ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ", 2021, том 10, № 2, с. 104–111

> \_ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ \_\_\_\_\_ ФИЗИКА

УДК 537.528: 621.313

# ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОДВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА ГЕНЕРАТОРА УДАРНОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ОБМОТКИ

### © 2021 г. Ю. Г. Шмигирилов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Димитровградский инженерно-технологический институт филиал Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", Димитровград, 433511, Россия

\*e-mail: shug555@mail.ru Поступила в редакцию 09.04.2021 г. После доработки 09.04.2021 г. Принята к публикации 13.04.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований генератора ударной мощности с дополнительной высоковольтной обмоткой для инициирования подводного электрического разряда рабочей низковольтной обмотки. Цель исследования – оценка потенциальной возможности инициирования электрического разряда основной низковольтной обмотки предварительным разрядом высоковольтной, изучение параметров, свойств и электрических характеристик подобных разрядов. Выполнен сравнительный анализ двух вариантов размешения обмоток: с продольной высоковольтной обмоткой, т.е. соосно с рабочей низковольтной, и с поперечной высоковольтной обмоткой, т.е. со сдвигом осей рабочей и высоковольтной обмоток на угол  $\pi/2$ . Показана необходимость определения временной функции ЭДС высоковольтной обмотки с учетом высших гармонических индукции магнитного поля. Процесс разряда генератора с высоковольтными обмотками включает три стадии. У двух вариантов размещения обмоток первые две стадии однотипны: пробой межэлектродного промежутка высоким напряжением и образование токопроводящего канала; период совместной работы обмоток генератора на дуговой разряд. Завершающая стадия зависит от конструктивного положения высоковольтной обмотки. Обобщенные результаты временных и энергетических характеристик, как самостоятельных разрядов высоковольтных обмоток, так и инициированных рабочей обмотки, подтвердили эффективность инициирования низковольтного разряда рабочей обмотки предварительным разрядом высоковольтной. При равных энергетических возможностях с другими способами инициирования разряда предложенные технические решения обеспечивают лучшую общую конструктивную компоновку и снижение удельных массогабаритных показателей мобильных устройств для электроразрядных технологий. Из двух вариантов размещения высоковольтных обмоток предпочтительным является вариант со сдвигом осей рабочей и высоковольтной обмоток на угол  $\pi/2$ , имеющий лучшие энергетические характеристики разрядов.

Ключевые слова: генератор ударной мощности, подводный электрический разряд, электрические характеристики, электрогидравлический эффект

DOI: 10.1134/S2304487X21020115

Определяющим элементом устройств для электрогидравлического возбуждения ударных волн давления являются накопители-источники импульсной электрической энергии. В автономных электрогидравлических разрядно-импульсных установках определенными преимуществами обладают установки с использованием в качестве накопителя энергии электромашинного генератора ударной мощности [1, 2].

Генератор ударной мощности с сопротивлением цепи разряда, согласованным с сопротивлением подводного канала электроискрового разряда, имеет напряжение не достаточное для пробоя межэлектродного промежутка, поэтому его разряд инициируется либо проволочными мостиками, взрывающимися в процессе разряда, либо пробоем межэлектродного промежутка высоким напряжением от вспомогательного источника [2, 3].

В качестве источника высокого напряжения может использоваться вспомогательная высоковольтная конденсаторная батарея или схема питания дуги от ударного генератора с двумя обмотками на статоре: рабочей низковольтной обмоткой (PO) и дополнительной, инициирующей, высоковольтной обмоткой (BO) [4]. В однофазном генераторе ударной мощности рабочая обмотка, занимает не более 2/3 пазов статора, что позволяет в свободных пазах размещать дополни-



**Рис. 1.** Схемы обмоток статора генератора ударной мощности: а) соосно с рабочей низковольтной; б) со сдвигом осей обмоток на π/2.

тельную высоковольтную обмотку для инициирования разряда.

В работе [4] приводятся результаты аналитического исследования инициирования межэлектродного промежутка в воде напряжением высоковольтной обмотки, размещенной соосно с рабочей низковольтной, но отсутствует анализ временной функции высоковольтной ЭДС, которая существенно зависит от высших гармонических составляющих магнитного поля. Отсутствует экспериментальная оценка данного способа инициирования, не рассматривается вариант размещения высоковольтной обмотки, сдвинутой пространственно относительно основной рабочей на 90 электрических градусов.

В настоящей работе выполнен сравнительный анализ двух вариантов размещения обмоток: 1) с продольной ВО, т.е. соосно с рабочей низковольтной; 2) с поперечной ВО, т.е. со сдвигом осей рабочей и высоковольтной обмоток на угол  $\pi/2$ . Исследования проводились в рамках проектирования генератора ударной мощности для электроразрядных технологий в габаритах, определяемых транспортабельной массой 3000–5000 кг.

Учитывая сложность и разнообразие процессов развития и формирования электрического разряда в жидкости, отсутствие экспериментальных исследований генераторов ударной мощности с инициирующей высоковольтной обмоткой, были изготовлены и исследованы модельные генераторы в габаритах асинхронного двигателя AP-6 "НПО Сибэлектромотор". Схемы обмоток статора модельных генераторов ударной мощности: а) соосно с рабочей низковольтной; б) со сдвигом осей обмоток на  $\pi/2$  приведены на рис. 1.

Специфичность конструкции машин и требование обеспечения необходимого уровня электрической прочности изоляции высоковольтных обмоток не позволили поднять амплитуду ЭДС генераторов выше 6000 вольт. При проектировании и последующем изготовлении модельных генераторов с предварительно заданной амплитудой ЭДС высоковольтных обмоток было учтено, что обмоточные коэффициенты высоковольтных обмоток для основных гармонических составляющих существенно отличаются вследствие сильного укорочения продольной обмотки ( $\beta = 0.333$ ). Для получения требуемой амплитуды ЭДС число витков продольной высоковольтной обмотки в сравнении с поперечной было увеличено почти вдвое, что привело к снижению площади сечения проводников и увеличению активного сопротивления обмотки.

Момент инициирования разряда низковольтной обмотки разрядом высоковольтной связан с временными зависимостями ЭДС обмоток. Анализ формы ЭДС в обмотках статора выполнен на основе гармонического разложения магнитодвижущей силы (МДС) обмотки возбуждения с последующим ее преобразованием в распределение магнитной индукции в зазоре методом удельной магнитной проводимости, позволяющим учесть реальную структуру сердечников статора и ротора и насыщение магнитопровода [5].

Гармонические составляющие МДС обмотки возбуждения, вращающиеся относительно статора с угловой частотой ω:

$$F_f = \sum_k F_{mk} \cos k(\omega t - \alpha), \qquad (1)$$

где  $F_{mk}$  — амплитуда k-й гармонической составляющей,

$$F_{mk} = \frac{8}{\pi^2 k^2 z_f} \sin\left(k z_f \frac{\pi}{2}\right) F_{fm};$$

 $z_f$  — отношение числа пазов, занятых обмоткой возбуждения, к числу пазовых делений ротора;  $\alpha$  — пространственная угловая координата.

Тип обмотки	Амплитуды ЭДС и гармонических составляющих									
	<i>E<sub>m</sub></i> , B	$E_{m1}, \mathbf{B}$	$E_{m3}$ , B	$E_{m5}, \mathbf{B}$	<i>E</i> <sub><i>m</i>7</sub> , B	<i>E<sub>m9</sub></i> , B	<i>E</i> <sub><i>m</i>20</sub> , <b>B</b>			
Низковольтная РО	159.2	160.0	$10.6 \cdot 10^{-6}$	0.16	0.040	$5.6 \cdot 10^{-6}$	0.021			
Продольная ВО	6000	4365.9	1531.9	200.8	81.3	82.7	201.1			
Поперечная ВО	6000	6690.7	465.0	330.3	22.2	107.0	20.3			

Таблица 1. Гармонический состав ЭДС рабочей и высоковольтных обмоток модельных генераторов в режиме холостого хода

Индукция магнитного поля в воздушном зазоре, возбуждаемая k-й гармонической МДС содержит гармонические составляющие, вращающиеся с частотами от  $\omega$  до (k + v) $\omega$ :

$$B_{\delta}^{k} = \Lambda F_{mk} \cos k(\omega t - \alpha), \qquad (2)$$

где  $\Lambda$  — удельная магнитная проводимость, определенная в результате численных расчетов магнитного поля, что позволяет учитывать насыщение магнитопровода и геометрию зубцовой зоны,

$$\Lambda = \Lambda_0 + \sum_{\nu} \Lambda_{0\nu} \cos \nu \omega t +$$
  
+ 
$$\sum_{n} \sum_{\nu} (\Lambda_n + \Lambda_{n\nu} \cos \nu \omega t) \cos n\alpha;$$
(3)

 $\Lambda_0$  — постоянная составляющая проводимости, независящая от положения ротора;  $\Lambda_n$  — амплитуда гармонической составляющей проводимости *n*-го порядка, независящая от положения ротора;  $\Lambda_{0v}$ ,  $\Lambda_{nv}$  — амплитуды гармонических составляющих, определяемые положением вращающегося ротора.

Волна индукции магнитного поля обмотки возбуждения  $\nu$ -го порядка с амплитудой  $B_{m\nu}$  индуцирует в статорных обмотках ЭДС

$$e_{v} = 4f\tau lwk_{ov}B_{mv}\sin v\omega t, \qquad (4)$$

где f – основная частота;  $\tau$  – величина полюсного деления; l – длина активной части статора; w – число витков обмотки статора;  $k_{0v}$  – обмоточный коэффициент обмотки статора для v-й гармоники [6],

$$k_{\rm ov} = \frac{\sin\left(\frac{q\alpha_Z}{2}v\right)}{q\sin\left(\frac{\alpha_Z}{2}v\right)}\sin\left(\frac{\pi}{2}\beta v\right);$$

q — число катушек обмотки статора на один полюс;  $\alpha_z$  — электрический угол сдвига между ЭДС соседних катушек;  $\beta$  — относительный шаг обмотки (коэффициент укорочения).

Временная функция ЭДС обмоток определяется суммой мгновенных значений v-х гармонических ЭДС  $e_v(t)$ ,

$$e(t) = \sum e_{v}(t). \tag{5}$$

Гармонический анализ ЭДС вплоть до девятой гармонической (табл. 1) позволил воспроизвести временные функции мгновенных значений ЭДС высоковольтных обмоток в режиме холостого хода (рис. 2).

На рис. За и Зб приведены осциллограммы ЭДС высоковольтных обмоток и основной рабочей, полученные в ходе экспериментальных исследований модельных генераторов.

Их гармонический состав по приведенным в таблице гармоникам дал хорошее совпадение не выходящее за пределы 5%, однако форма временных функций несколько отличается от расчетных на рис. 2а. Данное расхождение объясняется двумя причинами:

 наличием зубцовых гармоник индукции, которые на данном этапе исследований не учитывались;

 наличием демпферной обмотки, размагничивающей набегающий край полюса и подмагничивающей сбегающий.

Последнее обстоятельство приводит к некоторому фазовому смещению амплитуды ЭДС и ее гармонических составляющих по отношению к расчетному значению, что не критично при определении момента инициирования разряда поперечной обмоткой. Учет зубцовых гармонических индукции в соответствии с изложенной методикой позволяет с необходимой точностью воспроизвести временную функцию ЭДС продольной ВО (рис. 26).

На рис. 4 приведена принципиальная электрическая схема экспериментальной установки для электрогидравлического возбуждения ударных волн давления с инициированием разряда генератора ударной мощности поперечной высоковольтной обмоткой.

Схема с продольной инициирующей обмоткой – аналогична [4]. Основными элементами установки являются: генератор с рабочей низковольтной обмоткой (PO) и инициирующей высоковольтнолй обмоткой (BO) на статоре, обмоткой возбуждения (OB) на роторе; вентильный блок (BБ) в цепи рабочей обмотки и коммутирующее устройство (KУ) в виде высоковольтного искрового разрядника (тригатрона) в цепи высо-

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА "МИФИ" том 10 № 2 2021



**Рис. 2.** Временные функции мгновенных значений ЭДС высоковольтных обмоток в режиме холостого хода по результатам расчетов: а — продольной и поперечной высоковольтных обмоток без учета зубцовых гармонических составляющих; б — продольной высоковольтной обмотки с учетом зубцовых гармоник.



**Рис. 3.** Осциллограммы ЭДС экспериментальных генераторов в режиме холостого хода: а – рабочей низковольтной обмотки и продольной высоковольтной; б – рабочей низковольтной и поперечной высоковольтной обмоток.

ковольтной обмотки. Статорные обмотки через соответствующие коммутирующие устройства подключены к электроискровому преобразователю (ЭП).

Во время экспериментов контролировались: ток и напряжение обмоток, напряжение на электрогидравлическом излучателе  $u_p(t)$ , ток разряда  $i_p(t)$ . Для измерения напряжения и тока использовались, соответственно, делители напряжения и безиндуктивные шунты. При лабораторных исследованиях электроискровой преобразователь коаксиального типа помещался в бак с водопроводной водой. Электрическому разряду в воде предшествовало аккумулирование кинетической энергии в маховых массах роторов генератора и приводного двигателя с последующим форсированным увеличением тока в обмотке возбуждения (OB). При этом положительная полуволна напряжения рабочей обмотки генератора приложена постоянно через вентильный блок (ВБ) к электродам электроискрового преобразователя.

В заданный момент времени, определяемый фазовым углом ЭДС высоковольтной обмотки, согласованным с фазой напряжения рабочей обмотки, включается коммутирующее устройство (КУ), вызывая инициирующий разряд в межэлектродном промежутке ЭП напряжением высоковольтной обмотки. В момент равенства напряжения инициирующего разряда и рабочей обмотки генератора происходит автоматическое подключение рабочей обмотки генератора, сопровождающееся импульсным нарастанием тока разряда, близким к току короткого замыкания. Под действием ударного тока генератора и соответствуюшего энерговыделения в канале разряда формируется быстро расширяющаяся парогазовая полость – источник ударной волны давления.



Рис. 4. Принципиальная электрическая схема силовой части экспериментальной установки.

Процесс разряда завершается по достижению током обмоток генератора нулевого значения.

При экспериментальных исследованиях электрических характеристик канала разряда варыровались: длина межэлектродного промежутка ( $l_3 = 0.004 - 0.006$  м); фазовый угол включения напряжения генератора, при котором осуществлялся инициирующий разряд  $\psi$ .

По результатам измерений определялись: сопротивление канала разряда  $r_p$ , мощность и энергия  $W_p$ , выделившаяся в канале.

Процесс разряда генератора с продольной высоковольтной обмоткой включает три стадии (рис. 5): пробой межэлектродного промежутка



**Рис. 5.** Осциллограммы токов разряда продольной высоковольтной обмотки *i<sub>B</sub>* и рабочей низковольтной *i<sub>H</sub>*.

напряжением ВО и образование токопроводящего канала; период совместной работы обмоток (РО и ВО) на дуговой разряд; завершающая стадия — разряд высоковольтной обмотки при отсутствии тока рабочей обмотки.

О динамике электрических и энергетических параметров таких разрядов можно судить по характеристикам, полученным в результате обработки осциллограмм (рис. 6).



**Рис. 6.** Временные характеристики канала разряда, инициированного продольной обмоткой: напряжения  $u_p(t)$ , тока разряда  $i_p(t)$ , сопротивления  $r_p(t)$  и энергии  $W_p(t)$ , введенной в канал разряда.



**Рис.** 7. Осциллограммы тока *i<sub>p</sub>* и напряжения *u<sub>p</sub>* разряда, инициированного поперечной высоковольтной обмоткой.

Пробой межэлектродного промежутка сопровождается относительно небольшим током высоковольтной обмотки ( $I_{B \max} = 15-23$  A) вследствие ее собственного высокого сопротивления, но до-

статочным для того чтобы понизить сопротивление канала разряда, при котором его напряжение сравнялось с напряжением рабочей низковольтной обмотки. С этого момента имеет место импульсное нарастание тока разряда рабочей обмотки до амплитудного значения ( $I_{H \max} = 580 - 820$  A). Ток рабочей обмотки обрывается, как только ее напряжение становится ниже напряжения канала разряда, а напряжение высоковольтной обмотки достаточно для поддержания тока в межэлектродном канале до завершения разряда. Импульс тока рабочей обмотки относительно положительной полуволны напряжения кратковременный ( $t_n =$ = 1.8-4 мс) и зависит от длины межэлектродного промежутка и фазового угла начала инициирования. Оптимальный фазовый угол включения продольной высоковольтной обмотки исследуемого генератора лежит в интервале  $\omega t = (0.35 - 0.5)\pi$ .

Процесс разряда генератора с поперечной высоковольтной обмоткой также можно разбить на три стадии, но в отличии разряда, инициированного продольной обмоткой третья, завершающая стадия разряда, обусловлена только током основной рабочей обмотки, так как ее напряжение на завершающей стадии выше напряжения высоковольтной обмотки. Характерные осциллограммы тока и напряжения канала разряда, инициированного поперечной высоковольтной обмоткой, приведены на рис. 7; временные характеристики канала разряда, полученные в результате обработки осциллограмм – на рис. 8.

В отличие от продольной высоковольтной обмотки, поперечная обмотка обладает меньшим сопротивлением, определяющим более высокую



**Рис. 8.** Временные характеристики канала разряда, инициированного поперечной обмоткой: напряжения  $u_p(t)$ , тока разряда  $i_p(t)$ , сопротивления  $r_p(t)$  и энергии  $W_p(t)$ , введенной в канал разряда.

**Таблица 2.** Параметры и обобщенные результаты исследования временных характеристик разрядов высоковольтной и рабочей обмоток ( $E_m$  – амплитуда ЭДС;  $I_{mp}$  – амплитуда тока разряда;  $t_p$  – длительность разряда;  $r_{p \min}$  – минимальное сопротивление канала разряда;  $W_p$  – энергия, введенная в канал разряда)

	Об-	$E_m, I$		$t_p$ ,	$r_{p \min}$ ,	$W_{p}$ ,
Модель	мотка	В	$I_{mp}, A$	MC	Ом	Дж
С продольной ВО	BO	6000	19.7	7.1	3.91	13.9
	РО	159	822	3.0	0.0949	172
С поперечной ВО	BO	6000	43.8	7.5	2.12	24.1
	PO	159	1100	6.8	0.0738	729

амплитуду тока разряда ( $I_{Bm} = 35-44$  А;  $I_{Hm} = 950-1320$  А) и энергию, вводимую в канал разряда. Оптимальный фазовый угол включения продольной высоковольтной обмотки  $\omega t = (0.5-0.75)\pi$ . Длительность импульса разряда рабочей обмотки в сравнении с первым вариантом более длительный (до 7.0 мс).

В табл. 2 приведены обобщенные результаты временных и энергетических характеристик, как самостоятельных разрядов высоковольтных обмоток, так и инициированных рабочей обмотки для межэлектродного промежутка  $l_{2} = 0.005$  м.

### выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований двух вариантов размещения высоковольтных обмоток позволяет сделать следующие выводы:

 Предложенные конструктивные и схемные решения подтвердили эффективность данного способа инициирования низковольтного разряда рабочей обмотки. В отличие от метода инициирования разрядов высоковольтной конденсаторной батареей [2], здесь отсутствовали случаи обрыва разрядного тока.

2. При равных энергетических возможностях с другими способами инициирования разряда [2], предложенные технические решения обеспечивают лучшую общую конструктивную компоновку и снижение удельных массо-габаритных показателей мобильных устройства для электроразрядных технологий.

3. Из двух вариантов размещения высоковольтных обмоток предпочтительным является вариант со сдвигом осей рабочей и высоковольтной обмоток на угол  $\pi/2$ , имеющий лучшие энергетические характеристики разрядов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сипайлов Г.А., Хорьков К.А., Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. О применении электрических машин для электрогидравлического метода сейсморазведки // Силовые импульсные системы. Новосибирск: ИГД СОАН СССР, 1973. С. 66–70.
- 2. *Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г.* Применение электромашинного генератора для сейсморазвед-ки // Геофизика. ЕАГО. 2015. № 1. С. 82–86.
- 3. Пустынников С.В., Носов Г.В., Хан Вей, Носова М.Г. Исследование работы низковольтного ударного генератора в устройстве электрогидравлического воздействия для малоглубинной сейсморазведки // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 49–58.
- Хорьков К.А., Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г. Исследование инициирования дуги межэлектродного промежутка в воде напряжением высоковольтной обмотки ударного генератора // Известия ТПИ. 1974. Т. 200. С. 62–67.
- 5. Шмигирилов Ю.Г. Исследование магнитного поля и гармонического состава ЭДС однофазного генератора ударной мощности // Вестник НИЯУ МИФИ. 2015. Т. 4. № 4. С. 298–303.
- 6. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. В 2-х т. Том 1. Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 2, pp. 104-111

## Initiation of an Underwater Electric Discharge of the Impact Power Generator with an Additional High-Voltage Winding

Yu. G. Shmigirilov<sup>*a*,#</sup>

<sup>a</sup> Dimitrovgrad Engineering Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, Ul'yanovskaya oblast, 433511, Russia
<sup>#</sup>e-mail: shug555@mail.ru
Received April 9, 2021: revised April 9, 2021: accepted April 13, 2021

Abstract—An impact power generator with an additional high-voltage winding for initiating an underwater electric discharge of a working low-voltage winding has been experimentally studied. The purpose of the study is to evaluate the potential possibility of initiating an electric discharge of the main low-voltage winding

by a preliminary discharge of the high-voltage winding and to study the parameters, properties, and electrical characteristics of such discharges. A comparative analysis of two options for placing windings is performed: with a longitudinal high-voltage winding, i.e., coaxially with the working low-voltage winding, and with a transverse high-voltage winding, i.e., with a shift of the axes of the working and high-voltage windings by an angle of  $\pi/2$ . The necessity of determining the temporal function of the electromotive force of a high-voltage winding, taking into account the higher harmonic induction of the magnetic field, is shown. The discharge process of a generator with high-voltage windings includes three stages. For two variants of winding placement, the first two stages are of the same type: high-voltage breakdown of the interelectrode gap and the formation of a conductive channel; the period of joint operation of the generator windings for an arc discharge.

The final stage depends on the design position of the high-voltage winding. The generalized results of the time and energy characteristics of both independent discharges of high-voltage windings and initiated working windings have confirmed the efficiency of initiating a low-voltage discharge of the working winding by a preliminary discharge of the high-voltage one. With equal energy capabilities with other methods of initiating the discharge, the proposed technical solutions provide a better overall design layout and a reduction of the specific weight and size indicators of mobile devices for electric discharge technologies. The preferred option of the two options for placing high-voltage windings is one with the shift of the axes of the working and highvoltage windings by an angle of  $\pi/2$ , which has the best energy characteristics of the discharges.

*Keywords:* impact power generator, underwater electric discharge, electrical characteristics, electrohydraulic effect

DOI: 10.1134/S2304487X21020115

#### REFERENCES

- Sipajlov G.A., Horkov K.A., Frankovskij B.A., Shmigirilov Ju.G., *O primenenii elektricheskih mashin dlja elektrogidravlicheskogo metoda sejsmorazvedki. Silovye impulsnye sistemy* [On the use of electric machines for the electrohydraulic method of seismic exploration. Power impulse systems], Novosibirsk, IGD SOAN SSSR, 1973, pp. 66–70.
- 2. Frankovskij B.A., Shmigirilov Ju.G., Primenenie elektromashinnogo generatora dlja sejsmorazvedki [Application of an electric machine generator for seismic exploration], *Geofizika*, 2015, no. 1, pp. 82–86. (in Russian)
- Pustynnikov S.V., Nosov G.V., Han Vej, Nosova M.G., Issledovanie raboty nizkovoltnogo udarnogo generatora v ustrojstve elektrogidravlicheskogo vozdejstvija dlja maloglubinnoj sejsmorazvedki [Investigation of the operation of a low-voltage impact generator in an electrohydraulic device for shallow seismic exploration]. *Iz*-

*vestija TPU. Inzhiniring georesursov*, 2019, vol. 330, no. 4. pp. 49–58. (in Russian)

- 4. Horkov K.A., Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G., Issledovaniye initsiirovaniya dugi mezhelektrodnogo promezhutka v vode napryazheniyem vysokovoltnoy obmotki udarnogo generatora [Investigation of the initiation of the arc of the interelectrode gap in water by the voltage of the high-voltage winding of the shock generator], *Izvestiya TPI*, 1974, vol. 200, pp. 62–67. (in Russian)
- Shmigirilov Yu.G., Issledovaniye magnitnogo polya i garmonicheskogo sostava EDS odnofaznogo generatora udarnoy moshchnosti [Study of the magnetic field and harmonic composition of the EMF of a singlephase impact power generator], *Vestnik NIYaU MIFI*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 298–303. (in Russian)
- 6. Ivanov-Smolenskiy A.V., *Elektricheskiye mashiny* [Electrical machinery], Izdatelskiy dom MEI Publ., 2006, vol. 1. 652 p.