

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1087-1102

STRATEGIES FOR THE TARGET FUNCTION FORMATION AT THE PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE AUTOMATED ELECTRIC DRIVES OF WATER TRANSPORT OBJECTS

A. V. Saushev, N. V. Belousova, E. V. Bova

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issues of the target function formation when solving parametric optimization problems in relation to the automated electric drives of water transport objects. The complexity of solving the problem is due to its multi-criteria nature and the lack of reasonable methods for solving it for ship and shore electric drives. It is shown that at the stage of parametric synthesis, the controlled parameters of the main elements of the electric drive are optimized. At the same time, in the case of setting up the electric drive, such parameters are the gain coefficients and time constants of its control system. The analysis shows that quite often one most important quality indicator, which characterizes the speed of the electric drive, is chosen as the target function. It is shown that in recent years, other indicators that characterize accuracy, energy costs, and parametric reliability are also introduced into consideration. It is noted that the most important indicator that fully characterizes the probability of trouble-free operation of the electric drive is the reserve of efficiency. Three strategies for the formation of the target function are considered. The first of them involves the search for the optimum by the criterion of maximizing the minimum margin of efficiency. This approach is recommended for responsible electric drives. A distinctive feature of the proposed algorithm for solving the problem is the use of a priori information about the change rates of the controlled parameters. The second strategy involves the option of constructing the objective function, which is provided by a given working capacity stock, and the search for optimum is carried out according to the generalized criterion that takes into account the performance and energy efficiency and is based on the principle of equality. The third strategy involves the formation of the target function by way of an additive form as a generalized indicator of the economic efficiency of the electric drive, built on the basis of all considered quality indicators. At the same time, functional dependencies are established between this indicator and each quality indicator. This allows you to write the desired dependency in the form of an additive function. The algorithms for solving the problem in relation to the first strategy, which are illustrated by specific examples, are considered in the paper.

Keywords: automated electric drive, target function, working capacity stock, quality indicators, parametric synthesis.

For citation:

Saushev, Alexander V., Nadezhda V. Belousova, and Elena V. Bova. "Strategies for the target function formation at the parametric synthesis of the automated electric drives of water transport objects." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1087–1102. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1087-1102.

УДК 658.512

СТРАТЕГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ОБЪЕКТОВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

А. В. Саушев, Н. В. Белоусова, Е. В. Бова

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы формирования целевой функции при решении задач параметрической оптимизации применительно к автоматизированным электроприводам объектов водного транспорта. Сложность решения задачи обусловлена ее многокритериальностью и отсутствием обоснованных методов ее решения для судовых и береговых электроприводов. Показано, что на этапе параметрического синтеза

оптимизируемыми являются управляемые параметры основных элементов электропривода. При этом, в случае настройки электропривода, такими параметрами являются коэффициенты усиления и постоянные времени его системы управления. Анализ показывает, что достаточно часто в качестве целевой функции выбирается один наиболее важный показатель качества, который характеризует быстродействие электропривода. Показано, что в ряде публикаций в рассмотрение вводятся и другие показатели, которые характеризуют точность, энергетические затраты и параметрическую надежность. Отмечается, что важнейшим показателем, в полной мере характеризующим вероятность безотказной работы электропривода, является запас работоспособности. Рассматриваются три стратегии формирования целевой функции. Первая из них предполагает поиск оптимума по критерию максимизации минимального запаса работоспособности. Такой подход рекомендуется для электроприводов ответственного назначения. Отличительной чертой предложенного алгоритма решения задачи является использование априорной информации о скоростях изменения управляемых параметров. Вторая стратегия предполагает такой вариант построения целевой функции, при котором обеспечивается заданный запас работоспособности, а поиск оптимума осуществляется по обобщенному критерию, учитывающему показатели быстродействия и энергетической эффективности и построенному на основе принципа равенства. Третья стратегия предполагает формирование целевой функции в виде аддитивной формы как обобщенного показателя экономической эффективности электропривода, построенного на основе всех рассматриваемых показателей качества. При этом устанавливаются функциональные зависимости между этим показателем и каждым показателем качества. Это позволяет записать искомую зависимость в виде аддитивной функции. В работе рассматриваются алгоритмы решения задачи применительно к первой стратегии, которые иллюстрируются конкретными примерами.

Ключевые слова: автоматизированный электропривод, целевая функция, запас работоспособности, показатели качества, параметрический синтез.

Для цитирования:

Саушев А. В. Стратегии формирования целевой функции при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов объектов водного транспорта / А. В. Саушев, Н. В. Белоусова, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1087–1102. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1087-1102.

Введение (Introduction)

Оптимизация электротехнических систем (ЭТС) на этапе параметрического синтеза предполагает решение двух основных задач: определение номинальных значений внутренних параметров системы и допустимых пределов их изменения [1]. Внутренними параметрами являются параметры элементов ЭТС, характеризующие состояние и свойства самой системы. При параметрическом синтезе они определяют вектор X управляемых или варьируемых параметров, которые при решении задач оптимизации и технической диагностики также называют *первичными параметрами*. В качестве ЭТС в работе рассматривается автоматизированный электропривод (АЭП) — электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение исполнительного органа рабочей машины и управления этим движением, при котором часть операций выполняют соответствующие устройства без участия оператора. Практически все современные электроприводы на водном транспорте являются автоматизированными.

Управляемыми параметрами АЭП являются параметры его основных функциональных элементов — преобразователей электрической энергии, электромеханических и механических преобразователей, системы управления электропривода. К ним, например, относятся: активные и реактивные сопротивления электрических машин и преобразователей энергии, коэффициенты усиления и постоянные времени регуляторов системы управления. Для упрощения задачи, без потери общности полученных результатов, будем считать, что рассматривается режим настройки АЭП. При этом параметры всех функциональных элементов электропривода заданы, а варьируемыми являются параметры его системы управления.

Математическая функциональная модель АЭП представляет собой алгоритм вычисления вектора выходных параметров Y при заданных векторах первичных параметров X и внешних параметров V . Внешние параметры характеризуют свойства внешней по отношению к электроприво-

ду среды и оказывают влияние на его функционирование. Выходные параметры характеризуют свойства АЭП, интересующие потребителя. Они представляют собой параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных АЭП и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность АЭП. В работах [1]–[3] показано, что выходными параметрам ЭТС, а, следовательно, и АЭП на стадии параметрического синтеза принципиально могут быть показатели назначения, параметрической надежности и экономичности.

Для рассматриваемого случая параметрический синтез АЭП, как правило, сводится к задаче настройки регуляторов. При этом достаточно часто используют стандартные настройки на технический и симметричный оптимум, имеющие известные недостатки [3]–[7] — в процессе настройки рассматриваются лишь два динамических показателя: время переходного процесса и максимальное перерегулирование. При этом оптимизация коэффициентов усиления и постоянных времени регуляторов осуществляется по критерию главного показателя (время переходного процесса), недостатки которого достаточно подробно описаны, например, в работе [1].

Все более широкое применение на практике находят регуляторы с наблюдателями состояния [7], достоинством которых является гибкая структура регулятора и необходимость наличия лишь одного датчика выходной координаты объекта управления. Для параметрической оптимизации АЭП с такими регуляторами достаточно часто используется *метод модального синтеза на основе стандартных распределений корней характеристического полинома* [7]. Однако при этом не учитываются показатели параметрической надежности и возможные ограничения координат, присущие АЭП, что особенно важно для судовых и береговых объектов электроприводов [1], [2], [8].

В работах [1], [7], [9] отмечается, что применение современных методов параметрической оптимизации позволяет учесть весь комплекс требований, предъявляемых к системам автоматического управления электроприводов, а основной трудностью решения данной задачи являются проблемы формирования критериев качества управления, большинство которых носят косвенный характер, а также сходимости алгоритмов поиска глобального экстремума выбранной целевой функции. Синтез АЭП, включая их системы управления с регуляторами наблюдателями состояния, следует осуществлять не на основе косвенных критериев оптимальности, а в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству управления АЭП, включая показатели назначения (показатели быстродействия, точности), экономичности (энергетической эффективности) и параметрической надежности (показатели робастности, запас работоспособности). Таким образом, вопрос оптимального параметрического синтеза АЭП и систем их управления является задачей многокритериальной (векторной) оптимизации. Методологические аспекты решения задач многокритериальной оптимизации динамических систем продолжают оставаться актуальными и востребованными.

Для формирования целевой функции применительно к АЭП в работе [7] предложено использовать расширенный критерий качества, включающий нормированные показатели быстродействия \bar{Y}_1 , точности \bar{Y}_2 , параметрической грубости \bar{Y}_3 и энергетических затрат на управление \bar{Y}_4 :

$$\bar{Y}_m = 1 - \left(\prod_{i=1}^m \bar{Y}_i \right)^{1/m}, \quad (1)$$

где $m = 4$ — количество показателей качества управления в составе критерия.

В качестве показателя быстродействия \bar{Y}_1 принимается время нарастания переходной характеристики t_n , а в качестве показателя точности \bar{Y}_2 — средний модуль относительного отклонения выходной координаты системы на интервале времени от t_n до t_n :

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{N - T} \sum_{j=T}^N \left| \frac{Y_j - Y_3}{Y_3} \right| \cdot 100 \%,$$

где $T = t_n / T_0$ и $N = t_n / T_0$ — относительное время нарастания и переходного процесса; T_0 — период квантования.

В качестве показателя робастности \bar{Y}_3 , который косвенно характеризует параметрическую надежность АЭП, предлагается использовать средний модуль отклонения переходной характеристики системы при вариации параметров объекта управления относительно расчетных значений за период переходного процесса:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{Y_j - Y_j^*}{Y_j} \right| \cdot 100 \%,$$

где Y_j, Y_j^* — соответственно значения выходной координаты при расчетных и измененных параметрах системы.

В качестве показателя энергетических затрат на управление \bar{Y}_4 предлагается принять пиковое значение тока электродвигателя, ограниченное перегрузочной способностью силовой части системы.

Основным недостатком критерия (1) служит его мультипликативная форма задания, которая является субъективной и имеет известные ограничения [1]. Анализ библиографических источников показывает, что для большинства АЭП объектов водного транспорта (ОВТ) главным является соблюдение требования высокой надежности. Для АЭП, характеризующихся параметрической нестабильностью, особую актуальность приобретает требование обеспечения параметрической надежности. Применительно к решаемой задаче это означает, что важнейшим параметром оптимизации является запас работоспособности АЭП, который необходимо максимизировать. В работах [1], [10] доказано, что запас работоспособности в полной мере характеризует важнейший показатель безотказности — вероятность безотказной работы.

Под запасом работоспособности будем понимать степень приближения вектора \mathbf{X}_i фактического состояния системы к его предельно допустимому значению \mathbf{X}_n . Множество предельно допустимых значений вектора \mathbf{X}_n определяется границей области работоспособности АЭП. Область работоспособности $\mathbf{G} = \mathbf{P} \cap \mathbf{M}$ устанавливает множество допустимых значений внутренних параметров, при которых выполняются все требования, предъявляемые к выходным параметрам АЭП [11]. Она определяется условиями работоспособности, которые в случае двухсторонних ограничений параметров имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Y_{j\min} \leq Y_j = F_j(\mathbf{X}) \leq Y_{j\max}, \quad j = \overline{1, m}; \\ X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $Y_{j\max}(X_{i\max}), Y_{j\min}(X_{i\min})$ — соответственно максимально и минимально допустимые значения j -го выходного Y_j (i -го внутреннего X_i) параметра; F — оператор, устанавливающий связь между внутренними и выходными параметрами; \mathbf{D} и \mathbf{P} — допусковые области, определяемые, соответственно, первым и вторым неравенствами (2).

При этом области \mathbf{D} в пространстве внутренних параметров будет соответствовать допусковая область \mathbf{M} . Степень приближения вектора \mathbf{X}_i при отсутствии информации о скоростях изменения первичных параметров АЭП определяется расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки области работоспособности. При наличии такой информации в рассмотрение вводятся коэффициенты $k_1, \dots, k_i, \dots, k_n$, характеризующие эти скорости по каждому первичному параметру. В относительных единицах, считая коэффициент k_1 наибольшим, получим $1, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$, где $\alpha_i = k_i/k_1, i = \overline{1, n}$.

Обозначим через $[\mathbf{X}_r] = [X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rn}]$ точку на границе области работоспособности. Минимальное расстояние вектора параметров $\mathbf{X}_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}]$ от вектора \mathbf{X}_r по всем значениям граничных точек при отсутствии данных о значениях коэффициентов α_i будет определять запас работоспособности системы

$$\rho = \min_{[\mathbf{X}_r]} \sqrt{(X_1 - X_{r1})^2 + \dots + (X_i - X_{ri})^2 + \dots + (X_n - X_{rn})^2}.$$

Если определены номинальные значения параметров $[X_n] = [X_{1n}, X_{2n}, \dots, X_{nn}]$, то может быть определен и номинальный запас работоспособности. Запишем это выражение для случая, когда известны коэффициенты α_i . При этом

$$\rho_n = \min_{[X_i]} \sqrt{(X_{1n} - X_{r1})^2 + \dots + (X_{in} - \alpha_i X_{ri})^2 + \dots + (X_{nn} - \alpha_n X_{rn})^2}.$$

В относительных единицах запас работоспособности определяется в виде

$$\lambda(X) = \rho / \rho_n. \quad (3)$$

В статье рассматриваются известные подходы к решению задачи параметрической оптимизации АЭП и предлагаются оригинальные способы формирования целевой функции в условиях многокритериальности, которые отличаются учетом информации о скоростях изменения первичных параметров АЭП и новым подходом к синтезу обобщенного показателя качества.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим возможные стратегии формирования целевой функции при параметрическом синтезе АЭП применительно к объектам водного транспорта. Во всех случаях, как это отмечается в работах [1], [8], [9], [12], необходимым условием является учет запаса работоспособности АЭП.

Стратегия 1. В качестве целевой функции при параметрическом синтезе АЭП используется запас работоспособности, который необходимо максимизировать. Такой подход, рассматриваемый в работах [1], [3], [9], рекомендуется для мощных АЭП, а также для АЭП объектов водного транспорта ответственного назначения, к которым, например, можно отнести рулевой электропривод, гребной электропривод, электроприводы мощных судовых электроэнергетических систем, электропривод двухстворчатых ворот шлюза.

В зависимости от наличия и вида априорной информации об области работоспособности и статистической информации о скоростях изменения первичных параметров можно выделить различные методы и алгоритмы решения задачи, которые достаточно хорошо разработаны. Универсальным методом решения задач параметрического синтеза ЭТС является метод сужающихся областей (метод Саушева), который с высокой точностью впервые позволил найти глобальный оптимум для произвольной формы области работоспособности при практически произвольной размерности пространства первичных параметров ЭТС.

В зависимости от вида АЭП или его элемента разработаны различные алгоритмы решения задачи [1], которые применимы для всех возможных вариантов построения систем управления электроприводов. При наличии информации о границе области работоспособности в виде множества граничных точек разработан метод электрической аналогии, который дал возможность синтезировать целевую функцию, позволяющую использовать любой метод нелинейного программирования для поиска оптимума [1]. В работе [2] рассматривается модификация известных алгоритмов, которая учитывает степень влияния первичных параметров на показатели качества АЭП.

Стратегия 2. В качестве целевой функции при параметрическом синтезе АЭП используются: *вариант 1* — минимум обобщенного показателя качества при обеспечении заданного запаса работоспособности электропривода; *вариант 2* — максимум запаса работоспособности при обеспечении заданного запаса работоспособности остальных показателей качества электропривода. Для формирования обобщенного критерия оптимальности используется принцип минимакса, являющийся, по сути, следствием принципа равновесия Нэша, успешно применяемым для решения различных экономических задач [13].

Стратегия 3. Данная стратегия предполагает формирование целевой функции, исходя из предположения, что все возможные показатели АЭП при решении задачи параметрического синтеза не только имеют заданные ограничения, но и определяют экономическую эффективность (ЭЭ) электропривода.

Рассмотрим важнейшее свойство АЭП — его быстродействие, которое чаще всего характеризуется временем переходного процесса $t_{\text{пер}}$. Данный показатель имеет известные ограничения —

может изменяться от нуля до своего предельного значения, которое определяется конкретным электроприводом и задается на стадии составления технического задания. При превышении этого значения АЭП теряет работоспособное состояние и неспособен выполнять возложенные на него функции. Экономическая эффективность является функцией показателя t_{III} . Чем меньше величина t_{III} , тем больше значение ЭЭ. Это обусловлено тем, что быстродействие АЭП определяет целый ряд других его показателей, например, точность регулирования, плавность регулирования, стабильность электромагнитного момента электрической машины (значения пульсаций момента), которые, в свою очередь, характеризуют ЭЭ. Зависимость ЭЭ от показателей быстродействия в общем случае является нелинейной и может быть получена при исследовании конкретного типа электропривода.

Аналогичные зависимости могут быть получены для показателей точности и энергетических затрат на управление \bar{Y}_4 . Очевидно, что ЭЭ определяется также запасом работоспособности АЭП (3), но эта зависимость носит дискретный характер — 0, при изменении относительного значения запаса работоспособности в пределах от нуля до единицы: $\lambda(\mathbf{X}) \in [0; 1]$, и конкретное фиксированное значение при $\lambda(\mathbf{X}) > 1$. Таким образом, в общем случае $\text{ЭЭ} = f(Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$. Поскольку показатели Y_j определяют затраты, характеризуемые конкретной ценой, полученная зависимость может быть представлена аддитивной функцией

$$\text{ЭЭ} = \sum_{j=1}^m b_j Y_j,$$

где b_j — весовые коэффициенты.

Данная стратегия позволяет свести задачу векторной оптимизации к задаче скалярной оптимизации и гарантировать получение оптимального решения. Вместе с тем требуются дополнительные исследования по определению вида функциональной связи между показателем ЭЭ и конкретными значениями показателей качества, которые выходят за рамки настоящей работы.

Результаты (Results)

В статье изложены вопросы формирования целевой функции при параметрическом синтезе АЭП на основе стратегии 1. Рассмотрим модификацию метода поиска оптимального решения, учитывающего информацию о скоростях изменения настраиваемых параметров, который основан на методе сужающихся областей исходя из предположения, что каждая из функций-ограничений неравенства (2): $Y_{j\text{max}} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\text{min}} \geq 0$, аппроксимирована конечным множеством линейных гиперповерхностей f_j и область \mathbf{M} задана в виде следующей системы неравенств:

$$\sum_{j=1}^{2m} f_j(\mathbf{X}) \geq 0;$$

$$f_j(\mathbf{X}) = b_{j0} + \sum_{i=1}^n b_{ji} X_i \geq 0.$$

Методы аппроксимации области работоспособности системой линейных неравенств рассмотрены, например, в работе [1]. Рассмотрим метод, позволяющий сформировать такую целевую функцию, для которой возможно применение любого известного алгоритма поиска оптимального решения и при этом достигается максимально возможный или заданный запас работоспособности АЭП.

Формирование целевой функции. В пространстве R^n внутренних параметров введем метрику l , которая является функцией координат двух любых точек этого пространства, например точек A и B . При этом $l = \sqrt{\sum_{i=1}^n \mu_i (X_i(A) - X_i(B))^2}$, где $X_i(A)$, $X_i(B)$ — координаты векторов точек A и B соответственно; μ_i — нормирующий множитель по i -й координате параметров \mathbf{X} .

Если одна из точек (например, точка A) является граничной точкой области работоспособности, а точка B находится внутри этой области и ее координаты характеризуют состояние АЭП

в рассматриваемый момент времени, то данная метрика будет определять запас работоспособности системы и служить критерием поиска координат оптимальной точки.

Для формирования целевой функции представим область работоспособности в виде единого аналитического выражения. С этой целью воспользуемся свойствами логических R -функций [1]. В общем виде можно записать:

$$\left(\dots \left(\left(\varphi_1 \wedge_{\alpha_1}^k \varphi_2 \right) \wedge_{\alpha_2}^k \varphi_3 \right) \wedge_{\alpha_3}^k \dots \right) \wedge_{\alpha_{(g-1)}}^k \varphi_d = \wedge_{g=1}^d \varphi_g \geq 0, \quad (4)$$

где $\wedge_{\alpha_g}^k$ — R конъюнкция R функций φ_g , обеспечивающая возможность взятия k производных; $\alpha_g, g = \overline{1, d}$ — величины, принадлежащие интервалу $\alpha_g \in [-1; 1]$.

Если все ограничения (1) являются двухсторонними, то $d = 2(m + n)$. При этом для функций-ограничений $f_j(\mathbf{X}) : Y_{j\max} - F_j(\mathbf{X}) \geq 0$ и $F_j(\mathbf{X}) - Y_{j\min} \geq 0$ — $\varphi_g = f_j(\mathbf{X}), g = j, j = \overline{1, 2m}$, а для функций-ограничений $f_i(\mathbf{X}) : X_{i\max} - X_i \geq 0$ и $X_i - X_{i\min} \geq 0$ — $\varphi_g = f_i(\mathbf{X}), g = i, i = \overline{1, 2n}$.

В формуле (4) могут быть опущены скобки, тогда конечный результат не будет зависеть от последовательности свертки R -функций φ_g . Поскольку для построения целевой функции не требуется взятие производных, принимая $\alpha = 1$, получим

$$\varphi_1 \wedge \varphi_2 = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|). \quad (5)$$

В развернутой форме записи функция $G = G(\mathbf{X})$, аналитически описывающая область работоспособности \mathbf{G} , примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = \varphi_{(d)} = 0,5(\varphi_{(d-1)} + \varphi_d - |\varphi_{(d-1)} - \varphi_d|); \\ \varphi_{(d-1)} = 0,5(\varphi_{(d-2)} + \varphi_{d-1} - |\varphi_{(d-2)} - \varphi_{d-1}|); \\ \dots \\ \varphi_{(g)} = 0,5(\varphi_{(g-1)} + \varphi_g - |\varphi_{(g-1)} - \varphi_g|); \\ \dots \\ \varphi_{(3)} = 0,5(\varphi_{(2)} + \varphi_3 - |\varphi_{(2)} - \varphi_3|); \\ \varphi_{(2)} = 0,5(\varphi_1 + \varphi_2 - |\varphi_1 - \varphi_2|). \end{array} \right. \quad (6)$$

Уравнение $G = 0$ определяет границу области работоспособности. Представим функцию G в виде R конъюнкции функций $M = M(\mathbf{X})$ и $P = P(\mathbf{X})$, описывающих, соответственно, области \mathbf{M} и \mathbf{P} . В результате, на основе уравнения (5), получим:

$$G = 0,5(M + P - |M - P|) \geq 0. \quad (7)$$

Для аналитического описания областей \mathbf{M} и \mathbf{P} в системе уравнений (6) нужно произвести следующие замены: $g = j, d = 2m, G = M$ — для описания области \mathbf{M} и $g = i, d = 2n, G = P$ — для описания области \mathbf{P} . В случае, если $m = n = 2$, а внутренние параметры заданы в относительных единицах, причем $X_{1\min} = X_{2\min} = -1, X_{1\max} = X_{2\max} = 1$, области \mathbf{M} и \mathbf{P} запишутся в виде следующих неравенств:

$$\begin{aligned} M &= 0,25(Y_{1\max} + Y_{2\max} - Y_{1\min} - Y_{2\min} - |2F_1(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}| - \\ &- |2F_2(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |Y_{1\max} + Y_{2\min} - Y_{1\min} - Y_{2\max} + \\ &+ |2F_1(X_1, X_2) - Y_{2\max} - Y_{2\min}| - |2F_2(X_1, X_2) - Y_{1\max} - Y_{1\min}|) \geq 0; \\ P &= 0,5(2 - |X_1| - |X_2| - ||X_2| - |X_1||) \geq 0. \end{aligned}$$

Используя основное свойство R -функций, заключающееся в том, что логические и простейшие арифметические операции над ними образуют новую R -функцию, можно сделать вывод о том,

что аналитические описания областей \mathbf{M} , \mathbf{P} и \mathbf{G} также будут являться R -функциями. Получим уравнение границы области \mathbf{G}_μ , расположенной эквидистантно области работоспособности \mathbf{G} и внутри нее при условии, что скорости изменения настраиваемых параметров одинаковы граничные точки областей \mathbf{G} и \mathbf{G}_μ будут располагаться относительно друг друга по направлению градиента к функции $G(\mathbf{X})$ на одинаковом расстоянии l .

Рассмотрим две граничные точки $N \in f_j(\mathbf{X}) \in \mathbf{M}$ и $N^\mu \in f_j^\mu(\mathbf{X}) \in \mathbf{M}_\mu$. Координаты точки N^μ можно выразить через координаты точки N по формуле

$$X_i^\mu = X_i + \frac{(\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i)l}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|} = X_i + \frac{b_{ji}}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|}l, \quad \text{grad } f_j(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f_j(\mathbf{X})/\partial X_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_{ji}^2},$$

откуда

$$f_j^\mu(\mathbf{X}) = f_j(\mathbf{X}) - |\text{grad } f_j(\mathbf{X})|l. \quad (8)$$

Область \mathbf{M}_μ аналитически описывается аналогично области \mathbf{M} по формуле (7), в которой $\varphi_g = f_j^\mu(\mathbf{X})$, а функция M заменяется функцией M_μ .

В том случае, если граничная точка принадлежит области \mathbf{P} , координаты точки N^μ определяются выражением $X_i^\mu = X_i \pm l$. Аналитическое описание области \mathbf{P}_μ аналогично описанию области \mathbf{P} , при этом $\varphi_g = f_i^\mu(\mathbf{X})$. На основании формулы (7) получим $G_\mu = 0,5(M_\mu + P_\mu - |M_\mu - P_\mu|) \geq 0$.

В работе [14] показано, что численное значение R -функции G_μ определяется значением функции, которое является наименьшим среди всех R -функций $\varphi_g(\mathbf{X})$ и для любой точки каждой из гиперповерхностей $f_j^\mu \subset \mathbf{G}_\mu$ численное значение этой функции одинаково. Таким образом, функция G_μ принципиально может быть использована в качестве целевой функции при параметрическом синтезе АЭП по критерию запаса работоспособности. Недостатком этой функции является невозможность использования поисковых методов оптимизации, поскольку для разных граничных точек области \mathbf{G}_μ , функция G_μ не является постоянной, а принимает значение из множества возможных значений: $\{f_1^\mu, f_2^\mu, \dots, f_{2m}^\mu, l\}$.

Построим R -функцию, которая будет принимать единственное значение для любой точки, находящейся на одинаковом расстоянии от границы области работоспособности при условии, что скорости изменения настраиваемых параметров одинаковы. С этой целью, на основании (8), сформируем R -функции:

$$\varphi_j^l(\mathbf{X}) = \frac{f_j^\mu(\mathbf{X})}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|} = \frac{f_j(\mathbf{X})}{|\text{grad } f_j(\mathbf{X})|} - l.$$

Для любой внутренней точки области работоспособности, находящейся на одинаковом расстоянии от ее ближайшей граничной точки, вычисленное значение функции $\varphi_j^l(\mathbf{X})$ будет равно l . Искомая функция будет иметь вид

$$G_l = 0,5(M_l + P_l - |M_l + P_l|). \quad (9)$$

Рассмотрим случай, когда скорости изменения настраиваемых параметров различны. При этом введем в рассмотрение функцию

$$s_j(\mathbf{X}) = b_{j0} + \sum_{i=1}^n b_{ji} \alpha_i X_i \geq 0,$$

где α_i — коэффициенты, определяющие скорости изменения настраиваемых параметров.

Запишем выражение для градиента этой функции:

$$\text{grad } s_j(\mathbf{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial s_j(\mathbf{X})/\partial X_i)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i b_{ji}^2}.$$

Искомая целевая функция примет вид

$$\varphi'_j(\mathbf{X}) = \frac{f_j(\mathbf{X})}{|\text{grad } s_j(\mathbf{X})|} - l = b_{j0} + \sum_{i=1}^n b_{ji} X_i - l \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i b_{ji}^2}. \quad (10)$$

В случае, если $n = 2$, на основании формулы (10), получим

$$\varphi'_j(X_1, X_2) = \frac{f_j(X_1, X_2)}{|\text{grad } s_j(X_1, X_2)|} - l = b_{j0} + b_{j1} X_1 + b_{j2} X_2 - l \sqrt{a_1 b_{j1}^2 + a_2 b_{j2}^2}. \quad (11)$$

Принимая для сокращения формы записи $\alpha_1 = 1, d = \alpha_2/\alpha_1$, на основании формулы (11), получим

$$\varphi'_j(X_1, X_2) = f_j(X_1, X_2) - l \sqrt{b_{j1}^2 + d b_{j2}^2}. \quad (12)$$

В формуле (9) функция M_l вычисляется аналогично функции M_μ . Для этого в формуле (7) следует заменить φ_g на $\varphi'_j(\mathbf{X})$, а вместо M записать M_l . Функция P_l тождественно равна функции P_μ . Полученная функция G_l может являться целевой функцией при оптимизации ЭТС на максимум запаса работоспособности, причем для вычисления координат оптимальной точки по критерию $\max G_l$ может быть использован любой поисковый метод оптимизации. Заикливание при поиске исключается.

Важным свойством функции G_l является возможность распознавания состояния АЭП. Если вычисленное значение функции положительное, то система находится в работоспособном состоянии. Если результат окажется отрицательным, то электропривод находится в неработоспособном состоянии. В том случае, если значения внутренних параметров выражены в относительных единицах, вычисленное в любой внутренней точке области работоспособности значение функции будет характеризовать относительное значение запаса работоспособности АЭП, принадлежащее интервалу $[-1; 1]$.

При использовании для оптимизации градиентных методов, характеризующихся наибольшим быстродействием, при построении функции G_l следует использовать формулу (4), которая позволяет осуществлять операции дифференцирования.

Пример 1. Пусть внутренние параметры АЭП заданы в относительных единицах, область работоспособности совпадает с областью \mathbf{M} и определяется следующими ограничениями:

$$\begin{aligned} f_1(X_1, X_2) &= X_1 + 8X_2 - 1 \geq 0; f_2(X_1, X_2) = -X_1 + 1,2X_2 + 0,7 \geq 0; \\ f_3(X_1, X_2) &= 4,5X_1 - X_2 - 1,45 \geq 0; f_4(X_1, X_2) = -6,5X_1 - 2,7X_2 + 6,15 \geq 0; \\ G &= f_1(X_1, X_2) \wedge f_2(X_1, X_2) \wedge f_3(X_1, X_2) \wedge f_4(X_1, X_2). \end{aligned}$$

На основании формул (9) и (12) целевая функция будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} G_l &= 0,5(\varphi_{12}(X_1, X_2) + \varphi_{34}(X_1, X_2) - |\varphi_{12}(X_1, X_2) - \varphi_{34}(X_1, X_2)|); \\ \varphi_{12}(X_1, X_2) &= 0,5(\varphi_1(X_1, X_2) + \varphi_2(X_1, X_2) - |\varphi_1(X_1, X_2) - \varphi_2(X_1, X_2)|); \\ \varphi_{34}(X_1, X_2) &= 0,5(\varphi_3(X_1, X_2) + \varphi_4(X_1, X_2) - |\varphi_3(X_1, X_2) - \varphi_4(X_1, X_2)|); \\ \varphi_1(X_1, X_2) &= f_1(X_1, X_2) - l \sqrt{b_{11}^2 + d b_{12}^2} = X_1 + 8X_2 - 1 - l \sqrt{1 + 8^2 d}; \\ \varphi_2(X_1, X_2) &= f_2(X_1, X_2) - l \sqrt{b_{21}^2 + d b_{22}^2} = -X_1 + 1,2X_2 + 0,7 - l \sqrt{1 + (1,2)^2 d}; \\ \varphi_3(X_1, X_2) &= f_3(X_1, X_2) - l \sqrt{b_{31}^2 + d b_{32}^2} = 4,5X_1 - X_2 - 1,45 - l \sqrt{(4,5)^2 + d}; \\ \varphi_4(X_1, X_2) &= f_4(X_1, X_2) - l \sqrt{b_{41}^2 + d b_{42}^2} = -6,5X_1 - 2,7X_2 + 6,15 - l \sqrt{(-6,5)^2 + (2,7)^2 d}. \end{aligned}$$

При оптимизации использовался симплексный метод [1], не требующий дифференцирования целевой функции. В результате моделирования и оптимизации были получены значения $X_1 = 0,6021$ и $X_2 = 0,2668$ настраиваемых параметров, которые с заданной погрешностью характеризуют максимально возможный запас работоспособности АЭП $G_l = l = 0,2154$ при условии, что скорости их изменения одинаковы и коэффициент $d = 1$. Для разных скоростей изменения настраиваемых параметров при $d = 4$ были получены значения $X_1 = 0,5815$ и $X_2 = 0,3746$. При этом запас работоспособности АЭП $G_l = l = 0,1608$.

На рис. 1 показаны: исходная область работоспособности, заданная ограничениями $A(X_2) = f_1(X_1, X_2)$, $B(X_2) = f_2(X_1, X_2)$, $C(X_2) = f_3(X_1, X_2)$, $D(X_2) = f_4(X_1, X_2)$, оптимальные точки R_1 — для одинаковых скоростей изменения настраиваемых параметров и R_2 — для разных скоростей изменения настраиваемых параметров.

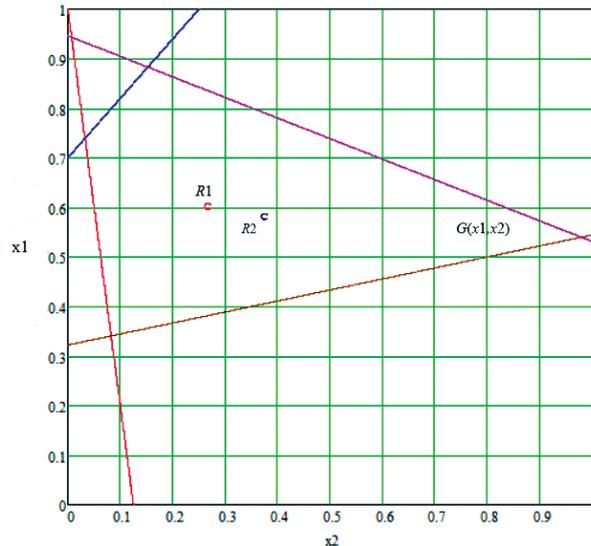


Рис. 1. Область работоспособности и оптимальные точки при разных скоростях изменения настраиваемых параметров

На рис. 2 приведена форма области работоспособности на промежуточном шаге поиска оптимального решения, откуда видно, что одно из ограничений, составляющих исходную область работоспособности, не участвует в процессе поиска. На рис. 3 и 4 показан, соответственно, процесс поиска оптимального решения при одинаковых и разных скоростях изменения настраиваемых параметров. Видно, что в процессе сужения исходной области работоспособности запас работоспособности для каждой точки, расположенной на линиях, определяющих область на промежуточном шаге поиска, одинаков при одинаковых скоростях ($d = 1$) и различен в случае разных скоростей изменения настраиваемых параметров ($d = 4$).

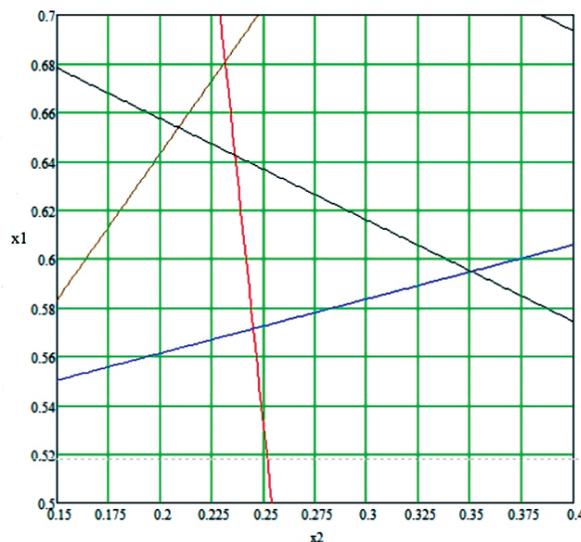


Рис. 2. Форма области работоспособности на промежуточном шаге поиска оптимального решения

Рассмотрим случай, когда область работоспособности задана множеством граничных точек. Учитывая информацию о скоростях изменения значений первичных параметров в виде коэффици-

ентов $1, \dots, \alpha_p, \dots, \alpha_n$, можно заключить, что целевой функцией при параметрическом синтезе ЭТС по критерию запаса работоспособности и задании области G в виде множества граничных точек может являться функция [1]:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i (R_i - X_{ik})^2} \right) \quad (13)$$

или функция

$$F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i (R_i - X_{ik}))^2} \right), \quad (14)$$

где N — общее число заданных граничных точек области работоспособности; n — число первичных параметров.

Обе функции гарантирует получение субоптимального решения по критерию $\lambda(X_0) = \max_{X \in G} \lambda(X) = \max_{X \in G} \min_{j \in [1, m]} \lambda_j(X)$.

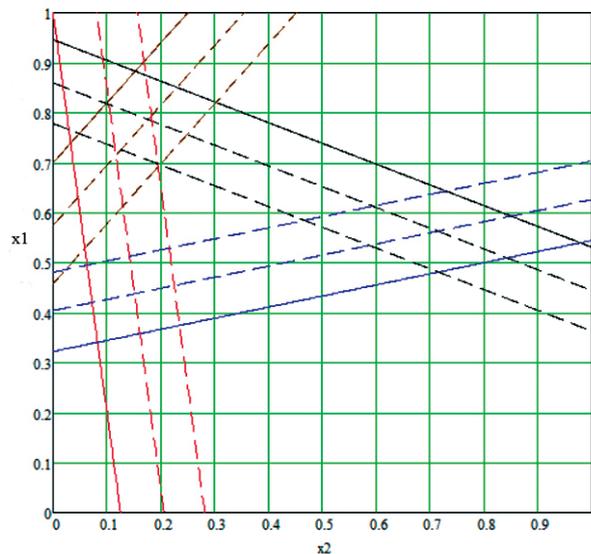


Рис. 3. Процесс поиска оптимума при равных скоростях изменения настраиваемых параметров

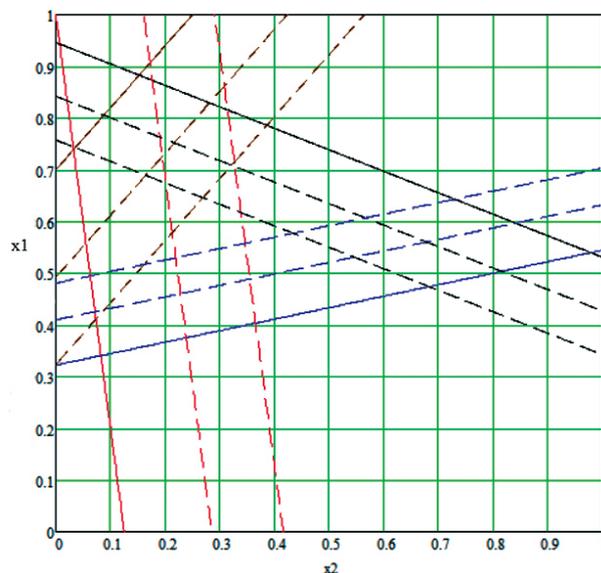


Рис. 4. Процесс поиска оптимума при разных скоростях изменения настраиваемых параметров

Функцию (14) следует использовать для АЭП ответственного назначения, а функцию (13) — для остальных электроприводов. Для нахождения оптимума по критерию F может быть использован любой поисковый метод оптимизации. При этом исключается заикливание алгоритма. Вместе с тем применение целевой функции F теоретически может привести к получению нескольких локальных оптимумов, однако на практике такой случай маловероятен.

Рассмотрим практическое применение целевой функции F для поиска оптимального решения при параметрическом синтезе АЭП ОВТ для произвольной формы области работоспособности. В случае небольшой размерности пространства первичных параметров ($n < 10$), что характерно для электроприводов, при решении задачи можно воспользоваться методом статистических испытаний. Случайная точка, принадлежащая области работоспособности, для которой целевая функция F принимает наименьшее значение, и принимается в качестве оптимального решения.

Пример 2. Имеются два управляемых параметра X_1 и X_2 , пределы изменения которых $-1 \leq X_i \leq 1$, $i = 1, 2$, $\alpha_i = 1$. Область работоспособности задана множеством граничных точек:

$X_{1j} = 0,9; 0,8; -0,8; 0,7; 0,7; 0,6; 0,6; 0,5; 0,5; 0,4; 0,4; -0,3; 0,3; 0,2; 0,2; 0,1; 0,1; 0; 0; 0,1; 0,1; 0,2; 0,2; 0,3; 0,3; 0,4; 0,4; 0,5; 0,5; 0,6; 0,6; 0,7; 0,7; 0,8.$

$X_{2j} = 0,4; 0,33; -0,05; 0,275; 0,2; 0,225; 0,4; 0,19; 0,54; 0,16; 0,66; -0,135; 0,75; 0,12; 0,83; 0,11; 0,9; 0,1; 0,64; 0,1; 0,64; 0,1; 0,45; 0,1; 0,3; 0,4; 0,17; 0,12; 0,75; 0,14; 0,01; 0,16; 0,08; 0,175; 0,15; 0,2.$

$$R = \begin{bmatrix} X_{1j} \\ X_{2j} \end{bmatrix}, j = \overline{1, s}; s = 34.$$

и аналитически описывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} G(X_1, X_2) &= 0,5(f_{12}(X_1, X_2) + f_3(X_1, X_2) - |f_{12}(X_1, X_2) - f_3(X_1, X_2)|); \\ f_{12}(X_1, X_2) &= 0,5(f_1(X_1, X_2) + f_2(X_1, X_2) - |f_1(X_1, X_2) - f_2(X_1, X_2)|); \\ f_1(X_1, X_2) &= 0,267X_1 - 0,22X_2 - 0,159X_1X_2 + 0,21; \\ f_2(X_1, X_2) &= -0,431X_1 - 0,325X_2 - 0,437X_1X_2 + 0,21; \\ f_3(X_1, X_2) &= 0,933X_1^2 + 4X_2 + 1,233X_1X_2 + 0,4. \end{aligned}$$

Программа, реализующая метод статистических испытаний, приведена на рис. 5 и не требует специальных пояснений. На рис. 6 приведена область работоспособности G , ограничивающая ее поверхности f_1, f_2, f_3 , и оптимальная точка $R_{\text{опт}}$.

```

ORIGIN := 1    n := 2    s := 34    k := 1000    G(0,0) = 0.21

F(N) :=
  a ← 1010
  s ← 34
  for k ∈ 1..N
    X1 ← 2·md(1) - 1
    X2 ← 2·md(1) - 1
    R0 ← (X1, X2)
    if G(X1, X2) ≥ 0
      for j ∈ 1..s
        L ← (1/s) · ∑j=1s 1 / ∑(R(j) - R0)2
        H = 3.3862
      if L < a
        R00 ← R0
        a ← L
  R00

H :=
  R0 ← (-0.2552, 0.3122)
  for j ∈ 1..s
    L ← (1/s) · ∑j=1s 1 / ∑(R(j) - R0)2
  L

F(k) = (-0.2525, 0.3136)

```

Рис. 5. Фрагмент программы поиска оптимального решения

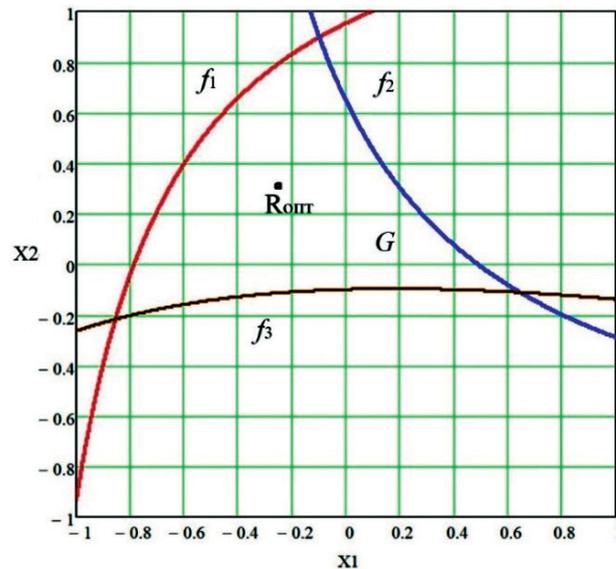


Рис. 6. Область работоспособности и оптимальное решение по критерию F

Значение целевой функции равно 3,3862. Координаты оптимальной точки: $X_1 = -0,2525$, $X_2 = 0,3136$.

Обсуждение (Discussion)

Задача параметрического синтеза АЭП является задачей векторной или многокритериальной оптимизации. Для ее решения необходим поиск компромиссного варианта, учитывающего в той или иной степени важность и значение каждого показателя. Вместе с тем следует учитывать технологические особенности каждого конкретного АЭП и условия его функционирования. При параметрическом синтезе АЭП в качестве целевой функции, как правило, используется один из технико-экономических показателей, а на значения остальных показателей накладываются ограничения. Показатели надежности в большинстве случаев во внимание не принимаются. Предложенный в работе [7] подход, основанный на построении обобщенного показателя качества в виде аддитивной функции, учитывает показатели надежности, но не может быть рекомендован к применению вследствие субъективности самой целевой функции.

В работах авторов [1]–[3], [8]–[10], [12] показано, что для решения задачи параметрического синтеза ЭТС, включая электропривод, целесообразно в качестве целевой функции выбирать запас работоспособности. Установлено, что при ограниченной информации о свойствах первичных параметров АЭП или при полном отсутствии такой информации запас работоспособности в полной мере характеризует вероятность безотказной работы электропривода. Вместе с тем разработанные алгоритмы не учитывают разные скорости изменения первичных параметров АЭП. Кроме того, в качестве целевой функции, согласно предложенной методологии оптимизации, может быть выбран любой технико-экономический показатель. При этом необходимым условием является задание требуемого уровня запаса работоспособности, который в этом случае будет являться ограничением при выборе оптимальных значений первичных параметров АЭП. Рассмотренные в работе методы и алгоритмы в определенной степени позволяют устранить эти ограничения.

Выводы (Conclusions)

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Параметрический синтез АЭП является задачей векторной или многокритериальной оптимизации. Необходимым условием для ее решения является обязательный учет показателей надежности и, прежде всего, запаса работоспособности АЭП.

2. При решении задачи параметрического синтеза АЭП ОВТ ответственного назначения в качестве целевой функции рекомендуется выбирать запас работоспособности, а также использовать априорную информацию в виде скорости изменения управляемых параметров. Полученное при этом решение является единственным и обеспечивает выполнение всех условий работоспособности. При этом автоматически учитываются показатели назначения АЭП, стоимость его изготовления, а также чувствительность и возможные изменения выходных параметров, связанные с вариациями первичных параметров в процессе изготовления, хранения и эксплуатации электропривода.

3. Информация о запасе работоспособности в процессе эксплуатации АЭП позволяет с высокой достоверностью решать задачи контроля и прогнозирования состояния его элементов.

4. Следует продолжить исследования, связанные с формированием целевой функции, для параметрического синтеза конкретных АЭП ОВТ на основе сформулированных в статье стратегий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем: монография / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

2. Саушев А. В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 380–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395.

3. Saushev A. V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary / A. V. Saushev, E. V. Bova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 327. — Is. 5. — Pp. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.

4. Ковчин С. А. Проблема синтеза современных электромеханических систем / С. А. Ковчин, Муафак Ф. М. Бернард // Труды V Международной (XVI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. — СПб., 2007. — С. 48–51.

5. Сташинов Ю. П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум / Ю. П. Сташинов // Электротехника. — 2016. — № 1. — С. 2–7.

6. Кузнецова О. А. Многокритериальная оптимизация электромеханических систем с асинхронным двигателем / О. А. Кузнецова // Приводная техника. — 2010. — № 6. — С. 20–26.

7. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния / А. А. Анисимов, С. В. Тарарькин, В. В. Аполлонский // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 2. — С. 21–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.021-026.

8. Саушев А. В. Параметрический синтез систем управления электроприводов технологических машин портов и судоремонтных заводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 192–202. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-192-202.

9. Саушев А. В. Показатели параметрической надежности при оптимизации электромеханических систем / А. В. Саушев [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2019. — Т. 2. — С. 60–62.

10. Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев [и др.] // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.

11. Саушев А. В. Области работоспособности в задачах управления состоянием автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев [и др.] // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: материалы докладов конференции. — Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. — С. 99–103.

12. Саушев А. В. К проблеме синтеза целевой функции параметрической оптимизации сложных технических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. — 2015. — № 3 (11). — С. 3–9.

13. Диксит А. Теория игр. Искусство стратегического мышления в бизнесе и жизни / Пер. с англ. / А. Диксит, Б. Нейлбафф. — М.: МИФ, 2017. — 445 с.
14. Saushev A. B. Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range / A. B. Saushev // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. — 2013. — Vol. 49. — Is. 1. — Pp. 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.

REFERENCES

1. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem: monografiya*. SPb.: GUM-RF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
2. Saushev, Alexander V., and Elena V. Bova. “The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 380–395. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-380-395.
3. Saushev, A. V., and E. V. Bova. “Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 327. No. 5. IOP Publishing, 2018. 052029. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052029.
4. Kovchin, S. A., and Muafak F. M. Bernard. “Problema sinteza sovremennykh elektromekhanicheskikh sistem.” *Trudy V mezhdunarodnoi (XVI vsrossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2007*. SPb., 2007. 48–51.
5. Stashinov, Y. P. “On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1.” *Russian Electrical Engineering* 87.1 (2016). DOI: 10.3103/S1068371216010107.
6. Kuznetsova, O. A. “Mnogokriterial'naya optimizatsiya elektromekhanicheskikh sistem s asinkhronnym dvigatelem.” *Privodnaya tekhnika* 6 (2010): 20–26.
7. Anisimov, A. A., S. V. Tararykin, and V. V. Apolonsky. “Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems.” *Vestnik IGEU* 2 (2016): 21–26.
8. Saushev, Aleksandr Vasil'evich, and Elena Vladimirovna Bova. “Parametrical synthesis of management systems of electric drives technological machines of ports and repair yards.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 192–202. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-192-202.
9. Saushev, A. V., E. V. Bova, and N. V. Belousova. “Pokazateli parametricheskoi nadezhnosti pri optimizatsii elektromekhanicheskikh sistem.” *Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality* 2 (2019): 60–62.
10. Saushev, Alexander V., Elena V. Bova, and Galina L. Demidova. “Reliability indicators at parametrical synthesis of the automated electric drives.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 597–607. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-597-607.
11. Saushev, A. V., N. V. Belousova, E. V. Bova, and V. O. Tyrva. “Oblasti rabotosposobnosti v zadachakh upravleniya sostoyaniem avtomatizirovannykh elektroprivodov.” *Trudy X Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018: Materialy dokladov konferentsii*. Novocherkassk: ООО «Лик», 2018. 99–103.
12. Saushev, A. V. “K probleme sinteza tselevoi funktsii parametricheskoi optimizatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem.” *Reliability & Quality of Complex Systems* 3(11) (2015): 3–9.
13. Dixit, Avinash K., and Barry J. Nalebuff. *The Art of Strategy: A Game Theorist's Guide to Success in Business and Life*. W. W. Norton & Company, 2010.
14. Saushev, A. B. “Parametric synthesis of technical systems based on the linear approximation of the operational capability range.” *Optoelectronics, instrumentation and data processing* 49.1 (2013): 51–56. DOI: 10.3103/S875669901301007X.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
 доктор технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev, Alexander V. —
 Dr. of Technical Sciences, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Белоусова Надежда Владиславовна —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: ep-gumrf@bk.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Бова Елена Владимировна —

доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: ep-gumrf@bk.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Belousova, Nadezhda V. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,

Russian Federation

e-mail: ep-gumrf@bk.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Bova, Elena V. —

Associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,

Russian Federation

e-mail: ep-gumrf@bk.ru,

kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2020 г.

Received: December 14, 2020.