ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА/THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Научная статья

Чернышева В.В.[1, *], Коровкин Н.В.[2]
[2] ORCID : 0000-0002-1173-8727;
[1, 2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nika.ch[at]mail.ru)

Аннотация

Исследуется переходный процесс синхронного генератора, возникающий при изменении внешнего эквивалентного индуктивного сопротивления. В рассматриваемом переходном процессе отклонение напряжения на шинах генератора остается в рамках допустимого для нормального режима. Производится оптимизация с векторным критерием качества (многокритериальная оптимизация) переходного процесса напряжения на шинах генератора путем изменения ЭДС возбуждения, т.е. задача синтеза оптимального закона управления возбуждением генератора в виде кусочно-линейной функции с заданными узлами интерполяции по времени. Выполнено построение с помощью генетического алгоритма в пространстве критериев множеств Парето и их последующее сужение в соответствии с аксиоматическим подходом.

Ключевые слова: векторный критерий качества, множество Парето.

MULTICRITERIA OPTIMISATION OF THE TRANSIENT PROCESS OF THE STRESS OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

Research article

Chernysheva V.V.[1, *], Korovkin N.V.[2]
[2] ORCID : 0000-0002-1173-8727;
[1, 2] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (nika.ch[at]mail.ru)

Abstract

The transient process of a synchronous generator occurring when the external equivalent inductive resistance changes is studied. In the studied transient process, the voltage deviation on the generator bars remains within the limits acceptable for normal operation. Optimisation is performed using a vector quality criterion (multicriteria optimisation) of the transient process of voltage on the generator bars by changing the excitation EMF, i.e. the task of synthesising the optimal generator excitation control law in the form of a piecewise linear function with specified time interpolation nodes. The construction was performed using a genetic algorithm in the space of Pareto sets criteria and their subsequent narrowing in accordance with the axiomatic approach.

Keywords: vector quality criterion, Pareto set.

Введение

Задача оптимизации переходного процесса синхронного генератора с помощью надежных, быстродействующих, совершенных алгоритмов управления его возбуждения является по-прежнему актуальной. Не прекращается появление новых публикаций на тему методов оптимизации различными метаэвристическими алгоритмами настроек ПИД-регулятора возбуждения синхронной машины и его разновидностей (ПИД-регулятор дробного порядка, с производной второго порядка и др.) [1], [2], [3], [5]. Однако стратегии, основанные на ПИД-регулировании, будут являться более предпочтительными (из-за меньшего количества вычислительных операций) только в случае оптимальной настройки коэффициентов регулятора [6].

Параметры ПИД-регулятора возбуждения, выбранные с помощью какой-либо оптимизационной процедуры, могут быть постоянными и(или) непрерывно изменяющимися, подстраиваемыми в соответствии с режимом ЭЭС в адаптивных и интеллектуальных схемах управления [6], [7], [8].

Оптимальный переходный процесс здесь и далее понимается нами как наилучший в смысле одного или нескольких критериев эффективности переходный процесс в условиях определенного возмущения — нормального эксплуатационного режима или аварийного режима. Традиционно для оптимизации переходного процесса синхронного генератора выбирают какой-либо из критериев: скорость затухания, размах колебаний, скорость регулирования напряжения при изменении уставки; скорость восстановления напряжения к заданному значению при возмущении со стороны энергосистемы; интенсивность подавления электромеханических колебаний, повышение запаса устойчивости; сам факт обеспечения устойчивости во всех возможных режимах эксплуатации; повышение уровня динамической устойчивости при близких коротких замыканиях и т.д.

Известна неоднозначность выбора целевых функций, являющаяся следствием противоречивости критериев, то есть улучшение одного критерия может приводить к ухудшению другого. Таковы, например, пары: колебательная устойчивость и коэффициент усиления; быстрота демпфирования колебаний и размах колебаний переходного процесса. Таким образом, выбор одного критерия не дает однозначного повышения качества переходного процесса.

Это приводит к необходимости искать наиболее эффективное управление переходными процессами, формирования векторного критерия оптимальности, опираясь на известные успехи использования методов многокритериальной оптимизации в решении самых разнообразных технических задач [9], [10], [11], [13].

Дальнейшая работа с векторным критерием разделяется на два основных направления: использование различных приемов его скаляризации [14], [15] (метод главного критерия и сведение остальных к критериальным ограничениям (неравенствам), метод штрафных функций; формирование минимаксного целевого функционала; линейная свертка критериев в один на основе весовых коэффициентов) и построение в пространстве критериев множества Парето с его последующим сужением. В настоящей работе используется второй подход, при этом для построения множества Парето используется генетический алгоритм (ГА).

Целью работы является изучение возможностей использования многоцелевой оптимизации для синтеза наилучших законов управления.

В данной работе производится многокритериальная оптимизация переходного процесса напряжения на шинах синхронного генератора в нормальном эксплуатационном режиме. Конкретно рассматривается процесс, вызванный работой синхронного компенсатора: изменение реактивного сопротивления в цепи синхронный генератор — трансформатор — линия электропередачи. Рассмотрено 12 различных критериев качества переходных процессов, объединенных во взаимно противоречащие пары или тройки, для которых выполнено построение множества Парето с учетом технических ограничений. Задача поиска наилучшего переходного процесса рассматривается далее, как задача синтеза оптимального закона управления возбуждением генератора. Результаты проведенных расчетов сравнивались с результатами эталона, в качестве которого принят результат одноцелевой оптимизации с применением одного из традиционных интегральных критериев качества переходных процессов. Проведенное исследование может рассматриваться как первый шаг решения задачи оптимальной настройки коэффициентов усиления АРВ по векторным критериям качества.

Классификации современных направлений развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов, данная в [16], предлагает 4 типа задач:

1 — модернизацию существующих линейных структур АРВ;

2 — разработку адаптивных АРВ;

3 — разработку методик по настройке АРВ;

4 — определение оптимальных мест установки АРВ.

Настоящее исследование относится ко второму и третьему типам задач: предварительные шаги для разработки адаптивного АРВ с сохранением существующей линейной структуры ПИД-регулятора или методики по настройке АРВ с элементами адаптивности.

Расчеты проводились на персональном компьютере с процессором уровня i7 10-го поколения в однопоточном режиме.

Исходные данные и математическая модель

Переходный процесс в синхронной машина описывается уравнениями Парка-Горева, разрешенными относительно производных:

$$\begin{cases} \dfrac{du_{\text{в}}}{dt} = k_{11}u_{\text{в}} + k_{12}u_q + k_{13}s\sin\delta + k_{14}\cos\delta + k_{15}e_q; \\ \dfrac{du_q}{dt} = k_{21}u_{\text{в}} + k_{22}u_q + k_{23}s\sin\delta + k_{24}\cos\delta + k_{25}e_q; \\ \dfrac{du_d}{dt} = k_{31}u_d + k_{32}s\cos\delta + k_{33}\sin\delta; \\ \dfrac{ds}{dt} = k_{41}u_q\sin\delta + k_{42}u_d\cos\delta + k_4; \\ \dfrac{d\delta}{dt} = w_s s, \end{cases} \quad (1)$$

где e_q — ЭДС, обусловленная токами обмотки возбуждения, $u_в$ — напряжение на зажимах обмотки возбуждения, u_d, u_q — поперечное и продольное напряжения статора, s — скольжение, δ — угол между поперечной осью генератора и вектором напряжения шин приемной системы, k_{11},k_{12},...,k_4 — постоянные коэффициенты, отражающие параметры конкретной машины. Принят к рассмотрению явнополюсный синхронный генератор [17] мощностью P = 20 МВт с номинальным напряжением $U_{\text{гн}}$ = 3,15 кВ, работающий через повышающий трансформатор $x_{\text{т}}$ = 0,113 о.е. и линию передачи $x_{\text{л}}$ = 0,0187 о.е. на мощную приемную систему. Постоянные параметры уравнений (1) следующие: k_{11} = -24,275, k_{12} = 208,226, k_{13} = 368,922, k_{14} = -188,892, k_{15} = 3,071, k_{21} = 1,662, k_{22} = -17,760, k_{23} = -211,720, k_{24} = 16,111, k_{25} = 0,147, k_{31} = -21,126, k_{32} = -219,431, k_{33} = -22,997, k_{41} = -2,525, k_{42} = -2,525, k_4 = 0,5.

Коэффициенты отражают взаимосвязь электрических параметров синхронного генератора и учитывают примыкающую энергосистему:

$$k_{11} = -w_s\frac{\rho_{rd}(g_1-\mu_d)+\rho_r(1-\mu_{d1})}{(1-\mu_{d1})(1-g_1)+(1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{12} = w_s\rho_{rd}\frac{g_1-\mu_d}{x_d-x_{dr}}\frac{x_d}{(1-\mu_{d1})(1-g_1)+(1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{13} = \frac{-w_s u_{bus}}{x_d - x_{d\Gamma}} \frac{(1-\mu_{d1})(g_1 x_{d\Gamma} - \mu_d x_d) + (g_1 - \mu_d)(\mu_{d1} x_d - x_{d\Gamma})}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{14} = -w_s \rho_{rd} x_{d\Gamma} \frac{g_1 - \mu_d}{x_d - x_{d\Gamma}} \frac{u_{bus}}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{15} = w_s \rho_r \frac{1-\mu_{d1}}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{21} = w_s \frac{x_d - x_{d\Gamma}}{x_d} \frac{\rho_{rd}(1-g_1) - \rho_r(1-g_2)}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{22} = -w_s \rho_{rd} \frac{1-g_1}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{23} = \frac{w_s u_{bus}}{x_d} \frac{(1-g_1)(\mu_{d1} x_d - x_{d\Gamma}) + (1-g_2)(-g_1 x_{d\Gamma} + \mu_d x_d)}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{24} = w_s \rho_{rd} x_{d\Gamma} \frac{u_{bus}}{x_d} \frac{1-g_1}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{25} = w_s \rho_r \frac{1-g_2}{x_d} \frac{x_d - x_{d\Gamma}}{(1-\mu_{d1})(1-g_1) + (1-g_2)(g_1-\mu_d)};$$

$$k_{31} = -w_s \rho_{rd} x_q \frac{1}{(1-\mu_q) x_q};\ k_{32} = w_s u_{bus} \frac{\mu_q}{(1-\mu_q) x_q} \frac{x_q - x_{q\Gamma}}{x_q};\ k_{33} = -w_s \rho_{rq} x_{q\Gamma} \frac{u_{bus}}{(1-\mu_q) x_q};$$

$$k_{41} = \frac{-u_{bus}}{T_j (x_d - x_{d\Gamma})};\ k_{42} = \frac{-u_{bus}}{T_j (x_q - x_{q\Gamma})};\ k_4 = \frac{m}{T_j},$$

где w_s — синхронная скорость, T_j — постоянная инерции, m — вращающий момент первичного двигателя (турбины), $x_{d\Gamma}$ и $x_{q\Gamma}$ — продольное и поперечное синхронные сопротивления машины, $x_d = x_{d\Gamma} + x_т + x_л$ и $x_q = x_{q\Gamma} + x_т + x_л$ — суммарные синхронные сопротивления машины с учетом внешней сети, $g_1 = \frac{x_{ad}}{x_r}$ и $g_2 = \frac{x_{ad}}{x_{rd}}$ — магнитные параметры машины с учетом ее работы на внешнюю сеть, $\mu_d = \frac{x_{ad}^2}{x_r x_d}$, $\mu_{d1} = \frac{x_{ad}^2}{x_{rd} x_d}$, $\mu_q = \frac{x_{aq}^2}{x_{rq} x_q}$ — коэффициенты магнитной связи обмотки возбуждения и демпферных контуров с соответствующими статорными контурами машины с учетом ее работы на внешнюю сеть, $\rho_r = \frac{1}{w_s T_r}$, $\rho_{rd} = \frac{1}{w_s T_{rd}}$, $\rho_{rq} = \frac{1}{w_s T_{rq}}$ — декременты затухания обмотки возбуждения и демпферных контуров, u_{bus} — напряжение шин приемной системы,

Дифференциальные уравнения решались методом Дорманда-Принца (разновидность явного метода Рунге-Кутты 4 порядка) средствами MatLab.

Решение задачи оптимизации

Предполагается, что изначально генератор работал в нормальном эксплуатационном режиме, а в переходном процессе отклонение напряжения на шинах генератора остается в рамках допустимого для нормального режима (±10%). Задача состоит в подавлении переходного процесса для напряжений на шинах генератора путем изменения ЭДС возбуждения, т.е. задача синтеза оптимального закона управления возбуждением генератора.

Закон изменения возбуждения представлен в виде кусочно-линейной функции с заданными узлами интерполяции $t_i = \overline{(1, N)}$ по времени, что сводит задачу синтеза оптимального закона управления к поиску оптимальных значений напряжения возбуждения $e_{qi}(t_i)$ в узлах $t_i = \overline{(1, N)}$. Для решения этой задачи использован генетический алгоритм. В ходе исследования было получено, что для получения удовлетворительного решения для процесса длительностью 5 секунд достаточно N = 13. При решении учитываются также технические требования к напряжению возбуждения, которые задается в виде ограничений. Так, ограничен диапазон изменения напряжение возбуждения, определяемый условиям устойчивости режима, сходимости переходного процесса к новому установившемуся режиму и физической реализуемости. Перечисленные выше характеристики задачи являются общими для всех расчетов. Далее перейдем к формированию критериев оптимизации или функций цели.

Как уже отмечалось, в настоящей работе основное внимание уделено многокритериальной оптимизации или оптимизации с векторным критерием качества. Векторный критерий представляет собой вектор скалярных критериев, причем желательной является попарная противоречивость входящих в него скалярных критериев. В настоящей работе рассматривались двух- или трехкритериальные постановки, что соответствует одно-, двух- или трехкритериальной оптимизации. Рассматривалась также традиционная однокритериальная оптимизация с нелинейными ограничениями на решения, используемая в работе в качестве некоторого эталона, который желательно улучшить переходом к многокритериальным задачам.

Используемые в работе скалярные критерии качества переходных процессов представлены графически на рис. 1, где смысл критериев интуитивно понятен. Ккритерии промаркированы буквами латинского алфавита и цифрой (если необходимо). Такая маркировка критериев будет использоваться и далее при формировании векторных критериев. Так, векторный критерий, обозначаемый **авс$_1$**, соответствует трехкритериальной задаче, в которой используются 3 скалярных критерия **а**, **в** и **с$_1$**.

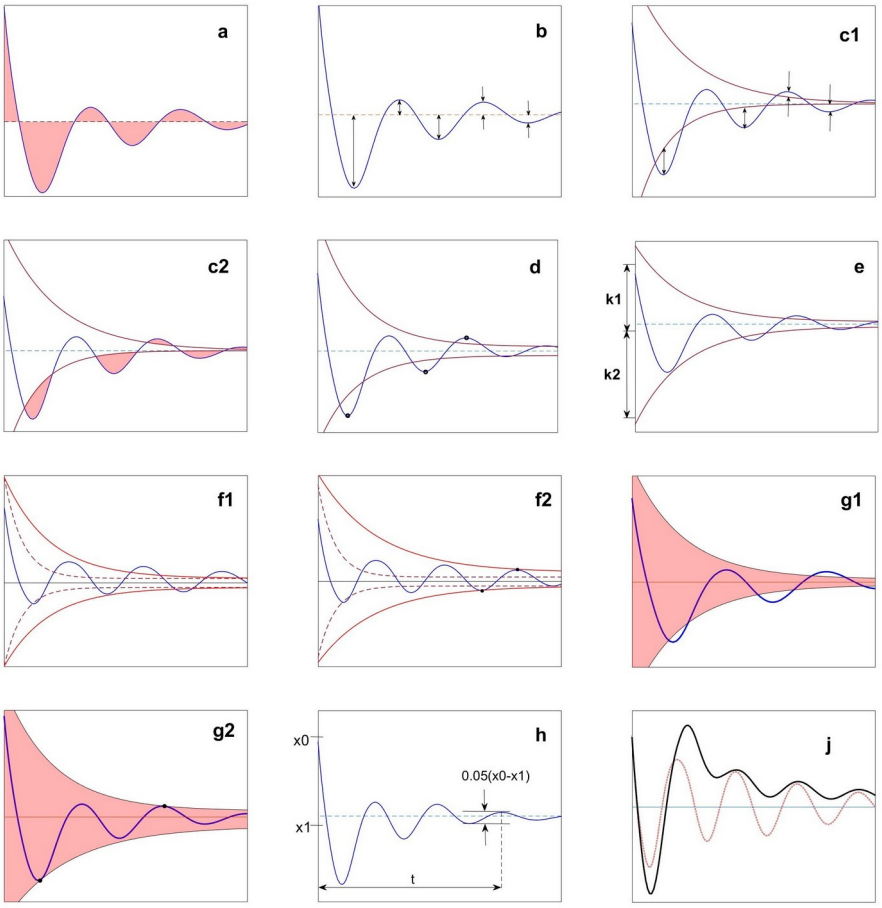

Рисунок 1 - Графическое представление показателей качества переходных процессов
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.1

Рассмотрим далее математическое описание этих критериев.

a. Интегральный показатель ошибки, при этом под ошибкой понимается отклонение текущего значения управляемой величины (напряжения генератора) от ее установившегося значения (новое значение напряжения генератора после изменения нагрузки): $\int_0^T \boldsymbol{J}(t)\,dt$, где конкретный вид функции $J(t)$ может иметь вид: $\int_0^T |e|\,dt$ — традиционная форма интегрального показателя ошибки, $\int_0^T t|e|\,dt$ — взвешенный по времени интегральный показатель ошибки, $\int_0^T |e + m\dot{e}|\,dt$ — интегральный показатель с ограничением скорости изменения ошибки, $\dot{e}$ — производная ошибки по времени, m — долевой коэффициент, $\int_0^T t^2|e|\,dt$ — взвешенный по времени интегральный квадратичный показатель ошибки, T — время переходного процесса.

b. Сумма модулей отклонений значений экстремумов кривой переходного процесса $x(t)$ от установившегося значения x_∞:

$\sum_{t\in E} |x(t) - x_\infty|$, где $E = \{t \in (0,T) \mid \dot{x}(t) = 0,\ \ddot{x}(t) \neq 0\}$.

c1. Сумма отклонений экстремумов кривой переходного процесса за пределы ограничивающих экспонент $f_{\text{low}}(t) = x_\infty - ke^{-\alpha_{\text{low}}t}$ и $f_{\text{up}}(t) = x_\infty + ke^{-\alpha_{\text{up}}t}$:

$$\sum_{\substack{t\in E_{\max} \\ x(t)>f_{\text{up}}(t)}} \left[x(t) - f_{\text{up}}(t)\right] + \sum_{\substack{t\in E_{\min} \\ x(t)<f_{\text{low}}(t)}} \left[f_{\text{low}}(t) - x(t)\right],$$

где $E_{\max} = \{t \in (0,T) \mid \dot{x}(t) = 0,\ \ddot{x}(t) < 0\}$, $E_{\min} = \{t \in (0,T) \mid \dot{x}(t) = 0,\ \ddot{x}(t) > 0\}$,

k = 0,1, α_{up} и α_{low} соответствуют экспонентам, проходящим вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса.

c2. Интеграл отклонений кривой переходного процесса $x(t)$ за пределы ограничивающих экспонент $f_{\text{low}}(t)$ и $f_{\text{up}}(t)$:

$\int_{t_1^*}^T g_1\,dt + \int_{t_2^*}^T g_2\,dt$, где $t_1^* = \min\left\{ t \in (0,T) \mid x(t) = f_{\text{low}}(t) \right\}$,

$t_2^* = \min\left\{ t \in (0,T) \mid x(t) = f_{\text{up}}(t) \right\}$,

$$g_1 = \begin{cases} f_{\text{low}}(t) - x(t), & \text{при } f_{\text{low}}(t) > x(t) \\ 0, & \text{при } f_{\text{low}}(t) \le x(t); \end{cases}$$

$$g_2 = \begin{cases} x(t) - f_{\text{up}}(t), & \text{при } x(t) > f_{\text{up}}(t) \\ 0, & \text{при } x(t) \le f_{\text{up}}(t); \end{cases}$$

k = 0,1, α_{up} и α_{low} соответствуют экспонентам, проходящим вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса.

d. Количество экстремумов кривой переходного процесса $x(t)$, выходящих за пределы ограничивающих экспонент $f_{\text{low}}(t)$ и $f_{\text{up}}(t)$, или, что то же самое, мощность множества S:

$|S|$, где $S = \left\{ t \in (0,T) \mid \dot{x}(t) = 0,\ \ddot{x}(t) \neq 0,\ \left(x(t) < f_{\text{low}}(t)\right) \vee \left(x(t) > f_{\text{up}}(t)\right) \right\}$,

где k = 0,1, α_{up} и α_{low} соответствуют экспонентам, проходящим вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса.

e. Максимальный из предэкспоненциальных множителей k_{low}, k_{up} в уравнениях экспонент, ограничивающих кривую переходного процесса.

f1. Коэффициенты α_{up}, α_{low} в показателях экспонент при условии, что экспоненты проходят вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса и могут пересекать эту кривую.

f2. Коэффициенты α_{up}, α_{low} в показателях экспонент при условии, что экспоненты касаются кривой переходного процесса в одной точке.

g1. Площадь фигуры, ограниченной экспонентами $f_{\text{low}}(t)$ и $f_{\text{up}}(t)$:

$\int_0^T \left(f_{\text{up}}(t) - f_{\text{low}}(t)\right) dt$, при условии, что экспоненты проходят вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса и могут пересекать эту кривую;

g11. Максимальная из площадей двух фигур, одна из которых ограничена экспонентой $f_{\text{low}}(t)$ и прямой установившегося значения x_∞, а вторая ограничена экспонентой $f_{\text{up}}(t)$ и прямой установившегося значения x_∞:

$\max\left[\int_0^T \left(f_{\text{up}}(t) - x_\infty\right) dt,\ \int_0^T \left(x_\infty - f_{\text{low}}(t)\right) dt\right]$, при условии, что экспоненты проходят вблизи точек экстремумов кривой переходного процесса и могут пересекать эту кривую;

g2. Площадь фигуры, ограниченной экспонентами $f_{\text{low}}(t)$ и $f_{\text{up}}(t)$:

$\int_0^T \left(f_{\text{up}}(t) - f_{\text{low}}(t)\right) dt$, при условии, что экспоненты касаются кривой переходного процесса в одной точке.

h. Время установления — момент времени установления затухания колебаний не более величины 5% от разницы между установившимися значениями x_0 и x_∞.

j. Плавность затухания колебаний (скорость изменения ошибки): $\int_0^T |\dot{e}|\, dt$.

Критерии **b, c1, c2, d, e, f1, f2, g1, g11, g2** (см. рис. 1) отличаются от интегральных тем, что контролируют форму кривой переходного процесса, требуя ограничить кривую переходного процесса двумя экспонентами сверху и снизу.

Огибающие равномерно затухающего колебательного процесса суть экспоненты. Можно так сформулировать критерии качества переходного процесса, что будем косвенно влиять на форму кривой затухающего переходного процесса, приближая ее к идеальной (равномерное плавное затухание).

Оптимизационная задача решается итерационным методом. На каждом шаге задается определенный закон изменения $e_q(t)$ и путем расчета уравнений машины Парка-Горева определяется кривая переходного процесса напряжения генератора в переходном процессе, которая затем оценивается в соответствии с назначенным критерием качества. При неудовлетворительном качестве производится новая итерация при новом $e_q(t)$, и получается новая кривая переходного процесса. На каждом шаге подберем такие числа k_{low}, k_{up}, α_{low}, α_{up}, что экспоненты $f_{\text{low}}(t) = x_\infty - ke^{-\alpha_{\text{low}} t}$ и $f_{\text{up}}(t) = x_\infty + ke^{-\alpha_{\text{up}} t}$ будут равноудалены от всех точек максимумов и минимумов кривой переходного процесса соответственно. При этом можно подобрать оба параметра экспоненты — коэффициент в показателе экспоненты и предэкспоненциальный множитель, или же — только один (коэффициент в показателе экспоненты), а второй (предэкспоненциальный множитель) задать известным. Очевидно, что построенные таким способом экспоненты в общем случае будут пересекать кривую переходного процесса. И только в случае идеального равномерного процесса — будут проходить через все точки экстремумов. Указанная процедура подбора экспоненциальной кривой дискретному набору точек экстремумов кривой переходного процесса методом наименьших квадратов заложена в математической реализации критериев **c1**, **c2**, **d**, **e**, **f1**, **g1**, **g11**.

Другой способ построения экспонент заложен в математической реализации критериев **f2**, **g2**. Предэкспоненциальный множитель задается постоянным. И Далее на каждом шаге решения оптимизационной задачи производится подбор коэффициента в показателе экспоненты в цикле: он увеличивается от нуля (что соответствует вырождению экспоненты в прямую линию, параллельную оси времени) до тех пор, пока экспоненты не коснутся кривой переходного процесса. В таком случае кривая переходного процесса никогда не выходит за пределы полученных экспонент. Размер шага цикла и погрешность подбора экспоненциальной кривой дискретному набору точек экстремумов кривой переходного процесса выбраны такими, чтобы скорость вычислений оптимизационной задачи с использованием критериев **c1**, **c2**, **d**, **e**, **f1**, **g1**, **g11** и **f2**, **g2** была сопоставима.

Однокритериальная оптимизация ЭДС возбуждения генератора для эффективного затухания переходного процесса напряжения на шинах не дают приемлемого результата, если использовать любой из критериев **b**, **c1**, **c2**, **d**, **e**, **f1**, **f2**, **g1**, **g2**, **h**, **j**. Только расчеты с помощью критериев «а» демонстрируют хороший результат (рис.2). Расчет, произведенный с помощью самой распространенной традиционной формы интегрального показателя ошибки $\int_0^T |e|\, dt$, принят за

эталон. Однако составленные из критериев **b**, **c1**, **c2**, **d**, **e**, **f1**, **f2**, **g1**, **g2**, **h**, **j** противоречивые пары (и тройки) целей дают результат лучший, чем эталон.

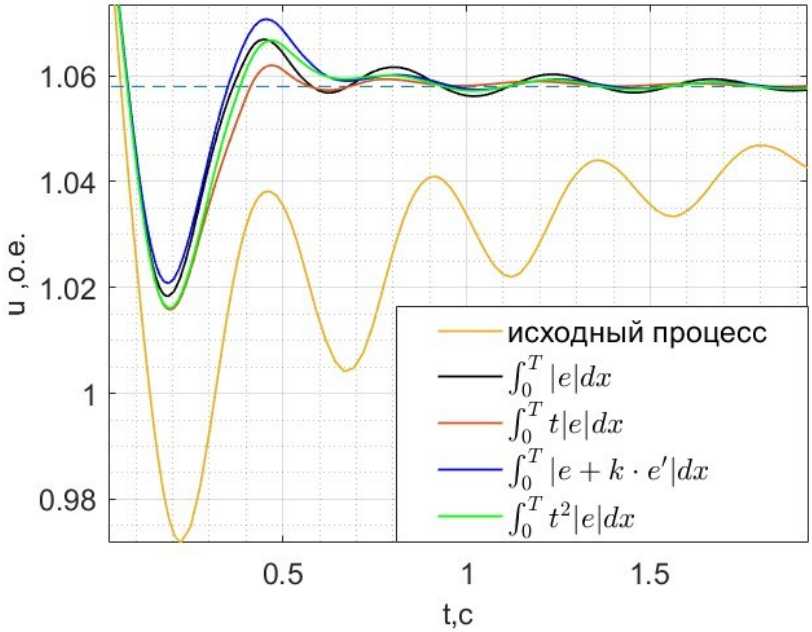

Рисунок 2 - Переходный процесс напряжения генератора до и после одноцелевой оптимизации с помощью традиционных интегральных критериев

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.2

Сужение множества Парето при многоцелевой оптимизации

Результатом применения к решению многоцелевой задачи ГА является фронт Парето — множество не улучшаемых по всем целевым функциям одновременно решений. При задаваемых в настоящей работе параметрах ГА количество точек на фронте Парето 650. О лучшем решении среди Парето-оптимальных решений можно говорить только в связи с предпочтениями исследователя. Для однозначного выбора лучшего для целей исследователя решения задачи многокритериальной оптимизации необходимо провести процедуру сужения множества Парето. Для этого может быть избран эвристический подход (визуально, по виду кривой фронта Парето) или аксиоматический (формализованная процедура). Вводится квант информации — информация от лица, принимающего решение (ЛПР) о том, выигрыш по какому критерию предпочтительнее. Затем в соответствии с расчетными формулами (данными, например, в [18], [19], [20], [21]) следует пересчитать исходный векторный критерий с учетом кванта информации.

Если обе цели с первого взгляда равнозначны, то введем дополнительные критерии сравнения решений. Рассмотрим 4 признака сравнения переходных процессов: просадка, размах, отклонение в 1 секунду и перерегулирование. Каждое решение Парето характеризуется своим набором этих чисел, т.е. для каждого решения Парето может быть задан четырёхкомпонентный вектор. Такие вектора в общем, скорее всего, уже не являются Парето-оптимальными. Произведем отбор из них Парето-оптимальных векторов.

Для дальнейшего сужения можно поступить различным образом.

1. Сравнение с эталоном. Выберем только те вектора, у которых все компоненты не хуже, чем у эталонного вектора.

2. Сужение множества Парето на основе разделения критериев сравнения по значимости. Будем считать время затухания более важным, чем остальные три. Выберем решения с минимальным временем затухания, а другие три критерия чтобы были не хуже, чем у эталона. Такое решение или одно, или нет таких.

3. Если предыдущее требование слишком жесткое, то выберем решения с минимальным временем затухания и только первым критерием не хуже эталона (или только вторым, или только четвертым).

4. На основе взаимно зависимой информации с использованием нелинейных функций [19].

5. На основе нечеткой информации о предпочтении ЛПР [20], [21].

Таблица 1 - Количество решений после сужение множества Парето

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.3

№	Название расчета	Уникальных решений	Уникальных. 4-х компонентных векторов	Разделения критериев на группы							
				Все критерии не хуже эталона	tз=min, а критерии 1,2,4 не хуже эталона	tз=min, а критерий 1 не хуже эталона	tз=min, а критерий 2 не хуже эталона	tз=min, а критерий 4 не хуже эталона	На основе методики [19]	На основе методики [20]	На основе методики [21]
1	a1g2	458	213	0	0	1	1	0	1	2	137
2	a3f2	616	145	2	0	1	1	0	1	3	145
3	a3g2	541	108	0	0	1	1	0	1	1	28
4	bh	588	43	2	1	1	1	1	1	2	43
5	c1f2, k=0,1	635	201	20	1	1	1	1	1	7	201
6	c2f2, k=0,1	647	102	8	0	0	0	0	1	8	5
7	c2f2, k=0,2	639	357	6	0	0	0	1	1	8	18
8	c2f2, k=0,05	647	19	0	0	1	0	0	1	2	19
9	c1g1	617	114	0	0	0	1	1	1	2	99
10	c2g11	609	50	0	0	0	0	1	1	2	50(2)
11	c1g11	602	173	0	0	0	0	0	10	3	8
12	c2h	626	118	0	0	0	0	0	1	4	118
13	a1f1	616	65	0	0	1	0	0	1	2	22
14	be	642	305	3	1	1	1	1	1	3	305
15	bc2	647	286	3	1	1	1	1	1	2	286
16	dh	50	13	0	0	0	0	1	1	4	13
17	eh	588	288	0	0	0	0	1	1	4	133
18	a1h	582	212	0	0	1	1	0	1	2	212
19	ej	644	413	0	0	1	0	0	1	1	413
20	a1j	579	8	0	0	0	0	1	1	1	8
21	g1j	602	77	0	0	0	0	1	1	2	64
22	g11j	642	110	15	0	1	1	0	1	2	110
23	a1f1c1	586	90	0	0	0	0	1	1	1	5
24	a1f1c1, k=0,1	609	105	9	0	1	0	0	1	8	9

На рис.3, 4, 5, 6 приведены результаты, соответствующие табл.1, после сужения множества решений Парето до 1–3 точек.

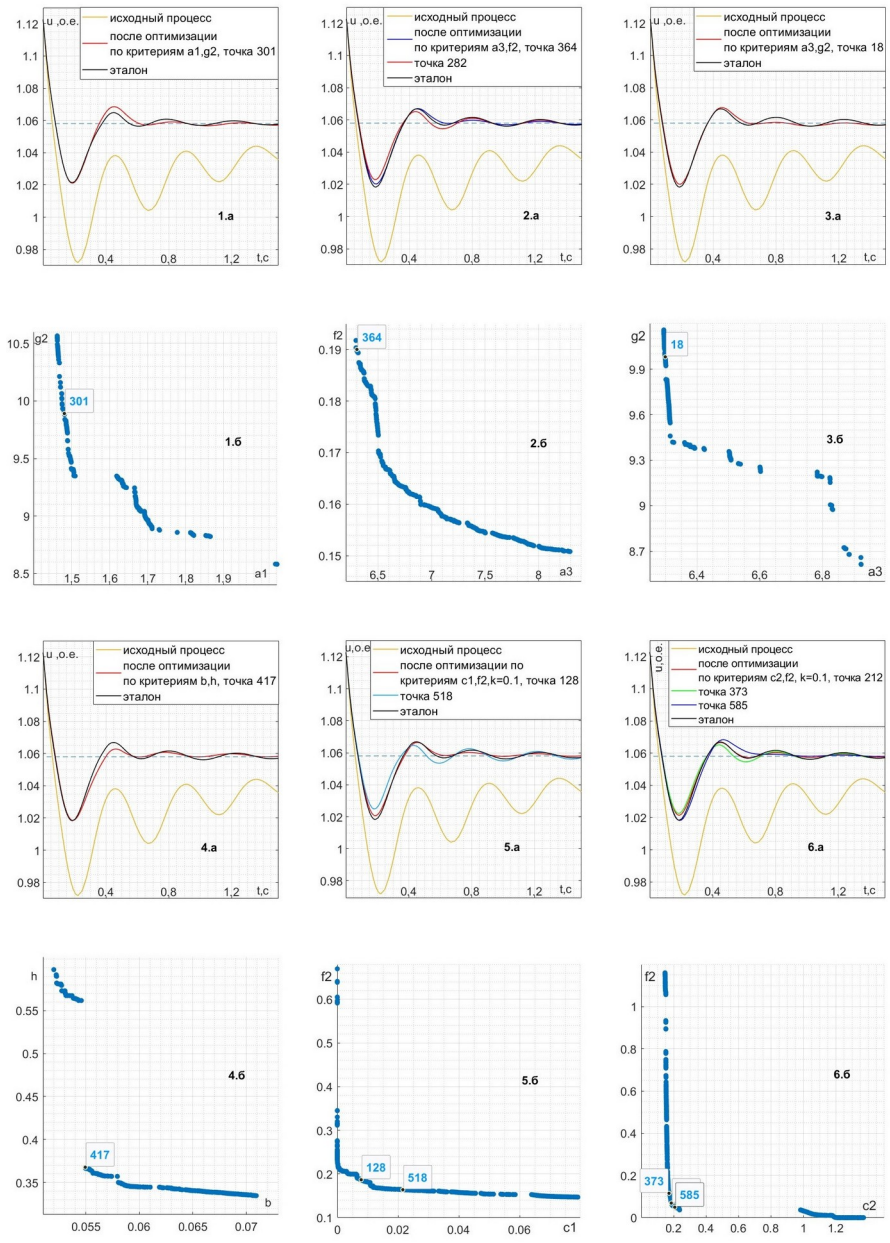

Рисунок 3 - Переходный процесс напряжения генератора до и после двухкритериальной оптимизации (*1.а – 6.а*) и соответствующие фронты Парето (*1.б – 6.б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.4

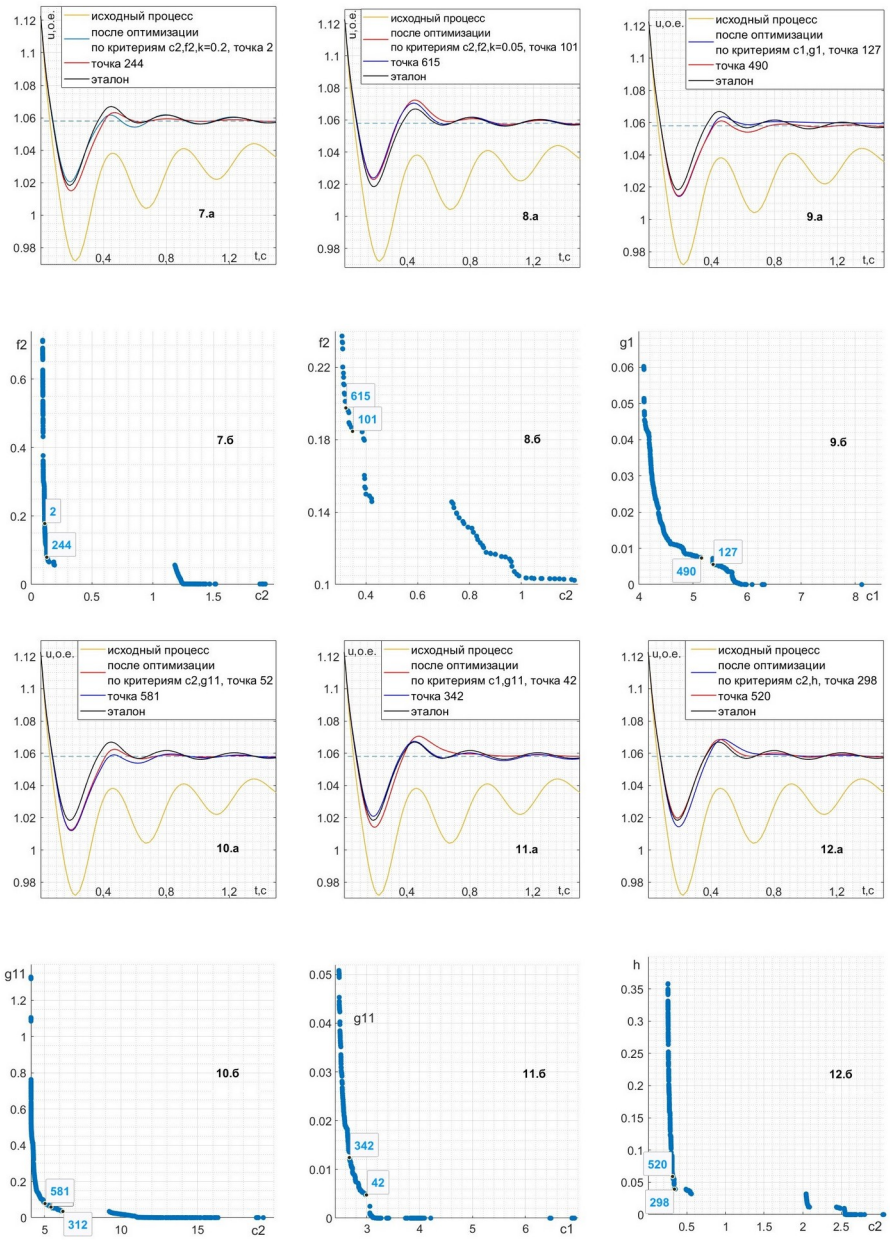

Рисунок 4 - Переходный процесс напряжения генератора до и после двухкритериальной оптимизации (*7.а – 12.а*) и соответствующие фронты Парето (*7.б – 12.б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.5

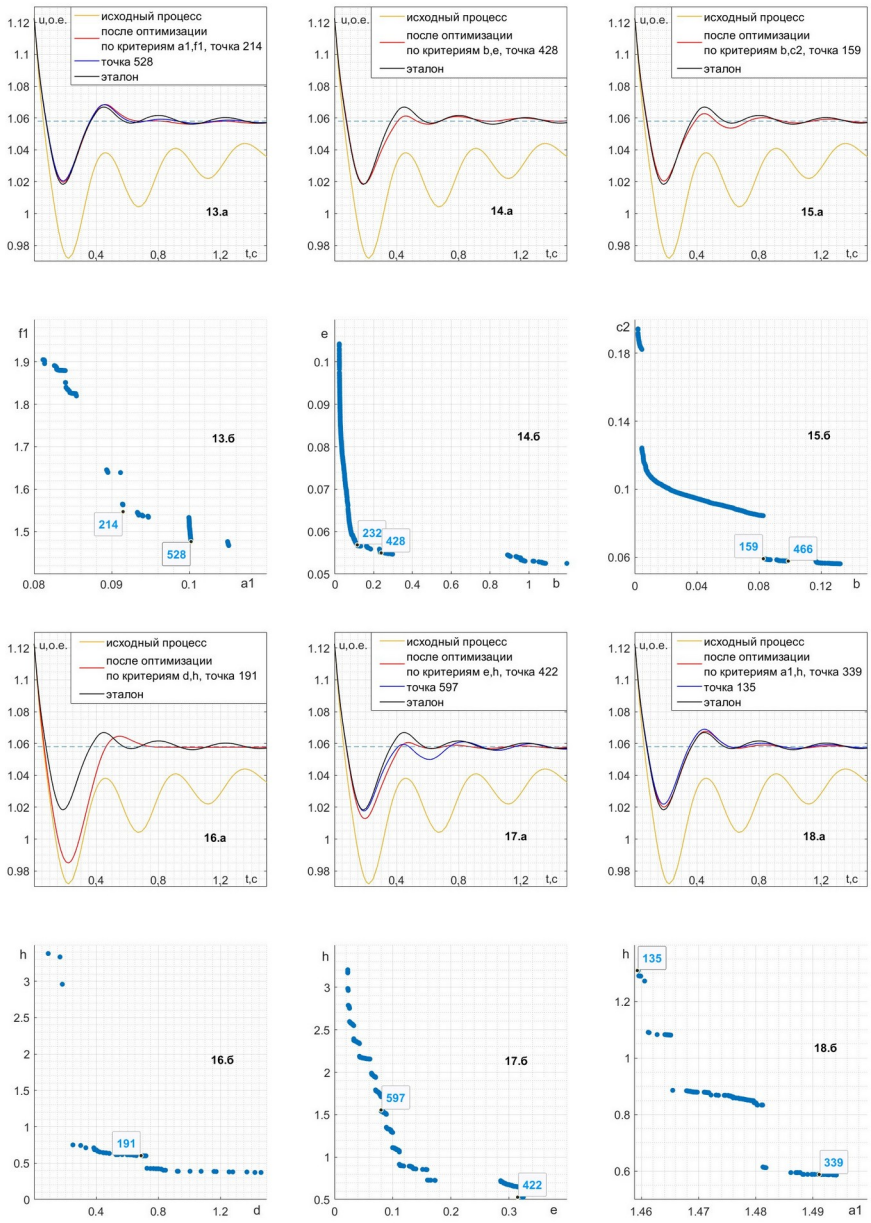

Рисунок 5 - Переходный процесс напряжения генератора до и после двухкритериальной оптимизации (*13.а – 18.а*) и соответствующие фронты Парето (*13.б – 18.б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.6

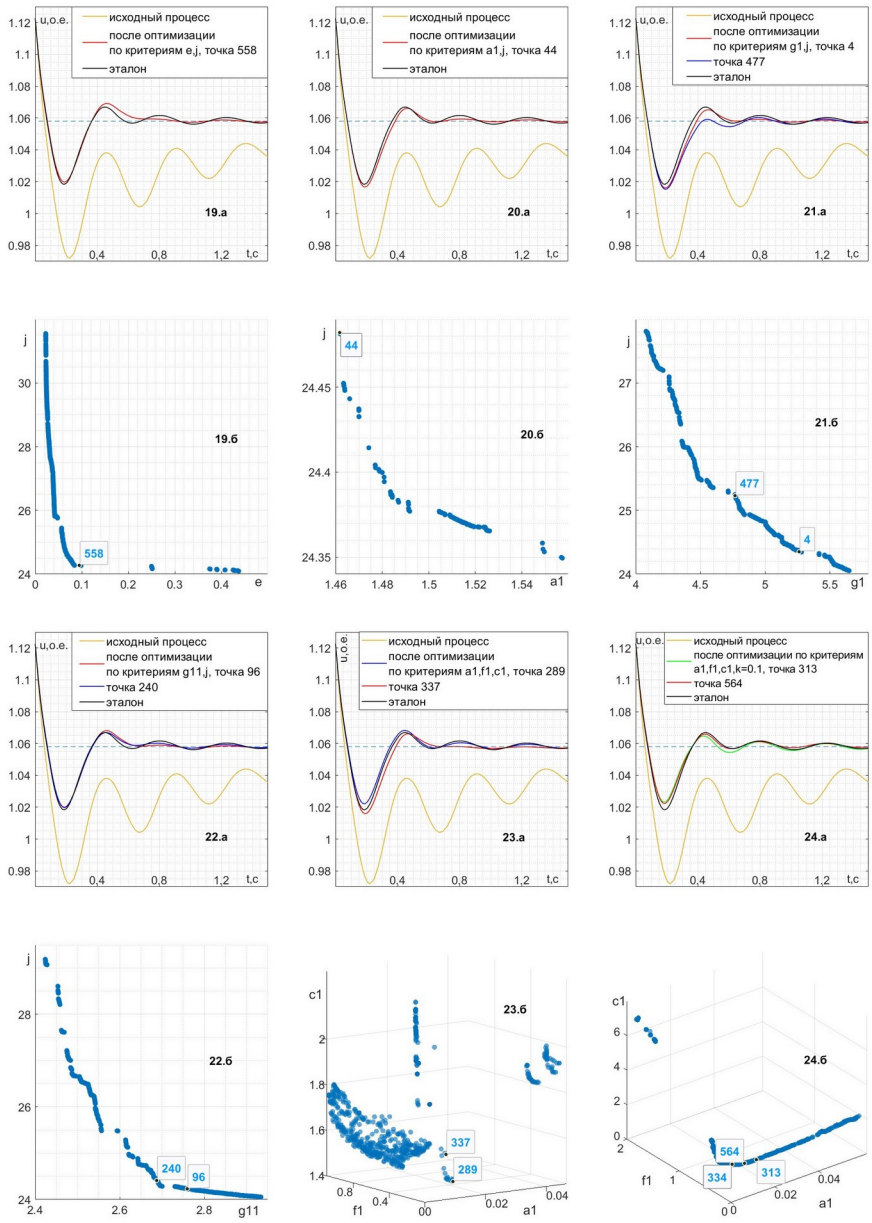

Рисунок 6 - Переходный процесс напряжения генератора до и после двух-или трехкритериальной оптимизации (*19.а –24.а*) и соответствующие фронты Парето (*19.б –24.б*)

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.7

После введения общих для всех расчетов 4-х критериев сравнения переходных процессов и сужения множества Парето до одного решения появляется возможность выбрать наиболее эффективные постановки многокритериальных расчетов путем проверки на Парето-оптимальность. Выбранные расчеты с численными показателями критериев сравнения даны в табл.2.

Таблица 2 - Численные показатели переходных процессов после многокритериальной оптимизации

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.8

№	Название расчета	Мин. значения	Размах колебаний	Откл. от уст. знач. при t=1с.	Перерегулирование
1	a1g2	1,0210	0,0476	0,12	0,0106
2	a3f2	1,0203	0,0467	0,10	0,0090
3	c1f2, k=0,1	1,0196	0,0472	0,10	0,0088
4	c2f2, k=0,05	1,0235	0,0507	0,18	0,0162
5	c1g1	1,0146	0,0464	0,10	0,0039
6	c2g11	1,0126	0,0496	0,05	0,0042
7	c2h	1,0173	0,0512	0,07	0,0105

№	Название расчета	Мин. значения	Размах колебаний	Откл. от уст. знач. при t=1с.	Перерегулирование
8	be	1,0185	0,0433	0,17	0,0038
9	bc2	1,0208	0,0458	0,15	0,0085
10	eh	1,0118	0,0487	0,09	0,0025
11	ej	1,0197	0,0495	0,07	0,0111
12	a1j	1,0164	0,0502	0,06	0,0087
13	g1j	1,0160	0,0492	0,06	0,0072
14	g11j	1,0196	0,0485	0,09	0,0101
15	a1f1c1, k=0,1	1,0182	0,0499	0,08	0,0101

Примечание: в относительных единицах

Все лучшие, выбранные с помощью методики сужения фронта Парето, точки дают примерно одинаковый результат — закон изменения $e_q(t)$, обеспечивающий приемлемый переходный процесс напряжения на шинах генератора (рис. 7).

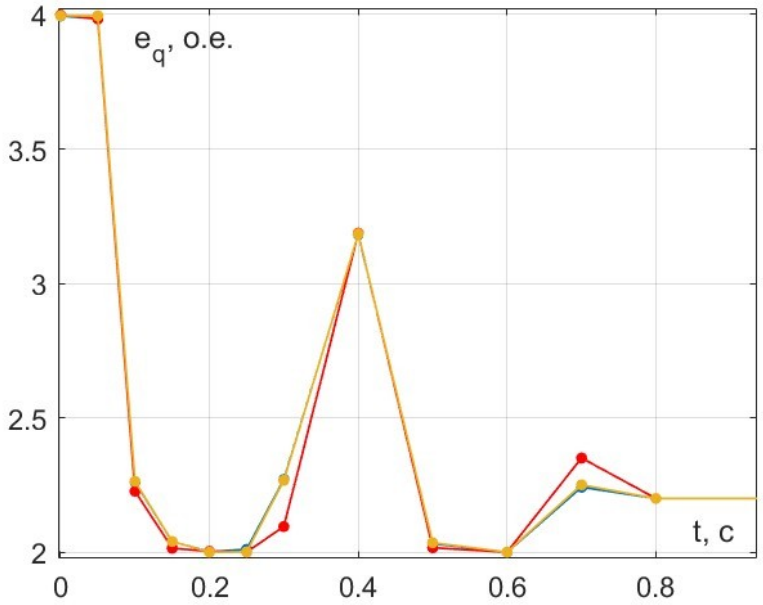

Рисунок 7 - Типовой закон изменения ЭДС возбуждения, обеспечивающий приемлемое затухание переходного процесса напряжения генератора

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.9

Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

· В тех случаях, когда фронт Парето не гладкий, а представляет собой набор отдельных точек и небольших кусков кривых, решение определяется однозначно визуально.

· В тех случаях, когда фронт Парето достаточно гладкий и без разрывов в своей срединной части, то решение выбрать достаточно сложно, поскольку они противоречивы: одни дают меньшую просадку или имеют меньший размах, другие интенсивнее или раньше затухают, третьи совсем лишены перерегулирования и представляют собой монотонно убывающую кривую, при этом дают большую просадку. Однозначный выбор с учетом предпочтений исследователя может быть произведен, например, с помощью методик сужения множества Парето, разработанных В. Д. Ногиным [17], [18], [19], [21]. А поскольку все рассмотренные постановки многокритериальных расчетов имеют одинаково значимые цели, то в соответствии с методикой сужения множества Парето для выбора «лучшего» решения необходимо введение новых критериев сравнения, дополнительной информации — «квант информации».

· Способ построения ограничивающих экспонент существенно влиял на результат оптимизации.

· Критерии, которые сами по себе дают приемлемый результат при однокритериальной оптимизации, имело смысл включать в состав двухкритериальных расчетов, поскольку результат становился лучше (т.е. a1, a2, a3 были удовлетворительными, но a1g2 лучше, чем a1, a3f2 лучше, чем a3 и т.д.)

· Трехкритериальные расчеты имеют смысл только тогда, когда дают результат лучший, чем соответствующие двухкритериальные (но a1f1c1 лучше, чем a1f1).

· После проверки множества 4-хкомпонентных векторов проведенных 25 расчетов на Парето-оптимальность осталось 15 (см. табл.2). Эти 15 вариантов постановки задачи оптимизации равнозначны.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.10

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.163.36.10

Список литературы / References

1. Ali A.K. An optimal design for an automatic voltage regulation system using a multivariable PID controller based on hybrid simulated annealing – white shark optimization / A.K. Ali // Scientific Reports. — 2024. — № 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-79300-7

2. Mojumder R.H Review of meta-heuristic optimization algorithms to tune the PID controller parameters for automatic voltage regulator / R.H Mojumder, N.K. Roy // Electrical Engineering and Systems Science. Systems and Control. — 2024. — Vol. 1. — DOI: 10.48550/arXiv.2409.00538

3. Rais M.C. Comparative Study of Optimization Techniques Based PID Tuning for Automatic Voltage Regulator System / M.C. Rais, F.Z. Dekhandji, A. Recioui et al. // Engineering Proceedings. — 2022. — № 14 (1). — DOI: 10.3390/engproc2022014021

4. Alghamdi S. Optimal PID Controllers for AVR Systems Using Hybrid Simulated Annealing and Gorilla Troops Optimization / S. Alghamdi, H.F. Sindi, M. Rawa et al. // Fractal and Fractional. — 2022. — № 6 (11). — DOI: 10.3390/fractalfract6110682

5. Micev M. Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm / M. Micev, M. Ćalasan, Z.M. Ali et al. // Ain Shams Engineering Journal. — 2021. — № 12 (1). — P. 641–657. — DOI: 10.1016/j.asej.2020.07.010

6. Liu S. Intelligent control method for automatic voltage regulator: An improved coati optimization algorithm-based strategy / S. Liu, Z. Lin, R. Feng et al. // Measurement. — 2025. — № 252. — DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117263

7. Obari J.A. A tunable stabilizing loop-based automatic voltage regulation system for overshoot reduction / J.A. Obari, A. Umar, R.U. Yusufu et al. // Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. — 2025. — № 6 (1). — P. 38–57. — DOI: 10.21595/jmeacs.2025.24865

8. Tumari M.Z.M. Optimizing PID controller parameters for robust automatic voltage regulator system through indirect design approach-2 / M.Z.M. Tumari, M.A. Ahmad, M.R. Ghazali et al. // Global Energy Interconnection. — 2024. — № 7 (5). — P. 682–696. — DOI: 10.1016/j.gloei.2024.10.009

9. Коровкин Н.В. Оптимизация параметров турбогенератора ТВВ-360 по векторному критерию качества / Н.В. Коровкин, М.А. Марков // Известия российской академии наук. Энергетика. — 2020. — № 4. — С. 49–54.

10. Коровкин Н.В. Оптимизация параметров гидрогенератора / Н.В. Коровкин, С.Л. Гулай, Д.А. Верховцев // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2019. — № 4. — С. 42–50.

11. Коровкин Н.В. Сужение множества Парето на основе выборки предпочтений и попарной обработки критериев для оптимизации конструкции турбогенераторов / Н.В. Коровкин, В.И. Бекузин, В.Н. Железняк // Известия российской академии наук. Энергетика. — 2025. — № 2. — С. 95–113.

12. Беляев Н.А. Формирование рациональной перспективной структуры ЕЭС России на основе мультикритериальной оптимизации / Н.А. Беляев, А.Ю. Гурьева, Н.А. Коровкин и др. // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2024. — № 1 (90). — С. 5–19.

13. Ковбаса В.Д. Минимизация отклонений напряжений узлов и потерь в энергосистеме на основе многокритериальной оптимизации / В.Д. Ковбаса, Н.В. Коровкин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. — 2023. — № 2 (89). — С. 31–38.

14. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления / И.Г. Черноруцкий. — Санкт-Петербург: Питер, 2004. — 256 с.

15. Weise T. Global Optimization Algorithm: Theory and Application / T. Weise. — 2009. — URL: https://www.researchgate.net/publication/200622167_Global_Optimization_Algorithm_Theory_and_Application (accessed: 01.09.2025)

16. Аскаров А.Б. Современные направления развития систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов электростанций / А.Б. Аскаров, М.В. Андреев, Е.М. Чикишев и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2021. — № 39. — С. 54–79.

17. Ракитский Ю.В. Разработка и исследование методов численного расчета переходных процессов в задачах электротехники и управления: дис. ... д-ра техн. наук / Ракитский Юрий Васильевич. — Ленинград, 1972.

18. Ногин В.Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход / В.Д. Ногин. — Москва: Физматлит, 2016. — 272 с.

19. Климова О.Н. Сужение множества Парето на основе взаимно зависимой информации с использованием нелинейных функций / О.Н. Климова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: экономика. Информатика. — 2009. — № 9 (64). — С. 152–159.

20. Ногин В.Д. Алгоритм сужения множества Парето при помощи набора квантов нечеткой информации / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2023. — № 4. — С. 82–93.

21. Ногин В.Д. Многокритериальный выбор на основе нечеткой информации / В.Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. — 2019. — № 2. — С. 50–61.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ali A.K. An optimal design for an automatic voltage regulation system using a multivariable PID controller based on hybrid simulated annealing – white shark optimization / A.K. Ali // Scientific Reports. — 2024. — № 14. — DOI: 10.1038/s41598-024-79300-7

2. Mojumder R.H Review of meta-heuristic optimization algorithms to tune the PID controller parameters for automatic voltage regulator / R.H Mojumder, N.K. Roy // Electrical Engineering and Systems Science. Systems and Control. — 2024. — Vol. 1. — DOI: 10.48550/arXiv.2409.00538

3. Rais M.C. Comparative Study of Optimization Techniques Based PID Tuning for Automatic Voltage Regulator System / M.C. Rais, F.Z. Dekhandji, A. Recioui et al. // Engineering Proceedings. — 2022. — № 14 (1). — DOI: 10.3390/engproc2022014021

4. Alghamdi S. Optimal PID Controllers for AVR Systems Using Hybrid Simulated Annealing and Gorilla Troops Optimization / S. Alghamdi, H.F. Sindi, M. Rawa et al. // Fractal and Fractional. — 2022. — № 6 (11). — DOI: 10.3390/fractalfract6110682

5. Micev M. Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm / M. Micev, M. Ćalasan, Z.M. Ali et al. // Ain Shams Engineering Journal. — 2021. — № 12 (1). — P. 641–657. — DOI: 10.1016/j.asej.2020.07.010

6. Liu S. Intelligent control method for automatic voltage regulator: An improved coati optimization algorithm-based strategy / S. Liu, Z. Lin, R. Feng et al. // Measurement. — 2025. — № 252. — DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117263

7. Obari J.A. A tunable stabilizing loop-based automatic voltage regulation system for overshoot reduction / J.A. Obari, A. Umar, R.U. Yusufu et al. // Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. — 2025. — № 6 (1). — P. 38–57. — DOI: 10.21595/jmeacs.2025.24865

8. Tumari M.Z.M. Optimizing PID controller parameters for robust automatic voltage regulator system through indirect design approach-2 / M.Z.M. Tumari, M.A. Ahmad, M.R. Ghazali et al. // Global Energy Interconnection. — 2024. — № 7 (5). — P. 682–696. — DOI: 10.1016/j.gloei.2024.10.009

9. Korovkin N.V. Optimizaciya parametrov turbogeneratora TVV-360 po vektornomu kriteriyu kachestva [Optimization of the TBB-360 Turbogenerator Parameters Using Vector Criteria of Quality] / N.V. Korovkin, M.A. Markov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetics. — 2020. — № 4. — P. 49–54. [in Russian]

10. Korovkin N.V. Optimizaciya parametrov gidrogeneratora [On Optimization Hydro-Generator Parameters by NSGA-II] / N.V. Korovkin, S.L. Gulaj, D.A. Verxovcev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics. — 2019. — № 4. — P. 42–50. [in Russian]

11. Korovkin N.V. Suzhenie mnozhestva Pareto na osnove vy'borki predpochtenij i poparnoj obrabotki kriteriev dlya optimizacii konstrukcii turbogeneratorov [Development of a new method for narrowing the Pareto set based on the cycle of preference sampling and pairwise processing of criteria and its application to the calculation of an electric machine] / N.V. Korovkin, V.I. Bekuzin, V.N. Zheleznyak // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energetics. — 2025. — № 2. — P. 95–113. [in Russian]

12. Belyaev N.A. Formirovanie racional'noj perspektivnoj struktury' EE'S Rossii na osnove mul'tikriterial'noj optimizacii [Developing a rational prospective structure of the unified power system of Russia based on multicriteria optimization] / N.A. Belyaev, A.Yu. Gur'eva, N.A. Korovkin et al. // STC of Unified Power System Proceedings. — 2024. — № 1 (90). — P. 5–19. [in Russian]

13. Kovbasa V.D. Minimizaciya otklonenij napryazhenij uzlov i poter' v e'nergosisteme na osnove mnogokriterial'noj optimizacii [Minimization of node voltage deviations and losses in the power system based on multicriteria optimization] / V.D. Kovbasa, N.V. Korovkin // STC of Unified Power System Proceedings. — 2023. — № 2 (89). — P. 31–38. [in Russian]

14. Chernoruczkij I.G. Metody' optimizacii v teorii upravleniya [Optimization methods in the theory of automatic control] / I.G. Chernoruczkij. — Saint Petersburg: Piter, 2004. — 256 p. [in Russian]

15. Weise T. Global Optimization Algorithm: Theory and Application / T. Weise. — 2009. — URL: https://www.researchgate.net/publication/200622167_Global_Optimization_Algorithm_Theory_and_Application (accessed: 01.09.2025)

16. Askarov A.B. Sovremenny'e napravleniya razvitiya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya vozbuzhdeniya sinxronny'x generatorov e'lektrostancij [Current trends in development of automatic excitation control systems of synchronous generators of power plants] / A.B. Askarov, M.V. Andreev, E.M. Chikishev et al. // PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems. — 2021. — № 39. — P. 54–79. [in Russian]

17. Rakitskiy Yu.V. Razrabotka i issledovanie metodov chislennogo rascheta perekhodnyh processov v zadachah elektrotekhniki i upravleniya [Development and research of methods for numerical calculation of transient processes in electrical engineering and control problems]: dis. ... of PhD in Technical Sciences / Rakitskiy Yuri Vasilyevich. — Leningrad, 1972. [in Russian]

18. Nogin V.D. Suzhenie mnozhestva Pareto: aksiomaticheskij podxod [Pareto set reduction: a quantitative approach] / V.D. Nogin. — Moscow: Fizmatlit, 2016. — 272 p. [in Russian]

19. Klimova O.N. Suzhenie mnozhestva Pareto na osnove vzaimno zavisimoj informacii s ispol'zovaniem nelinejny'x funkcij [The Pareto set reduction based on mutually dependent information and with using of nonlinear functions] / O.N.

Klimova // Belgorod State University. Scientific Notes. Series: Economics. Information technologies. — 2009. — № 9 (64). — P. 152–159. [in Russian]

20. Nogin V.D. Algoritm suzheniya mnozhestva Pareto pri pomoshhi nabora kvantov nechetkoj informacii [Algorithm for the reduction of the Pareto set using a collection of fuzzy information quanta] / V.D. Nogin // Artificial Intelligence and Decision Making. — 2023. — № 4. — P. 82–93. [in Russian]

21. Nogin V.D. Mnogokriterial'ny'j vy'bor na osnove nechetkoj informacii [Multicriteria choice based on fuzzy information] / V.D. Nogin // Artificial Intelligence and Decision Making. — 2019. — № 2. — P. 50–61. [in Russian]