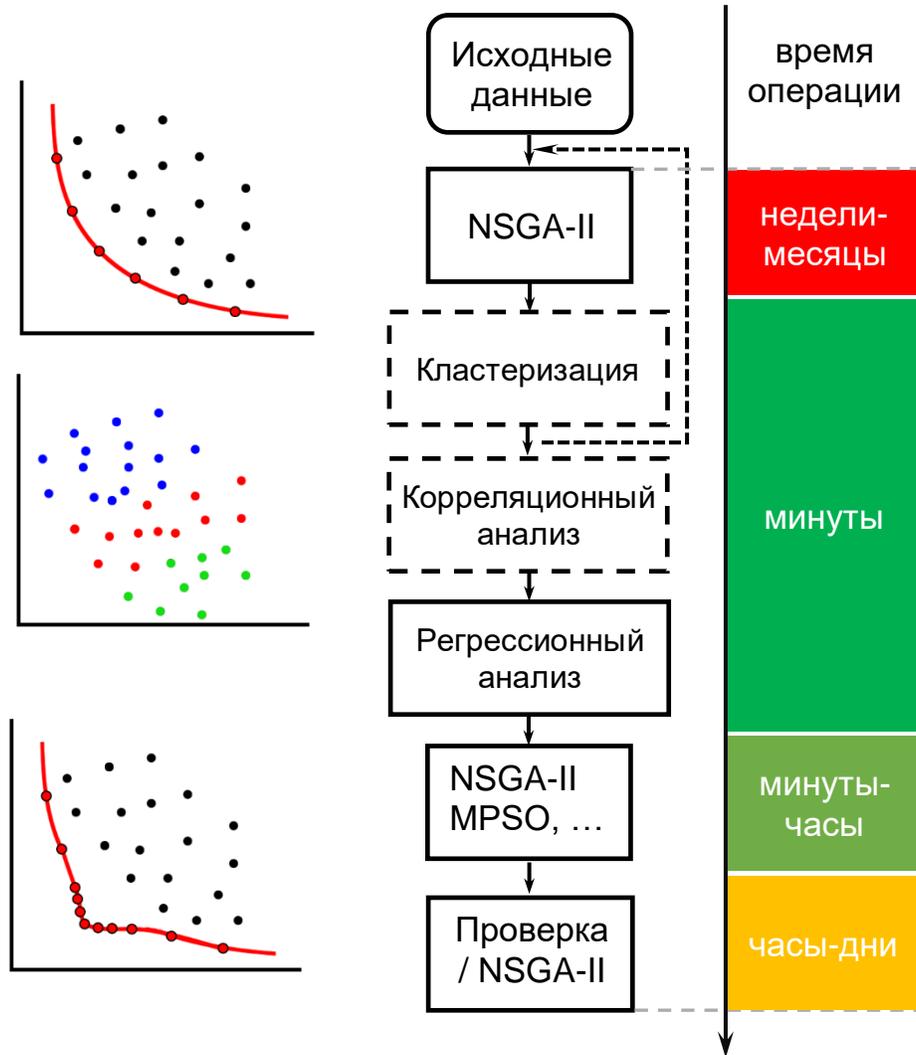


Рисунок 7 — Принципиальная схема методики проектирования и распределение времени работы

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложен новый подход к оптимизации конструкций вращающихся электрических машин, выполнена его апробация для гидрогенераторов и подтверждена возможность эффективной алгоритмической реализации нового подхода на современных вычислителях.

В работе получены следующие основные результаты с формализацией дальнейшего вектора развития:

1. разработан новый алгоритм проектирования электрических машин на примере гидрогенераторов;
2. разработана параметризованная двумерная конечно-элементная модель гидрогенератора;
3. разработан комплекс программных сценарных файлов, реализующих предлагаемые метод МКО и расчет МКЭ;
4. разработана методика расчета потерь в активной стали сердечника статора и полюсах ротора от гистерезиса и вихревых токов;
5. разработана методика расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой линейного напряжения и индуктивных сопротивлений;
6. разработан алгоритм многокритериальной оптимизации;
7. применен кластерный анализ с формированием структурных групп и их корреляционный анализ.

Разработанная методика и комплекс программных сценарных файлов обеспечивает лицо, принимающее решение, эффективным инструментом, который позволяет:

1. построить множество Парето-оптимальных решений;
2. обосновать выбранный вариант;
3. снизить трудоемкость оценки различных вариантов.

В ходе исследования была решена научная задача создания метода оптимизации на основе метода конечных элементов, позволяющего учитывать взаимодействие целевых функций.

Для дальнейшего развития предложенного метода необходимо проведение дополнительных исследований с формализацией в рамках других факторных признаков. Подобные факторы могут сформировать либо дополнительные критерии оптимальности, либо дополнить ограничения задачи комбинаторной оптимизации.

#### **IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. S. Gulay and D. Verkhovtsev. "On optimization hydro-generator parameters by NSGA-II," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
2. Н.В. Коровкин, С.Л. Гулай, Д.А. Верховцев. «Оптимизация параметров гидрогенератора», ИЗВЕСТИЯ РАН. ЭНЕРГЕТИКА 2019, № 4, с. 1–9.
3. А.А. Лямин, С.Л. Гулай, Д.А. Верховцев и С.Д. Чишко. «К методу визуализации полигармонических колебаний конструкций», Электрические станции 2020, № 8, с.43-46.