

УДК 621.314.58:681.515

# СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО АППАРАТА

**В.Г. Букреев**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: [bukreev@tpu.ru](mailto:bukreev@tpu.ru)

**Е.Б. Шандарова**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30  
E-mail: [shandarovaelena@mail.ru](mailto:shandarovaelena@mail.ru)

**В.М. Рулевский**

*Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*  
634034, г. Томск, пр. Ленина, 40  
E-mail: [rulevsky@niiuem.tomsk.ru](mailto:rulevsky@niiuem.tomsk.ru)

**Ключевые слова:** система электропитания погружного оборудования, модель в пространстве состояний, аппроксимация, передаточная функция, стабилизирующий регулятор.

**Аннотация:** В работе рассматривается подход к синтезу стабилизирующего регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного телеуправляемого аппарата. При этом описание системы электропитания базируется на аппроксимации ее сложной математической модели передаточными функциями и дальнейшим преобразованием в векторно-матричное уравнение с интервальными значениями параметров. В результате проведенных исследований установлено, что для стабилизации напряжения во всем диапазоне изменения нагрузки в рассматриваемой системе электропитания, необходимо использовать три оптимальных регулятора, каждый из которых будет работать в своем диапазоне регулирования. Переключение регуляторов можно осуществлять на основе информационных сигналов, поступающих по телеметрическому каналу от системы управления погружной части глубоководного аппарата.

## 1. Введение

Значительный объем геологоразведочных, аварийно-спасательных, обзорно-поисковых и других видов работ на морском дне в пределах больших площадей с высокой качественной достоверностью вызвал необходимость использования подводных технических средств. В наибольшей степени решению этой задачи отвечают телеуправляемые обитаемые подводные аппараты, оснащенные различной научно-исследовательской и специальной аппаратурой. Разработка и создание эффективных и высоконадежных глубоководных аппаратов в значительной степени зависит от харак-

теристик систем электропитания (СЭП), обеспечивающих стабильное напряжение на потребляющих нагрузках при наименьших массогабаритных показателях [1,2]. Теоретические исследования таких систем и вопросы их проектирования чрезвычайно актуальны и имеют значительную практическую ценность.

Схема замещения СЭП автономного объекта изображена на рис. 1, где  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  – Г-образные LC фильтры; Т1, Т2 – трехфазные трансформаторы; КЛ – кабельная линия; АИН – автономный инвертор напряжения с коэффициентом  $k_m$  модуляции; Н – потребляющая нагрузка с эквивалентным активным сопротивлением  $R_n$ . Электрическая схема замещения, а также математическая модель, описывающая работу системы электропитания при изменении нагрузки, представлены в работах авторов [3, 4].

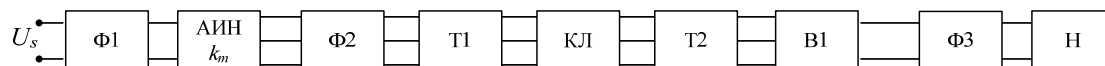


Рис. 1. Схема замещения СЭП глубоководного телеуправляемого аппарата.

Рассматривая задачу построения стабилизирующего регулятора напряжения в СЭП при изменении параметров нагрузки, предлагается использовать решения в рамках хорошо апробированной теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов, изложенной, например, в работе [5].

## 2. Синтез оптимального регулятора

Для структуры СЭП с ПИ-регулятором в форме отрицательной обратной связи (рис. 2) запишем в общем виде модель замкнутой системы с регулированием выходной  $y(t)$  переменной. При этом описание системы электропитания базируется на аппроксимации ее многомерной модели передаточными функциями и дальнейшим преобразованием в векторно-матричное уравнение пониженного порядка. Принятые обозначения:  $y^*(t)$  – задающее значение измеряемой переменной состояния;  $c^T$  – вектор-строка, элементы которой характеризуют свойства датчиков для измерения переменных  $x(t)$  состояния СЭП;  $\varepsilon(t)$  – ошибка регулирования;  $k_p, k_i$  – параметры пропорциональной и интегральной составляющих закона регулирования.

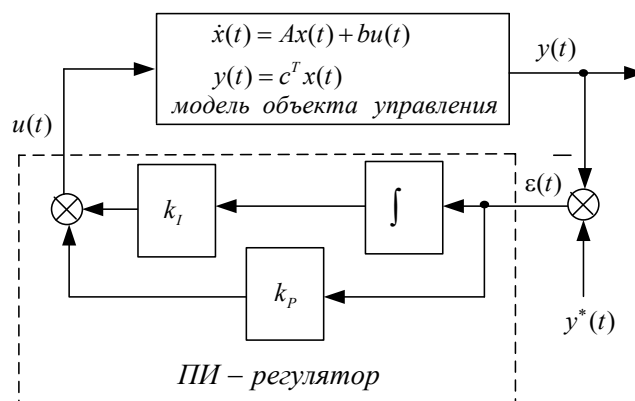


Рис. 2. Структура СЭП в пространстве переменных состояний с ПИ-регулятором.

Для синтеза оптимального регулятора будем использовать линейную математическую модель СЭП со стационарными параметрами, которая в пространстве состояний представляет собой векторно-матричное уравнение:

$$(1) \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t),$$

где  $x(t)$  –  $n$ -мерный вектор переменных состояния линейной модели СЭП;  $A$  –  $n \times n$ -матрица стационарных параметров модели системы;  $b$  –  $n$ -мерный вектор стационарных параметров управляющего воздействия;  $u(t)$  – скалярное управляющее воздействие (выходная переменная регулятора).

Пропорционально-интегральный закон формирования управляющего воздействия  $u(t)$  на произвольном интервале  $[t_0, t]$  времени записывается следующим уравнением:

$$u(t) = k_p \varepsilon(t) + k_I \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) d\tau, \text{ где } t_0 - \text{ время начального состояния объекта управления.}$$

Рассматривается синтез оптимального регулятора для стабилизации выходного напряжения  $U_{Cd}(t)$  СЭП, компенсирующего значительные изменения параметров кабельной линии и нагрузки, представленной на рис. 1. Для упрощения структуры регулятора в качестве передаточной функции СЭП используется передаточная функция с двумя полюсами. Принимая, что напряжение на нагрузке в операторной форме  $U_{Cd}(p)$ , а коэффициент модуляции АИН –  $k_m(t)$ , запишем передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{k_0}{T_1 p^2 + T_2 p + 1} = \frac{U_{Cd}(p)}{k_m(p)}.$$

Перейдя от операторной формы записи к функции времени, получим дифференциальное уравнение второго порядка

$$\ddot{U}_{Cd}(t) = -\frac{T_2}{T_1} \dot{U}_{Cd}(t) - \frac{1}{T_1} U_{Cd}(t) + \frac{k_0}{T_1} k_m(t).$$

После введения следующих обозначений:

$$x_1(t) = U_{Cd}(t), \quad a_1 = 1/T_1, \quad a_2 = T_2/T_1, \quad b_1 = k_0/T_1, \quad u(t) = k_m(t)$$

система дифференциальных уравнений в форме Коши запишется в виде

$$(2) \quad \begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -a_1 x_1(t) - a_2 x_2(t) + b_1 u(t) \end{cases}$$

или в матрично-векторной форме вида (1), где

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \end{bmatrix}.$$

### 3. Результаты численного моделирования

Численное моделирование выполнялось для системы электропитания мощностью 48 кВт с эквивалентным сопротивлением нагрузки  $R_n = 5,5 R_{\text{ном}}$  и коэффициентом модуляции АИН, равном 0,7. По полученной передаточной функции записана система дифференциальных уравнений в форме Коши (2), что позволило определить матрицы  $A$  и  $b$ . Для нахождения коэффициентов передачи оптимального регулятора записывается уравнение Рикатти [6]:

$$P(t)br^{-1}b^T P(t) - P(t)A - A^T P(t) - Q = 0,$$

где  $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix}$  – матрица штрафных коэффициентов,  $r = 0,001$  – штрафной коэффициент, при увеличении которого динамика системы становится менее форсированной и переходные процессы затягиваются.

Коэффициенты регулятора найдены из выражения  $k^T = r^{-1}b^T P$  и для заданных коэффициентов штрафа получились равными  $k_1 = 0,44$ ,  $k_2 = 0,36$ . Синтезированный регулятор позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке, сопротивление которой меняется в диапазоне  $3,4R_{\text{ном}} \leq R_n \leq 10R_{\text{ном}}$  при отклонении напряжения  $U_{Cd}(t)$  от номинального за время 20 мс от начала переходного процесса в пределах от 1% до 10%, соответственно.

Регулятор, построенный на основе передаточной функции, полученной при работе СЭП на номинальную нагрузку, позволяет стабилизировать напряжение при изменении сопротивления нагрузки в пределах  $0,95R_{\text{ном}} \leq R_n \leq 1,4R_{\text{ном}}$  с погрешностью стабилизации от 9% до 9,3%. Проведенные исследования показали, что для стабилизации напряжения при изменении нагрузки в пределах  $1,5R_{\text{ном}} \leq R_n \leq 3,3R_{\text{ном}}$  необходимо введение третьего регулятора.

Структура предложенного оптимального регулятора представлена на рис. 3. Информационные сигналы  $S_1$  и  $S_2$ , поступающие на переключающее устройство (ПУ) от системы управления (СУ), представляют собой комбинации нулей и единиц. При этом сигнал  $S_1$  определяет подключение одного из регуляторов в соответствии со значением текущей нагрузки, а сигнал  $S_2$  – отключение другого регулятора с определенным запаздыванием.

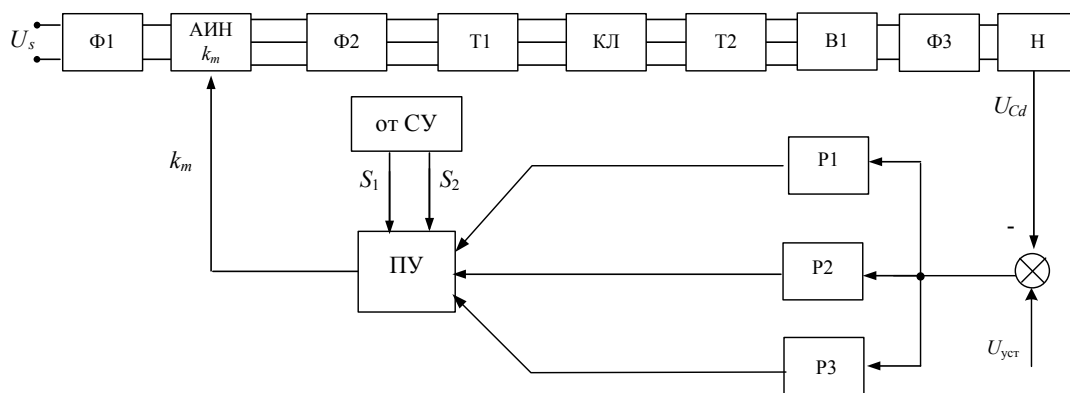
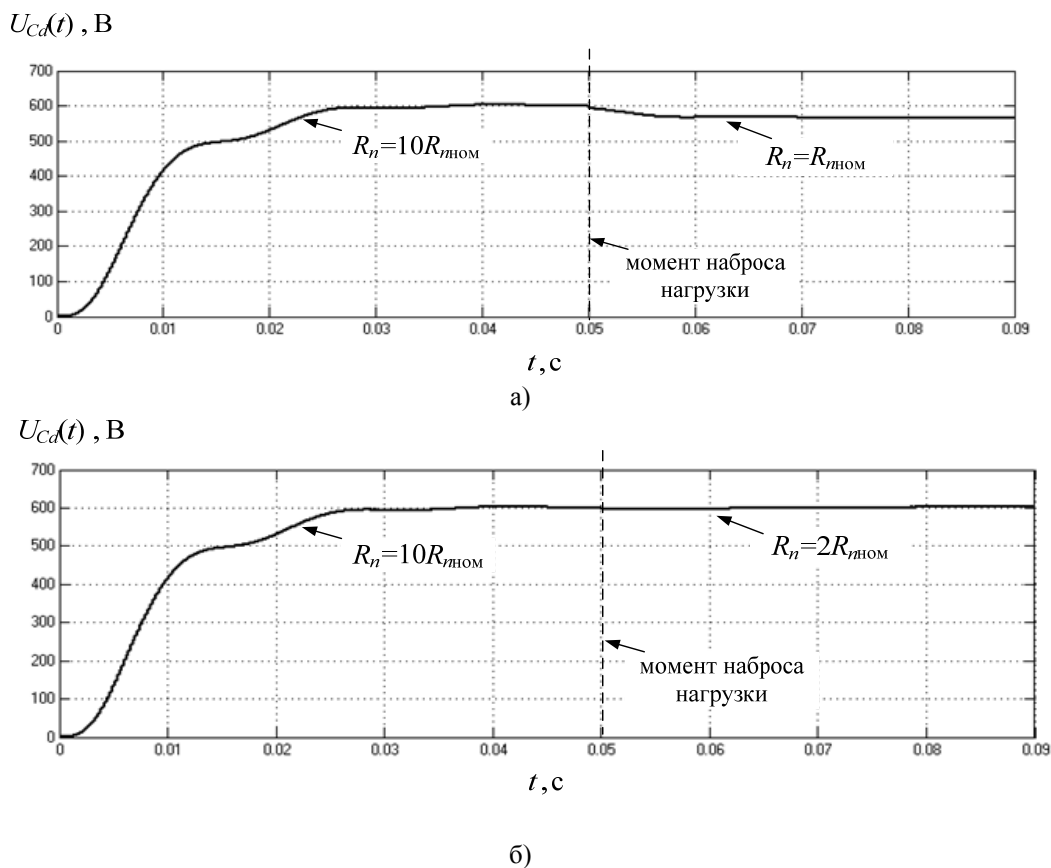


Рис. 3. Структура СЭП с комбинированным регулятором и непосредственным измерением напряжения на нагрузке.

На рис. 4,а представлены результаты работы комбинированного оптимального регулятора при включении системы в режиме холостого хода (срабатывает регулятор P1, настроенный на режим малых нагрузок с коэффициентами  $k_1$  и  $k_2$ ) и последующем подключении номинальной нагрузки (подключается регулятор P2, настроенный на номинальный режим с коэффициентами  $k_{12} = 0,048$ ,  $k_{22} = 0,04$ ).

Рис. 4,б представляет работу комбинированного регулятора при подключении нагрузки с сопротивлением  $R_n = 2R_{\text{ном}}$ , при этом стабилизация напряжения осуществляется регулятором P3 с параметрами  $k_{13} = 0,285$ ,  $k_{33} = 0,09$ . На всех представленных рисунках подключение нагрузки происходит в момент времени 50 мс и погрешность стабилизации не превышает 10% от задающего напряжения 600 В.



**Рис. 4.** Напряжение на нагрузке при действии комбинированного оптимального регулятора (а – изменение  $R_n$  от  $10R_{нном}$  до  $R_{нном}$ ; б – изменение  $R_n$  от  $10R_{нном}$  до  $2R_{нном}$ ).

Проведенные исследования показали, что для стабилизации напряжения во всех режимах работы системы электропитания, с погрешностью, не превышающей 10%, необходимо использовать, как минимум, три оптимальных регулятора, каждый из которых будет работать в своем диапазоне регулирования. Переключение регуляторов можно обеспечить согласно информационным сигналам, поступающим по телеметрическому каналу от системы управления погружной части глубоководного аппарата. Комбинации управляющих сигналов формируются в соответствии с режимами работы потребляющей нагрузки системы электропитания.

## Список литературы

1. Бочаров Л.Ю. О некоторых тенденциях в развитии автономных необитаемых подводных аппаратов // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы пятой всероссийской научно-технической конференции. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 12-18.
2. Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2(16). С. 24-32.
3. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 4. С. 119-132.
4. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Нелинейная модель системы электропитания погружных объектов с учетом изменения длины кабель-троса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 11. С. 114-123.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712с.

6. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М.: Изд-во МГТУ, 1993. 492 с.