

$$\rho(\tau, 0) = \left| \frac{\sin[L\pi\Delta f_0\tau]}{L\pi\Delta f_0\tau} \right|, \quad (4)$$

яка швидко затухає зі збільшенням τ . Вертикальний перетин ФН ЧМС $\rho(\tau, 0)$ наведений на рис. 1. ФН має гострий пік, ширина якого у площині $F = 0$ на рівні 0,64 складає $\Delta\tau = 1/\Delta f$. Кількість парціальних імпульсів ЧМ сигналу (розрядність коду) визначається за умови $L = \Pi/\Delta f_0$.

При застосуванні L – розрядного коду на виході пристрою узгодженої обробки забезпечується часове стиснення вхідного сигналу у L^2 разів. Такі сигнали дозволяють обирати розрядність коду в залежності від вимог до часового розділення сигналів та об'єму інформації, яку необхідно передати сигналом. L -розрядне квантування сигналу за частотою дає можливість отримати велику кількість кодових послідовностей. Цім забезпечується висока інформативність та завадозахищеність інформаційних систем. У той же час на основі аналізу властивостей часо-частотних ФН [6] та виразу (4) до недоліків застосування ЧМ сигналів можна віднести: достатньо великий рівень бокових залишків, який для функції (4) складає приблизно 20 % і не залежать від вигляду та тривалості кодової послідовності; при узгодженій обробці сигналу необхідно передбачити окремі частотні канали для кожного з парціальних імпульсів, кількість яких складає L , а також швидкодіючий електронний комутатор для підключення цих каналів у відповідності до використаного коду модуляції. Збільшення розрядності коду модуляції приводить до збільшення кількості частотних каналів. Сказане вище суттєво позначається на можливості технічної реалізації пристроїв формування та обробки сигналів маніпульованих за частотою псевдохаотичною дискретною послідовністю.

При використанні ФМ сигналів для зазначених вище тривалості та ширини спектра сигналів їх база складає $n = 8000 \dots 16000$. Період бінарної ($p = 2$) кодової послідовності l визначається кількістю комбінацій цифр на m позиціях і складає

$$l = p^m - 1 = 2^m - 1. \quad (5)$$

Для $m = 13$ максимальний період кодової послідовності складає $l = 8191$. Саме сигнал, модульований такою послідовністю і проаналізуємо у подальшому.

Серед усієї сукупності можливих варіантів кодових послідовностей ФМ сигналів виділяють клас М-послідовностей, для яких забезпечується мінімальний рівень бокових залишків [3]. Оскільки значення обраного періоду l є простим числом, то кількість варіантів М-послідовностей

$$x = (l - 1) / m = (8191 - 1) / 13 = 630. \quad (6)$$

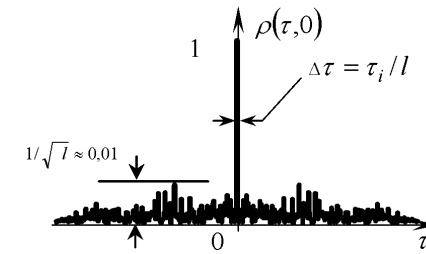


Рисунок 2 – Перетин ФН ФМ сигналу

Нормована функція невизначеності ФМ радіоімпульсу має вигляд [3]

$$r(t, F) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{n=0}^{n-1} q_m q_n U_0(s - mt_0) U_0(s - nt_0 - t) e^{j2pFs} ds \right| / 2E, \quad (7)$$

де q_μ – визначає початкову фазу μ -го парціального радіоімпульсу, тобто приймає значення 1 або -1 . Для одного з варіантів М-послідовності на рис. 2. наведений перетин ФР площиною $F = 0$. З рис. 2. видно, що ФН має гострий пік, тривалість якого визначається тривалістю парціального імпульсу $\Delta t = t_i / l = t_0$. При цьому рівень бокових залишків для кодової послідовності складає $l = 8191$ складає $1/\sqrt{l} \approx 0,01$. Узгоджена фільтрація фазоманіпульованого сигналу з відомою частотою передбачає наявність лише одного частотного каналу.

Висновки. Таким чином, порівняльний аналіз систем сигналів на базі фазової та частотної маніпуляції показав, що при створенні систем сигналів для завадозахищених систем ідентифікації перевагу потрібно віддати сигналам з дискретною псевдохаотичною фазовою маніпуляцією.

Список літератури. 1. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В.Ткачев, Ю.Г.Даник, С.А. Жуков, І.І.Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 2. І.І.Обод, А.А.Тюрин, А.В.Ярочая. Сравнительный анализ существующих систем идентификации воздушных объектов // Системы управления, навигации та зв'язку: Збірник наукових праць. – Вип. 2(6). – К.: ЦНДІ НіУ, 2008. – С. 21-25. 3. Обод І.І., Тюрин О.О. Спосіб ідентифікації об'єктів. Патент на корисну модель № 32641 від 26.05.2008. 4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. 5. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1977. – 345 с. 6. Глазов Б.И. Спектры и корреляционные функции частотноманипулированных шумоподобных сигналов // Радиотехника, 1970. – № 9. – С. 55-59. 7. Глазов Б.И., Котенко Л.П., Мерзлякин Б.С. Анализ спектральных и корреляционных свойств L-ичных дискретных ЧМ сигналов // Радиотехника, 1979. – № 3. – С. 43-51.

Надійшла до редколегії 01.10.2009

О.В.ХВОЩАН, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.КУРАШКО, канд.техн.наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Ю.И.МЕЛЬХЕР, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
В.В.ЛИТВИНОВ, ИИПТ НАН Украины, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ РАЗРЯДНИКА ПОГРУЖНЫХ СКВАЖИННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Проведено теоретичний розрахунок втрат в розряднику електрогідрравлічних свердловинних комплексів, теоретично і експериментально досліджено його температурне поле. Розроблено рекомендації щодо конструктивного виконання розрядників.

The theoretical calculation of losses in the spark-gap of electro-hydraulic oil-well complexes is conducted, its temperature theoretical and experimental fields are explored. Recommendations in relation to structural implementation of spark-gaps are developed.

Введение. Критические условия работы погружных комплексов для обработки нефтяных скважин (температура окружающей среды до 100 °С, гидростатическое давление до 50 МПа) наряду с ограниченными габаритными размерами, определяемыми диаметром скважин, вызывают ряд вопросов, связанных с надежностью и стабильностью работы высоковольтного оборудования. Увеличение производительности комплексов вызывает увеличение потерь при их работе, что ведет к перегреву элементной базы и ее возможному выходу из строя.

Комплекс имеет модульную структуру. Ранее [1] был проведен расчет оптимальных параметров высоковольтного трансформатора модуля зарядного блока комплекса с полезной мощностью 10³ Вт для обработки нефтяных скважин, определены температуры перегрева его наиболее уязвимых частей.

Целью настоящей работы является анализ тепловых потерь в высоковольтном разряднике комплекса и определение его температуры перегрева для решения вопросов, касающихся надежности и стабильности работы комплекса.

Постановка задачи и методика расчета. Разрядник электрогидравлического погружного комплекса установки предназначен для передачи запасенной в конденсаторах комплекса энергии в нагрузку при достижении уровня зарядного напряжения 3·10⁴ В. В настоящее время разрядник выполнен газонаполненным и неуправляемым. В качестве газовой среды использован азот газообразный ГОСТ 9293-74 при давлении 1,01·10⁵ Па.

На основании проведенных в [2] исследований была разработана следующая конструкция разрядника (рис. 1). Корпус разрядника 1 представляет стальную трубу, внутри которой на стальных фланцах установлены с обеих сторон фарфоровые изоляторы 2 и 3 с медными электродами 4 и 5. Электроды имеют возможность осевого перемещения. Герметизация внутренней полости разрядника осуществляется с помощью резиновых уплотнительных колец прокладок, заглушки 6 и 7 используются при транспортировке и хранении.

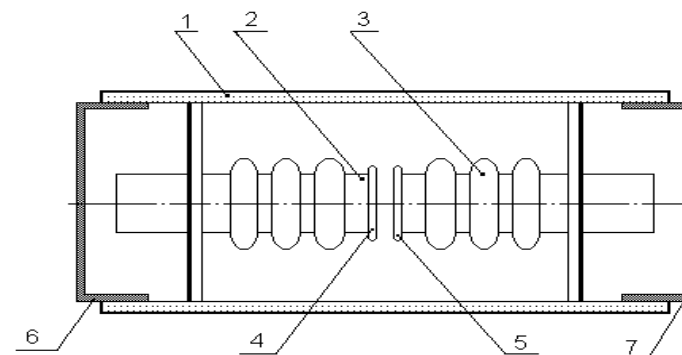


Рисунок 1 – Разрядник

Теоретический анализ тепловых режимов работы разрядника проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. Анализ подвергалась осесимметричная двумерная модель (см. рис. 2). При составлении модели принимались следующие допущения:

- теплофизические характеристики материалов разрядника (см. таблицу) взяты при температуре 20 °С и принимались неизменными в процессе нагрева;
- граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;
- внутренняя цилиндрическая область заполнена азотом;
- рассмотрена модель при учете механизма теплопроводности, принято, что энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке, идет на нагрев средней части электродов, джоулевы потери в тоководах разрядника не учитывались;
- потери в разряднике рассчитаны на основании гидродинамической теории импульсной дуги [3], методика расчета приведена ниже.

Материал	азот	сталь	воздух	медь	фарфор
Плотность ρ , кг/м ³	1,06	7840	1	8700	2450
Удельная теплоемкость C_m , Дж/(кг·К)	1060	465	1010	385	850
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	0,027	49,8	0,03	400	2

Согласно [3], мощность джоулевых потерь в канале дуги можно определить по формуле

$$P(i, t) = \frac{g \cdot i^{4/3}}{t^{2/3} \cdot t^{1/3}}, \quad (1)$$

где i – ток, протекающий через межэлектродный промежуток, кА; τ – период колебаний тока, мкс; t – время, мкс.

Коэффициент g определялся выражением

$$g = d \cdot \left(\frac{2 \cdot x \cdot r_0}{P \cdot S_0^2} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где d – длина межэлектродного промежутка, мм;

$$x = \frac{K_p \cdot g}{g - 1};$$

K_p – коэффициент поршня, $K_p \approx 0,75-0,9$; γ – эффективный показатель адиабаты Пуассона, для двухатомных газов $\gamma = 1,4$; ρ_0 – относительная плотность газа, для азота $\rho_0 = 1,06$; $\sigma_0 \approx 3 \cdot 10^3$ (Ом · м)⁻¹ при $d > 5$ мм.

Энергия, выделяющаяся в межэлектродном промежутке за время протекания разряда

$$W = \int_0^{1/f} P(i, t) dt, \quad (3)$$

где f – частота следования разрядных импульсов, Гц.

Энергия за полупериод периодического разряда согласно [3] аппроксимируется выражением

$$W_n \approx 0,45 \cdot g \cdot I_{mn}^{4/3}, \quad (4)$$

где I_{mn} – амплитуда разрядного тока в n -ый полупериод, кА.

Средняя зарядная мощность энергии, выделяющейся при работе разрядника, необходимая для теоретического расчета температурного режима, определялась выражением

$$P_{cp} = f \cdot \sum_n W_n. \quad (5)$$

Результаты теоретического расчета. Современные погружные комплексы для обработки нефтяных скважин имеют следующие параметры разрядного контура:

- напряжение зарядки емкостного накопителя – $U_0 = 30$ кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,4$ мкФ;
- индуктивность разрядного контура $L \sim 3$ мкГн.

Известно, что оптимальным разрядом в электрогидравлических технологиях является затухающий синусоидальный, близкий к критическому. При этом амплитуды токов можно определить из [4]:

$$I_{mn} \approx U_0 \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{R \cdot (2n-1) \cdot R}{4}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (6)$$

где R – активное сопротивление контура, Ом.

Активное сопротивление канала разряда в моменты максимума тока при режиме разряда накопителя, близком к критическому, $R \approx 0,8$ Ом. При этом $I_{m1} = 15,3$ кА; $I_{m2} = 5$ кА; $I_{m3} = 1,6$ кА; $I_{m4} = 0,5$ кА, декремент затухания (отношение амплитуд ближайших периодов тока) $\delta = 10$.

Суммарная энергия, выделившаяся в разряднике, рассчитана по формуле (4) и составила $\sum_n W_n = 1,63$ Дж.

Перегрев элементов разрядника в установившемся режиме при частоте разрядных импульсов 1 Гц, которой можно достичь в реальных условиях [5], представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при оптимальной работе погружного комплекса перегрев электродов разрядника относительно его корпуса ~ 40 °С. При уменьшении величины разрядного промежутка и, соответственно, его активного сопротивления уменьшится декремент затухания разрядного тока, увеличится его амплитуды, что приведет к более высоким значениям перегрева элементов. Результаты расчета приведены на рис. 3.

Сравнение результатов теоретического расчета и эксперимента. Для определения достоверности результатов, полученных расчетом, был поставлен эксперимент, при котором разрядник Р замыкал контур (рис. 4) с параметрами:

- напряжение зарядки емкостного накопителя C – от 30 до 32 кВ;
- емкость накопителя – $C = 2,7$ мкФ;
- длина межэлектродного промежутка электродной системы ЭС – от 15 до 16 мм.

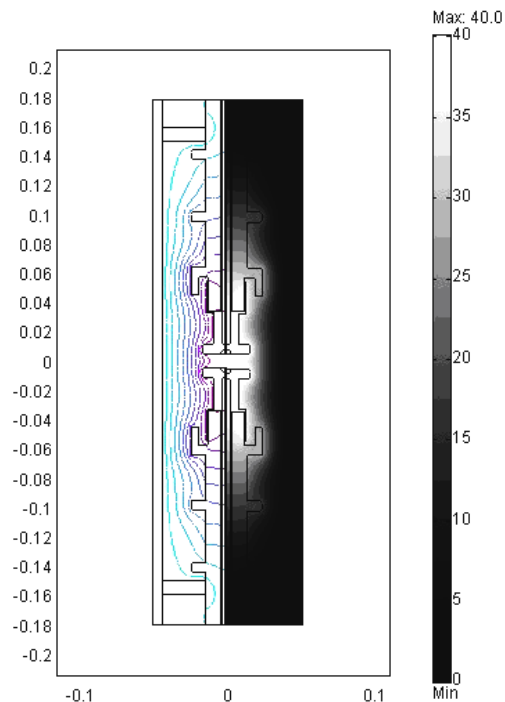


Рисунок 2 – Расчет температур перегрева элементов разрядника

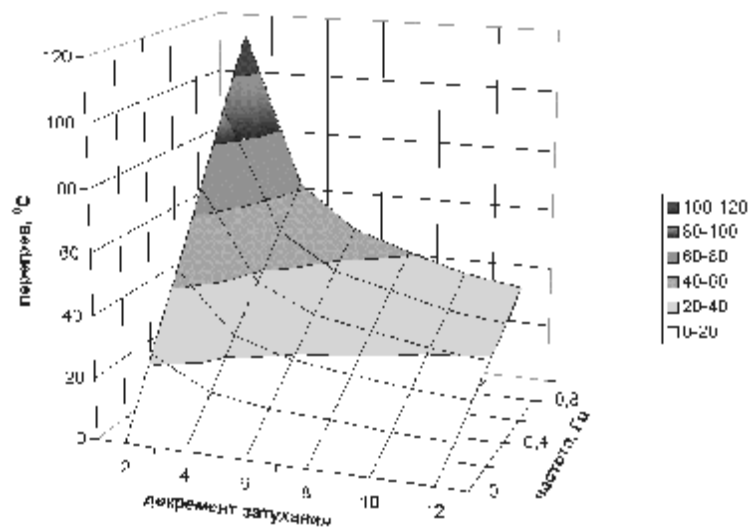


Рисунок 3 – Зависимость перегрева электродов разрядника относительно корпуса от декремента затухания и частоты разрядных импульсов

В процессе эксперимента фиксировались ток и напряжение на межэлектродном промежутке. Использовались осциллограф Tektronics TDS1012B, емкостно-резистивный делитель напряжения с коэффициентом уменьшения 1000, коаксиальный шунт с сопротивлением 0,0033 Ом. Характерные осциллограммы тока и напряжения на промежутке изображены на рис. 5. Масштабные коэффициенты:

- по напряжению – 9 кВ/дел.;
- по току – 17кА/дел.;
- по времени – 20 мкс/дел.

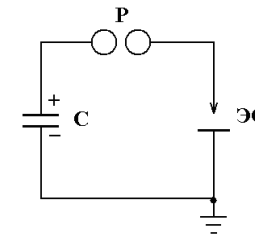


Рисунок 4 – Разрядный контур генератора тока скважинного комплекса

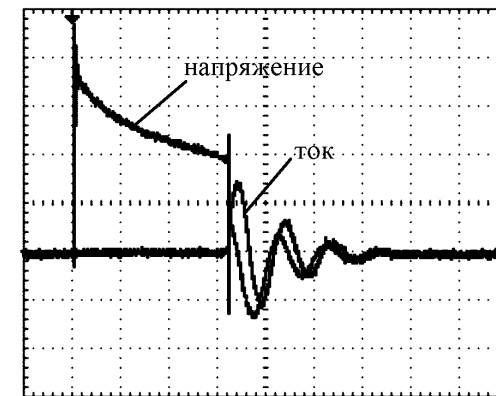


Рисунок 5 – Осциллограммы разрядного тока и напряжения на межэлектродном промежутке электродной системы

Следует отметить, что эксперимент проводился в условиях естественной воздушной конвекции корпуса разрядника, в то время как рабочий режим на скважине предполагает расположение погружной части комплекса с разрядником в скважинной жидкости. Поэтому в обоих случаях оценивался перепад температуры электродов разрядника относительно его корпуса.

Амплитуды токов согласно рис. 5 $I_{m1} = 22$ кА; $I_{m2} = 15$ кА; $I_{m3} = 10$ кА; $I_{m4} = 5$ кА, $I_{m5} = 1$ кА. Суммарная энергия по формуле (4) составила

$\sum_n W_n = 3,9$ Дж, при частоте следования разрядных импульсов $f = 0,8$ Гц мощность $P_{cp} = 3,1$ Вт. Теоретически рассчитанный перегрев электродов относительно стенки корпуса составил 76 °С.

Экспериментальное измерение температуры электродов разрядника производилось двумя термопарами К-типа.

Динамика нагрева элементов разрядника в процессе его работы с частотой повторения импульсов $0,8$ Гц приведена на рис. 6.

Измерения проводились до установления постоянной величины нагрева при температуре окружающей среды (воздуха) 17 °С. Перегрев электрода вычислялся путем вычитания соответствующих значений температур электрода и корпуса разрядника. Как видно из рис. 6, перегрев электродов разрядника вышел на установившееся значение за 45 минут работы, при этом его измеренная величина (60 °С) на 21 % меньше определенной теоретическим расчетом. Учитывая, что от 20 до 30 % разрядных импульсов не завершались пробоем рабочей среды, а происходило стекание заряда накопителя при малом разрядном токе, в разряднике выделялось меньшее количество энергии по сравнению с расчетом. Повысить точность результатов можно, производя осциллографирование тока и напряжения каждого импульса, протекающего через разрядник, что является достаточно трудоемким процессом. В то же время сравнение полученных данных с учетом описанных ранее погрешностей измерения свидетельствует о хорошей сходимости теоретических результатов с экспериментом.

тической оценки температур перегрева элементов разрядника при работе погружного комплекса. При затухающих синусоидальных, близких к критическим, разрядах возможно крепление электродов к тоководам при помощи припоев с высоким содержанием олова, имеющих начальную температуру плавления 183 °С (например, ПОС 30, ПОС 40). Однако учитывая возможность работы комплексов при температуре окружающей среды ~ 100 °С на короткие промежутки со слабо затухающей периодической формой разрядного тока, следует использовать более тугоплавкие сплавы (например, ПОСС 4-6 с температурой начала плавления 245 °С) и тщательно подходить к вопросу выбора фарфоровых изоляторов разрядника.

Авторы выражают благодарность м.н.с. Тафтаю Э.И. за участие в проведении эксперимента и обсуждении результатов.

Список литературы: 1. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электроразрядных устройств повышенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 112-118. 2. К.В.Дубовенко, Ю.И.Курашко, И.С.Швец. Анализ вероятностных характеристик пробоя компактного высоковольтного разрядника с газовой изоляцией // Труды 3-й Международной конференции «Электрическая изоляция – 2002». – С.-Петербург, 2002. – С. 370-372. 3. И.Н.Романенко. Импульсные дуги в газах. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1976. – 136 с. 4. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1964. – 752 с. 5. О.В.Хвоцан, Ю.И.Курашко, В.В.Литвинов. Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – №37. – С. 86-92.

Поступила в редакцию 04.08.2009

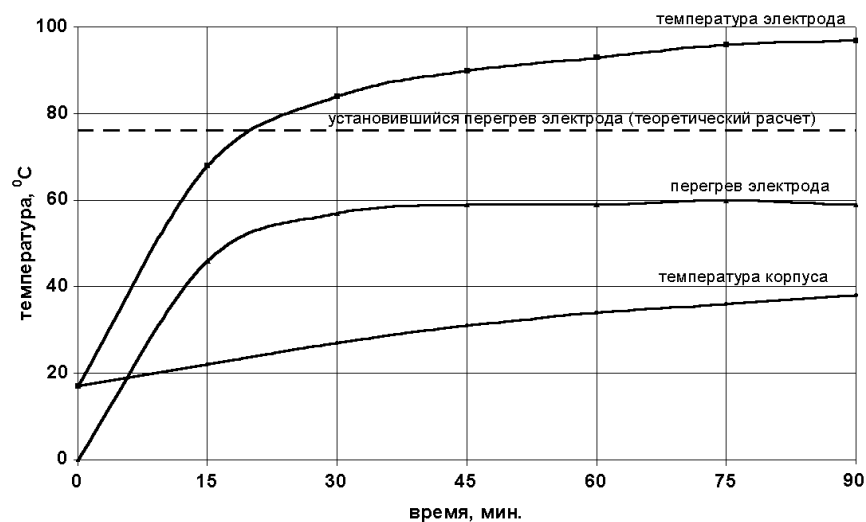


Рисунок 6 – Динамика изменения температуры элементов разрядника

По результатам исследований можно сделать вывод о возможности теоре-