

## THE QUALITY INDICATORS AND OPTIMALITY CRITERION AT THE STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES

**A. V. Saushev, E. V. Bova**

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

*It has been shown that the structural and parametric synthesis is the main way to ensure the working capacity and the set quality level of the automated electric drives (AED) at all stages and phases of their life cycle. At the same time the structural synthesis assumes the selection of the AED construction option, and the parametric synthesis is directed to determination of nominal values of the electric drive internal parameters and the permissible limits of their change at which the electric drive maintains the operating state. It has been established that a set of AED quality indicators formation and synthesizing the optimality criterion are necessary to solve the problems of structural-parametric synthesis. The AED morphological analysis is performed, its structure is defined, it has been shown that in many cases the multi-mass mechanical system of the electric drive can be reduced to a dual-mass calculation scheme. The classification of control and disturbing influences of the AED is considered, and the parameters characterizing its state have been established. The AED quality indicators are analyzed and a conclusion on their use in relation to a problem of structural and parametric synthesis is made. It has been established that the decisive role in selecting the AED structure is provided by the technical and economic indicators, and to solve the problem of parametric synthesis such indicator is the working capacity resource characterizing the AED parametric reliability at limited statistical information on the laws of changes in the parameters of its elements. The optimization methodology in relation to the structural-parametric synthesis of AED based on specially introduced postulates is developed. Based on the obtained results, a conclusion on the necessity to use the working capacity resource at the parametric synthesis of AED, as well as expediency of its application as an objective function at limited information on the laws of changes in the AED internal parameters or its complete absence, is made. It has been shown that the information on the working capacity resource is also necessary for the structural synthesis of AED. Moreover, it can be recommended also as the optimality criterion.*

*Keywords: automated electric drive, quality indicators, optimality criterions, working capacity resource, structural-parametric synthesis.*

**For citation:**

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.

**УДК 658.512**

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

**А. В. Саушев, Е. В. Бова**

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

*Показано, что структурно-параметрический синтез является основным способом обеспечения работоспособности и заданного уровня качества автоматизированных электроприводов (АЭП) на всех этапах и стадиях их жизненного цикла. При этом структурный синтез предполагает выбор варианта построения АЭП, а параметрический синтез направлен на определение номинальных значений внутренних параметров электропривода и допустимых пределов их изменения, при которых электропривод сохраняет работоспособное состояние. Установлено, что для решения задач структурно-параметрического синтеза необходимо сформировать совокупность показателей качества АЭП и синтезировать*

*критерий оптимальности. Выполнен морфологический анализ АЭП, определена его структура, показано, что во многих случаях многомассовая механическая система электропривода может быть приведена к двухмассовой расчетной схеме. Рассмотрена классификация управляющих и возмущающих воздействий АЭП, установлены параметры, характеризующие его состояние. Проанализированы показатели качества АЭП и сделан вывод по их использованию применительно к задаче структурно-параметрического синтеза. Установлено, что определяющую роль при выборе структуры АЭП оказывают технико-экономические показатели, а для решения задачи параметрического синтеза таким показателем является запас работоспособности, характеризующий параметрическую надежность АЭП при ограниченной статистической информации о законах изменения параметров его элементов. Разработана методология оптимизации применительно к структурно-параметрическому синтезу АЭП, основанная на специально введенных постулатах. На основании полученных результатов сделан вывод о необходимости использования запаса работоспособности при параметрическом синтезе АЭП, а также о целесообразности его применения в качестве целевой функции при ограниченной информации о законах изменения внутренних параметров АЭП или ее полном отсутствии. Показано, что информация о запасе работоспособности необходима также для структурного синтеза АЭП. При этом его можно рекомендовать и в качестве критерия оптимальности.*

*Ключевые слова: автоматизированный электропривод, показатели качества, критерии оптимальности, запас работоспособности, структурно-параметрический синтез.*

**Для цитирования:**

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.

### **Введение (Introduction)**

Структурно-параметрический синтез является основным способом обеспечения работоспособности и заданного уровня качества автоматизированных электроприводов (АЭП) на всех этапах и стадиях их жизненного цикла. При этом структурный синтез предполагает выбор варианта построения АЭП, а параметрический синтез направлен на определение номинальных значений внутренних параметров электропривода и допустимых пределов изменения этих параметров, при которых электропривод сохраняет работоспособное состояние. Для решения этих задач необходимо сформировать критерий оптимальности, который, как показывает анализ источников [1]–[4], отличается сложностью и неоднозначностью. Для построения критерия оптимальности необходимо сформировать совокупность показателей качества АЭП и каким-либо способом решить задачу векторной (многокритериальной) оптимизации. Это обусловлено тем, что показатели качества АЭП по своей природе являются противоречивыми. Улучшение значений одних показателей, например, за счет выбора другого варианта решения, приводит к ухудшению значений других показателей качества. При выборе показателей качества на этапе параметрического синтеза АЭП достаточно часто рассматривают лишь показатели назначения, причем, как правило, во внимание принимают лишь динамические показатели — время переходного процесса и максимальное перерегулирование [5]. В работах [2], [6] применительно к электротехническим системам и электроприводу показано, что решение задачи параметрической оптимизации должно обязательно учитывать показатели надежности. Более того, эти показатели во многих случаях целесообразно использовать в качестве целевой функции.

Так как критерии имеют противоречивый характер и их экстремальные значения не могут быть реализованы одновременно, принимаемое решение должно обеспечивать некоторое компромиссное сочетание всех показателей качества. При этом следует иметь в виду, что улучшение энергетических показателей АЭП можно обеспечить путем разработки эффективных алгоритмов управления, учитывающих оптимальные конструктивные и режимные параметры электропривода, полученные в результате многокритериальной оптимизации. Кроме того, необходимо отметить, что в настоящее время в технической литературе отсутствует подробный анализ показателей качества АЭП, которые следует рассматривать при решении задач оптимального структурного

и параметрического синтеза, а также отсутствует методологическая база, необходимая для правильного выбора критерия оптимальности.

*Целью работы* является морфологический анализ АЭП и, как следствие, формирование множества показателей качества, которые должны учитываться при решении задачи структурно-параметрического синтеза АЭП в условиях ограниченной статистической информации о законах изменения их внутренних параметров и математических форм записи, а также анализ возможных способов формирования целевой функции, необходимой для решения задачи структурно-параметрического синтеза АЭП в условиях многокритериальности.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение исполнительного органа рабочей машины (ИОРМ) и управления этим движением. Элементами электропривода являются: преобразователь электрической энергии (ПЭЭ), электромеханический преобразователь (ЭМП), механический преобразователь (МП) и система управления электропривода (СУЭП), состоящая из устройства сопряжения, информационного устройства (ИУ) и устройства управления (УУ) — рис. 1. В качестве ПЭЭ в современном автоматизированном электроприводе (АЭП), как правило, применяется частотный преобразователь. Наиболее распространенным электромеханическим преобразователем является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Вместе с тем в последние годы для общепромышленного и судового электропривода все чаще применяются вентильно-индукторные машины с постоянными магнитами и другие конструкции синхронных электрических машин, наиболее перспективными среди которых являются реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

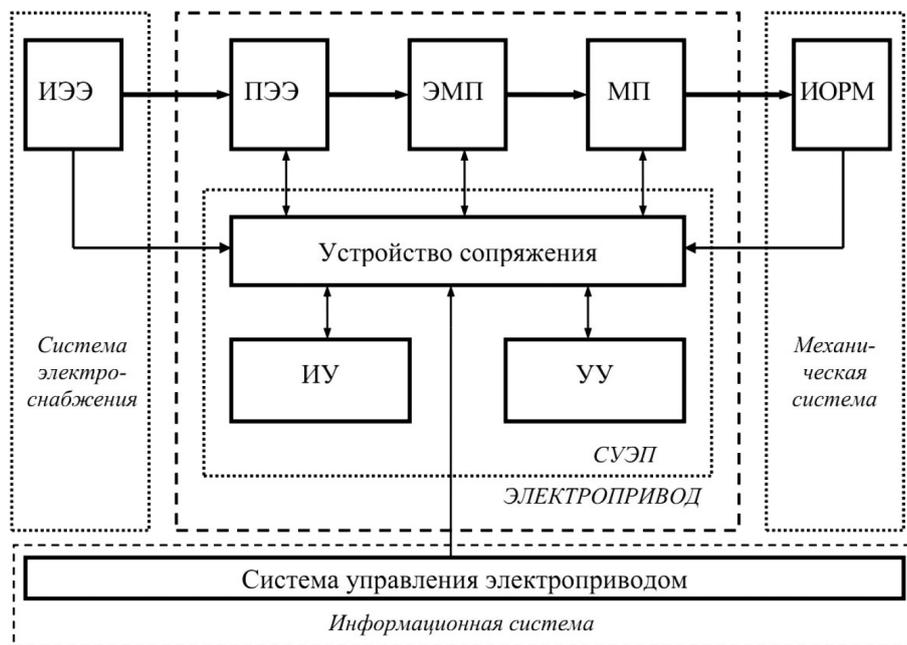


Рис. 1. Структурная схема электропривода

На рис. 1, кроме элементов электропривода, показаны: источник электрической энергии (ИЭЭ), исполнительный орган рабочей машины (ИОРМ) и система управления электроприводом, которая является внешней по отношению к электроприводе системой более высокого иерархического уровня. Под механической системой электропривода будем понимать систему, состоящую из механического преобразователя (передаточное устройство), рабочей машины и элементов сопряжения вращающихся валов (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема механической системы электропривода

Приведенные на этом рисунке переменные, соответственно, обозначают:  $M_{вд}$ ,  $M_{рм}$ ,  $M_{ио}$  — моменты, соответственно, на валу электродвигателя, рабочей машины, исполнительного органа;  $\omega_{вд}$ ,  $\omega_{рм}$ ,  $\omega_{ио}$  — угловые скорости вала электродвигателя, рабочей машины, исполнительного органа;  $F_{ио}$ ,  $v_{ио}$  — соответственно усилие и линейная скорость исполнительного органа.

Анализ производственных механизмов показывает, что при определенных допущениях они имеют общие динамические свойства и во многих случаях многомассовая механическая система электропривода может быть приведена к двухмассовой расчетной схеме. При выполнении операций приведения следует использовать разработанный одним из авторов [7] точный метод перехода от полной расчетной схемы механической системы к эквивалентной расчетной схеме. При этом точность вычисления эквивалентных параметров двухмассовой механической системы (моменты инерции —  $J_1$ ,  $J_2$ , коэффициент жесткости упругой связи —  $c_{12}$ , коэффициенты демпфирования вращающихся масс —  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , коэффициент демпфирования упругой связи —  $\beta_{12}$ ) повышается до 20 % относительно упрощенного классического подхода.

При решении задач структурно-параметрического синтеза АЭП следует рассматривать как динамические системы, т. е. системы, находящиеся в каждый момент времени в одном из возможных состояний и способные переходить из одного состояния в другое по внешним и внутренним причинам. Эти причины обусловлены воздействиями внешней среды, которые будем называть *входными воздействиями на электропривод и внутренними возмущениями в элементах АЭП*. Среди входных воздействий можно выделить задающие  $u(t)$  и возмущающие  $V(t)$  воздействия.

Задающие воздействия можно разделить на управляющие, характеризующие рабочие режимы работы АЭП, и тестовые. Управляющие воздействия могут быть координатными, параметрическими и структурными. Они также могут быть рабочими и аварийными. Рабочие воздействия имеют место в рабочих режимах функционирования АЭП и его элементов. Эти воздействия заранее известны и определяются техническими требованиями к электроприводу. Аварийные воздействия являются вынужденными и направлены на сохранение работоспособного или частично работоспособного состояния АЭП. Тестовые воздействия имеют место в режимах наладки и технического диагностирования АЭП и его элементов. Они, как правило, по своим параметрам отличаются от рабочих воздействий и, по своей сути, являются координатными воздействиями. При этом АЭП или его элементы на время технического диагностирования выводятся из эксплуатации.

*Координатными управляющими воздействиями* являются принудительные изменения переменных состояния в виде напряжения питания, подводимого к элементам АЭП от источника электрической энергии, и напряжения, задающего сигналы управления на входах СУЭП.

*Параметрическими управляющими воздействиями* являются специально предусмотренные вариации параметров элементов АЭП, включая не только параметры комплектующих элементов, но и конструктивные параметры, задающие их геометрические размеры и отношения.

*Структурными управляющими воздействиями* являются любые целенаправленные изменения структуры АЭП и рабочей машины. К ним, например, относятся: изменения структуры регуляторов СУЭП, необходимые для обеспечения заданных динамических свойств АЭП (рабочее

воздействии); отключения части электродвигателей в многодвигательном электроприводе с целью экономии электрической энергии (рабочее воздействие); отключения некоторых элементов рабочей машины (потребителей электрической энергии) для обеспечения частично работоспособного состояния многодвигательного АЭП в случае невозможности формирования заданной активной мощности из-за отказа электродвигателя или передаточного устройства (аварийное воздействие).

Возмущающие воздействия, действующие на АЭП, являются случайными и не зависят от человека-оператора в случае автоматизированного управления или от задающей программы при автоматическом управлении. Возмущающие воздействия могут быть координатными, параметрическими и режимными.

*Координатные возмущения*, называемые также *помехами*, или *случайными входными сигналами*, обусловлены влиянием силовых полей других систем, например, системы электроснабжения. Для АЭП к ним можно отнести различные наводки и гальванические связи по питанию. По своей физической природе задающие воздействия и помехи являются фазовыми переменными и для АЭП они представляют собой токи, напряжения, мощности, движущие моменты и силы.

*Параметрические возмущения* обусловлены изменением физических характеристик элементов АЭП. Они являются следствием действия различных дестабилизирующих факторов внешней среды, природа которых случайна. К ним, например, относятся температура, влажность, запыленность, вибрация, солнечная и проникающая радиация.

*Режимные возмущения* определяются параметрами переменных состояния механической системы электропривода во всех заданных режимах его работы. Этими переменными являются моменты сопротивления рабочей машины и передаточного устройства, которые можно разделить на активные и реактивные моменты. Будем считать, что электромагнитный момент электродвигателя является движущим. Этот случай является наиболее распространенным на практике. Активными моментами сопротивления при этом являются момент сопротивления рабочей машины и упругие моменты в упругих элементах многомассовой механической системы электропривода. Реактивными моментами сопротивления являются моменты трения в упругих связях и во вращающихся массах механической системы. Эти моменты определяют нагрузку на электропривод.

Воздействия АЭП на внешнюю среду будем называть *реакциями системы* (выходными переменными АЭП) и обозначать их множество через вектор  $\mathbf{y}(t)$ , а выходные переменные элементов АЭП обозначать как  $\mathbf{Z}(t)$ . По своей физической природе выходные переменные являются переменными состояния. К ним, например, относится угловая скорость электропривода, а также напряжение на выходе регуляторов СУЭП и электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем.

Состояние АЭП в любой фиксированный момент времени характеризуется некоторым набором (вектором) параметров. К ним относятся:

– входные параметры:  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_g, \dots, u_e)$ , характеризующие задающие воздействия  $\mathbf{u}(t)$  и наблюдаемые на входах АЭП;

– внешние параметры:  $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_p, \dots, v_f)$ , характеризующие возмущающие воздействия, действующие на АЭП;

– внутренние параметры:  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$ , характеризующие состояние комплектующих элементов АЭП и их конструктивные характеристики. Поскольку эти параметры определяют материально-структурное состояние электропривода [8], их также называют *первичными параметрами*. Параметрами комплектующих элементов АЭП являются сопротивления резисторов, индуктивности катушек, емкости конденсаторов, массы, моменты инерции, жесткости упругих связей, коэффициенты демпфирования, а также функции от этих параметров, имеющие определенный физический (коэффициенты усиления, постоянные времени, коэффициенты соотношения масс);

– внутренние параметры  $\mathbf{u}^v = (u_1^v, u_2^v, \dots, u_i^v, \dots, u_e^v)$ ,  $\mathbf{Z}^v = (Z_1^v, Z_2^v, \dots, Z_j^v, \dots, Z_c^v)$ , характеризующие, соответственно, переменные состояния на входах и выходах электротехнических, электромеханических и механических устройств, входящих как элементы  $v = \overline{1, h}$ ,  $h$  — количество элементов в составе АЭП;

– выходные параметры  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$ , характеризующие свойства АЭП, интересующие потребителя. Это параметры-функционалы, т. е. функциональные зависимости фазовых переменных  $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g, \dots, Z_d)$ ,  $d = c \cdot v$  АЭП и параметры, являющиеся граничными значениями диапазонов внешних переменных, в которых сохраняется работоспособность системы. Эти параметры обычно являются показателями качества АЭП.

Среди множества внутренних параметров  $X$  можно выделить подмножества целевых параметров  $X_n = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$ ,  $n < N$ , определяющие достижение поставленной цели, оказывая заметное влияние на выходные параметры АЭП, и настраиваемых параметров  $X_n = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_q)$ ,  $q \leq n$ , которыми обычно являются коэффициенты усиления и постоянные времени СУЭП.

Математическая модель, описывающая динамические свойства АЭП, может быть представлена уравнением

$$Y = F(X, u, Z, V, t), \quad (1)$$

где  $F$  — оператор связи, определяющий форму взаимосвязи параметров и переменных АЭП.

**Показатели качества электроприводов.** В соответствии с системным анализом и данными работы [8] будем различать три основных разновидности качества: материально-структурное, функциональное и потенциальное системное. В первом случае АЭП рассматривают как систему со сложным внутренним строением; во втором случае — как элемент этой системы; в третьем — как элемент с потенциальными возможностями «включения» в различные окружающие его системы, удовлетворяющий требованиям этих систем. В отличие от первых двух разновидностей качества, наблюдаемых в системе через свойства материалов ее комплектующих элементов и параметры рабочих процессов, третья разновидность качества является системной и в АЭП присутствует в них лишь как признак системы. Потенциальные системные качества АЭП непосредственному наблюдению недоступны и рассматриваются лишь при решении отдельных задач структурно-параметрического синтеза. Внутри каждой разновидности качества можно выделить группы показателей [8]. Функциональные показатели АЭП можно разделить на технико-экономические: назначения, надежности, экономичности, и эргатические: эргономические, эстетические и экологические показатели безопасности.

Для структурно-параметрического синтеза основными показателями качества, определяющими выбор целевой функции при оптимизации АЭП, являются технико-экономические показатели. Следуя методологии параметрического управления состоянием электротехнических систем [8], эти показатели необходимо исследовать на всех стадиях и этапах жизненного цикла электропривода и его элементов. При этом можно выделить координатное, параметрическое и структурное управление, а АЭП представить в виде «черного ящика» (рис. 3) с указанными ранее параметрами и показателями качества.

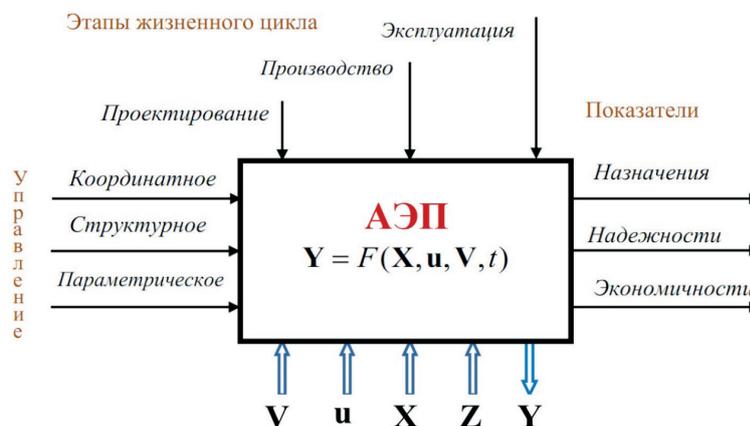


Рис. 3. Модель электропривода в процессе структурно-параметрического управления состоянием

**Показатели назначения.** Данные показатели характеризуют динамические и статические свойства АЭП, определяющие основные функции, для выполнения которых он предназначен. Можно выделить четыре группы динамических показателей, которые также называют критериями качества. Эти показатели характеризуют динамические свойства АЭП.

К первой группе относятся показатели, в той или иной степени используемые для оценки качества сигнал рассогласования в различных типовых режимах работы электропривода. Эту группу составляют *критерии точности*. Точность, характеризующая установившийся режим работы АЭП, однозначно оценивается величиной ошибки, равной разности между требуемым и действительным значениями управляемого сигнала:  $u^0(t) = u(t) - Z(t)$ .

Типовыми режимами, определяющими законы изменения во времени входного сигнала или возмущающего воздействия, обычно являются: *режим скачка* — неизменность управляющего и возмущающих воздействий; *режим движения с постоянной скоростью* — изменение входного сигнала во времени по линейному закону; *режим движения с постоянным ускорением* — изменение входного сигнала по параболическому закону; *режим движения по синусоидальному закону*. В первых трех режимах установившееся значение сигнала рассогласования системы управления определяется применением к его изображению по Лапласу предельной теоремы перехода, что связано с порядком астатизма передаточной функции разомкнутой системы  $W_p(p)$ :

$$u_{уст}^0 = \lim_{t \rightarrow \infty} u^0(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pu^0(p) \quad (2)$$

где  $u^0(s) = W_3(p)u(p)$ ;  $W_3(p) = (1 + W_p(p))^{-1}$  — передаточная функция замкнутой системы по сигналу рассогласования;  $u(p)$  — изображение по Лапласу задающего воздействия.

При гармоническом входном сигнале точность системы управления АЭП может быть оценена по амплитуде сигнала рассогласования:

$$u_{max}^0 = \frac{u_{max}}{|W_p(j\omega_k)|} = \frac{u_{max}}{A(\omega_k)}, \quad (3)$$

где  $A(\omega_k)$  — амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы при частоте  $\omega = \omega_k$ .

Ко второй группе относятся показатели, характеризующие устойчивость работы АЭП. Для оценки устойчивости во временной области обычно применяются следующие показатели: перерегулирование  $\sigma = (Z_{max} - Z_0) \cdot 100/Z_0$ , %, где  $Z_{max}$  и  $Z_0$  — соответственно максимальное и начальное значения сигналов рассогласования; и число колебаний  $N_k = T_p/N_k$ , наблюдаемое за время регулирования  $T_p$ , где  $T_k$  — расстояние по временной оси переходного процесса  $Z(t)$  между смежными максимумами, обычно  $N_k \in [1; 4]$ . Для оценки устойчивости СУЭП в частотной области вводятся понятия запаса устойчивости по амплитуде и фазе. Одной из частых оценок качества является показатель колебательности, т. е. отношение максимального значения амплитудной частотной характеристики замкнутой системы к значению амплитудной характеристики при  $\omega = 0$ :  $M_{max} = A_{max}(\omega)/A(0)$ . Для системы управления АЭП, у которой  $A(0) = 1$ ,  $M_{max} = |W_3(j\omega)|_{max} = \frac{|W_p(j\omega)|}{|1 + W_p(j\omega)|_{max}}$ . Чем меньше запас устойчивости, тем больше склонность системы управления к колебаниям.

К третьей группе относятся показатели, характеризующие быстродействие АЭП. Для оценки быстродействия по виду переходной характеристики  $h(t) = Z(t)/Z(\infty)$  используют следующие временные показатели качества:

– длительность переходного процесса  $t_n$ , равная промежутку времени от момента приложения скачкообразно входного воздействия до момента, когда выходной сигнал  $Z(t)$  будет отличаться от установившегося значения  $Z(\infty)$  не более чем на заданную малую постоянную времени  $\Delta$ , представляющую собой допустимую статическую ошибку, т. е.  $|h(t) - h(\infty)| \leq \Delta$ ; как правило,  $\Delta = (1-5)$  % от скачка сигнала на входе СУЭП;

– время запаздывания  $t_3$ , равное отрезку времени, заключенному между моментом приложения скачкообразного входного сигнала и моментом, в который осредненная выходная величина становится равной половине ее установившегося значения;

– время нарастания  $t_n$ , равное отрезку времени, заключенному между точкой пересечения оси времени с касательной к кривой переходной характеристики в точке  $a = 0,5h(\infty)$  и абсциссой точки пересечения этой касательной с горизонтальной прямой, соответствующей установившемуся значению  $h = h(\infty)$ ;

– время установления  $t_y$ , т. е. время достижения переходной характеристикой первого максимума;

– частоту колебания  $f_k$ , близкую по значению к резонансной частоте замкнутой системы.

Для оценки быстродействия по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы управления АЭП используют следующие показатели качества:

– резонансную частоту  $\omega_0$ , соответствующую пику амплитудно-частотной характеристики;

– частоту  $\omega_n$ , соответствующую полосе пропускания замкнутой системы и определяемой из условия  $A(\omega_n) = 1/\sqrt{2}$ ;

– частоту среза  $\omega_{cp}$ , соответствующую условию  $A(\omega_{cp}) = 1$ ;

– эквивалентную частоту замкнутой системы  $\omega_s$ , определяемую по формуле

$$\omega_s = \int_0^{\infty} |W_3(j\omega)|^2 d\omega = \int_0^{\infty} A^2(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Частотные показатели качества, характеризующие быстродействие АЭП, могут быть также определены по соответствующим частотным характеристикам ее разомкнутой системы, что существенно проще. Это обстоятельство является одним из преимуществ использования частотных показателей качества по сравнению с временными показателями. В ряде случаев требуется сопоставить между собой частотные и временные показатели, однако такая связь очень сложна и в общем виде может быть определена только для простейших структур АЭП.

К четвертой группе показателей качества относятся комплексные критерии, дающие оценку некоторых обобщенных свойств АЭП, учитывающих точность, запас устойчивости и быстродействие. Обычно это достигается при помощи некоторых интегральных показателей, определяющих свойства кривой переходного процесса, а также на основе критерия минимума колебательности инерционных масс. В первом случае суть анализа качества АЭП заключается в сравнении линейной или квадратичной интегральной оценки с минимальной возможной величиной. Удобство интегральных оценок состоит в том, что они дают единый числовой критерий качества. Недостатком является то, что одному и тому же значению интегральной оценки могут соответствовать разные формы переходного процесса, что приводит к неопределенности при решении задач структурно-параметрического синтеза. Во втором случае для оценки демпфирующих свойств АЭП используются прямые и косвенные показатели. Из прямых показателей наибольшее распространение получили логарифмический декремент затухания и коэффициент резонансного усиления, который определяется амплитудой большего резонансного пика амплитудно-частотной характеристики электропривода. Этот показатель является наиболее эффективным при изучении режимов с периодическими механическими возмущениями. Из косвенных показателей наиболее распространен коэффициент электромеханической связи, который непосредственно характеризует эту связь и дает оценочные представления о демпфирующих свойствах АЭП.

К показателям, определяющим статические свойства АЭП, относятся показатели, характеризующие производительность электропривода, его массогабаритные и регулировочные свойства. В простейшем виде показатель производительности характеризует максимальное перемещение за заданный промежуток времени. На практике эта задача обычно формулируется как необходимость обеспечения избытка мощности, с помощью которого можно реализовать заданное перемещение за минимальное время. Производительность напрямую зависит от динамических свойств системы управления движением ИОРМ. Для повышения производительности следует усовершенствовать механические конструкции технологических установок, а также использовать высокодинамичные электроприводные системы, что позволит обеспечить возможность получения высоких скоростей движения ИОРМ.

Важнейшими показателями, характеризующими регулировочные свойства АЭП, являются диапазон регулирования скорости и плавность регулирования [9]. Для интегральной характеристики как динамических, так и статических свойств АЭП можно использовать показатель качества функционирования электропривода, под которым понимают степень его приспособленности к выполнению поставленной задачи. Этот показатель выражает меру полезности электропривода. Для его определения необходим анализ результатов применения АЭП по назначению.

В процессе эксплуатации АЭП изменяются состояния, в которых он находится. В каждом состоянии АЭП может выполнять заданные функции с определенным уровнем качества [8]. Количественное значение показателя качества функционирования  $\xi(t_i)$  зависит от состояния электропривода в момент времени  $t_i$  и в общем случае от всех предшествующих состояний, т. е. от траектории эволюции состояния электропривода. По возможности следует учитывать случайные факторы и рассматривать  $\xi(t_i)$  как случайный процесс. Объективно существует наибольшее значение показателя качества функционирования  $E_0 = \text{const}$ , соответствующее «идеальному» АЭП (например, в случае, когда все его внутренние параметры являются номинальными). Случайная функция  $\xi(t_i)/E_0$ , принимающая значения в диапазоне  $[0,1]$ , определяет относительное значение показателя качества функционирования АЭП.

Можно выделить показатели качества функционирования двух видов: мгновенные и интервальные. *Мгновенные показатели* являются характеристиками случайной величины  $\xi(t_i)$  — значения случайной функции  $\xi(t)$  при  $t = t_i$ . Полной характеристикой  $\xi(t_i)$  является закон распределения. Однако для практических приложений можно пользоваться первыми двумя моментами этой случайной величины — математическим ожиданием и дисперсией. *Интервальные показатели* качества функционирования относятся к интервалу времени или наработки  $[0, t]$ . При этом каждой  $u$ -й траектории  $\xi_u(t)$  эволюции АЭП в течение времени или наработки  $t$  будет соответствовать некоторый результат, характеризующий полезность его использования для решения поставленной задачи, т. е. выходной эффект. Таким образом, результат эксплуатации АЭП в течение времени  $[0, t]$  можно оценить с помощью функционала  $\Phi[\xi_u(t)]$  от реализаций процесса функционирования электропривода. Интервальными показателями качества функционирования АЭП в течение времени или наработки  $[0, t]$  могут быть математическое ожидание выходного эффекта (средний выходной эффект) и среднее квадратическое отклонение выходного эффекта, характеризующее «интервальный риск». Рассмотренные возможные показатели назначения АЭП определяют большое разнообразие показателей назначения его элементов.

**Показатели надежности.** Для АЭП и их элементов важнейшими свойствами, составляющими надежность, являются безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Показатели этих свойств хорошо известны. Вместе с тем для обеспечения параметрической надежности АЭП вопрос выбора показателей остается недостаточно изученным. Одной из последних работ на эту тему является публикация [6], в которой отмечается, что применительно к задаче параметрического синтеза важнейшими свойствами являются безотказность и долговечность, а в качестве показателя при ограниченной информации о законах распределения управляемых параметров следует использовать запас работоспособности. Под запасом работоспособности электропривода понимается степень приближения вектора фактического состояния АЭП к его предельно допустимому значению. Множество предельно допустимых значений этого вектора определяется границей области работоспособности электропривода. Степень приближения вектора фактического состояния АЭП задается расстоянием от его конца до ближайшей граничной точки этой области. В работе [6] доказано, что для разных законов распределения выходных параметров максимизация минимального запаса работоспособности дает близкую к максимальному значению вероятность безотказной работы электротехнической системы. Данный вывод в полной мере относится и к АЭП.

**Экономические показатели.** Эти показатели играют важную роль при решении задачи структурно-параметрического синтеза АЭП. К ним можно отнести показатели энергетической эффективности и показатели, непосредственно характеризующие стоимость АЭП и затраты на его эксплуатацию. Энергетические показатели объединяются в следующие группы:

– показатели, характеризующие режимы работы электромеханического преобразователя как потребителя электрической энергии. К ним относятся активная, реактивная и полная мощности, потребляемые от силового преобразователя электрической энергии;

– показатели, характеризующие результат электромеханического преобразования подводимой энергии. К ним относятся механическая мощность, момент и угловая скорость;

– показатели, являющиеся мерой эффективности и экономичности преобразования энергии двигателем. К ним относятся мощность потерь в элементах электродвигателя, коэффициенты мощности и полезного действия.

В работе [10] применительно к асинхронному электроприводу приводятся следующие критерии оценки его эффективности.

$$1. F_1 = \int_0^T (U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta}) dt \rightarrow \min \text{ — энергия, поступающая из сети к обмоткам электродвигателя в Дж.}$$

ля в Дж.

$$2. F_2 = \int_0^T P_{\text{мех}}(t) dt = \int_0^T M(t)\omega(t) dt \rightarrow \max \text{ — энергия, затрачиваемая на совершение полезной работы электродвигателя в Дж.}$$

боты электродвигателя в Дж.

$$3. F_3 = T_{Wm} = \frac{2W_m}{(U_{s\alpha} I_{s\alpha} + U_{s\beta} I_{s\beta})} \rightarrow \min \text{ — постоянная преобразования магнитной энергии в с;}$$

$$4. F_4 = \frac{M(t)\omega(t)}{M(t)\omega(t) + \sum P_{\Delta}} \rightarrow \max \text{ — энергетический КПД в о.е.}$$

$$5. F_5 = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|} \rightarrow \max \text{ — критерий, оценивающий электрическое преобразование энергии в о.е.}$$

энергии в о.е.

$$6. F_6 = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|} \rightarrow \max \text{ — критерий, оценивающий механическое преобразование энергии, о.е.}$$

гии, о.е.

$$7. F_7 = \frac{|W(S)|}{\varphi} \rightarrow \min \text{ — удельный расход энергии в Дж/рад.}$$

$$8. F_8 = (\bar{I}_s \bar{\Psi}_s + \bar{I}_r \bar{\Psi}_r) \rightarrow \min \text{ — критерий, учитывающий энергию магнитной системы в Н·м.}$$

$$9. F_9 = \int_0^T (\bar{I}_s^2 R_s + \bar{I}_{sr}^2 R_r) dt \rightarrow \min \text{ — энергия на компенсацию активных потерь в Дж.}$$

$$10. F_{10} = \int_0^T (M(\omega) - M_{cr}(\omega))^2 dt \rightarrow \min \text{ — степень близости механических характеристик в Н·м.}$$

Между приведенными критериями объективно существует корреляционная зависимость. При использовании методов компонентного анализа можно сократить количество критериальных энергетических оценок. В работе [11] рассматривается обобщенный критерий энергетической эффективности без учета других показателей качества.

**Критерии оптимальности электроприводов.** Критерии оптимальности применительно к электроприводу рассматривались в работах [1]–[4], [8], [10], [11]. Среди авторов работ существует понимание того, что задача является сложной, многокритериальной. Вместе с тем при рассмотрении возможных способов решения этой задачи не сделан должный акцент на методологических аспектах построения целевой функции.

Анализ библиографических источников показывает, что в настоящее время известны следующие основные подходы к решению задачи:

1. Выбирается один, наиболее важный из множества исходных показателей качества, для которого определяется его максимально или минимально возможное значение при ограничениях, установленных для значений других показателей качества. Примером может служить настройка СУЭП на технический оптимум, при которой оптимизируемым показателем является время переходного процесса, а на максимальное перерегулирование накладывается ограничение. Показатели надежности и экономичности в этом случае вообще не рассматриваются [5].

2. Строится обобщенный показатель качества в виде аддитивной<sup>1</sup>, или мультипликативной [4], [11] функции от значений других показателей качества и весовых коэффициентов, определяющих важность каждого показателя. Например, в работе [4] для решения задачи параметрического синтеза предложена следующая целевая функция (обобщенный критерий качества):

$$\bar{Y}_m = 1 - \left( \prod_{i=1}^m \bar{Y}_i \right)^{1/m}, \quad (5)$$

где  $m = 4$  — количество показателей качества в составе критерия, включающего следующие нормированные показатели: быстродействия  $\bar{Y}_1$ , точности  $\bar{Y}_2$ , параметрической грубости  $\bar{Y}_3$  и энергетических затрат на управление  $\bar{Y}_4$ .

При этом в функции (6) показателем быстродействия является время нарастания переходной характеристики; показателем точности  $\bar{Y}_2$  — средний модуль относительного отклонения выходной координаты системы на заданном интервале времени; показателем робастности  $\bar{Y}_3$  — средний модуль отклонения переходной характеристики АЭП при вариации параметров СУЭП относительно расчетных значений за время переходного процесса; показателем энергетических затрат на управление  $\bar{Y}_4$  — пиковое значение тока электродвигателя, которое ограничивается перегрузочной способностью силовой части АЭП.

Данный подход является субъективным и имеет известные ограничения. Кроме того, как показано в работах [3]–[5], он может привести к грубым ошибкам [8].

3. В целях оптимизации используется метод Соболя – Статникова, который предполагает построение множества Парето-оптимальных решений, и поиск оптимального варианта на основе зондирования пространства управляемых параметров АЭП методом статистического моделирования. Для этой цели используется процедура синтеза псевдослучайных точек путем построения ЛПТ-последовательностей [1], [10]. Данный подход отличается объективностью, но на практике не позволяет получить единственное решение;

4. В качестве критерия оптимальности при параметрическом синтезе СУЭП используется запас работоспособности, который максимизируется. Такой подход гарантирует получение Парето-оптимального решения и отличается объективностью выбора оптимальных значений первичных параметров СУЭП [2], [6], [8]. Выполненный анализ показателей качества электропривода позволяет распространить данный подход на структурно-параметрический синтез АЭП.

## Результаты (Results)

Сформируем базовые основы методологии оптимизации применительно к структурно-параметрическому синтезу АЭП. На рис. 4 приведена структурная схема предлагаемой методологии выбора целевой функции для структурного и параметрического синтеза АЭП, в основе которой аксиоматический принцип. Введем в рассмотрение постулаты, являющиеся базисом этой методологии [8].

*Постулат 1.* Основопологающим постулатом методологии является констатация того, что любой АЭП характеризуется двумя обобщенными параметрами: эффективностью (полезностью) и затратами (платой за полезность). Этот постулат логически вытекает из фундаментального философского закона диалектического единства противоположностей, применимого к любому объекту исследования. Следствиями постулата являются формулировки двух критериев оценки АЭП: эффективности (Э) и цены (Ц). Критерий цены (КЦ) характеризует АЭП значением параметра Ц при фиксированном значении параметра Э, а критерий эффективности (КЭ) — значением параметра Э при фиксированном значении параметра Ц.

<sup>1</sup> РТМ 212.0106–81. Расчет и выбор электрооборудования гидротехнических сооружений. М.: Транспорт, 1983. 64 с.

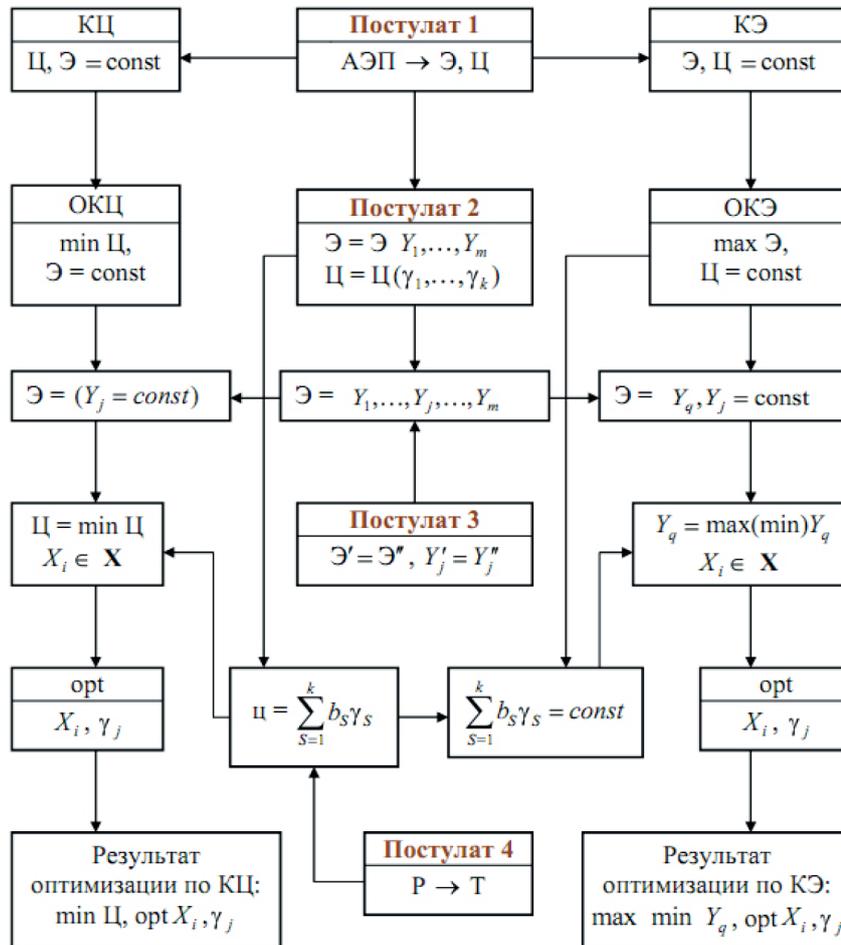


Рис. 4. Структурная схема методологии структурно-параметрического синтеза АЭП

*Постулат 2.* Обобщенные параметры АЭП могут быть представлены в виде функциональных зависимостей от его внешних (выходных) и ресурсных параметров:  $\Theta = \Theta(Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$ ,  $\Pi = \Pi(\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_k)$ . Под ресурсными параметрами понимаются такие параметры АЭП, которые характеризуют потребление различных ресурсов при его создании и эксплуатации. Ресурсами являются материалы и средства, расходуемые при проектировании, изготовлении и техническом обслуживании АЭП (конструкционные материалы, обрабатывающие механизмы, контрольно-диагностическая аппаратура), носители электроэнергии, рабочее время проектировщиков, изготовителей и обслуживающего персонала и т. п. Эти параметры определяют величину затрат, обозначенных обобщенным параметром  $\Pi$ .

*Постулат 3.* Два варианта решения задачи структурно-параметрического синтеза АЭП полагаются равноэффективными ( $\Theta' = \Theta''$ ) в том случае, когда равны попарно их соответствующие выходные параметры ( $Y'_j = Y''_j$ ). На основе этого постулата функция  $\Theta = \Theta(Y_1, \dots, Y_j, \dots, Y_m)$  конкретизируется в форме вектора.

*Постулат 4.* Ресурсы АЭП тождественны товарам. Причем любой товар как экономическая категория имеет цену, и она может быть установлена. Следствием постулата является конкретизация функции  $\Pi = \Pi(\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_k)$  в форме  $\Pi = \sum_{s=1}^k b_s \gamma_s$ , где  $b_s$  — стоимость (цена) единицы ресурса (товара)  $\gamma_s$ .

Полученная формула записи функции цены, по своей сути, принципиально отличается от похожей по форме аддитивной функции записи обобщенного показателя качества, которую вводят с целью скаляризации векторной оценки при оптимизации различных технических систем.

Задача оптимизации критерия цены (ОКЦ) налагает на обобщенный параметр  $\mathcal{E}$  условие его постоянства ( $\mathcal{E} = \text{const}$ ). Единственно возможным способом удовлетворить это требование является фиксирование всех выходных параметров АЭП. При этом эффективность можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{E} = (Y_j = \text{const}), \quad j = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Задание фиксированных значений  $Y_j = \text{const}, j = \overline{1, m}$  есть создание вполне определенных, фиксированных потребительских свойств АЭП. Таким образом, в выражении (6) зафиксировано не что иное как требования потребителя, преследуемая им цель. При этом данное выражение и, следовательно, методология оптимизации, инвариантны относительно величины фиксированного значения цели АЭП и определяют лишь форму ее задания. Именно в логическом обосновании формы задания цели АЭП состоит истинный смысл и значение выражения (6). Тем самым запрещается любой произвол в этом отношении [8].

Задача оптимизации критерия эффективности (ОКЭ) предполагает нахождение его максимума. Но эффективность в виде  $\mathcal{E}$  представляет собой вектор, а операция оптимизации вектора не имеет смысла. Единственным логически возможным способом разрешения этого противоречия является фиксация всех компонент вектора кроме одного, который и подлежит максимизации. В этом случае обобщенный параметр  $\mathcal{E}$  приобретает форму

$$\mathcal{E} = (Y_q, Y_j = \text{const}), \quad j = \overline{1, m}, \quad j \neq q, \quad (7)$$

где  $q$  — нефиксированный выходной параметр АЭП.

Выражение (7) накладывает на выходной параметр  $Y_j, j \neq q$ , только требование фиксированности, но оставляет свободу в выборе конкретных значений.

Полученный вывод позволяет для решения задач параметрического и структурного синтеза использовать запас работоспособности АЭП или выбрать один, определяющий для данного электропривода показатель (критерий), который следует оптимизировать. Например, для электроприводов циклического действия при решении задачи структурного синтеза в качестве критерия может быть выбран показатель минимума колебательности инерционных масс или критерий минимума габарита и мощности электродвигателя. При этом на запас работоспособности вводится ограничение, которое при оптимизации обязательно должно быть выполнено. Такой подход показал свою эффективность при решении задачи параметрического синтеза электропривода двухстворчатых ворот шлюза [12]. При выборе ограничений на значения оставшихся показателей качества предлагается использовать критерий равенства, целевая функция которого строится по принципу минимакса или максимина [8].

### Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что АЭП является сложной электромеханической системой, которая характеризуется разнообразными и противоречивыми по своей природе показателями качества. Задача структурно-параметрического синтеза АЭП является задачей векторной или многокритериальной оптимизации [8], [10], для решения которой 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.

Для решения задачи структурного синтеза 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 РТМ 212.0106–81 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 [2], [6], [8] показано, что для решения задачи параметрического синтеза электротехнических систем, 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. Применение этого показателя в качестве целевой функции позволяет получить и положительный социальный аспект, который выражается в снижении стрессовых ситуаций для персонала, связанных с отказами элементов АЭП и необходимостью принятия мер по их ликвидации.

Рассмотренная в статье методология оптимизации АЭП предполагает возможность использования запаса работоспособности в качестве целевой функции для решения задач структурного и параметрического синтеза, что предполагает необходимость построения областей работоспособности и вычисление запаса работоспособности для каждого исследуемого варианта электропривода. 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 варианта решения или оптимальных значений первичных параметров АЭП.

### Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Структурно-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. На первом этапе структурного синтеза следует использовать безусловный критерий оптимальности [8], который позволяет сформировать множество Парето-оптимальных решений.
3. При решении задачи параметрического синтеза АЭП в качестве целевой функции в большинстве случаев рекомендуется выбирать запас работоспособности. Получаемое 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.
4. Информация о запасе работоспособности в процессе эксплуатации АЭП позволяет с высокой достоверностью решать задачи контроля и прогнозирования состояния его элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязев М. В. Многокритериальная оптимизация управления двухмассовой электромеханической системы / М. В. Грязев, О. А. Кузнецова, В. А. Сушкин // Электротехнические системы и комплексы. — 2013. — № 21. — С. 60–70.
2. 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.
3. Селиванов В. А. Критерии оптимизации и необходимость построения параметрических систем электропривода / В. А. Селиванов // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2011. — № 1 (30). — С. 120–124.
4. 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.

5. Сташинов Ю. П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 / Ю. П. Сташинов // *Электротехника*. — 2016. — № 1. — С. 2–7.
6. Саушев А. В. Показатели надежности при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов / А. В. Саушев, Е. В. Бова, Г. Л. Демидова // *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.
7. Саушев А. В. Математическое описание многомассовых механических систем электропривода / А. В. Саушев // *Электричество*. — 2013. — № 3. — С. 27–33.
8. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем: монография / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.
9. Храмшин В. Р. Разработка тиристорных электроприводов с двухзонным регулированием скорости с улучшенными энергетическими показателями / В. Р. Храмшин, А. А. Лукин // *Тинчуринские чтения: Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции: в 4 т.* — Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2010. — С. 72–73.
10. Кузнецова О. А. Многокритериальная оптимизация электромеханических систем с асинхронным двигателем / О. А. Кузнецова // *Приводная техника*. — 2010. — № 6. — С. 20–26.
11. Локарев В. И. Оптимизация асинхронного электропривода на основе обобщенного критерия энергетической эффективности / В. И. Локарев // *Электромашиностроение и электрооборудование*. — 2006. — № 66. — С. 305–306.
12. Саушев А. В. Моделирование и оптимизация режимов работы электропривода двухстворчатых ворот шлюза / А. В. Саушев, В. А. Шошмин // *Гидротехническое строительство*. — 2009. — № 10. — С. 40–44.

## REFERENCES

1. Gryazev, M. V., O. A. Kuznetsova, and V.A. Sushkin. “Multicriterion optimization management of electromechanic system with two masses.” *Electrotechnical Systems and Complexes* 21 (2013): 60–70.
2. 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.
3. Selivanov, V. A. “The criteria for the optimization and the necessity for the construction of electric drive parametric systems.” *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* 1(30) (2011): 120–124.
4. 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.
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. 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.
7. Saushev, A. V. “Matematicheskoe opisanie mnogomassovykh mekhanicheskikh sistem elektroprivoda.” *Elektrichestvo* 3 (2013): 27–33.
8. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
9. Khramshin, V. R., and A. A. Lukin. “Razrabotka tiristornykh elektroprivodov s dvukhzonnym regulirovaniem skorosti s uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami.” *Tinchurinskii chteniya: Materialy dokladov V Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii: v 4 t.* Kazan’: Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2010. 72–73.
10. Kuznetsova, O. A. “Mnogokriterial’naya optimizatsiya elektromekhanicheskikh sistem s asinkhronnym dvigatелеm.” *Privodnaya tekhnika* 6 (2010): 20–26.
11. Lokarev, V. I. “Optimization of the asynchronous electric drive on the basis of the generalized criterion of power efficiency.” *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie* 66 (2006): 305–306.
12. Saushev, A. V., and V. A. Shoshmin. “Modelirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty elektroprivoda dvukhstvorchatykh vorot shlyuza.” *Gidrotekhnicheskoe stroitel’stvo* 10 (2009): 40–44.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Саушев Александр Васильевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [saushev@bk.ru](mailto:saushev@bk.ru),  
[SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@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](mailto:ep-gumrf@bk.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Saushev, Alexander V.** —  
Doctor of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [saushev@bk.ru](mailto:saushev@bk.ru),  
[SaushevAV@gumrf.ru](mailto:SaushevAV@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](mailto:ep-gumrf@bk.ru),  
[kaf\\_electroprivod@gumrf.ru](mailto:kaf_electroprivod@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 20 марта 2019 г.  
Received: March 20, 2019.*