

Рулевский В.М.¹, Букреев В.Г.², Шандарова Е.Б.²¹ Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

СИНТЕЗ СУБОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО АППАРАТА

В статье изложен подход к синтезу субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу на основе желаемой передаточной функции. При построении регулятора используются полиномы Ньютона и Баттерворта второго и третьего порядков, определяется оптимальный порядок полиномов, время регулирования и частота среза, позволяющие получить заданные требования к длительности переходного процесса в системе электропитания без значительного перерегулирования. Предложено использовать полиномы второго порядка, что значительно упрощает вид регулятора без потери качества стабилизации. В результате исследований вариантов синтезированных регуляторов установлено, что регулятор с фиксированными параметрами не позволяет отработать весь диапазон изменения нагрузки в рассматриваемой системе электропитания и обеспечить требуемое качество напряжения на нагрузке. Для расширения пределов стабилизации напряжения в системе электропитания предложено использовать регулятор с переменными параметрами, который реализуется в виде двух регуляторов, работающих в своем диапазоне изменения нагрузки. Для реальных систем электропитания мощностью 48 и 21 кВт синтезированы комбинированные регуляторы, позволяющие стабилизировать напряжение на нагрузке с заданной погрешностью в широком диапазоне ее изменения. Разработан алгоритм переключения регуляторов при изменении параметров нагрузки по сигналам, поступающим от системы управления. При этом для обеспечения более широкого диапазона действия регулятора в режиме номинальных нагрузок предложено использование положительной вольт-добавки, величина которой определяется технически измеряемым фазным током выходного фильтра автономного инвертора напряжения. Работа полученных регуляторов проверялась на имитационной модели системы электропитания телеуправляемого глубоководного аппарата, реализованной в среде Matlab.

Ключевые слова: система электропитания, автономный объект, субоптимальный регулятор, желаемая передаточная функция, стабилизация напряжения, комбинированный регулятор, математическое моделирование, аппроксимация, Matlab/Simulink.

ВВЕДЕНИЕ

Важными тенденциями в проведении научных исследований во многих странах мира является совершенствование и модернизация телеуправляемых подводных аппаратов специального назначения [1-3]. Такие аппараты обычно оснащены гидроакустической измерительной аппаратурой, профилографами и антеннами бокового обзора. Они целесообразны для выполнения работ по поиску различных затонувших объектов на больших площадях поиска в реальном времени, а также поведения инспекции трубопроводов и кабелей связей. Для таких аппаратов используют системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу [4-6], в которых существует проблема обеспечения требуемого качества питающего напряжения на удаленной электромеханической нагрузке [7-14]. В первую очередь эта проблема определяется невозможностью организации стабилизирующих регуляторов с использованием датчиков напряжения и тока, установленных на удаленной от источника энергии полезной нагрузки. Кроме того, сложность математического описания всего тракта преобразования и передачи энергии в таких системах значительно затрудняет получение в аналитическом виде законов регулирования напряжения.

В статье рассматривается построение субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания

(СЭП) глубоководного аппарата с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу. Термин «субоптимальность» характеризует допустимую степень упрощения модели СЭП для решения задачи синтеза оптимального регулятора. Кроме того, техническая невозможность получения достоверной информации о регулируемой величине напряжения на удаленной нагрузке СЭП не позволяет выполнить необходимые условия экстремальности критерия качества динамических процессов в классической трактовке теории оптимизации. Таким образом, на пути создания оптимального регулятора для рассматриваемой системы электропитания имеются ограничения, не позволяющие получить предельные значения качественных показателей регулирования при стабилизации выходного напряжения. Исследования показали, что в нашем случае сложная модель системы электропитания может быть аппроксимирована более простой моделью, позволяющей применить хорошо апробированную теорию оптимального управления линейными объектами [11,15,16].

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ПО ЖЕЛАЕМОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

Эквивалентная схема рассматриваемой СЭП представлена на **рис. 1**, где АИН – трехфазный автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией, на вход которого через LC -фильтр с параметрами R_s , L_s , C_s (блок «фильтр 1») поступает постоянное напряжение U_s . Инвертор формирует трехфазную систему линейных напряжений $u_{AB}(t)$, $u_{BC}(t)$, $u_{CA}(t)$. Для

сглаживания пульсаций напряжения на входе кабель-троса между инвертором и повышающим трансформатором Т1 включен LC -фильтр с параметрами R_a, L_a, C_a («фильтр 2»). Напряжение на конце кабель-троса понижается трансформатором Т2. Пульсации напряжения, вызванные коммутацией ключей выпрямителя В1, сглаживаются фильтром 3 с параметрами L_d, C_d . Длина кабель-троса СЭП не превышает 6 км и при расчетах учитывается как линия с сосредоточенными параметрами R_{ak}, L_{ak}, C_{ak} . Для компенсации емкостной составляющей тока кабель-троса в схему введено компенсирующее устройство с параметрами R_m, L_m . Полезная нагрузка системы электропитания имеет активный характер и на схеме представлена сопротивлением R_n .

Синтезируемый регулятор должен обеспечивать следующие параметры переходного процесса, вызванного изменением нагрузки в системе электропитания:

- при длительности регулирования $t_p = 20$ мс отклонение напряжения на нагрузке от установившегося значения не должно превышать $\Delta = 10\%$;
- величина перерегулирования σ должна составлять не более 20%.

На основе анализа характеристик реальной СЭП для последующего построения регулятора разработаны математические и имитационные модели, позволяющие с достаточной точностью моделировать ее основные режимы работы при различных коэффициентах модуляции k_m АИН [12,13].

Для построения математической модели системы использовался метод переменных состояния, позволяющий применить современную теорию управления для построения эффективных регуляторов в замкнутой системе [14]. Определяющей тенденцией развития этого подхода для многомерного объекта большого порядка можно считать его описание в виде аппроксимирующих передаточных функций [11,15,16]. Такой подход позволяет значительно уменьшить количество

дифференциальных уравнений, использующихся для синтеза субоптимального регулятора.

Синтез регулятора по желаемой передаточной функции основан на условии устойчивости, согласно которому исследуется распределение корней характеристического уравнения. В свою очередь, корни однозначно зависят от коэффициентов характеристического уравнения, поэтому модальное управление можно трактовать как целенаправленное изменение корней характеристического уравнения объекта с целью обеспечения требований, предъявляемых к качеству переходных процессов в замкнутой регулируемой системе [17].

Для построения регулятора по методу желаемой передаточной функции [18] передаточная функция объекта задается в виде

$$W_0(s) = \frac{P(s)}{R(s)} = \frac{P^-(s)P^+(s)}{R^-(s)R^+(s)}, \quad (1)$$

где $P(s)$, $R(s)$ – полиномы с левыми нулями; $P^-(s)$, $R^-(s)$ – полиномы с правыми и нейтральными нулями, при этом выбранная проектировщиком желаемая передаточная функция замкнутой системы $W_{\text{ж}}(s)$ должна быть физически осуществима, т.е. удовлетворять следующим условиям:

$$W_{\text{ж}}(s) = \frac{P^+(s)M(s)}{G(s)}; \quad 1 - W_{\text{ж}}(s) = \frac{R^+(s)N(s)}{G(s)}, \quad (2)$$

где $G(s)$ – знаменатель желаемой передаточной функции, порядок и коэффициенты которого определяются требованиями к качеству переходного процесса проектируемой системы; $M(s)$, $N(s)$ – неопределенные полиномы, коэффициенты которых находятся из полиномиального уравнения [18]:

$$P^+(s) \cdot M(s) + R^+(s) \cdot N(s) \cdot s^r = G(s). \quad (3)$$

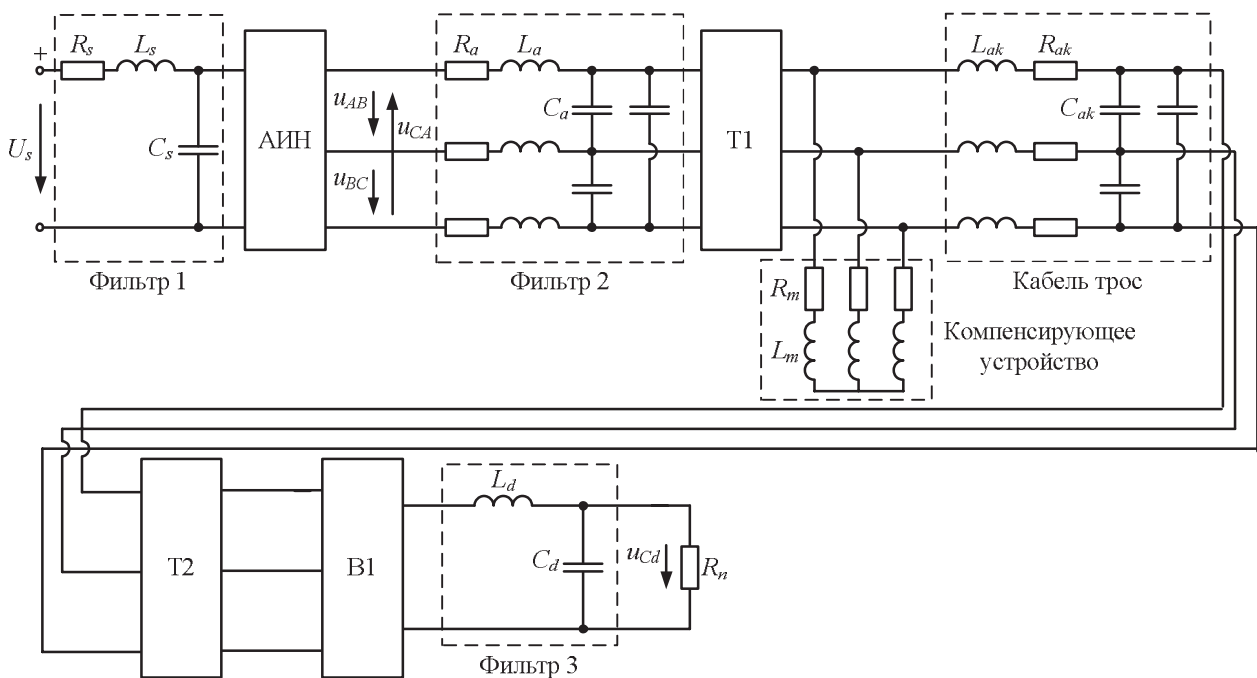


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения СЭП

Тогда передаточная функция регулятора, обеспечивающего желаемое расположение корней характеристического уравнения замкнутой системы, запишется в виде

$$W_p(s) = \frac{R^-(s)M(s)}{P^-(s)N(s)s^r}, \quad (4)$$

где r – порядок астатизма относительно возмущения.

Одним из важнейших этапов синтеза регулятора является корректный выбор желаемой передаточной функции, в частности ее вид и порядок, который определяется исходя из заданных требований к качеству регулируемого процесса.

В литературе приводятся стандартные нормированные передаточные функции, представленные в виде

$$W_n(q) = \frac{b'_0 q^m + b'_1 q^{m-1} + \dots + b'_m}{q^n + a'_1 q^{n-1} + \dots + a'_{n-1} q + 1}, \quad (5)$$

для которых определены полиномы знаменателей 1-8 порядков $G(s)$, время регулирования и перерегулирование, а также представлены соответствующие им графики переходных процессов [19, 20]. Желаемая передаточная функция приводится к виду

$$W_{ж}(s) = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + 1}, \quad (6)$$

при этом ее коэффициенты связаны с коэффициентами нормированной передаточной функции следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} q &= \alpha \cdot s, \quad b_i = b'_i \alpha^{m-i}, \quad i = 0, 1, \dots, m; \\ a_0 &= \alpha^n, \quad a_k = a'_k \alpha^{n-k}, \quad a_n = 1, \quad k = 1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \quad (7)$$

Коэффициент $\alpha = t_p / \tau_p$, поэтому требуемое время регулирования t_p будет обеспечено при вычислении коэффициентов по формулам (7).

При выборе характеристического полинома рассматривались передаточные функции (ПФ) с одинаковыми полюсами, записанные на основании полиномов Ньютона, а также ПФ с полиномами Баттерворта [19, 20]. Все эти функции не имеют нулей, их числители являются константами, что позволяет обеспечить простоту реализации синтезируемого регулятора.

По переходной характеристике, представляющей собой отношение напряжения на нагрузке $u_{Ca}(t)$ к входному напряжению U_s без учета фильтра на входе автономного инвертора напряжения при коэффициенте модуляции равном 0,7 и номинальном сопротивлении нагрузки на имитационной модели, построенной в программной среде моделирования Matlab [12], получены передаточные функции, при этом число полюсов изменялось от двух до трех.

При моделировании системы электропитания глубоководного аппарата мощностью 48 кВт использовались следующие параметры электрической схемы замещения, представленной на **рис. 1**:

входное напряжение питания $U_s = 512$ В;

частота коммутаций АИН $f_{\text{ШИМ}} = 48$ кГц; частота выходного напряжения АИН $f = 1000$ Гц;

параметры фильтра 1: $R_s = 0,12$ Ом, $L_s = 0,7$ мГн, $C_s = 7720$ мкФ;

параметры фильтра 2: $R_a = 0,01$ Ом, $L_a = 0,1$ мГн, $C_a = 108$ мкФ;

коэффициент трансформации идеального повышающего трансформатора Т1: $k_{T1} = 0,5$;

коэффициент трансформации идеального понижающего трансформатора Т2: $k_{T2} = 2,22$;

параметры кабель-троса: $R_{ak} = 19,2$ Ом, $L_{ak} = 2$ мГн, $C_{ak} = 3,6$ мкФ;

параметры фильтра 3: $L_d = 0,3$ мГн, $C_d = 2000$ мкФ.

Удаленный электромеханический объект имитировался активной нагрузкой с номинальным сопротивлением $R_{\text{ном}} = 7,66$ Ом. К выходу повышающего трансформатора подключено компенсирующее устройство с параметрами $R_m = 20$ Ом, $L_m = 21$ мГн, позволяющее компенсировать реактивную емкостную составляющую тока кабель-троса. Индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток трансформаторов не учитывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как показали проведенные исследования, точность аппроксимации переходной характеристики передающей функцией с тремя полюсами:

$$W(s) = \frac{0,923}{2,2 \cdot 10^{-10} s^3 + 8,54 \cdot 10^{-7} s^2 + 9,4 \cdot 10^{-3} s + 1}$$

составила 99,25%, с двумя полюсами – 99,22%:

$$W(s) = \frac{0,923}{8,7 \cdot 10^{-7} s^2 + 9,36 \cdot 10^{-3} s + 1} = \frac{R(s)}{P(s)}.$$

Для дальнейшего синтеза регулятора выбрана переходная характеристика, построенная по передаточной функции с двумя полюсами (**рис. 2**, кривая 1), что позволяет значительно упростить вид регулятора без потери качества стабилизации.

Передаточные функции (ПФ) с одинаковыми полюсами обладают монотонными переходными характеристиками, при этом уменьшение времени регулирования вызывает увеличение перерегулирования в системе. В качестве примера на **рис. 2** представлены переходные характеристики для ПФ с одинаковыми полюсами для полинома второго порядка. Повышение порядка характеристического полинома затягивает длительность переходного процесса. Для дальнейшего исследования выбраны характеристические полиномы второй степени с временем регулирования 0,02 и 0,025 с.

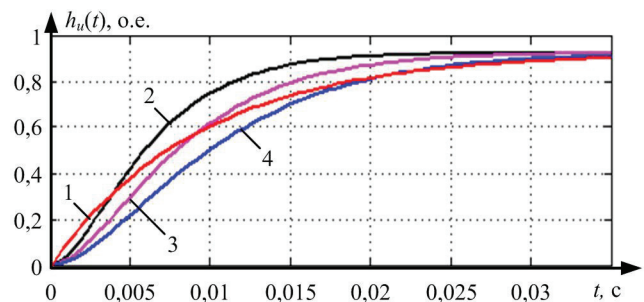


Рис. 2. Переходные характеристики для ПФ с одинаковыми полюсами (кривая 1 – характеристика исследуемой системы мощностью 48 кВт; кривая 2 – при $t_p = 0,015$ с; 3 – $t_p = 0,02$ с; 4 – $t_p = 0,025$ с)

Полиномы Баттерворта обычно записываются в виде соотношений с вещественными коэффициентами и нормируются по частоте среза $\omega_c=1$ [19]. Для выбора желаемой передаточной функции рассматривались полиномы второго и третьего порядков. Частота среза выбиралась по ЛАЧХ исследуемой системы и варьировалась от 100 до 300 рад/с (рис. 3).

Анализ переходных характеристик, представленных на рис. 3, показал, что с ростом частоты среза уменьшается время переходного процесса, но вместе с тем растет величина перерегулирования и колебательность.

На рис. 4 представлены переходные характеристики при частоте среза, равной 250 рад/с для фильтров второго ($n=2$) и третьего ($n=3$) порядка. Как видно из представленных графиков, увеличение порядка фильтра увеличивает перерегулирование и повышает колебательность системы. Также с повышением порядка фильтра увеличивается длительность переходного процесса.

Проведенные исследования показали, что для данной задачи целесообразно настроить систему с применением фильтра второго или третьего порядка. Следуя рекомендациям, приведенным в [18], порядок фильтра был принят равным степени характеристического полинома неизменяемой части исследуемой системы ($n=2$), а в качестве желаемой выбрана передаточная функция, рассчитанная при частоте среза, равной 250 рад/с. Также при построении регуляторов можно использовать передаточные функции, построенные на полиномах Ньютона при $t_p = 0,02$ и $0,025$ с.

Для выбранных передаточных функций по вышеизложенной методике синтезировано несколько регуляторов, в основу которых были положены полиномы Баттерворта и полиномы Ньютона. Работа полученных регуляторов проверялась на имитационной модели системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, реализованной в среде Matlab [12].

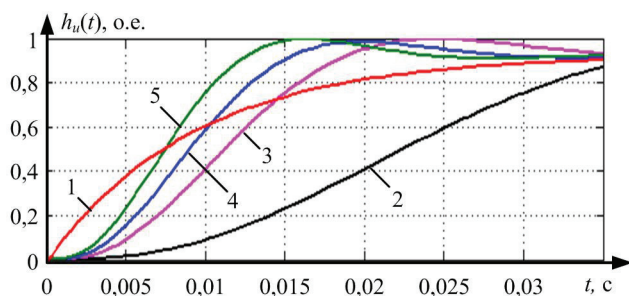


Рис. 3. Переходные характеристики для фильтра Баттерворта третьего порядка (кривая 1 – характеристика исследуемой системы; кривая 2 – при $\omega_c=100$; 3 – $\omega_c=200$; 4 – $\omega_c=250$; 5 – $\omega_c=300$)

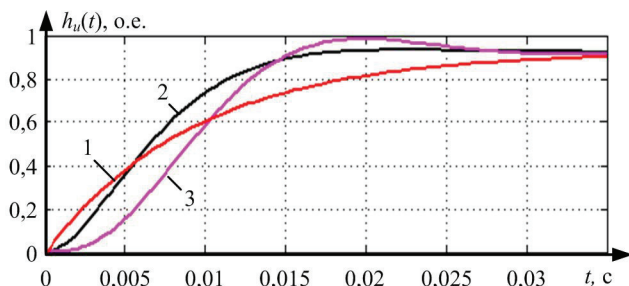


Рис. 4. Переходные характеристики для фильтра Баттерворта при $\omega_c=250$ (кривая 1 – характеристика исследуемой системы; кривая 2 – $n=2$; 3 – $n=3$)

Как показали эксперименты, приемлемое качество переходного процесса обеспечивает регулятор, построенный на полиноме Баттерворта при частоте среза 250 рад/с.

В результате проведенных исследований было установлено, что один регулятор не позволяет отработать весь диапазон изменения нагрузки и обеспечить требуемое качество напряжения. Так, регулятор, построенный на основании полинома Баттерворта при частоте среза 250 рад/с и переходной функции, снятой для номинального режима, не позволяет обеспечить приемлемое качество стабилизации выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки от $2,5R_{\text{ном}}$ до $3R_{\text{ном}}$, где $R_{\text{ном}}$ – номинальное сопротивление нагрузки.

Решением проблемы является регулятор с изменяемыми параметрами в соответствии с нагрузочными режимами работы. Таким образом, необходимо синтезировать как минимум два регулятора, каждый из которых будет настроен на определенный режим работы системы: например, первый регулятор работает в режиме пониженных нагрузок при изменении сопротивления от $10R_{\text{ном}}$ до $3R_{\text{ном}}$, второй должен обеспечить стабилизацию напряжения при изменении R_n от $2,9R_{\text{ном}}$ до $0,95R_{\text{ном}}$.

Схема системы электропитания для системы мощностью 48 кВт с комбинированным регулятором для стабилизации напряжения $u_{cd}(t)$ на нагрузке (Н) представлена на рис. 5, где Φ_1, Φ_2, Φ_3 – LC фильтры; КТ – кабель-трос; СУ – система управления; ПУ – переключающее устройство. Напряжение уставки $U_{\text{уст}}$ задавалось равным номинальному напряжению, значение которого для системы электропитания мощностью 48 кВт составляет 600 В.

На рис. 6 представлена кривая напряжения на нагрузке при действии регулятора с переменными параметрами, синтезированного на основании полиномов Баттерворта с частотой среза 250 рад/с, при этом передаточные функции регуляторов представлены в виде:

$$W_{p1}(s) = \frac{0,1 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 1,57 \cdot 10^{-2} \cdot s + 1}{1,69(1,6 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot s)};$$

$$W_{p2}(s) = \frac{8,7 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 + 9,36 \cdot 10^{-3} \cdot s + 1}{0,923(1,6 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot s)}.$$

При моделировании принималось, что включение системы электропитания происходит при работе автономного объекта в режиме, близком к холостому ходу $R_n=10R_{\text{ном}}$, при этом система управления СУ выдает управляющий сигнал $S=01$, и переключающее устройство ПУ вводит в действие регулятор Р1, настроенный на данный режим, который стабилизирует напряжение в соответствии с заданными требованиями (см. рис. 6). Затем, в момент времени $t=50$ мс, нагрузка увеличивается до номинальной, СУ формирует новый управляющий сигнал $S=10$, параметры регулятора изменяются и начинается новый процесс стабилизации. Для данного режима величина перерегулирования меньше 10%, а через 20 мс после подключения номинальной нагрузки точность стабилизации составляет 98%.

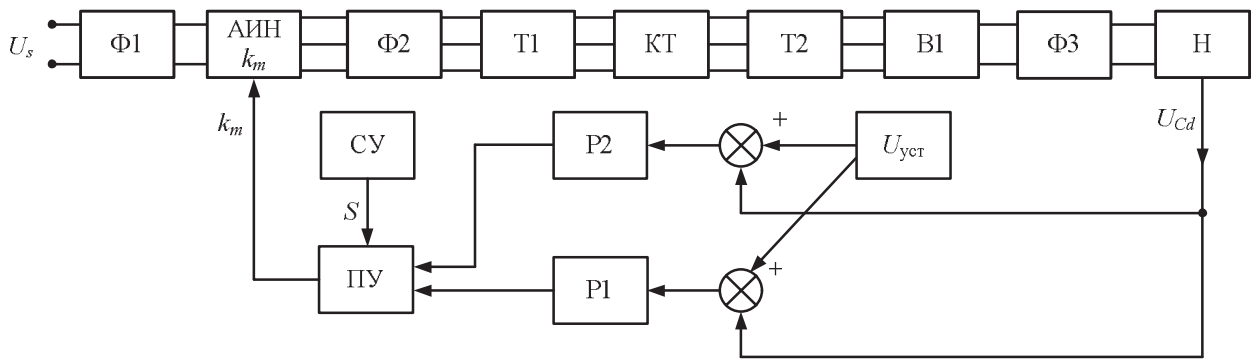


Рис. 5. Схема системы электропитания мощностью 48 кВт с комбинированным регулятором

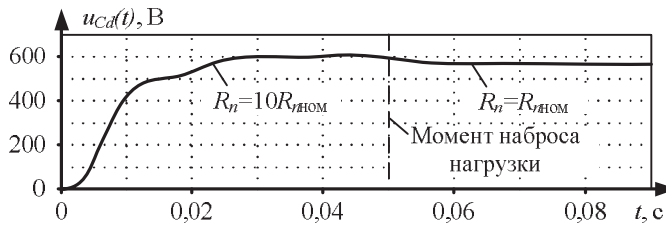


Рис. 6. Напряжение на нагрузке при действии регулятора с переменными параметрами при изменении нагрузки от режима, близкого к холостому ходу, до номинального

Регулятор P1, настроенный на режим пониженных нагрузок, позволяет стабилизировать напряжение при изменении нагрузки от $10R_{нном}$ до $3R_{нном}$ с погрешностью от 1 до 10%. Второй регулятор P2, настроенный на режим номинальных нагрузок, сопротивление которых меняется от $2,9R_{нном}$ до $0,95R_{нном}$, обеспечивает заданные требования к качеству напряжения, при этом погрешность стабилизации через 10 мс от начала переключения не превышает 10%.

Для системы электропитания мощностью 21 кВт, имеющей такую же структуру, как представлена на рис. 1, параметры которой приведены в работе [13],

также по желаемой передаточной функции на основании полинома Баттерворта второго порядка при частоте среза 250 рад/с синтезирован комбинированный регулятор, позволяющий стабилизировать напряжение на нагрузке в заданных пределах. Напряжение уставки $U_{уст}$ задавалось равным 300 В.

Схема системы электропитания мощностью 21 кВт с комбинированным регулятором представлена на рис. 7, где P1 – регулятор, настроенный на режим малых нагрузок и холостой ход ($3R_{нном} \leq R_n \leq 10R_{нном}$); P2 – регулятор, настроенный на режим номинальных нагрузок ($0,95R_{нном} \leq R_n \leq 2,9R_{нном}$); В2 – однофазный выпрямитель с LC-фильтром (Φ_4), предназначенный для выпрямления фазного тока фильтра i_Φ , который используется в регуляторе P2 в качестве положительной вольтодобавки для обеспечения более широкого диапазона действия регулятора в режиме номинальных нагрузок. Передаточные функции регуляторов записаны в виде:

$$W_{p1}(s) = \frac{0,23 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot s + 1}{1,6 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot s};$$

$$W_{p2}(s) = \frac{0,11 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 1 \cdot 10^{-2} \cdot s + 1}{0,72(1,6 \cdot 10^{-5} \cdot s^2 + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot s)}.$$

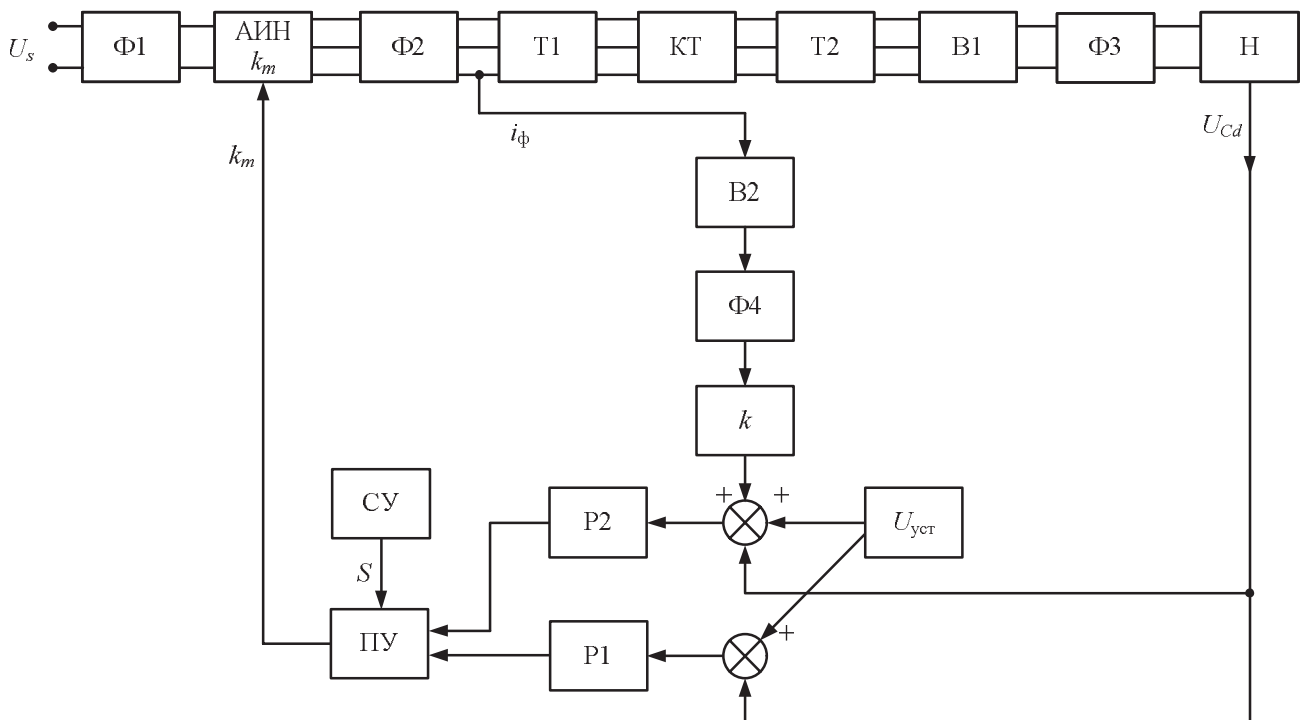


Рис. 7. Схема системы электропитания мощностью 21 кВт с комбинированным регулятором

Результаты работы регулятора представлены на рис. 8. Включение системы производится в режиме, близком к холостому ходу, затем через 40 мс подключается нагрузка (см. рис. 8, а – $R_n=5R_{\text{ном}}$; б – $R_n=R_{\text{ном}}$) при этом происходит подключение регулятора, настроенного на данный режим работы.

Включение в схему положительной вольт-добавки и работа каждого из двух синтезируемых регуляторов в своем диапазоне изменения нагрузки обеспечивает стабилизацию напряжения системы электропитания с погрешностью, не превышающей 10% в установившемся режиме. При этом перерегулирование не превышает 20% через 10 мс после начала переходного процесса.

Для дальнейшего практического применения полученных регуляторов необходимо встроить их в систему электропитания, позволяющую стабилизировать напряжение на нагрузке, при возможности непосредственного снятия данных с LC-фильтра (Ф2), расположенного после автономного инвертора напряжения. При проведении экспериментов на имитационной модели СЭП, созданной в среде Matlab/Simulink, при допущении о линейности математической модели исследуемой системы электропитания установлено, что в установившихся режимах работы напряжение на нагрузке и выпрямленное напряжение с фильтра Ф2 связаны линейным соотношением. Экспериментальным путем для систем мощностью 48 и 21 кВт определены коэффициенты линейной связи, которые будут использоваться в синтезе оптимального регулятора для пересчета изменения напряжения на нагрузке по измеренному выпрямленному напряжению фильтра Ф2. Синтез регулятора на основании полученных комбинированных регуляторов при возможности снятия данных только в промежуточных точках системы электропитания подводного аппарата является предметом дальнейшего исследования.

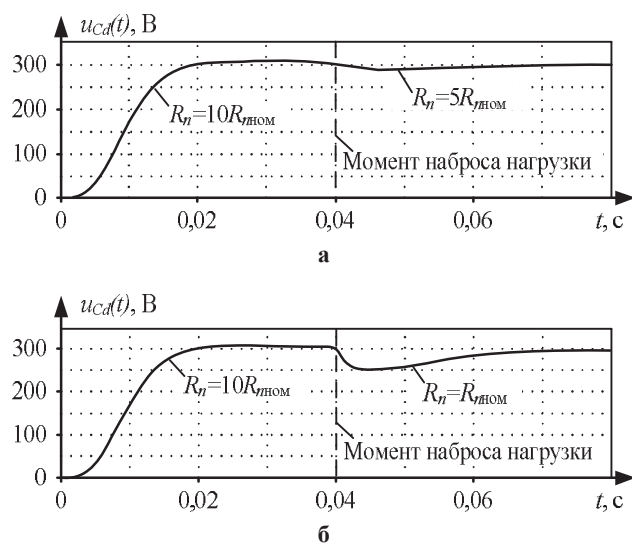


Рис. 8. Напряжение на нагрузке при действии регулятора с изменяющимися параметрами для системы мощностью 21 кВт: а – $R_n=5R_{\text{ном}}$; б – $R_n=R_{\text{ном}}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований теоретически установлено и подтверждено экспериментально, что для синтеза регулятора по методу желаемой передаточной функции в качестве характеристического полинома предпочтительно выбирать характеристические полиномы Ньютона второй степени с временем регулирования 0,02 и 0,025 с, а также полином Баттерворта при частоте среза 250 рад/с. Однако, использование только одного регулятора не позволяет отработать весь диапазон изменения параметров нагрузки в рассматриваемой системе электропитания и обеспечить требуемое качество регулирования напряжения.

Теоретическая новизна состоит в синтезе комбинированного регулятора, в состав которого входят два регулятора, один из которых настроен на работу в режиме пониженных нагрузок и позволяет стабилизировать напряжение при изменении нагрузки от $10R_{\text{ном}}$ до $3R_{\text{ном}}$ с погрешностью от 1 до 10%. Второй регулятор функционирует в режиме номинальной нагрузки, сопротивление которой изменяется от $2,9R_{\text{ном}}$ до $0,95R_{\text{ном}}$, и обеспечивает погрешность устойчивой стабилизации выходного напряжения не более 10% после 10 мс с момента переключения. Предложенная структура регулятора в сочетании с алгоритмом его работы позволяет расширить пределы стабилизации выходного напряжения системы электропитания глубоководного аппарата мощностью 48 кВт.

Для стабилизации напряжения в системе электропитания мощностью 21 кВт при значительном изменении нагрузки предлагается ввести в комбинированный регулятор сигнал положительной обратной связи, в качестве которого используется, пересчитанный в определенном масштабе, выпрямленный фазный ток фильтра, подключенного к выходу АИН. Включение положительной вольт-добавки и работа каждого из двух синтезируемых регуляторов в своем диапазоне изменения нагрузки позволяет компенсировать широкое изменение тока нагрузки. Этот алгоритм обеспечивает стабилизацию напряжения системы электропитания с погрешностью, не превышающей 10% в установившемся режиме и перерегулированием не более 20% через 10 мс после начала переходного процесса.

Статья написана по материалам исследований, выполненных в рамках работ по проекту 8.8184.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Илларионов Г.Ю., Лаптев К.З., Матвиенко А.П. Дополнительные требования к автономным необитаемым подводным аппаратам дальнего радиуса действия // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы седьмой всероссийской научно-технической конференции (г. Владивосток, 2-6 октября 2017 г.). Владивосток: Дальнаука, 2017. С. 25-33.
- Бочаров Л.Ю. О некоторых тенденциях в развитии автономных необитаемых подводных аппаратов // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы пятой всероссийской научно-технической конференции (г. Владивосток, 30 сентября – 4 октября 2013 г.). Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 12-18.
- Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. №2. С. 73-132.
- Исследование режимов работы системы энергообеспече-

- ния автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии / Герасимов В.А., Кувшиннов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. // Подводные исследования и робототехника. 2013. №2(16). С. 24-32.
5. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Управление инвертором в системе энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии // Технические проблемы освоения мирового океана: материалы пятой всероссийской научно-технической конференции (г. Владивосток, 30 сентября – 4 октября 2013 г.). Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 125-131.
 6. Wrinch M.C. Power delivery to subsea cabled observatories // *Sea Technology*. 2009, 50 (7), pp. 27-29.
 7. Румянцев М.Ю., Берилов А.В. Разработка системы электропитания подводных аппаратов // Практическая силовая электроника. 2012. № 1. С. 33-37.
 8. Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16 (4). P. 1958-1970.
 9. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., Hirose T., Suzuki A., Matsui Y., Sogo N., Sato R. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean // *Autonomous Underwater Vehicles*. 2016, no. 7778668. P. 177-180.
 10. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3/140. С. 47-55.
 11. 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.
 12. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarov E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Y.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 177(1), no. 012098. P. 1-6.
 13. Математическая модель системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе / Правикова А.А., Рулевский В.М., Ляпунов Д.Ю., Букреев В.Г. // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. №1. С.131-135.
 14. Хорошавин В.С., Зотов А.В., Мокрушин С.А. Общий подход к представлению динамики процесса в пространстве состояний // *Advanced Science*. 2017. № 2. С. 38-46.
 15. Bond B., Daniel L. Stable reduced models for nonlinear descriptor systems through piecewise linear approximation and projection // *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2009. Vol. 26, no. 12. P. 2116-2129.
 16. Storace M., De Feo O. Piecewise-linear approximation of nonlinear dynamical systems // *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 2004. Vol. 55 (4). P. 830-842.
 17. Лозгачев Г.И., Безрядин М. М. Программная реализация алгоритма построения модального робастного регулятора по передаточной функции замкнутой системы в случае наличия возмущающего воздействия // Вестник Воронежского государственного университета. 2010. № 2. С. 50-52.
 18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. М.: Физматлит, 2007. 312 с.
 19. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.
 20. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М.: БИНОМ, 1994. 352 с.

Поступила в редакцию 3 мая 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CREATING OF A SUBOPTIMAL VOLTAGE REGULATOR IN THE POWER SUPPLY OF THE DEEP-WATER VEHICLE

Victor M. Rulevskiy

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Director of Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. E-mail: rulevsky@niiam.tomsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9229-8611>.

Victor G. Bukreev

D.Sc. (Eng.), Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: bukreev@tpu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>.

Elena B. Shandarova

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: shandarovaelena@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>.

In this paper, the approach to creating of the suboptimal voltage regulator in the power supply of deep-water vehicle was represented, this approach is based on the desired transfer function. In the construction of regulator, polynomials of Newton and Butterworth second and third orders are used; the optimal order of the polynomials, settling time and cutoff frequency are identified. These parameters make it possible to obtain the specified requirements for the transition process duration in the power supply without significant overshoot. It was suggested to use the polynomials of the second order. This solution greatly simplifies the type of controller without any loss of stabilization quality. The results of the research of various developed regulators were shown. The regulator with fixed parameters

doesn't ensure the correct operation of the power supply in the entire load range. To expand the limits of voltage stabilization, the regulator with variable parameters was proposed. It is implemented in the form of two regulators operating within the specified load range. For real power supply systems with output power of 48 kW and 21 kW, combined regulators are synthesized. They allow us to stabilize the voltage at the load with the given error in a wide range of changes. The algorithm for switching regulators was developed and this algorithm is based on changing the load parameters. At the same time with providing a wider range of controller operation in the nominal loads mode, a positive accessory voltage is proposed. The accessory voltage value is determined by the technically

measured phase current of the output filter of the Autonomous voltage inverter. The work of the obtained regulators was tested on the simulation model of the power supply of the remote operating underwater vehicle, the model was implemented in Matlab/Simulink environment.

Keywords: power supply, autonomous object, suboptimal regulator, desired transfer function, voltage stabilization, combined regulator, mathematical modeling, approximation, Matlab/Simulink.

REFERENCES

1. Illarionov G.Yu., Laptev K.Z., Matvienko A.P. Additional requirements for autonomous uninhabited long-range underwater vehicles. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana: materialy sedmoj vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Papers of XII All-Russian scientific conference "Technical problems of the development of the world ocean"] (Vladivostok, October 2-6). Vladivostok, 2017, pp. 25-33. (In Russian).
2. Bocharov L.U. Some trends in the development of autonomous uninhabited submarines. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana: materialy pyatoj vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Papers of XII All-Russian scientific conference "Technical problems of the development of the world ocean"] (Vladivostok, 30 September – 4 October). Vladivostok, 2013, pp. 12-18. (In Russian).
3. Makarenko S.I. Military Robots – the Current State and Prospects of Improvement. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2016, no. 2, pp. 73-132. (In Russian).
4. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. The investigation of modes power system supplies for autonomous unmanned underwater vehicle with a contactless power transmission. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater investigations and robotics], 2013, no. 2(16), pp. 24-32. (In Russian).
5. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Control of the inverter in the power supply system of an autonomous uninhabited underwater vehicle with non-contact energy transfer. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana: materialy pyatoj vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Papers of V All-Russian scientific conference "Technical problems of the development of the world ocean"] (Vladivostok, 30 September – 4 October). Vladivostok, 2013, pp. 125-131. (In Russian).
6. Wrinch M.C. Power delivery to subsea cabled observatories. *Sea Technology*, 2009, no. 50 (7), pp. 27-29.
7. Rumyantsev M.Yu., Berilov A.V. Development of a power supply system for underwater vehicles. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2012, no. 1, pp. 33-37. (In Russian).
8. Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16 (4), pp. 1958-1970.
9. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., Hirose T., Suzuki A., Matsui Y., Sogo N., Sato R. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean. *Autonomous Underwater Vehicles*, 2016, no. 7778668, pp. 177-180.
10. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Structure of the system noncontact energy issue of the autonomous undersea device. *Izvestiya SFedU*. [Proceedings of SFedU] Engineering Sciences, 2013, no. 3(140), pp. 47-55. (In Russian).
11. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy, V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering], 2018, no. 329 (4), pp. 119-131. (In Russian).
12. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Kuleshova E.O., Shandarova E.B., Shandarov S.M., Vasilyeva Y.Z. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-rope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 177(1), no. 012098, pp. 1-6.
13. Pravikova A.A., Rulevskiy V.M., Lyapunov D.Y., Bukreev V.G. Mathematical model of electric power supply system for remotely operated unmanned underwater vehicle with AC electric power transmission line. *Doklady tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2017, vol. 20, no. 1, pp.131-135. (In Russian).
14. Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Mokrushin S.A. *Obschiy podhod k predstavleniyudynamiki protsessa v prostranstve sostoyaniy* [General approach to the representation of the dynamics of the process in the state space]. *Advanced Science*, 2017, no. 2, pp. 38–46. (In Russian).
15. Bond B., Daniel L. Stable reduced models for nonlinear descriptor systems through piecewise linear approximation and projection. *IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2009, vol. 26, no. 12, pp. 2116-2129.
16. Storace M., De Feo O. Piecewise-linear approximation of nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2004, vol. 55 (4), pp. 830-842.
17. Lozgachev G.I., Bezryadin M.M. Program realization of algorithm of construction of modal regulators on transfer function of the closed system in case of presence of setting and revolting influence. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Voronezh State University], 2010, no. 2, pp. 50-52. (In Russian).
18. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.1. Linejnye sistemy* [Theory of automatic control. Vol.1. Linear systems]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 312 p. (In Russian).
19. Grigoryev V.V., Zhuravleva N.V., Lukyanova G.V., Sergeev K.A. *Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom modal'nogo upravleniya* [Synthesis of systems for automatic control of the modal control method]. St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2007, 108 p. (In Russian).
20. Peyton A.J., Walsh V. *Analog Electronics with Op Amps*. Moscow: BINOM, 1994. 352 p. (In Russian).

Рулевский В.М., Букреев В.Г., Шандарова Е.Б. Синтез субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3(40). С. 47-54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-47-54)

Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B. Creating of a Suboptimal Voltage Regulator in the Power Supply of the Deep-Water Vehicle. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 47-54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-47-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-47-54)