
УДК 621.313.322-81

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТВВ-360 ПО ВЕКТОРНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА

© 2020 г. Н. В. Коровкин¹, *, М. А. Марков¹, **

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

**e-mail: mmarkov9@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.05.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Рассмотрена многоцелевая оптимизация конструкции мощного турбогенератора, в качестве функций цели использованы: КПД турбогенератора (максимизируется), масса меди обмоток статора и ротора, продольное синхронное индуктивное сопротивление турбогенератора (обе минимизируются). Расчет конструкции турбогенератора выполнен по методике, изложенной Хуторецким Г.М. и др. в книге “Проектирование турбогенераторов” (1987). Получены близкие к линейным зависимости, связывающие все многообразие Парето-оптимальных решений. Полученным результатам дано теоретическое обоснование. Применение предлагаемой в статье методики многоцелевой оптимизации позволило улучшить показатели по всем выбранным критериям качества конструкцию референсного турбогенератора. В качестве референсного рассматривался турбогенератор ТВВ-360-2 с водородно-водяным охлаждением.

Ключевые слова: синхронный турбогенератор, улучшение прототипа, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, NSGA-II, векторный критерий качества, оптимизация параметров, КПД турбогенератора, индуктивное сопротивление турбогенератора

DOI: 10.31857/S0002331020040056

ВВЕДЕНИЕ

Для современного электромашиностроения характерны тенденции к уменьшению сроков проектирования производимого оборудования, к снижению затрат на его производство, а также, что особенно важно, тенденция к возрастанию потребности в создании оборудования, обладающего лучшими количественными и качественными в сравнении с существующими аналогами характеристикам. Поддержка этих современных трендов достигается на всех этапах жизни электротехнического устройства – от дизайн-проекта до утилизации – решением соответствующих оптимизационных задач, постановки и методы решения которых определяются во многом тем, на каком этапе они используются. В большинстве случаев оптимизация состоит в улучшении свойств известного прототипа. В настоящей статье рассматривается оптимизация конструкции турбогенератора ТВВ-360 на этапе его проектирования, соответственно в качестве прототипа выбран производимый турбогенератор этого типа [1].

В данной статье оптимизация выполняется одновременно по нескольким критериям качества (многоцелевая оптимизация). Методология решения таких задач в последнее время значительно усовершенствовалась, и, благодаря также высокому быстродействию современных компьютеров, появилась возможность решать задачи мно-

гоцелевой оптимизации для сложных электротехнических устройств, какими являются турбогенераторы [2]. Опыт в решении подобных задач электроэнергетических устройств и объектов к настоящему времени уже имеется [3].

Актуальность работ в данном направлении определяется тем, что турбогенератор – сложная дорогостоящая синхронная машина, проектирование которой выполняется по отработанным расчетным методикам [1]. Выбор при проектировании из многих допустимых значений параметров конструкции генератора отражает опыт проектировщика и выбранный прототип, так как выполнение расчетов всех возможных комбинаций параметров, обычно, невозможно. Соответственно, любое, полученное таким образом решение, может быть не оптимальным. Поэтому на этапе проектирования желательно организовать некоторый направленный (в смысле последовательного улучшения выбранных критериев оптимальности) перебор вариантов конструкций. Разработка подхода, реализующего такой процесс, – актуальная, по мнению авторов, для проектирования мощных турбогенераторов задача.

Актуальны также и исследования групп критериев оптимальности, показывающие наилучший набор таких критериев для, например, турбогенераторов [4]. Здесь кроме технической и экономической значимости критериев в наборе важна их противоречивость. Так, набор критериев: минимум веса меди обмоток и минимум потерь в меди представляется более перспективным, чем набор: минимум веса меди обмоток и минимум веса турбогенератора, поскольку в последнем случае критерии оптимальности, вероятно, сильно коррелируют. Оговоримся здесь, что мы не исследовали эти постановки, они приведены только для пояснения тезиса о противоречивости критериев, и, мы допускаем, что существуют инженерные задачи, где использование второго набора критериев целесообразно.

Цель настоящей статьи – создание и апробация на уже изученном объекте методики многоцелевой оптимизации, основанной на эвристическом алгоритме, которая сможет улучшать прототипы турбогенераторов за счет направленного перебора большого числа вариантов.

В статье многоцелевая оптимизация выполнена посредством генетического алгоритма, который представляет собой эвристический алгоритм решения задач путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизма моделирования процессов естественного отбора в природе [5].

Описан турбогенератор совокупностью параметров, которые условно разделены на две группы. Первая группа – заимствованные у прототипа величины, которые не будут изменяться в процессе оптимизации. Это $P = 360$ МВт – номинальная активная мощность турбогенератора; $\cos\varphi = 0.85$ – коэффициент мощности; $n = 3000$ об/мин – частота вращения ротора; $f = 50$ Гц – частота сети; $m = 3$ – число фаз; соединение фаз – звезда (Y); $W = 1.65$ – статическая перегружаемость; система охлаждения – ТВВ [1]. Вторая группа – варьируемые в некоторых заданных пределах параметры. Это $D_1 = 1.325$ – 1.345 м – диаметр статора; $D_2 = 1.115$ – 1.135 м – диаметр ротора; $b_{\pi} = 0.028$ – 0.032 м – ширина паза статора; $h_{\kappa} = 0.015$ – 0.035 м – высота клина статора; $b_{\text{пак}} = 0.06$ – 0.085 м – ширина пакета статора; $b_{\text{кан}} = 0.008$ – 0.012 м – ширина вентиляционного канала статора; $U = 10.5$ – 24 кВ – напряжение; $b_{\text{пол}} = 0.0015$ – 0.0025 м – ширина канала в полом проводнике; $h_{\text{пол}} = 0.004$ – 0.005 м – высота канала в полом проводнике; $h_1 = 0.01$ – 0.02 м – двусторонняя толщина изоляции стержня по высоте; $h_2 = 0.0005$ – 0.0015 м – толщина прокладки под клин; $h_3 = 0.0005$ – 0.0015 м – толщина прокладки на дне паза; $h_4 = 0.004$ – 0.006 м – толщина прокладки между стержнями.

Таким образом мы имеем 13 параметров оптимизации, поиск которых необходимо осуществить таким образом, чтобы улучшить конструкцию турбогенератора по ряду критериев качества.

В качестве критериев качества (функций цели) в статье рассматриваются: КПД η турбогенератора, масса меди G обмоток статора и ротора, продольное синхронное ин-

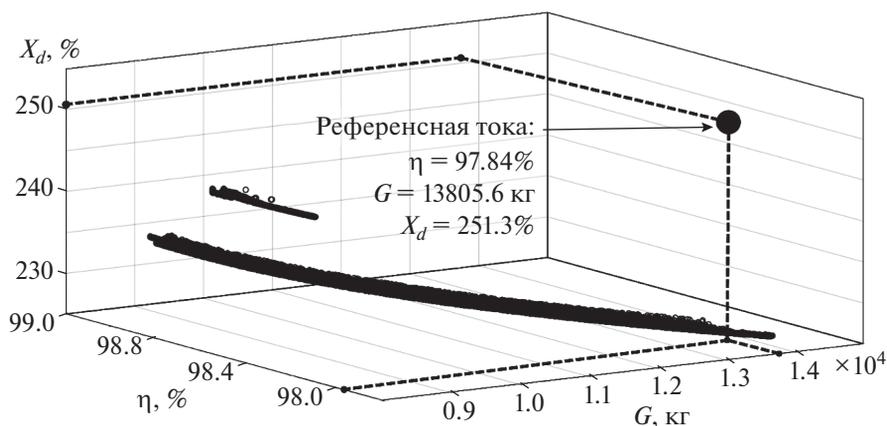


Рис. 1. Результат оптимизации по трем критериям качества.

дуктивное сопротивление X_d турбогенератора. Уточним предлагаемый в статье набор критериев:

1. Получение наибольшего η при значениях G и X_d не больше референсных;
2. Получение минимальной массы меди G (для уменьшения размера турбогенератора) что противоречит первому критерию, так как при уменьшении G значение η уменьшается;
3. Получение минимального X_d (для более легкого регулирования в переходных режимах), что вступает в противоречие с критериями 1 и 2, так как уменьшение X_d соответствует увеличению веса меди и уменьшению КПД.

Значения функций цели для прототипа (референсная точка): $\eta = 97.84\%$; $G = 13805.6$ кг; $X_d = 251.3\%$, показаны на рис. 1 и приведены в табл. 1. На рисунках 2–4 приведены проекции референсной точки на соответствующие координатные поверхности. Референсная машина – это турбогенератор ТВВ-360-2 с водородно-водяным охлаждением.

Расчеты выполнялись в пакете прикладных программ MATLAB, для многоцелевой оптимизации использовался генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой *NSGA (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)* [6]. Характеристики задачи: размер популяции 10000 особей; число поколений 120; число критериев качества 3; число переменных 13.

Результат расчета – двусвязное Парето-множество представляет собой поверхность, представленную на рис. 1. Как можно видеть, все точки найденного множества решений превосходят референсную точку по всем трем критериям. Анализ приведенного на рис. 1 Парето-множества удобно выполнять с помощью рассмотрения его сечений, параллельных координатным плоскостям.

Таблица 1. Сравнение полученных данных

| Критерии | Референсная точка | Значения критериев при наименьшем G | Значения критериев при наибольшем η | Значения критериев при наименьшем X_d |
|------------|-------------------|---------------------------------------|--|---|
| η , % | 97.84 | 98.79 | 98.88 | 98.78 |
| G , кг | 13805.6 | 8540 | 10320 | 8861 |
| X_d , % | 251.3 | 235.5 | 237.3 | 235 |

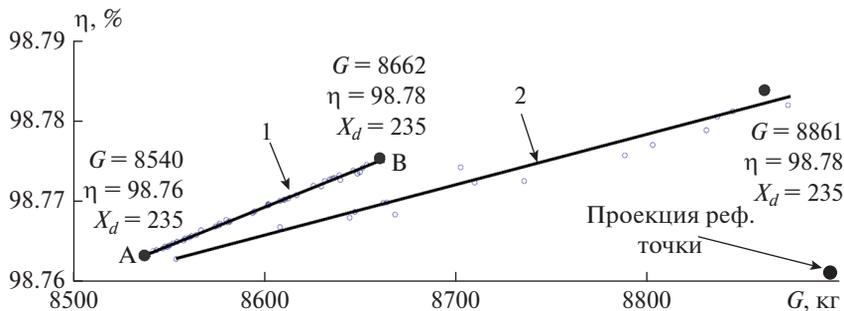


Рис. 2. Парето-фронт $f(\eta, G)$ при фиксированном значении $X_d = 235\%$.

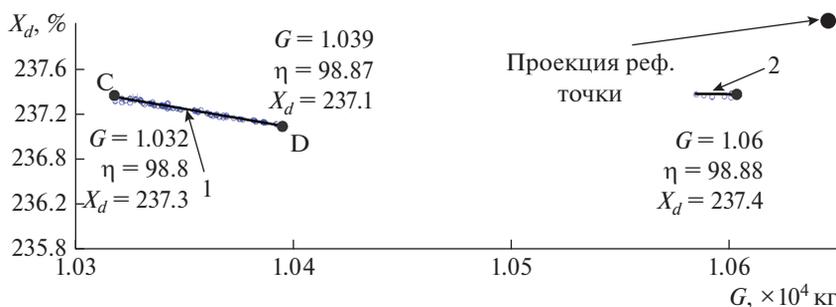


Рис. 3. Парето-фронт $f(X_d, G)$ при наибольшем η .

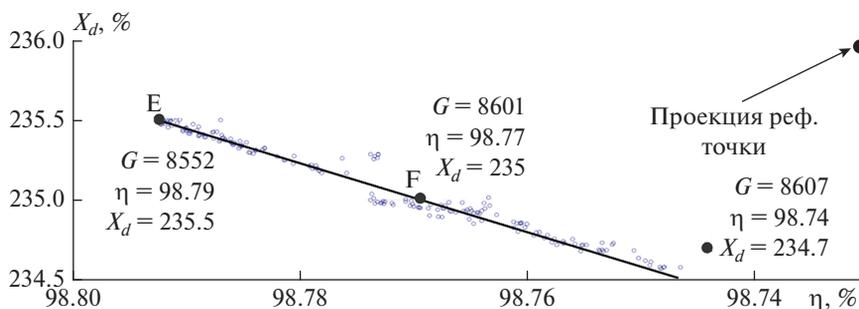


Рис. 4. Парето-фронт $f(X_d, \eta)$ при наименьшем значении G .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунках 2–4 показаны сечения Парето-множества при неизменном значении одного из критериев, которые могут интерпретироваться как Парето-множества для двух критериев (целевых функций). Согласно рис. 2, на котором представлена зависимость $f(\eta, G)$ при минимальном из достигнутых значениях X_d , увеличение КПД сопряжено с увеличением веса машины, что интуитивно ясно. Однако выполненный расчет дает нам здесь не только количественные характеристики этой связи, но и показывает, что таких связи две (прямые 1 и 2 на рис. 1). При этом прямая 1 представляется более перспективной, так как с неизбежным увеличением веса дает наиболее быстрое увеличение КПД. Наличие двух связей объясняется и здесь и далее тем, что и исходно Парето-множество двусвязное.

На рисунке 3 представлено распределение $f(\eta, G)$ при наибольшем значении η . Как можно видеть, это множество также двусвязное. С ростом G (и, соответственно, с увеличением габаритов) X_d уменьшается. Здесь интерес представляет тот факт, что это уменьшение очень незначительное – фактически изменение наблюдается только в четвертом знаке X_d . Это общее свойство для всего Парето-множества хорошо прослеживается и на его 3D представлении (рис. 1). Действительно, при уменьшении площади сечения провода его внутренняя индуктивность или не изменяется (для кругового сечения), или изменяется весьма незначительно, а внешняя увеличивается [7]. Здесь наибольший интерес представляет прямая 1.

На рисунке 4 представлено распределение $f(X_d, \eta)$ при наименьшем значении G . В данном случае множество Парето односвязное. Однако алгоритм нашел 2 значения минимального G . Множество на рис. 4 построено для от $G = 8550$ кг до $G = 8650$ кг. Как можно видеть, уменьшение X_d связано с относительно быстрым уменьшением КПД, поэтому рекомендовать включение этого критерия в набор целей целесообразно, вероятно, только для машин специального типа.

Сравнение численных значений достигнутых величин критериев приведено в табл. 1.

ДИСКУССИЯ

Представленные в статье результаты являются оценочными, так как получены без учета теплового расчета генератора, не анализировалась также подробно механическая прочность элементов конструкции. Вероятно, это одна из причин излишне оптимистичных результатов, особенно это касается веса генератора. Тем не менее, по мнению авторов, учет тепловых процессов и механики принципиально не изменит рассмотренный в статье подход. Возможно также качественное сохранение вида полученных зависимостей, связывающих критерии оптимальности. Авторы в ближайшее время планируют включить и тепловой расчет по [1] в предложенную здесь методику.

Авторы также хорошо понимают, что данная работа только начало использования методов искусственного интеллекта к проектированию мощных электрических машин. Здесь представляет интерес не только связи критериев оптимальности, но и сами искомые параметры конструкции машины. Эти результаты приведены в табл. 2 для

Таблица 2. Параметры конструкции турбогенератора для ряда точек множества Парето

| Геометрические параметры генератора | Референсная точка | | Точка А | | Точка В | | Точка С | | Точка D | | Точка Е | | Точка F | |
|-------------------------------------|-------------------|-----|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | м | % | м | % | м | % | м | % | м | % | м | % | м | % |
| D_1 | 1.335 | 100 | 1.325 | 99.3 | 1.3266 | 99.4 | 1.3267 | 99.4 | 1.3293 | 99.6 | 1.3266 | 99.4 | 1.3265 | 99.4 |
| D_2 | 1.125 | 100 | 1.1257 | 100 | 1.1164 | 99.2 | 1.1171 | 99.3 | 1.115 | 99.1 | 1.1153 | 99.1 | 1.1216 | 99.7 |
| b_n | 0.03 | 100 | 0.032 | 106 | 0.032 | 107 | 0.0315 | 105 | 0.0316 | 105 | 0.0315 | 105 | 0.032 | 107 |
| h_k | 0.025 | 100 | 0.015 | 60 | 0.015 | 60 | 0.015 | 60 | 0.015 | 60 | 0.0151 | 60 | 0.015 | 60 |
| $b_{\text{пак}}$ | 0.06 | 100 | 0.085 | 142 | 0.0841 | 140 | 0.085 | 142 | 0.0849 | 142 | 0.085 | 142 | 0.085 | 142 |
| $b_{\text{кан}}$ | 0.01 | 100 | 0.008 | 80 | 0.0084 | 84 | 0.0088 | 88 | 0.008 | 80 | 0.0083 | 83 | 0.0104 | 104 |
| $b_{\text{пол}}$ | 0.002 | 100 | 0.0021 | 105 | 0.0024 | 120 | 0.0024 | 120 | 0.0018 | 90 | 0.0018 | 90 | 0.0025 | 125 |
| $h_{\text{пол}}$ | 0.0045 | 100 | 0.005 | 111 | 0.0045 | 100 | 0.005 | 111 | 0.0049 | 109 | 0.0049 | 109 | 0.005 | 111 |
| h_1 | 0.015 | 100 | 0.01 | 67 | 0.01 | 67 | 0.0108 | 72 | 0.01 | 67 | 0.0106 | 71 | 0.0119 | 79 |
| h_2 | 0.001 | 100 | 0.0005 | 50 | 0.0005 | 50 | 0.0005 | 50 | 0.0005 | 50 | 0.0005 | 50 | 0.0005 | 50 |
| h_3 | 0.001 | 100 | 0.0015 | 150 | 0.0015 | 150 | 0.0015 | 150 | 0.0015 | 150 | 0.0015 | 150 | 0.0015 | 150 |
| h_4 | 0.005 | 100 | 0.004 | 80 | 0.0047 | 94 | 0.0058 | 116 | 0.0047 | 94 | 0.0046 | 92 | 0.0044 | 88 |
| Рабочее напряжение | кВ | % | кВ | % | кВ | % | кВ | % | кВ | % | кВ | % | кВ | % |
| U | 20 | 100 | 10.5 | 52.5 | 10.54 | 52.7 | 10.5 | 52.5 | 10.61 | 53 | 10.5 | 52.5 | 10.5 | 52.5 |

крайних и срединных точек А..F множества Парето, указанных на рис. 2–4. Как можно видеть, ряд параметров изменяется значительно. Здесь мы не обсуждаем технические и технологические аспекты реализации предложенных конструкций, но отметим, что все параметры уложились в заданные им возможные пределы изменений.

ВЫВОДЫ

В статье представлена методика оптимизации конструкции турбогенератора по векторному критерию качества. В качестве критериев качества использовались: КПД турбогенератора, масса меди обмоток статора и ротора и продольное синхронное индуктивное сопротивление турбогенератора. Полученные результаты показывают, что использование подхода авторов позволяет получить группу решений (множество Парето) улучшающее выбранный прототип (турбогенератор ТВВ-360-2) по всем критериям качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов - Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отделение, 1987. 256 с.
2. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Chudny V.S., Frolov O.V. Reduction of active power losses in electric power systems with optimal placement of FACTS devices / Proceedings of the 2015 IEEE, ElCon-RusNW 2015, St. Petersburg, Russian Federation, 2015, February 2–4. P. 150–154.
3. Коровкин Н.В., Гулай С.Л., Верховцев Д.А. Оптимизация параметров гидрогенератора. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 4. С. 42–50.
4. Korovkin N.V., Potienko A.A. The use of a genetic algorithm for solving electric engineering problems Электричество. 2002. № 11. С. 2–15.
5. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощностей в энергосистемах. Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 1. С. 77–80.
6. Nitsch J.B., Adalev A.S., Hayakawa M., Korovkin N.V. Deembedding and unterminating microwave fixtures with the genetic algorithm IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Т. 54. № 7. С. 3131–3139.
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники, СПб, Питер, 2009, т. 1, 510 с., т. 2, 430 с.

Optimization of the TBB-360 Turbogenerator Parameters Using Vector Criteria of Quality

N. V. Korovkin^{a,*} and M. A. Markov^{a,**}

^aPeter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

**e-mail: mmarkov9@yandex.ru

The multi-purpose optimization of the design of a powerful turbogenerator is considered, the following functions are used as goal functions: turbogenerator efficiency (maximized), the weight of copper of stator and rotor windings, the longitudinal synchronous inductance of the turbogenerator (both minimized). The design of the turbogenerator was calculated using the method described in G.M. Hutoretsky et al., Design of Turbine Generators, 1987. Near-linear relationships were obtained that link the entire variety of Pareto-optimal solutions. The theoretical justifications are given for the obtained results. Application of the multipurpose optimization technique proposed in the article made it possible to improve the performance of the reference turbogenerator design for all selected quality criteria. A TVB-360-2 turbogenerator with hydrogen-water cooling was considered as a reference.

Keywords: synchronous turbogenerator, prototype improvement, multi-objective optimization, genetic algorithm, NSGA-II, vector quality criterion, optimization parameters, turbogenerator efficiency, inductance of the turbogenerator