

Правикова А.А., Рулевский В.М.

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ НА ПОТЕРИ И МАССОГАБАРИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В статье описана методика расчета входного понижающего трансформатора подводной части системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата. Рассмотренная методика позволяет для конкретной структуры, мощности и требуемых массогабаритных показателей системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также длины и электрических параметров кабель-троса определить максимально возможную частоту передачи напряжения по кабель-тросу, что, в свою очередь, помогает обоснованно выбрать частоту передачи. Кроме того, было показано, что увеличение частоты передачи напряжения по кабель-тросу до 10 кГц ведет к уменьшению массы входного понижающего трансформатора подводной части системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата более чем в 2 раза. Нежелательным последствием увеличения частоты питающего напряжения является увеличение реактивной (емкостной) составляющей тока кабель-троса. Компенсация реактивной составляющей тока осуществляется с помощью индуктивностей намагничивания трансформаторов бортовой и подводной частей системы. Рассмотрено проявление волнового эффекта в кабель-тросе системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата при повышении частоты передачи напряжения. Приведено условие представления кабель-троса как цепи с распределенными параметрами и приведена методика расчета токов и напряжений в любой точке линии. Исследован характер изменения амплитуды напряжения вдоль кабель-троса. Проведено математическое моделирование системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с кабель-тросом, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км при частоте 10 кГц, в результате которого получены графики напряжения в начале и конце кабель-троса, подтвержден нелинейный характер изменения амплитуды напряжения вдоль линии.

Ключевые слова: телеуправляемый подводный аппарат, система электропитания, кабель-трос, напряжение, частота, трансформатор, перегрев, потери

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы телеуправляемые подводные аппараты (ТПА) применяются для решения ряда практических и научно-исследовательских задач, таких как разведка полезных ископаемых, проведение геологических исследований на морском дне, монтаж подводных сооружений, очистка погружных платформ, прокладка трубопроводов и кабелей, взрывные работы, поиск повреждений, поисковые операции, картографирование и съемка дна [1-3]. Система электропитания (СЭП) ТПА во многом определяет работоспособность подводного аппарата. Обеспечение энергией ТПА осуществляется через кабель-трос от бортовой части СЭП. Анализ вариантов построения СЭП ТПА [4, 5] показывает, что передача энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты обеспечивает увеличение удельных характеристик СЭП ТПА.

Частота напряжения при передаче энергии по кабель-тросу оказывает непосредственное влияние на параметры системы. В частности, увеличение частоты влечет за собой уменьшение массогабаритных показателей подводной части (ПЧ) СЭП ТПА. Это происходит за счет того, что 80% от общей массы ПЧ СЭП составляет входной трехфазный понижающий трансформатор, а как известно, массогабаритные показатели трансформаторов значительно улучшаются с увеличением частоты [6]. В зависимости от структуры, мощности и требуемых массогабаритных показателей СЭП ТПА, а также электрических параметров и длины кабель-троса выбор частоты сводится к определению такого значения, при котором выполняются требования по перегреву, потерям и массогабаритным показателям трансформатора.

Кабель-трос также является важной частью СЭП и определяет характеристики всей системы в целом. Следовательно, определение основных электрических параметров кабель-троса необходимо для разработки СЭП. Задача усложняется тем, что погонные емкость и индуктивность кабеля не указываются в технической документации производителей и не стандартизированы в технической литературе [7]. Кроме того, увеличение частоты передачи энергии по кабель-тросу приводит к появлению в линии волновых эффектов, что тоже необходимо рассмотреть при выборе частоты.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Согласно закону электромагнитной индукции напряжение, приложенное к первичной обмотке, находится по формуле [8]:

$$U_1 = 4K_\phi B_m S_c W_1 f, \quad (1)$$

где $K_\phi=1,11$ для синусоидального напряжения; B_m – амплитуда индукции, Тл; S_c – сечение сердечника, см²; W_1 – число витков первичной обмотки; f – частота прикладываемого напряжения, Гц.

Согласно формуле (1) при неизменном напряжении U_1 , приложенном к первичной обмотке, с увеличением частоты f необходимо уменьшать магнитную индукцию B_m , сечение сердечника S_c или количество витков W_1 , что во всех трех случаях приведет к уменьшению массогабаритных показателей трансформаторов. Этим объясняется улучшение массогабаритных показателей трансформатора при увеличении частоты [6].

В качестве сердечников входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП используются магнитопроводы ГМ 54ДС из аморфных и нанокристаллических

сплавов [9]. Для магнитопровода ГМ54ДС вводится немагнитный разрезной зазор для получения линейной кривой намагничивания. Немагнитный зазор фиксируется, за счет чего удается получить заданную величину магнитной проницаемости.

Удельные магнитные потери магнитопровода ГМ54ДС определяются по формуле [9]

$$P = 75(\ln \mu)^{-2,3} f^{1,48} B_m^{1,85}, \quad (2)$$

где P – удельные магнитные потери (потери в стали), Вт/м³; μ – относительная магнитная проницаемость; f – частота, Гц; B_m – магнитная индукция, Тл.

Увеличение частоты питающего напряжения приводит также к нежелательным последствиям в виде увеличения реактивной (емкостной) составляющей тока кабель-троса, которая в СЭП ТПА компенсируется индуктивностью намагничивания трансформатора ПЧ СЭП. Индуктивность намагничивания трансформатора определяется по формуле [10]:

$$L_\mu = \frac{\mu_0 \mu W_1^2 S_c}{l}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; S_c – площадь поперечного сечения, м²; l – длина средней магнитной линии сердечника, м.

Эквивалентная упрощенная схема замещения одной фазы кабель-троса и индуктивностей намагничивания трансформаторов при двухсторонней компенсации представлена на рис. 1.

Эквивалентная индуктивность компенсации находится по формуле

$$L_{\mu\Sigma} = \frac{L'_{\mu1\gamma} L_{\mu2\gamma}}{L'_{\mu1\gamma} + L_{\mu2\gamma}}, \quad (4)$$

где $L'_{\mu1\gamma}$ – индуктивность намагничивания трансформатора бортовой части, приведенная ко вторичной стороне; $L_{\mu2\gamma}$ – индуктивность намагничивания трансформатора подводной части, приведенная к первичной стороне.

Для компенсации реактивной составляющей тока кабель-троса должно выполняться соотношение (условие резонанса токов):

$$X_C = X_L. \quad (5)$$

При двухсторонней компенсации примем $L'_{\mu1\gamma} = L_{\mu2\gamma} = L_\mu = 2L_{\mu\Sigma}$, тогда согласно (5) получим выражение

$$L_\mu = \frac{1}{2C_{\text{ЛЭП}} (\pi f)^2}, \quad (6)$$

где $C_{\text{ЛЭП}}$ – рабочая емкость ТПЖ кабель-троса.

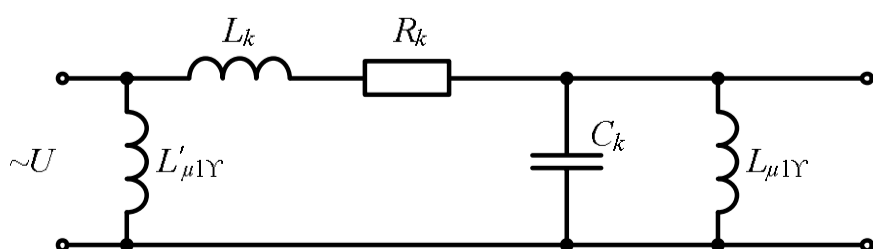


Рис. 1. Схема замещения жилы кабель-троса и индуктивностей намагничивания трансформаторов

После подстановки в выражение (3) W_1 из формулы (1) и L_μ из формулы (6) получаем выражение для магнитной индукции, при которой обеспечивается компенсация реактивной составляющей тока кабеля:

$$B_m = \frac{U_1 \pi}{4K_\phi} \sqrt{\frac{2\mu_0 \mu C_{\text{ЛЭП}}}{l S_c}}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), магнитная индукция не зависит от частоты передачи тока по кабель-тросу, а зависит только от емкости кабель-троса, типоразмера и относительной магнитной проницаемости сердечника.

На рис. 2 приведена зависимость магнитной индукции от относительной магнитной проницаемости.

Как уже говорилось выше, при проектировании трансформаторов учитываются требования к трансформаторам по потерям и перегреву. Перегрев трансформатора определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{P_\Sigma}{k_T S_T}, \quad (8)$$

где P_Σ – суммарные потери в трансформаторе, Вт; k_T – коэффициент теплоотдачи; S_T – эффективная поверхность охлаждения, см².

Согласно (8), с уменьшением массогабаритных показателей, а именно эффективной поверхности охлаждения, перегрев увеличивается.

Методика расчета трансформатора ПЧ СЭП ТПА включает вычисление индуктивности намагничивания трансформатора, магнитной индукции, количества витков обмоток, потерь и перегрева трансформатора согласно формулам (2) – (8).

Если полученные в процессе расчета значения перегрева и потерь мощности больше заданных значений, следует провести вторую итерацию расчета для другого габаритного размера сердечника. Из вышесказанного можно сделать вывод, что для каждого типоразмера сердечника существует максимально допустимая частота передачи тока по кабель-тросу.

Значения максимальной частоты для нескольких типоразмеров сердечника ГМ54ДС для СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, представляется возможным выбрать частоту передачи напряжения 10 кГц для типоразмеров К150×90×30, К170×100×30 при относительной магнитной проницаемости $\mu=30$.

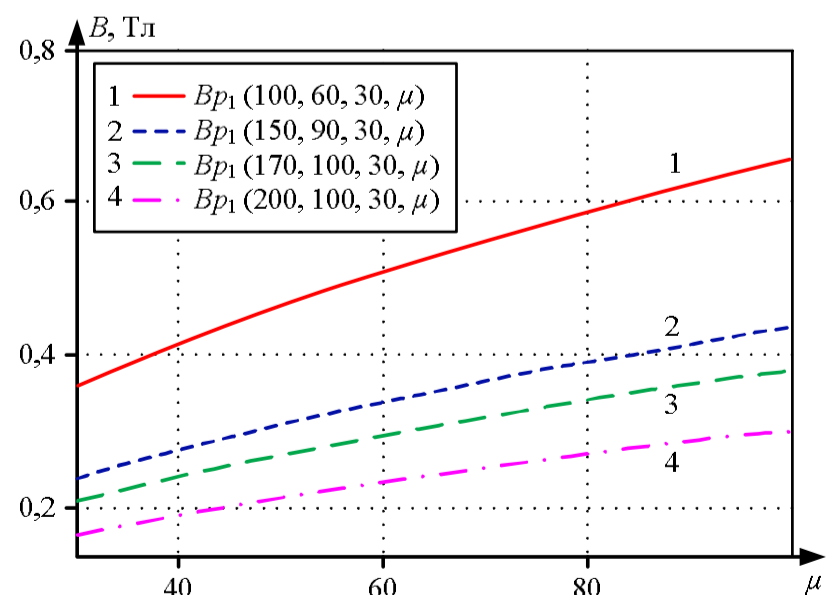


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции от относительной магнитной проницаемости сердечника для различных типоразмеров

Таблица 1
Максимально допустимая частота при разных значениях относительной магнитной проницаемости для нескольких типоразмеров сердечника, кГц

Типоразмер	K100×60×30	K150×90×30	K170×100×30
$\mu=30$	6,8	10,2	11,5
$\mu=60$	5,8	8,6	9,7
$\mu=90$	-	7,7	8,8
$\mu=140$	-	6,8	7,7

КАБЕЛЬ-ТРОС КАК СИСТЕМА
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Кабель-трос при рассмотрении электромагнитных процессов в СЭП ТПА может рассматриваться как система с сосредоточенными либо распределенными параметрами. В первом случае кабель-трос представлен параметрами цепи (сопротивлением R , емкостью C , индуктивностью L), которые сосредоточены в определенных участках цепи. Схема замещения кабель-троса в этом случае приведена на рис. 3.

Однако такое представление кабель-троса не всегда оправдано, как, например, для случая, когда длина волны сигнала в кабеле соизмерима с линейными размерами линии [11]. В этом случае кабель рассматривается как цепь с распределенными параметрами. Такую цепь еще называют длинной линией.

В цепях с распределенными параметрами напряжения и токи являются функциями двух переменных – пространственной координаты и времени, а как следствие, непрерывно изменяются вдоль линии от точки к точке.

Практическим условием учета распределенности параметров вдоль линии является [12]:

$$l \geq (0,01 - 0,05)\lambda, \quad (9)$$

где l – длина кабель-троса; $\lambda=c/f$ – длина волны, км; c – скорость света; f – частота, Гц.

Применительно к СЭП ТПА при $f=1$ кГц длина волны $\lambda=300$ км, кабель-трос длиной $l=11$ км рассматривается как цепь с сосредоточенными параметрами. При $f=10$ кГц длина волны $\lambda=30$ км, следовательно, кабель-трос длиной $l=11$ км представляет собой цепь с распределенными параметрами [13].

Для однородной цепи с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном процессе напряжение и ток в любой точке линии определяются выражениями [14]

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x; \\ \dot{U} = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_1 \cdot Z_c \operatorname{sh} \gamma x, \end{cases} \quad (10)$$

где \dot{I}_1, \dot{U}_1 – ток и напряжение в начале линии; x – расстояние от начала линии, км; $\gamma=\sqrt{Z_0 Y_0}$ – коэффициент распространения линии, 1/км; $Z_0=r_0+j\omega L_0$, Ом/км; $Y_0=g_0+j\omega C_0$, См/км; r_0 – продольное сопротивление линии на единицу длины, Ом/км; g_0 – поперечная проводимость линии на единицу длины, См/км; L_0 – индуктивность линии на единицу длины, Гн/км; C_0 – емкость линии на единицу длины, Ф/км; $Z_c=\sqrt{Z_0/Y_0}$ – волновое (характеристическое) сопротивление, Ом.

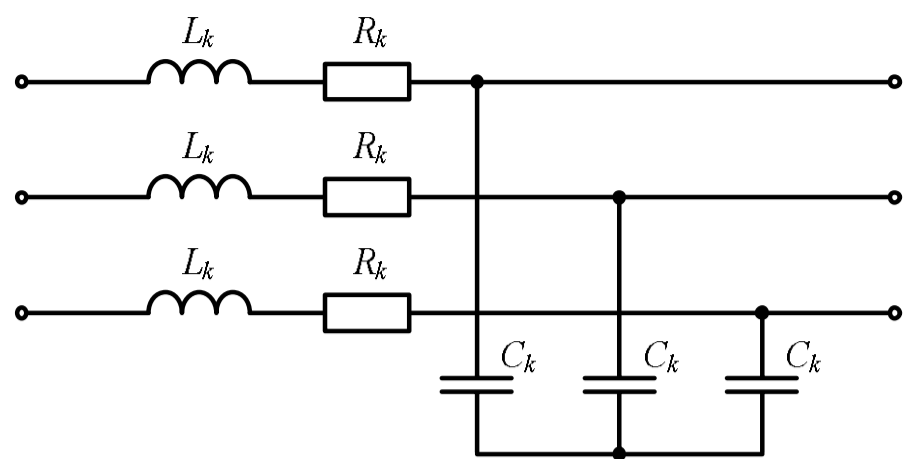


Рис. 3. Схема замещения трехжильного кабель-троса

При проведении численных экспериментов принимались следующие параметры системы: $f=10$ кГц; $r_0=4,75$ Ом/км; $g_0=5 \cdot 10^{-11}$ См/км; $L_0=0,3$ мГн/км; $C_0=0,06$ мкФ/км.

Напряжение в начале и в конце линии, рассчитанное по формуле (10), показано на рис. 4.

Напряжение вдоль линии изменяется нелинейно. Характер изменения амплитуды напряжения вдоль кабель-троса объясняется возникновением падающих и отраженных волн:

$$\dot{U} = \dot{U}_{\text{отр}} + \dot{U}_{\text{пад}} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x}, \quad (11)$$

где \dot{A}_1, \dot{A}_2 – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий через напряжение и ток в конце линии:

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = 0,5(\dot{U} - iZ_c) e^{-\gamma l}; \\ \dot{A}_2 = 0,5(\dot{U} + iZ_c) e^{\gamma l}, \end{cases} \quad (12)$$

где \dot{I}, \dot{U} – ток и напряжение в конце линии; l – длина линии, км.

Графики падающей и отраженной волн напряжения в конце линии, их алгебраическая сумма и напряжение в конце линии, рассчитанные по формуле (10), приведены на рис. 5. Как видно из рис. 5, алгебраическая сумма падающей и отраженной волн и напряжение в конце линии, рассчитанное по формуле (10), совпадают, что подтверждает правильность расчетов.

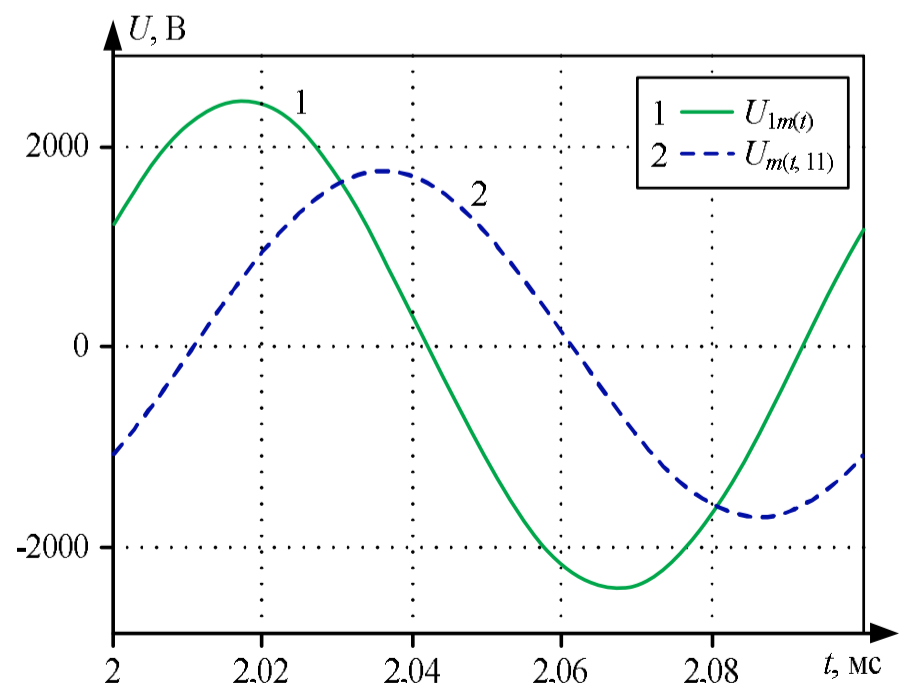


Рис. 4. Напряжения в начале и в конце кабель-троса

Таблица 3

Сравнительный расчет входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА при частотах 1 и 10 кГц

Параметры расчета	Частота 1 кГц	Частота 10 кГц
Длина кабеля, км	8	11
Типоразмер сердечника	ГМ54ДС-140 К200×100×30	ГМ54ДС-30 К150×90×30
Потери трансформатора, Вт	34	86
Перегрев трансформатора, °С	10	43
Вес трансформатора, кг	4,6	2

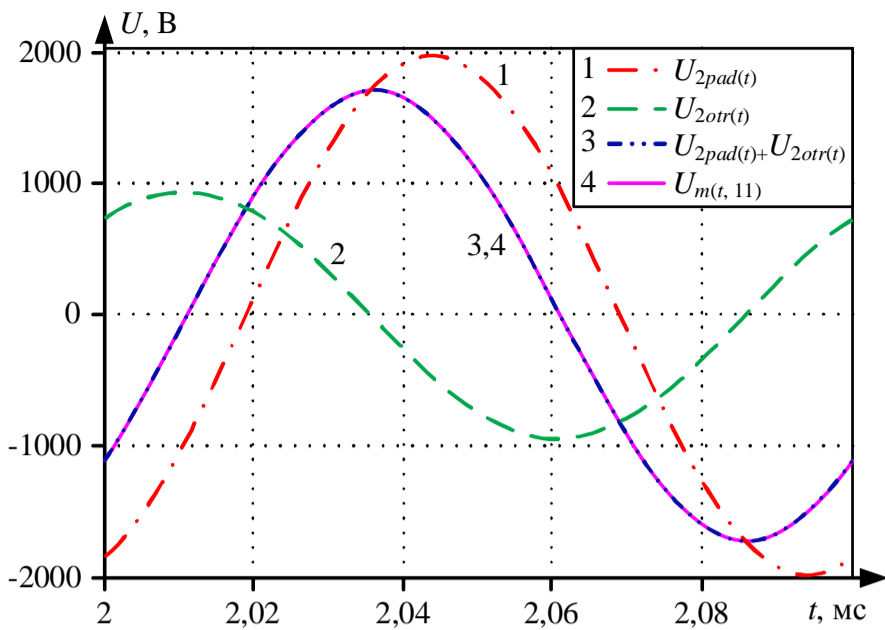


Рис. 5. Падающая и отраженная волна напряжения в конце линии, их алгебраическая сумма и напряжение в конце линии

Проведенные исследования позволяют учитывать эффект длинной линии в кабель-тросе и применять приведенные методы для расчета систем электропитания в случае передачи энергии по кабель-тросу [13].

Падающая волна затухает к концу линии, что обусловлено присутствием потерь в ней, а отражённая волна затухает в обратном направлении. Эти явления являются причиной нелинейного характера изменения амплитуды напряжения вдоль линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Результаты расчета трансформатора ГМ54ДС К150×90×30 ПЧ СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, в виде перегрева ΔT , потерь мощности ΔP и веса трансформатора G при частоте передачи напряжения 10 кГц и относительной магнитной проницаемости $\mu=30$ приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 результаты расчеты показывают, что при частоте 10 кГц оптимальным типоразмером сердечника является К150×90×30.

В работах [6,15] рассматривалась СЭП ТПА с кабель-тросом КГ(3×8,0+3×200В)240-90, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 8 км с передачей энергии по кабель-тросу на частоте 1 кГц.

Предлагается провести сравнительный расчет входных понижающих трансформаторов ПЧ СЭП ТПА для выявления влияния на систему повышения частоты передачи напряжения по кабель-тросу. Расчётные параметры трансформаторов ПЧ СЭП ТПА для частот 1 и 10 кГц и разных кабель-тросов приведены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты расчета трансформатора подводной части ГМ54ДС при частоте 10 кГц

Типоразмер	К150×90×30	К170×100×30	К200×100×30
Потери мощности, Вт	86	90	93
Перегрев трансформатора, °С	43	36	27
Вес трансформатора, кг	2	2,5	4

Приведенные в табл. 3 результаты расчета трансформатора показывают, что при частоте 10 кГц масса входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА снижается более чем в 2 раза, соответственно, уменьшаются и массогабаритные параметры всей ПЧ СЭП ТПА. При этом увеличивается перегрев трансформатора, но возможно обеспечить значение, не превышающее допустимую температуру перегрева.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИ ЧАСТОТЕ 10 кГц

Имитационная модель СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, создана в среде Matlab Simulink. Для рассмотрения волновых эффектов в линии кабель-трос представлен одиннадцатью ячейками, каждая из которых содержит Г-образную структуру (рис. 3).

Имитационная модель СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, представлена на рис. 6. Принятые обозначения: VT1, VT2, VT3 – повышающие трансформаторы бортовой части СЭП; блок Cable – схема замещения кабель-троса, представленная ячейками; VT4-VT9 – понижающие трансформаторы ПЧ СЭП; VD1, VD2 – выпрямители ПЧ.

В результате моделирования были измерены напряжения в начале и конце кабель-троса, графики представлены на рис. 7. При моделировании СЭП ТПА принимались допущения: пассивные элементы идеальны, диоды идеальны, трансформаторы представляются пропорциональным звеном.

Графики на рис. 7 качественно совпадают с графиками, представленными на рис. 4, где напряжение в конце кабель-троса рассчитано по формуле (10). Форма напряжения в конце кабель-троса на рис. 7 может быть объяснена влиянием выпрямителя. Моделирование подтверждает появление волновых эффектов в кабель-тросе при частоте передачи 10 кГц.

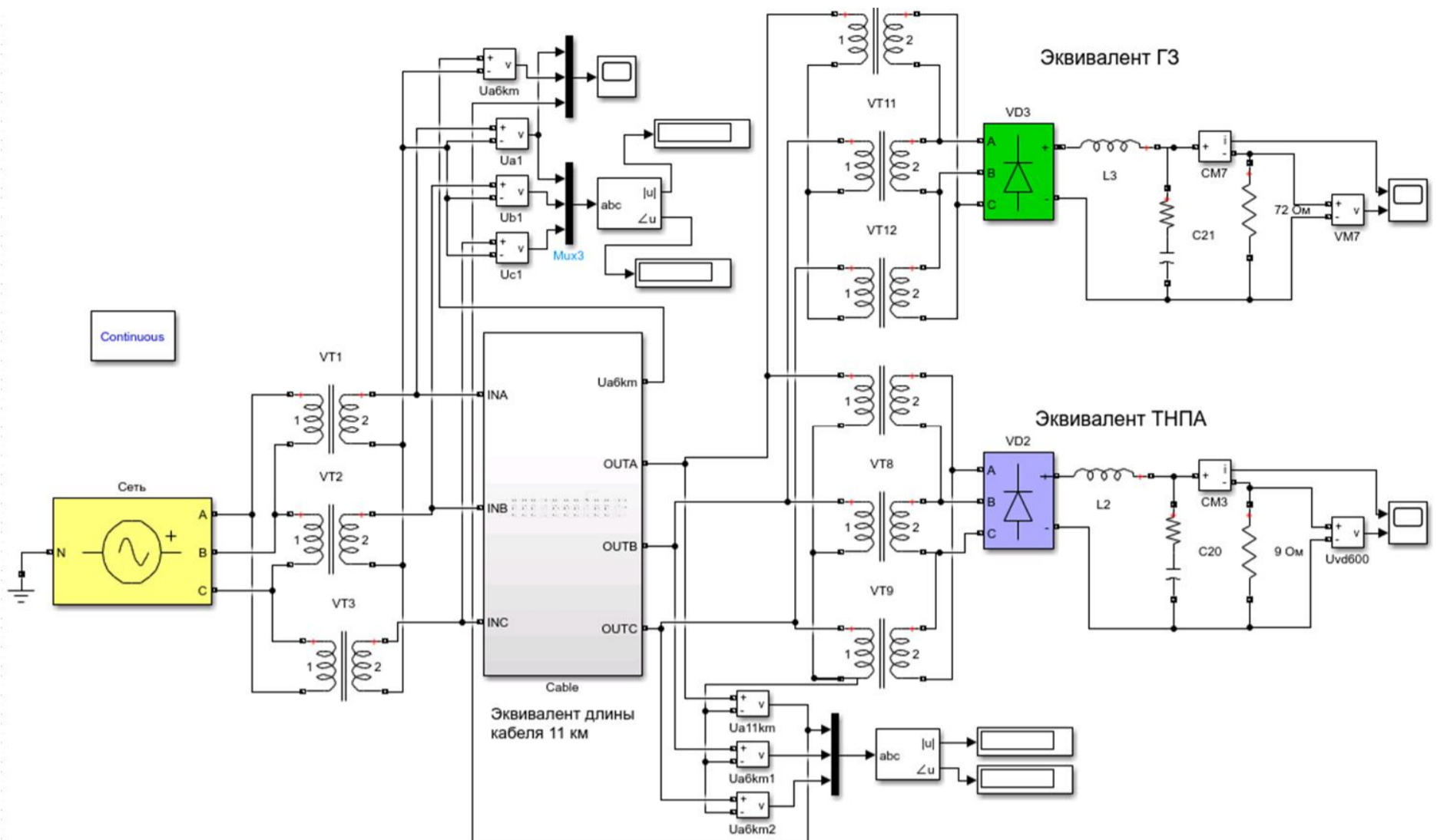


Рис. 6. Имитационная модель системы электропитания

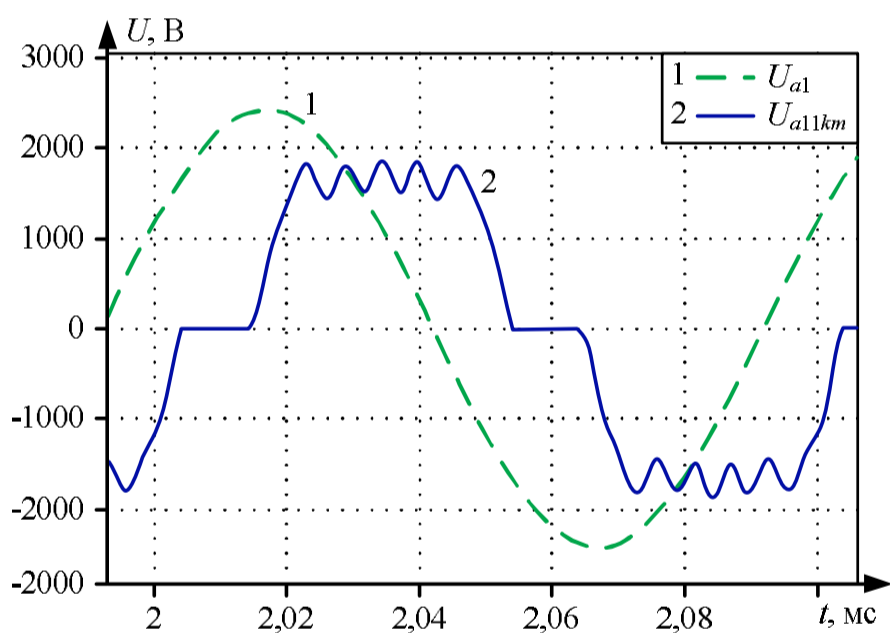


Рис. 7. Напряжения в начале и конце кабель-троса, полученные в результате моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанная методика расчета трансформатора позволяет обоснованно выбрать частоту передачи напряжения по кабель-тросу. Для СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3E)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, такой частотой является 10 кГц. Показано, что при частоте 10 кГц масса входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА снижается более чем в 2 раза по сравнению с СЭП с передачей энергии на частоте 1 кГц.

Проведенные исследования позволяют учитывать волновые эффекты в кабель-тросе и рассчитать напряжения и токи в любой точке линии. Проведено моделирование СЭП ТНПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3E)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км. График напряжения в конце кабель-троса, полученный при моделировании,

качественно совпал с таким же графиком, полученным с помощью расчета.

Статья написана в рамках выполнения работы FEWM-2020-0046 «Фундаментальные основы и методология создания высокоэффективного энергопреобразования для систем космического и морского назначения на базе интеллектуальных силовых модулей сверхвысокой степени интеграции».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. Ленинград: Судостроение, 1973, 199 с.
2. Ignatova A.M. Underwater Vehicles for Geological Research. Gelendzhik: Yuzhmorgeologia, 1990.
3. Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems / Н. Albitar, К. Dandan, А. Ananiev, I. Kalaykov // International Journal of Advanced Robotic System. 2016. No. 13(1). Pp. 1-14. doi: 10.5772/62060
4. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. 2004. №5(307). С. 120–123.
5. Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт // Известия Томского политехнического университета. 2013. №4(322). С. 107–110.
6. Рулевский В.М. Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тросе системы электропитания подводного аппарата // Доклады ТУСУР. 2019. №2(22). С. 121–127. doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127
7. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас В.А., Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. 2021.

№6(332). С. 186-197. doi: 10.18799/24131830/2021/06/3249

8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
9. Официальный сайт НПП Гаммамет. <http://www.gammamet.ru/index.php/ru/gm/comp-fix> (дата обращения: 28.08.2022)
10. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Советское радио, 1971. 720 с.
11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия, 1967. 517 с.
12. Черкашин М.В., Бабак Л.И. Линии передачи и согласующие цепи для СВЧ МИС: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управле-

Поступила в редакцию 21 сентября 2022 г.

- ния и радиоэлектроники, 2010. 54 с.
13. Правикова А.А. Кабель как цепь с распределенными параметрами в системе электропитания телеуправляемого подводного аппарата // Труды XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2020), г. Новосибирск, 30 ноября - 4 декабря. Новосибирск, 2020. С. 56-60.
14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 623 с.
15. Рулевский В.М. Энергоэффективные системы электропитания глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Рулевский Виктор Михайлович. Томск, 2019. 352 с

Принята к печати 12 ноября 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INFLUENCE OF VOLTAGE TRANSMISSION FREQUENCY THROUGH THE ROPE-CABLE ON LOSSES, WEIGHT AND SIZE PARAMETERS OF THE UNDERWATER VEHICLE POWER SUPPLY

Aleksandra A. Pravikova

Postgraduate Student, Head of Reliability Sector, Research Institute of Automation and Electromechanics TUSUR, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, bezruchenko@niiam.tomsk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0474-2912>

Victor M. Rulevskiy

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Rector of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. E-mail: rulevsky@niiam.tomsk.ru, rector@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-3921>

The article describes a method for calculating the step-down transformer of an underwater part in a remote-controlled underwater vehicle supply system. The chosen technique allows determining the maximum frequency of voltage to transmit the power through the rope-cable. In addition, it was shown that an increase in the frequency of voltage along the rope-cable up to 10 kHz leads to a decrease in the weight and size parameters of the input step-down transformer for the underwater part of the power supply by more than 2 times. An undesirable consequence of increasing the frequency of the supply voltage is an increase in the reactive (capacitive) component of the rope-cable current. Compensation of the reactive component of the current is performed using the magnetization inductances within the transformers of the onboard and underwater parts of the power supply. The manifestation of the wave effect in the rope-cable of the power supply with an increase in the frequency of voltage transmission is considered. A condition for representing a rope-cable as a distributed parameterline is given. A method for calculating currents and voltages at any point of the line is presented. The nature of the change in the voltage amplitude along the rope-cable has been investigated. Mathematical modeling of the power supply of the remote-controlled underwater vehicle with a rope-cable, with power rating over 65 kW for a distance of up to 11 km at a frequency of 10 kHz was carried out. The voltage waveforms were obtained at the beginning and at the end of the rope-cable. The non-linear nature of voltage change along the line was confirmed.

Keywords: remote-controlled underwater vehicle, power supply, rope-cable, voltage, frequency, transformer, overheating, losses

REFERENCES

1. Yastrebov V.S. *Telepravlyaemye podvodnye apparaty*. [Remote-controlled underwater vehicles]. Leningrad, Ship building Publ., 1973. 199 p. (In Russian)
2. Ignatova A.M. Underwater Vehicles for Geological Research. Gelendzhic, Yuzhmorgeologia Publ., 1990.
3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater

- robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems. *International Journal of Advanced Robotic System*. 2016, no. 13(1), pp. 1-14. doi: 10.5772/62060
4. Rulevskiy V.M., Dementev Yu.N., Bubnov O.V. Power supply systems for alternating current underwater vehicles above 10 kW. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2004, vol. 307, no. 5, pp. 120-123. (In Russian)
5. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Yudinzev A.G. Power supply systems for remote-controlled alternating current underwater vehicles above 10 kW. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 322, no. 4, pp. 107-110. (In Russian)
6. Rulevskiy V.M. Calculation of optimal alternating current voltage and frequency in a three-phase rope-cable power supply system of an underwater vehicle. *Doklady TUSUP* [Reports of TUSUP], 2019, no. 2(22), pp. 121-127. (In Russian). doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127
7. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. Calculation of linear electrical parameters of an oil-submersible cable. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186-197. (In Russian) doi:
8. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Solid state converter equipment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p. (In Russian)
9. NPP Gammamet: <http://www.gammamet.ru/index.php/ru/gm/comp-fix> (accessed 28 August 2020)
10. Balyan R.Kh. *Transformatory dlya radioelektroniki*. [Transformers for radio electronics]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1971. 720 p. (In Russian)
11. Nejman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. [Fundamentals of electrical engineering]. Leningrad, Energy Publ., 1967. 517 p. (In Russian)
12. Cherkashin M.V., Babak L.I. *Linii peredachi i soglasuyusc-*

- chie tsepi dlya SVCH MIS* [Transmission lines and matching circuits for SVCH MIS]. Tomsk, Tomsk State University of Radio electronic control systems, 2010. 54 p. (In Russian)
13. Pravikova A.A. Cable as a circuit with distributed parameters in the power supply system of a remote-controlled underwater vehicle. *Trudy XIV Vserossiiskoy nauchnoy konferentsii molodyh uchenykh "Nauka. Tehnologii. Innovatsii" (NTI-2020)*. [Proceedings of XIV All-Russian scientific conference of young scientists "Science. Technology. Innovations" (NTI-2020)]. Novosibirsk, 2020, pp. 56-60. (In Russian)
14. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki* [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow, High school, 1996. 623 p. (In Russian)
15. Rulevskiy V.M. *Energoeffektivnyye sistemy elektropitaniya glubokovodnykh teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov: Doct. Diss.* [Energy efficient power supply systems for remote-controlled deep-water vehicles. Doct. Diss.]. Tomsk, 2019. 352 p. (In Russian)

Правикова А.А., Рулевский В.М. Влияние частоты передачи напряжения по кабель-тросу на потери и массогабаритные параметры системы электропитания подводного аппарата // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 29-35. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-29-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-29-35)

Pravikova A.A., Rulevskiy V.M. Influence of Voltage Transmission Frequency through the Rope-Cable on Losses, Weight and Size Parameters of the Underwater Vehicle Power Supply. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 29-35. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-29-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-29-35)