

УДК 621.314.58:681.5.015

НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОГРУЖНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИНЫ КАБЕЛЬ-ТРОСА

Букреев Виктор Григорьевич¹,
bukreev@tpu.ru

Шандарова Елена Борисовна¹,
shandarovaelena@mail.ru

Рулевский Виктор Михайлович²,
rulevsky@niiaem.tomsk.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Актуальность работы определяется необходимостью создания адекватных математических моделей систем электропитания сложного погружного технологического оборудования, например электроцентробежных насосов и автономных подводных аппаратов, получающих энергию переменного тока по достаточно протяженной кабельной линии. Приемлемая адекватность характеристик модели и реальной системы электропитания данного класса объектов может быть достигнута в результате учета изменяемой длины кабельной линии и различных режимов работы погружного оборудования. Использование передаточных функций в качестве промежуточных моделей основных элементов системы электропитания и операторного метода является достаточно приемлемым решением для адекватного отражения процессов изменения напряжения на нагрузке. Далее путем преобразования передаточной функции записывается нелинейная математическая модель системы электропитания в пространстве переменных состояния, которая позволяет аналитическим образом решить задачу робастной стабилизации неизменяемого напряжения на полезной электромеханической нагрузке.

Цель работы: построение нелинейной математической модели системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу с учетом изменения его длины в пространстве переменных состояния.

Методы: операторный метод, методы пространства состояния и математического моделирования.

Результаты. Разработана методика определения параметров устройства компенсации реактивной мощности в кабель-тросе для увеличения его пропускной способности при передаче мощности на дальние расстояния при повышенной частоте. Определена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать индуктивность компенсирующего устройства во всем диапазоне изменения длины кабель-троса. Для построения оптимального регулятора получены полиномы, позволяющие определять коэффициенты передаточных функций при изменении длины кабеля и сопротивления нагрузки системы электропитания. На основании передаточных функций, полученных для различных режимов работы системы электропитания, определены параметры схемы замещения, позволяющей записать нелинейную математическую модель системы электропитания пониженного порядка. Проведена сравнительная оценка результатов моделирования системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу, подтверждающая возможность ее описания моделью пониженного порядка в пространстве состояний.

Выводы. В работе предложена методика определения параметров устройства компенсации реактивной мощности, позволяющая увеличить пропускную способность кабель-троса. На основании передаточных функций, коэффициенты которых зависят от длины кабель-троса, записана упрощенная нелинейная математическая модель системы электропитания погружного технологического оборудования. В результате полученная модель системы электропитания может быть использована для последующего синтеза оптимального регулятора напряжения в классе нелинейных систем управления.

Ключевые слова:

Система электропитания погружного оборудования, компенсация реактивной мощности, математическая модель, аппроксимация, передаточная функция, метод переменных состояния.

Введение

Необходимой составной частью такого погружного технологического оборудования, как центробежные нефтедобывающие насосы, а также глубоководные аппараты для изучения морского дна, является система электропитания (СЭП) с кабельной линией, передающей энергию переменного или постоянного тока [1–7]. Наряду с жесткими требованиями к динамическим и статическим характеристикам процесса стабилизации напряжения на электромеханической нагрузке необходимо минимизировать потери, возникающие в кабельной линии. Повышение энергоэффективности СЭП

возможно в случае использования компенсатора реактивной мощности в кабель-тросе и оптимального регулятора напряжения в замкнутой системе [8–11].

Распространенным приемом получения аналитической модели сложного объекта является первоначальное формирование передаточных функций основных элементов СЭП с последующими структурными преобразованиями. При этом важная роль отводится имитационному моделированию в программной среде Matlab с целью тестирования различных режимов работы системы электропитания [12, 13].

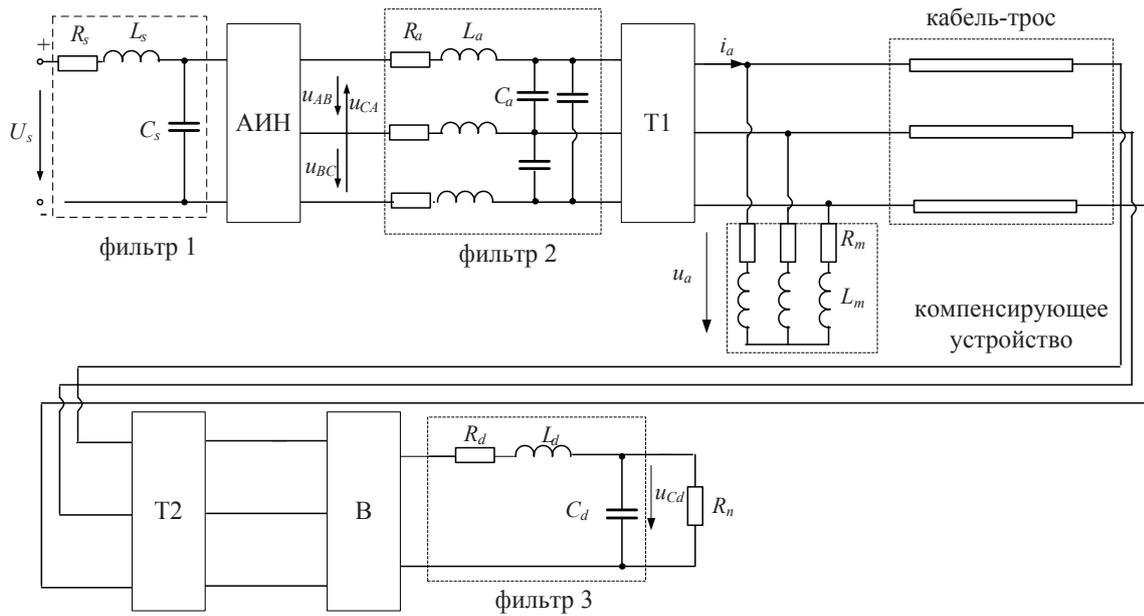


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения СЭП

Fig. 1. Power supply system equivalent circuit

Полученные математические модели в виде нелинейных дифференциальных уравнений позволяют в дальнейшем учитывать не только нестационарный характер внутренних и внешних возмущений, но и возможные начальные условия работы системы электропитания.

Эквивалентная схема рассматриваемой СЭП представлена на рис. 1, где АИН – трехфазный автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), 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

T1 включен LC -фильтр с параметрами R_a, L_a, C_a («фильтр 2»). Напряжение на конце кабель-троса понижается трансформатором T2. Пульсации напряжения, вызванные коммутацией ключей выпрямителя В, сглаживаются фильтром 3 с параметрами R_d, L_d, C_d . 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 . В процессе исследований кабель-трос рассматривался как линия с распределенными параметрами.

Имитационная модель, построенная по вышеприведенной схеме замещения в программном комплексе Matlab Simulink, представлена на рис. 2.

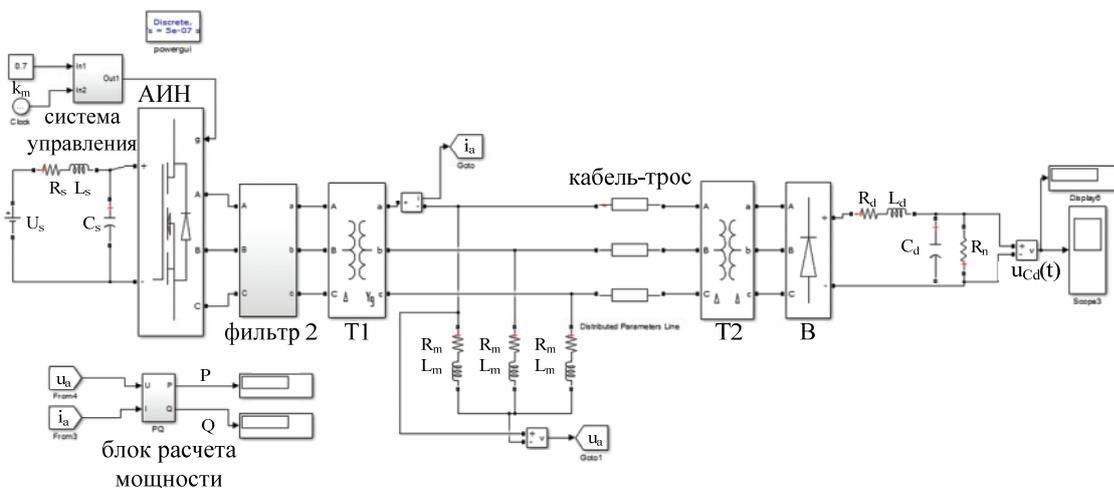


Рис. 2. Имитационная модель СЭП

Fig. 2. Power supply system simulation model

Кабель-трос в имитационной модели представлен стандартным блоком «Distributed Parameters Line», моделирующим электромагнитные переходные процессы в многофазной линии электропередачи с распределенными параметрами на основе метода бегущей волны Бергерона [14–17]. Параметры блока являлись удельные параметры кабель-троса: $R_{k0}=2,4$ Ом/км, $L_{k0}=0,25$ мГн/км, $C_{k0}=0,15$ мкФ/км, определенные при температуре $+20^\circ$. Длина кабельной линии по условиям эксплуатации технологического оборудования изменялась от 3 до 8 км. Подробное описание блоков, представленных на рис. 2, в частности моделирование АИН с возможностью изменения коэффициента модуляции k_m ШИМ, описано в ранее опубликованных работах авторов [13, 18].

Методика определения параметров компенсирующего устройства

Одной из задач исследования являлась разработка методики определения параметров R_m , L_m устройства компенсации реактивной мощности в кабель-тросе для увеличения его передаточной способности при передаче мощности на дальние расстояния при повышенной частоте. Компенсирующее устройство (КУ) выполняется в виде резонансных фильтров, настроенных на основную гармонику, включенных в каждую жилу кабель-троса (рис. 1).

Параметры компенсирующего устройства рассчитывались из однофазной схемы, представленной на рис. 3, в которой кабель-трос рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами, где $R_k=R_{k0}l$, $x_{Lk}=\omega L_{k0}l$, $x_{Ckz}=1/(\omega C_{k0}l)$ – активное, индуктивное и емкостное сопротивление кабель-троса при соединении «звезда» для основной гармоники; R_{k0} , L_{k0} , C_{k0} – удельные параметры кабель-троса; R_m , $x_m=\omega L_m$ – активное и индуктивное сопротивление компенсирующего устройства; ω – угловая частота основной гармоники; l – длина линии.

Часть схемы после кабель-троса заменена симметричной эквивалентной нагрузкой, соединенной по схеме «звезда», сопротивление лучей которой рассчитывалось по формуле

$$Z_n = \frac{\dot{U}_{mk}}{\dot{I}_{mk}} = R' \pm jx',$$

где \dot{U}_{mk} , \dot{I}_{mk} комплексные амплитуды первых гармоник фазных напряжения и тока на выходе кабель-троса, модуль и фазы которых определены в результате расчета имитационной модели, представленной на рис. 2 (без КУ, кабель-трос представлен линией с сосредоточенными параметрами) в программном комплексе Matlab.

Моделирование производилось при коэффициенте модуляции, равном 0,7, для системы мощностью 48 кВт со следующими параметрами электрической схемы замещения:

- 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: $R_d=0,01$ Ом, $L_d=0,1$ мГн, $C_d=12$ мкФ;
- коэффициент трансформации повышающего трансформатора Т1: $k_{T1}=0,2$;
- коэффициент трансформации понижающего трансформатора Т2: $k_{T2}=2,22$;
- параметры фильтра 3: $R_d=0,008$, $L_d=0,3$ мГн, $C_d=2000$ мкФ.

Удаленный электромеханический объект имитировался активной нагрузкой с номинальным сопротивлением $R_{\text{ном}}=7,66$ Ом.

Допущение, принятое при рассмотрении кабель-троса как линии с сосредоточенными параметрами для расчета параметров КУ, основывается на небольшой погрешности (менее 6 %) между кривыми токов и напряжений, полученных в результате моделирования системы электропитания с учетом волнового характера линии, и при замене кабель-троса по схеме замещения, представленной на рис. 3. В качестве примера на рис. 4 представлены кривые напряжения на нагрузке, полученные при работе системы электропитания в номинальном режиме без КУ (кривая 1 – линия с распределенными параметрами; кривая 2 – линия с сосредоточенными параметрами).

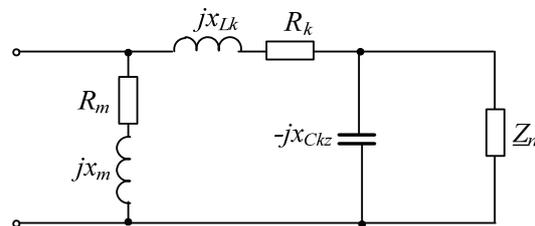


Рис. 3. Однофазная схема участка цепи для расчета параметров компенсирующего устройства

Fig. 3. Single-phase circuit diagram for calculating parameters of the compensating device

В результате проведенных исследований установлено, что эквивалентная нагрузка носит активно-емкостной характер. Параметры компенсирующего устройства для схемы, представленной на рис. 3, выбирались из условия равенства нулю мнимой части комплекса входного сопротивления цепи:

$$Z = \frac{\left(\frac{(R' - jx')(-jx_{Ckz})}{(R' - jx') - jx_{Ckz}} + (R_k + jx_{Lk}) \right) (R_m + jx_m)}{\left(\frac{(R' - jx')(-jx_{Ckz})}{(R' - jx') - jx_{Ckz}} + (R_k + jx_{Lk}) \right) + (R_m + jx_m)}$$

Для упрощения выделения мнимой части активное сопротивление дросселя R_m принято равным нулю, так как при изучении резонансных характеристик с малыми потерями обычно прибегают к идеализации, заключающейся в пренебреже-

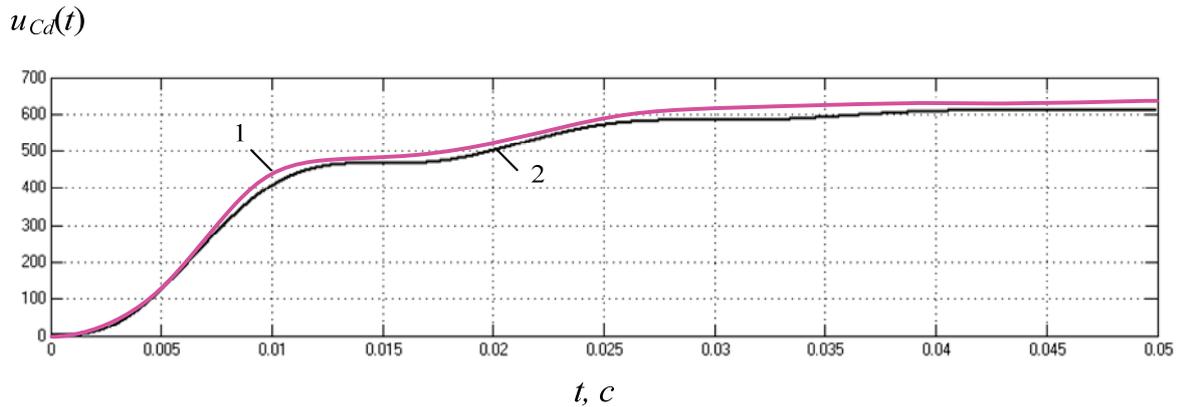


Рис. 4. Кривые напряжения на нагрузке в номинальном режиме работы (кривая 1 – линия с распределенными параметрами; 2 – линия с сосредоточенными параметрами)

Fig. 4. Diagrams of voltage on the load in the nominal operating mode (curve 1 is the line with distributed parameters; curve 2 is the line with concentrated parameters)

нии затуханий свободных колебаний [19]. При этом учет потерь вводится на последнем этапе расчета. В режиме резонанса на основной гармонике индуктивное сопротивление компенсатора реактивной мощности рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{b_1 + 2 \left(R_k^2 x_{Ckz} x' + x_{Ckz}^2 R_k R' - R'^2 x_{Lk} x_{Ckz} + \right)}{\left[-x_{Lk} R'^2 + R'^2 x_{Ckz} + x_{Ckz}^2 x' - \right.} \\ \left. - x_{Ckz}^2 x_{Lk} + x_{Ckz} x'^2 - 2x_{Lk} x_{Ckz} x' - x_{Lk} x'^2 \right]}$$

где

$$b_1 = R_k^2 (R'^2 + x_{Ckz}^2 + x'^2) + R'^2 (x_{Lk}^2 + x_{Ckz}^2) + \\ + x_{Lk}^2 (x'^2 + x_{Ckz}^2) + x'^2 x_{Ckz}^2.$$

Таким образом, для определения параметров компенсирующего устройства предложено использовать следующую методику.

1. Замена части цепи после кабель-троса эквивалентной нагрузкой, рассчитанной по первым гармоникам тока и напряжения на выходе кабельной линии.
2. Определение индуктивного сопротивления компенсирующего устройства из условия равенства нулю мнимой части входного сопротивления однофазной схемы замещения цепи, в состав которой входит компенсирующее устройство, кабель-трос с сосредоточенными параметрами и эквивалентная нагрузка [19].
3. Учет потерь в компенсирующем устройстве из условия $R_m = 0,1x_m$ [20, 21].

Так как в процессе работы системы нагрузка постоянно изменяется, необходимо выбрать основной режим, для которого будут определены параметры КУ. Причинами изменения нагрузки являются режимы работы специального технологического оборудования глубоководного аппарата, при этом система запускается в режиме, близком к холостому ходу (при сопротивлении нагрузки $R_n = 10R_{нном}$), а затем, после выхода системы на уста-

новившийся режим работы, подключается основная нагрузка. Следует также отметить, что при нагрузке, выше номинальной ($R_n = 0,95R_{нном}$), нагрузка отключается от источника.

Используя разработанную методику при максимальной длине кабеля 8 км определены индуктивности КУ при работе схемы в режиме, близком к холостому ходу ($R_n = 10R_{нном} = 76,6$ Ом), в номинальном режиме ($R_n = R_{нном} = 7,66$ Ом) и при сопротивлении нагрузки ($R_n = 4R_{нном} = 30,6$ Ом). Далее на имитационной модели (рис. 2) с учетом рассчитанного КУ определены активная P и реактивная Q мощности, потребляемые одной фазой кабельной линии, при изменении сопротивления нагрузки от $R_n = 0,95R_{нном}$ до $R_n = 10R_{нном}$. Результаты расчетов представлены на рис. 5 (кривая 1 – $L_m = 21$ мГн (настройка на режим холостого хода); кривая 2 – $L_m = 42$ мГн (настройка на номинальный режим); кривая 3 – $L_m = 23$ мГн (настройка на режим $R_n = 4R_{нном}$)).

В качестве основного для настройки компенсатора выбран режим при сопротивлении нагрузки, равном $4R_{нном}$. Далее по вышеизложенной методике при изменении длины линии от 3 до 8 км и сопротивлении нагрузки $R_n = 4R_{нном}$ определены индуктивности компенсирующего устройства при изменении длины кабель-троса с шагом в 0,5 км.

Полученная расчетная зависимость аппроксимирована полиномом второго порядка $L_m(l) = 1,27 \cdot 10^{-3} l^2 - 0,021 l + 0,11$ с погрешностью, не превышающей 1%. Представленный полином дает возможность рассчитать параметры компенсирующего устройства при любом изменении длины кабель-троса. Результаты расчетов представлены на рис. 6, где кривая 1 – зависимость, построенная по расчетным данным; кривая 2 (пунктир) – построенная по полиному второго порядка.

Следует отметить, что значение индуктивности, полученной расчетным путем по предложенной методике при $l = 8$ км ($L_m = 23$ мГн), практически совпадает со значением индуктивности, подоб-

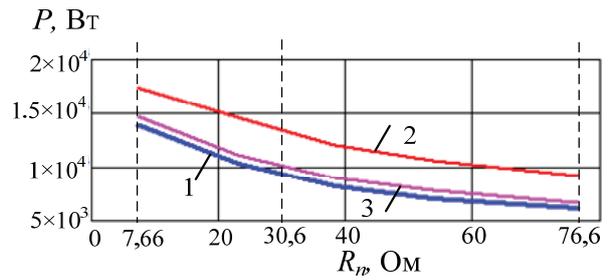
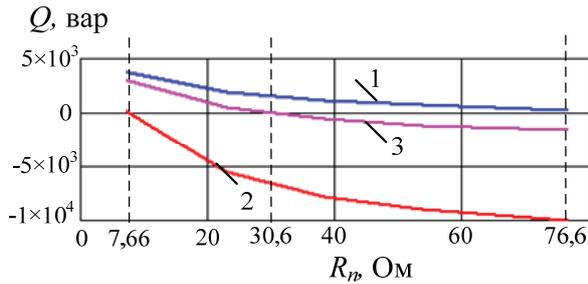


Рис. 5. Зависимости реактивной и активной мощности от сопротивления нагрузки (кривая 1 – $L_m=21$ мГн; 2 – $L_m=42$ мГн; 3 – $L_m=23$ мГн)

Fig. 5. Diagrams of reactive and active power depending on load resistance (curve 1 – $L_m=21$ mH; 2 – $L_m=42$ mH; 3 – $L_m=23$ mH)

ранной опытным путем для реальной СЭП ($L_m=24$ мГн). Так как ранее проведенные исследования показали, что зависимости напряжения на нагрузке реальной СЭП совпадают с результатами моделирования схемы ее замещения (рис. 2) с удовлетворительной погрешностью [18], то предложенная в работе методика может считаться адекватной.

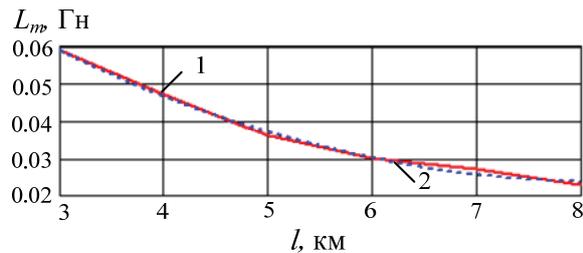


Рис. 6. Зависимость индуктивности компенсирующего устройства от длины кабельной линии (кривая 1 – по расчетным данным; 2 – по аналитической зависимости)

Fig. 6. Diagrams of compensating device inductance dependence on the cable-rope length (curve 1 – according to the calculated data; 2 – according to the analytical dependence)

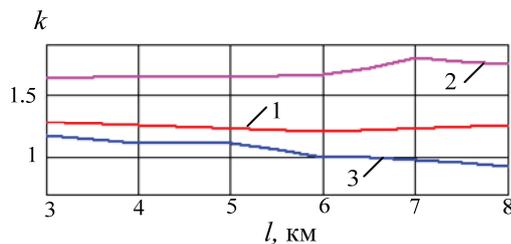


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи от длины кабельной линии (1 – при отсутствии КУ; 2 – в режиме, близком к холостому ходу; 3 – в номинальном режиме)

Fig. 7. Diagrams of the transmission coefficient dependence on the cable-rope length (curve 1 – in the absence of KU; 2 – in the mode close to idling; 3 – in the nominal mode)

Построение нелинейной математической модели СЭП

Следующим этапом исследования являлось нахождение зависимостей коэффициентов переда-

точной функции, необходимой для синтеза оптимального регулятора, от длины кабель-троса. Передаточная функция определялась 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 работе компенсирующего устройства на имитационной модели, построенной в программной среде моделирования Matlab. Как показали исследования, работу рассматриваемой СЭП с точностью до 96 % возможно описать передаточной функцией (ПФ) с двумя полюсами

$$W(s, l) = \frac{k(l)}{a_2(l)s^2 + a_1(l)s + 1},$$

коэффициенты которой зависят от длины кабель-троса l .

Исследования, проведенные авторами в предыдущих работах, в частности [22], включающие синтез регулятора по желаемой передаточной функции, показали, что для стабилизации напряжения во всем диапазоне изменения нагрузки необходимо проектировать два регулятора, один из которых будет настроен на режим пониженных нагрузок, а второй – на режимы, близкие к номинальным. Регулятор является составным элементом системы электропитания, обеспечивающим формирование управляющего сигнала АИН в соответствии с законом регулирования, при этом ошибка регулирования определяется как разность между задающим сигналом и сигналом обратной связи. Задача регулятора – стабилизация напряжения на нагрузке в заданных пределах и повышение энергоэффективности СЭП. При построении более точного регулятора необходимо учитывать влияние изменения длины кабельной линии на коэффициенты передаточной функции проектируемого регулятора. Для этого необходимо определить аналитические зависимости, дающие связь между коэффициентами передаточной функции СЭП и длиной кабельной линии для разомкнутой системы, представленной на рис. 1.

Для учета изменения длины кабель-троса при синтезе комбинированного регулятора на имитационной модели определены значения коэффици-

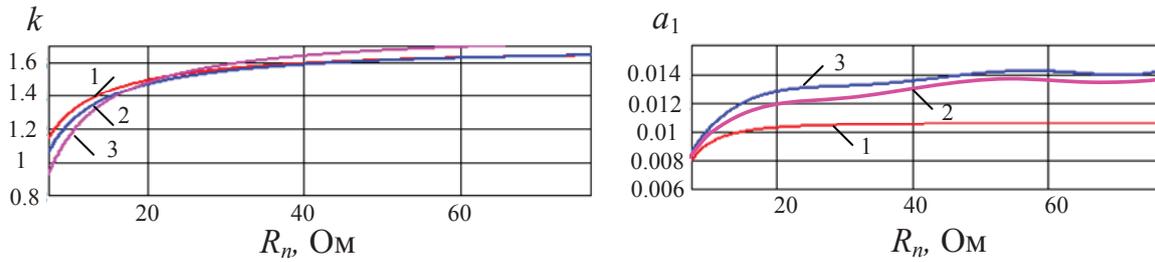


Рис. 8. Зависимости коэффициентов передаточной функции от сопротивления нагрузки (кривая 1 – $l=3$ км; кривая 2 – 5 км; 3 – 7 км)
Fig. 8. Diagrams of the transfer function coefficients dependence on the load resistance (curve 1 – $l=3$ км; curve 2 – 5 км; 3 – 7 км)

ентов передаточной функции при изменении длины кабель-троса в режиме, близком к холостому ходу ($R_n=10R_{\text{НОМ}}$), а также при номинальной нагрузке СЭП (таблица).

Зависимости коэффициентов ПФ от длины кабель-троса имеют нелинейный характер, в частности из-за влияния компенсирующего устройства. На рис. 7 для примера представлены зависимости коэффициента передачи от длины кабельной линии, где кривая 1 снята при отсутствии компенсирующего устройства в номинальном режиме работы; кривая 2 – в режиме, близком к холостому ходу; 3 – в номинальном режиме. При этом кривые 2 и 3 сняты при условии действия компенсатора, настроенного в резонанс при сопротивлении нагрузки $R_n=4R_{\text{НОМ}}$.

Таблица. Коэффициенты передаточной функции при изменении длины кабель-троса

Table. Coefficients of the transfer function depending on the change in cable-rope length

l , км	3	4	5	6	7	8
$R_n=10R_{\text{НОМ}}$						
k	1,636	1,655	1,646	1,66	1,8	1,75
a_2	$0,33 \cdot 10^{-4}$	$0,41 \cdot 10^{-4}$	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$0,53 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,69 \cdot 10^{-5}$
a_1	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$
$R_n=R_{\text{НОМ}}$						
k	1,17	1,11	1,11	1	0,98	0,93
a_2	$0,18 \cdot 10^{-5}$	$0,19 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,72 \cdot 10^{-6}$	$0,12 \cdot 10^{-5}$
a_1	$0,81 \cdot 10^{-2}$	$0,82 \cdot 10^{-2}$	$0,87 \cdot 10^{-2}$	$0,91 \cdot 10^{-2}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$0,87 \cdot 10^{-2}$

Полученные на имитационной модели зависимости аппроксимированы полиномами, вид и порядок которых меняется при переходе от режима, близкого к холостому ходу (хх), до номинального, при этом погрешность не превышает 10 %:

$$\begin{aligned}
 k_{\text{хх}}(l) &= -5,5 \cdot 10^{-3} l^3 + 0,064 l^2 + 3,56 l^{-1}, \\
 k_{\text{НОМ}}(l) &= 8,7 \cdot 10^{-3} l^3 - 0,15 l^2 + 0,75 l; \\
 a_{2\text{хх}}(l) &= 9,9 \cdot 10^{-8} l^5 - 1,98 \cdot 10^{-6} l^4 + \\
 &+ 1,34 \cdot 10^{-5} l^3 - 3,78 \cdot 10^{-5} l^2 + 4,9 \cdot 10^{-5} l, \\
 a_{2\text{НОМ}}(l) &= 4,4 \cdot 10^{-10} l^4 + 2,4 \cdot 10^{-8} l^3 - \\
 &- 4 \cdot 10^{-7} l^2 + 1,6 \cdot 10^{-6} l; \\
 a_{1\text{хх}}(l) &= -4,9 \cdot 10^{-5} l^3 + 6 \cdot 10^{-4} l^2 + 0,018 l^{-1}, \\
 a_{1\text{НОМ}}(l) &= -3,5 \cdot 10^{-5} l^3 + 3,8 \cdot 10^{-4} l^2 + 0,017 l^{-1}.
 \end{aligned}$$

Основным требованием при проведении процедуры аппроксимации являлась вычислительная реализуемость полученных полиномов в реальном времени.

Следует отметить, что коэффициенты передаточной функции также изменяются при изменении режимов работы СЭП при определенной длине кабель-троса. На рис. 8 представлены зависимости коэффициентов передаточной функции от сопротивления нагрузки СЭП, построенные по зависимостям, полученным в результате аппроксимации экспериментальных данных, при фиксированной длине кабельной линии. На рис. 8 кривая 1 построена при длине кабель-троса 3 км; кривая 2 – 5 км; кривая 3 – 7 км.

Полученные зависимости позволяют не только синтезировать комбинированный регулятор, параметры которого будут меняться в зависимости от длины кабель-троса, но также построить упрощенную нелинейную математическую модель СЭП в пространстве переменных состояния [23]:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L_s} (U_s - i_L R_s - u_{Cs}); \\
 \frac{du_{Cs}}{dt} &= \frac{1}{C_s} i_L - \frac{1}{C_s} i_{Lp}, \\
 \frac{di_{Lp}}{dt} &= \frac{1}{L(l)} (u_{Cs} - i_{Lp} R(l) - u_{Cd}); \\
 \frac{du_{Cd}}{dt} &= \frac{1}{C(l)} i_{Lp} - \frac{1}{C(l)} i_n, \\
 i_n(t) &= \frac{u_{Cd}(t)}{R_n}.
 \end{aligned}$$

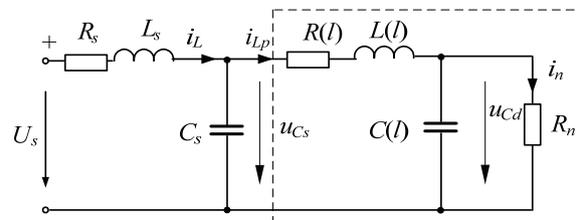


Рис. 9. Упрощенная схема замещения СЭП, составленная на основании передаточной функции при фиксированном значении коэффициента модуляции АИИИ

Fig. 9. Simplified equivalent circuit of the power supply system, based on the transfer function with a fixed value of the modulation index of the autonomous voltage inverter

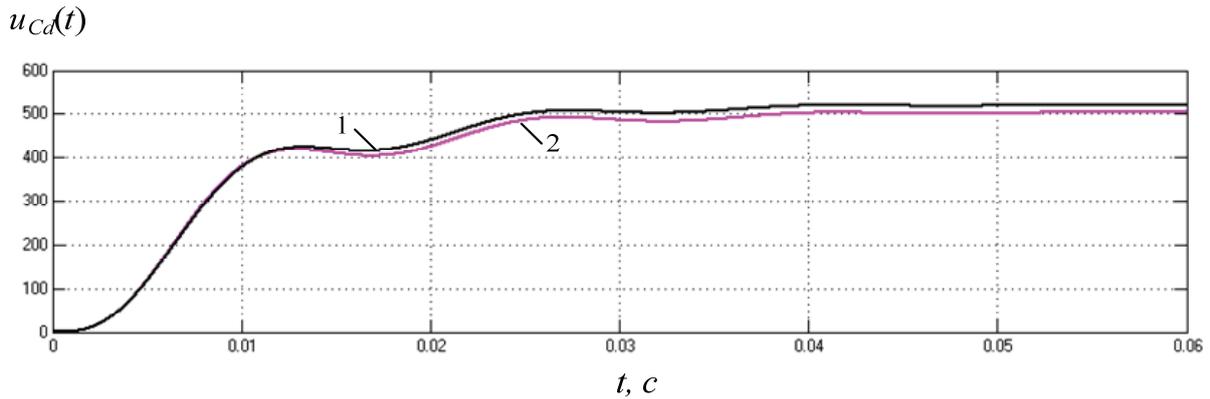


Рис. 10. Кривые напряжения на нагрузке в номинальном режиме работы с компенсацией (кривая 1 – исходная схема; 2 – упрощенная схема)

Fig. 10. Diagrams of voltage on the load in the nominal operating mode with compensation (curve 1 is the original circuit; 2 is the simplified circuit)

Математическая модель записана для упрощенной схемы замещения СЭП, представленной на рис. 9, параметры которой $L(l)$ и $C(l)$ пересчитываются из условия равенства корней знаменателя $a_2(l)s^2 + a_1(l)s + 1$ передаточной функции корням характеристического уравнения, записанного для схемы замещения части цепи, выделенной на рис. 9 пунктиром.

Эквивалентное сопротивление $R(l)$ рассчитывается из установившегося режима схемы (выделено пунктиром на рис. 9) при известных сопротивлении

нагрузки и коэффициенте передачи $k(l) = \frac{u_{Cd}(l)}{u_{Cs}(l)}$.

Путем несложных вычислений определены параметры схемы замещения при работе схемы в номинальном режиме и длине кабель-троса 6 км: $R(6)=0,0001$ Ом, $L(6)=69$ мГн и $C(6)=14$ мкФ.

На рис. 10 представлены кривые напряжения на нагрузке при работе схемы в номинальном режиме, где кривая 1 является результатом работы имитационной модели, построенной по исходной схеме замещения с компенсирующим устройством (рис. 2), а кривая 2 – по упрощенной схеме замещения (рис. 9). Как следует из графиков, погрешность, вызванная эквивалентированием схемы, не превышает 6 %, что говорит об адекватности и работоспособности предложенной модели.

Заключение

Предложена методика определения параметров устройства компенсации реактивной мощности в кабель-тросе для увеличения его пропускной способности при передаче мощности на дальние рас-

стояния при повышенной частоте. На основании данных экспериментов, проведенных в среде математического моделирования Matlab, на разработанной модели, имитирующей работу реальной СЭП, определена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитывать индуктивность компенсирующего устройства во всем диапазоне изменения длины кабель-троса.

Для построения оптимального регулятора, задачей которого является стабилизация напряжения и повышение энергоэффективности СЭП, получены полиномы, позволяющие определять коэффициенты передаточных функций при изменении длины кабель-троса и сопротивления нагрузки системы электропитания. На основании передаточных функций, полученных для различных режимов работы системы электропитания, определены параметры схемы замещения, позволяющей записать нелинейную математическую модель СЭП пониженного порядка.

Проведена сравнительная оценка зависимостей напряжения на нагрузке, полученных в результате моделирования исходной системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу, и системы, построенной по упрощенной модели, подтверждающая адекватность и работоспособность предложенной нелинейной модели пониженного порядка.

Полученные в результате расчетов аналитические зависимости, а также выведенная на их основе модель СЭП технологического оборудования будут являться основой для последующего синтеза оптимального регулятора напряжения, учитывающего изменение длины кабельной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pragale R., Aramco S., Reyes J. Understanding oil field power quality issue // 7th IEEE GCC Conference and Exhibition, GCC 2013. – Qatar, 2013. – № 6705764. – P. 136–141.
2. Enhancing production using new cable deployed electrical submersible pump – the first trial and the challenges faced / Q. Butt, N. Kothari, T.Z. Boutamine, B. Roth // Annual Technical Symposium and Exhibition. – Saudi Arabia, 2017. – P. 647–657.
3. Nørve Eidsvik O.A., Schjølberg I. Finite element cable-model for Remotely Operated Vehicles (ROVs) by application of beam theory // Ocean Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 322–336.
4. Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Khozhaev I. Analysis and synthesis of dual mode control systems of a tethered descent undersea vehicle // OCEANS 2016. – Shanghai, China, 2016. – № 7485341. – P. 1–6.
5. Энергетические характеристики электроприводов погружных нефтедобывающих насосов / Ф.А. Гизатуллин, М.И. Хакимьянов, Р.А. Семисынов, И.Н. Шафиков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 24–42.
6. Новиков Д.В., Харченко Д.А. Кабели для электропитания установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Кабели и провода. – 2014. – № 1 (344). – С. 8–19.
7. Bak C.L., Faria da Silva F. High voltage AC underground cable systems for power transmission – a review of the Danish experience, part 1 // Electric Power Systems Research. – 2016. – V. 140. – P. 984–994.
8. Смирнов О.В., Копырин В.А. К вопросу об использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 2. – С. 68–70.
9. Рулевский В.М. Система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного комплекса с компенсацией реактивной мощности // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – Т. 2. – № 20. – С. 14–17.
10. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters «cable – towed underwater vehicle» / K.V. Chupina, E.V. Kataev, A.M.K. Annanov, V.N. Korshunov, I.A. Sennikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015 (3). – № 032167. – P. 1–6.
11. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук, S. Halasz // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
12. Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Khozhaev I. Mathematical model of the control system of a tethered descent underwater vehicle // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA 2016. – Guilin, China, 2016. – № 7578654. – P. 1257–1262.
13. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования / В.Г. Букреев, Е.Б. Шандарова, В.М. Рулевский // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 119–131.
14. Chen Z.-H., Huang S.-F., Tao H.-L. Research on the application of the Bergeron model to the differential equation algorithm for long transmission line // Automation of Electric Power Systems. – 2005. – V. 29. – № 9. – P. 31–34.
15. Dynamic compensation strategy of inductive power transfer system with inductive-resistive load / Z. He, Y. Li, R. Mai, Y. Li // Journal of Southwest Jiaotong University. – 2014. – V. 49 (4). – P. 569–575.
16. Dommel H.W. Techniques for analyzing electromagnetic transients // IEEE Computer Applications in Power. – 1997. – V. 10 (3). – P. 18–21.
17. Modeling of Power Cables with Arbitrary Cross Section: from Parameter Calculation to Electromagnetic Transients Simulation / A.A. Hafner, P.T. Caballero, J.H.A. Monteiro, E.C.M. Costa, S. Kurokawa, M.V.F. Luz, W.P. Carpes // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2017. – V. 28. – № 3. – P. 405–417.
18. The power supply system model of the process submersible device with AC power transmission over the cable-ropes / V.M. Rulevskiy, V.G. Bukreev, E.O. Kuleshova, E.B. Shandarova, S.M. Shandarov, Y.Z. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V. 177 (1). – № 012098. – P. 1–6.
19. Долгинов А.И. Резонанс в электрических цепях и системах. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1957. – 328 с.
20. Серебряков А.С. Трансформаторы. – М.: ИД МЭМ, 2013. – 360 с.
21. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
22. Рулевский В.М., Букреев В.Г., Шандарова Е.Б. Синтез субоптимального регулятора напряжения в системе электропитания глубоководного аппарата // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 30(4). – С. 47–55.
23. Хорошавин В.С., Зотов А.В., Мокрушин С.А. Общий подход к представлению динамики процесса в пространстве состояний // Advanced Science. – 2017. – № 2. URL: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Технические/horoshavin-kpechati-ispr.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Технические/horoshavin-kpechati-ispr.pdf) (дата обращения 15.10.2018).

Поступила 15.10.2018 г.

Информация об авторах

Букреев В.Г., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шандарова Е.Б., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рулевский В.М., кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института автоматизации и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 621.314.58:681.5.015

NONLINEAR POWER SUPPLY MODEL OF SUBMERSIBLE OBJECTS BASED ON CHANGE IN THE CABLE-ROPE LENGTH

Viktor G. Bukreev¹,

bukreev@tpu.ru

Elena B. Shandarova¹,

shandarovaelena@mail.ru

Victor M. Rulevskiy²,

rulevsky@niiaem.tomsk.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this work is determined by the need to develop suitable mathematical models of complex subsea process power supply equipment. Acceptable adequacy of the characteristics of the model and the actual power supply can be achieved by taking into account the variable cable-rope length and various modes of the submersible equipment operation. The use of transfer functions and operator method is an acceptable solution for adequate reflection of the voltage change on the load. By transforming the transfer function, a nonlinear mathematical model of the power supply system is written in the space of state variables. This allows solving analytically the problem of robust stabilization of immeasurable voltage on the useful electromechanical load.

The main aim of the work is to build a nonlinear mathematical model of the power supply with AC power transmission via the cable-rope, taking into account the change of its length in the space of state variables.

Research methods: operator method, state variable method, methods of mathematical modeling.

Results. The authors have developed the method of determining parameters of the reactive power compensation device in the cable-rope to increase its transfer capacity, when transmitting power over long distances at high frequency; determined the analytical dependence, which allows calculating the inductance of the compensating device in the whole range of cable-rope length change. To construct an optimal regulator, polynomials are obtained that allow determining the coefficients of transfer functions, when changing the cable length and load resistance of the power supply system. On the basis of transfer functions obtained for different modes of the power supply operation, the authors determined the parameters of the equivalent circuit, which allows writing a nonlinear mathematical reduced order model. The paper introduces the comparative evaluation of the simulation results of the power supply with AC power transmission by cable-rope, confirming the possibility of its description by the reduced order model in the state space.

Conclusions. The paper introduces the method for determining parameters of the reactive power compensation device, which allows increasing the capacity of the cable-rope. Based on the transfer functions, the authors recorded a simplified nonlinear mathematical model of the subsea process equipment power supply system. As a result, the model can be used for the subsequent synthesis of the optimal voltage regulator in the class of nonlinear control systems.

Key words:

Power supply system of subsea equipment, reactive power compensation, mathematical model, approximation, transfer function, variable state method.

REFERENCES

1. Pragale R., Aramco S., Reyes J. Understanding oil field power quality issue. *7th IEEE GCC Conference and Exhibition, GCC 2013*. Qatar, 2013. No. 6705764, pp. 136–141.
2. Butt Q., Kothari N., Boutamine T.Z., Roth B. Enhancing production using new cable deployed electrical submersible pump – the first trial and the challenges faced. *Annual Technical Symposium and Exhibition*. Saudi Arabia, 2017. pp. 647–657.
3. Nørve Eidsvik O.A., Schjølberg I. Finite element cable-model for Remotely Operated Vehicles (ROVs) by application of beam theory. *Ocean Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 322–336.
4. Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Khozhaev I. Analysis and synthesis of dual mode control systems of a tethered descent undersea vehicle. *OCEANS 2016*. Shanghai, China, 2016. No. 7485341, pp. 1–6.
5. Gizatullin F.A., Khakimyanov M.I., Semisynov R.A., Shafikov I.N. Energy characteristics of electric submersible pump drives. *Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 24–42. In Rus.
6. Novikov D.V., Kharchenko D.A. Kabeli dlya ehlektropitaniya ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov dobychi nefi [Cables for power supply of installations of electric centrifugal oil pumps]. *Cables and Wires*, 2014, vol. 1 (344), pp. 8–19.
7. Bak C.L., Faria da Silva F. High voltage AC underground cable systems for power transmission – a review of the Danish experience, part 1. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 140, pp. 984–994.
8. Smirnov O.V., Kopyrin V.A. On the issue of using downhole reactive power compensators. *Higher Educational Institutions News. Neft' i gaz*, 2015, no. 2, pp. 68–70. In Rus.
9. Rulevskiy V.M. Sistema elektropitaniya teleupravlyаемого neobitaемого podvodnogo kompleksa s kompensatsiey reaktivnoy moshchnosti [Power supply system for remote uninhabited underwater complex with reactive power compensation]. *Marine intellectual technologies*, 2014, vol. 2, no. 20, pp. 14–17.
10. Chupina K.V., Kataev E.V., Annanov A.M.K., Korshunov V.N., Sennikov I.A. Robust automatic control system of vessel descent-rise device for plant with distributed parameters «cable – towed

- underwater vehicle». *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015 (3), no. 032167, pp 1–6.
11. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halász S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
 12. Gayvoronskiy S.A., Ezangina T., Khozhaev I. Mathematical model of the control system of a tethered descent underwater vehicle. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA 2016*. China, 2016. No. 7578654, pp. 1257–1262.
 13. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119–131. In Rus.
 14. Chen Z.-H., Huang S.-F., Tao H.-L. Research on the application of the Bergeron model to the differential equation algorithm for long transmission line. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, vol. 29, no. 9, pp. 31–34.
 15. He Z., Li Y., Mai R., Li Y. Dynamic compensation strategy of inductive power transfer system with inductive-resistive load. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, vol. 49, no. 4, pp. 569–575.
 16. Dommel H.W. Techniques for analyzing electromagnetic transients. *IEEE Computer Applications in Power*, 1997, vol. 10, no. 3, pp. 18–21.
 17. Hafner A.A., Caballero P.T., Monteiro J.H.A., Costa E.C.M., Kurokawa S., Luz M.V.F., Carpes W.P. Modeling of Power Cables with Arbitrary Cross Section: From Parameter Calculation to Electromagnetic Transients Simulation. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2017, vol. 28, no. 3, pp. 405–417.
 18. 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.
 19. Dolginov A.I. *Rezonans v elektricheskikh tsepyakh i sistemakh* [Resonance in electrical circuits and systems]. Moscow, Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1957. 328 p.
 20. Serebryakov A.S. *Transformatory* [Transformers]. Moscow, MEHM Publ. house, 2013. 360 p.
 21. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electric cars. Introduction to electromechanics. DC Machines and Transformers]. St-Petersburg, Piter Publ., 2007. 320 p.
 22. Rulevskiy V.M., Bukreev V.G., Shandarova E.B. Creating of a suboptimal voltage regulator in the power supply of the deep-water vehicle. *Electrotechnical systems and complexes*, 2018, no. 30 (4), pp. 47–55. In Rus.
 23. Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Mokrushin S.A. Obshchiy podkhod k predstavleniyu dinamiki protsessa v prostranstve sostoyaniy [General approach to process dynamics representation in the state space]. *Advanced Science*, 2017, no. 2. Available at: [http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2\(2017\)/Технические/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf](http://advanced-science.ru/assets/mgr/docs/2(2017)/Технические/horoshavin-k-pechati-ispr.pdf) (accessed 15 October 2018).

Received: 15 October 2018.

Information about the authors

Viktor G. Bukreev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Elena B. Shandarova, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor M. Rulevskiy, Cand. Sc., director, Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.