

## Защита погружных электроустановок нефтедобычи от перенапряжений

ГОЛЬДШТЕЙН В.Г.<sup>1</sup>, ДЖАГАРОВ Н.Ф.<sup>2</sup>, РОМАНОВ В.С.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>СамГТУ, Самара, Россия

<sup>2</sup>ВВМУ им. Н. Вапцарова, Варна, Болгария

<sup>3</sup>СамараНИПИнефть, Самара, Россия

<sup>4</sup>ТГУ, Тольятти, Россия

*Статья посвящена проблемам обеспечения надежного электроснабжения и повышения энергоэффективности работы электроустановок оборудования нефтедобычи. Проведен анализ данных эксплуатации по отказам погружного электрооборудования и организационно-технических мероприятий для повышения его надежности и энергоэффективности. Представлена и проанализирована классификация причин нарушений и отказов погружных кабелей и электродвигателей. Среди множества опасных эксплуатационных воздействий, существенно снижающих ресурс погружного электрооборудования, выделены электромагнитные воздействия в виде внешних и внутренних перенапряжений. Дана оценка и проведено сравнение вариантов защиты от перенапряжений, возникающих при эксплуатации электроцентробежных насосов нефтедобычи. Рассмотрены специфика и построение системы питания погружного электрооборудования по кабельным линиям электропередачи с полимерной изоляцией и применение защиты от перенапряжений, основанной на использовании и учитывающей особенности нелинейных ограничителей перенапряжений из оксида цинка в электроснабжении нефтедобычи.*

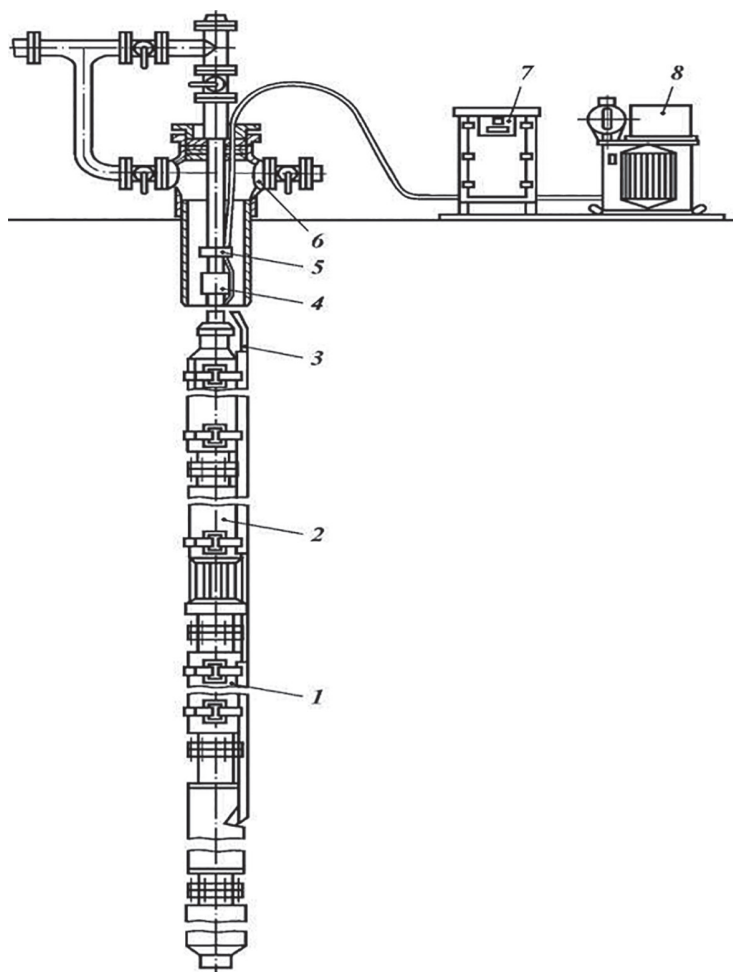
**К л ю ч е в ы е с л о в а:** погружные электроустановки, защита от перенапряжений, электроснабжение нефтедобычи, ограничители перенапряжений, дефекты, отказы, глубина спуска, термостойкость, недобор нефти, ущербы, ресурсы

В мировой нефтедобыче широко применяется механизированный способ подъема нефти, использующий погружные центробежные насосы, с помощью которых добывается более 80 % нефти [1]. Электроприводы таких насосов – погружные электродвигатели (ПЭД) – имеют специфичную компактную конструкцию и работают в агрессивных средах. Тяжелые эксплуатационные условия в электрических, тепловых и других режимах нефтедобычи приводят к беспрецедентно высокой, по сравнению с другими отраслями промышленности, аварийности погружного электрооборудования и производственным убыткам. Это свидетельствует о необходимости и актуальности решения проблем, направленных на снижение количества отказов и нарушений, приводящих к выходу из строя систем электроснабжения нефтедобычи и, прежде всего, погружного электрооборудования. Одним из важнейших аспектов является защита погружных электроустановок (ПЭУ) нефтедобычи от эксплуатационных воздействий, в частности, от перенапряжений. Применение современных средств защиты, теория, реализация и практика использования новых видов изоляционных конструкций требуют тщательного анализа причин аварийности, а также условий работы погружного электрооборудования.

Электродвигатели, составляющие основу электротехнических комплексов нефтедобычи, являются наиболее массовыми потребителями электроэнергии в технологических процессах нефтяной отрасли, электроснабжение которых в погружных электроустановках (ПЭУ) реализуется по схемам «кабель – электродвигатель» [2]. Упрощенная схема привода электроцентробежного насоса (трехфазного асинхронного короткозамкнутого погружного электродвигателя), а также варианты применяемых схем электроснабжения ПЭД [3] представлены на рис. 1 и 2.

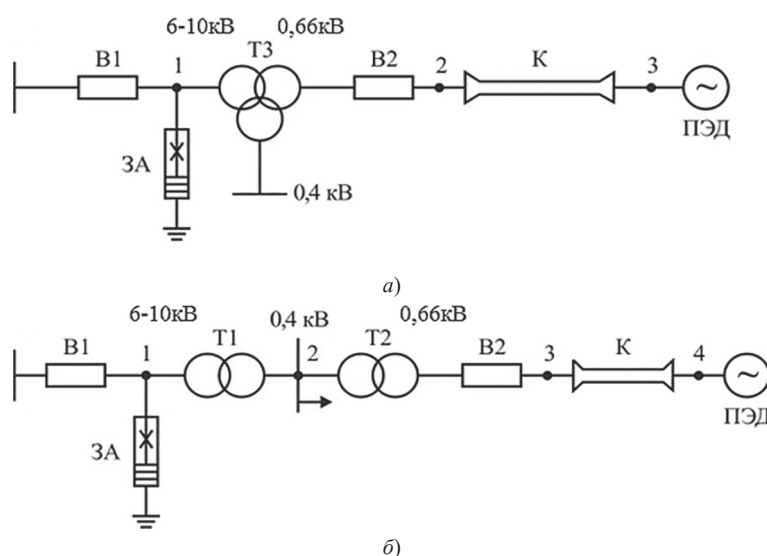
Статистика аварийности ПЭУ и анализ результатов исследований влияющих на неё факторов, а также отечественных и зарубежных публикаций [3, 4] позволили классифицировать причины, определяющие возникновение дефектов погружного электрооборудования (рис. 3). Среди причин нарушений и отказов погружных кабелей и электродвигателей можно отметить конструкторские, технологические, эксплуатационные, связанные с человеческим фактором и др.

Конструкторские причины являются отражением неудачных технических решений и несовершенства выбора конструктивных параметров, построения систем контроля и защиты. Они устраняются в процессе доводки и модификации узлов ПЭУ.



**Рис. 1.** Схема погружного электродвигателя: 1 – гидрозащита; 2 – насос; 3 – кабельная линия; 4 – насосно-компрессорные трубы; 5 – пояс; 6 – оборудование устья скважины; 7 – система управления; 8 – трансформатор

**Fig. 1.** Scheme of the submersible electric motor: 1 – hydroprotection; 2 – pump; 3 – cable line; 4 – tubing (tubing); 5 – belt; 6 – wellhead equipment; 7 – control system; 8 – transformer



**Рис. 2.** Схемы электроснабжения погружного электродвигателя: а – однотрансформаторная; б – двухтрансформаторная; В1, В2 – выключатели; Т1–Т3 – силовые трансформаторы; 3А – защитный аппарат; К – кабель; ПЭД – погружной электродвигатель

**Fig. 2.** Schemes of the submersible electric motor: а – single-transformer scheme; б – two-transformer circuit; В1, В2 – switches; Т1–Т3 – power transformers; 3А – protective apparatus; К – cable; ПЭД – submersible electric motor

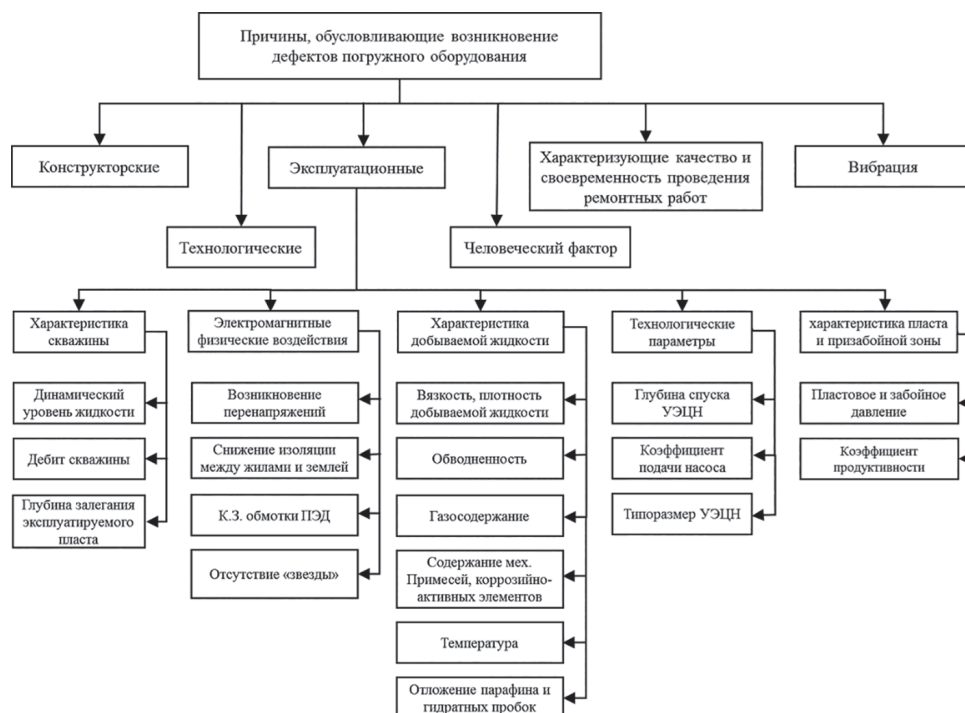


Рис. 3. Классификация причин возникновения дефектов погружных электроустановок

Fig. 3. Classification of defect causes in submersible electrical installations

*Технологические причины* определяются техническим уровнем конкретных производств и особенностями конструкции ПЭУ.

Наибольшее число дефектов обусловлено эксплуатационными причинами, связанными с условиями эксплуатации ПЭУ, среди которых глубина погружения и коэффициент подачи насоса [5]. Глубина спуска влияет на вероятность выхода из строя почти всех узлов ПЭУ. Она ограничивается прочностью эксплуатационной колонны (корпуса скважины) и предельной нагрузкой на упорный подшипник насоса.

Число аварий ПЭУ за определенный период в значительной степени определяется соответствием паспортной подачи *характеристике скважины*. При пониженной добыче потребление насосом электроэнергии не снижается. Если насос работает с заниженной подачей, то количество перекачиваемой жидкости недостаточно для поддержания необходимого температурного режима, вследствие чего ПЭД перегревается [3, 10, 12]. В значительной мере аналогичны нежелательные последствия режимов с повышенной подачей.

Число и повторяемость отказов и аварий ПЭУ определяется и цикличностью работы ПЭУ. Частые включения и выключения также приводят к отрицательным последствиям, сокращая добычу нефти, продолжительность работы установок и др. Каждое включение сопровождается пусковым током и связанным с ним *коммутационными перенапряжениями*, что вырабатывает ресурсы и отрицательно сказывается на долговечности кабеля и ПЭД [7, 8, 10]. В каждом цикле включения–

выключения масло в ПЭД и протекторе нагревается, а затем охлаждается. Следствием расширения и сжатия масла является быстрый износ протектора.

На работу ПЭУ отрицательно влияют *электромагнитные физические воздействия*, кавитация, неуравновешенность, а также изменения системы фазовых напряжений питания ПЭД, в 4 раза и более сокращающие время безаварийной работы [3, 5, 6].

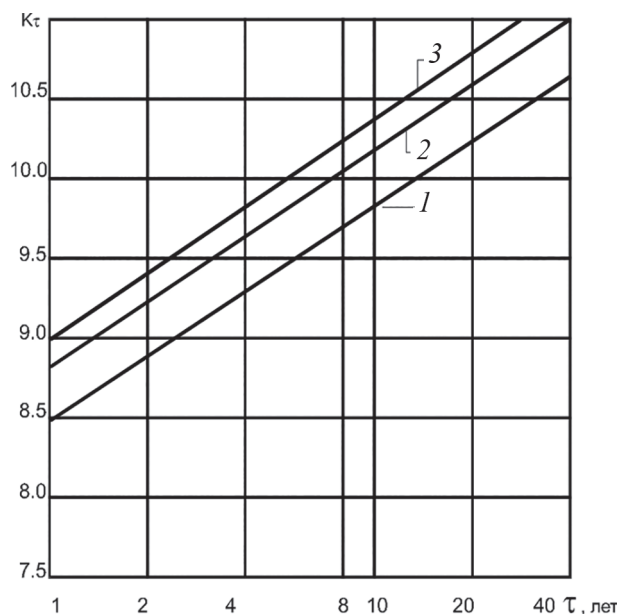
*Вибрация* возникает по многим причинам и оказывает разрушительное воздействие. Типичным примером эксплуатационных нагрузок, вызывающих усталостные напряжения и обеспечивающих развитие дефектов ПЭУ, являются вибрационные механические напряжения, и их можно считать основной причиной так называемых "полетов" [3, 10, 12].

*Причины, обусловленные человеческим фактором*, отражают корректность действий персонала во время обслуживания, ремонта и использования ПЭУ (неправильные действия, несоблюдение ТУ, требований охраны труда и техники безопасности, небрежность, некомпетентность и др.).

В работах [3, 6] подробно рассмотрены технологические причины отказов, позволившие дать репрезентативную оценку возникновения дефектов ПЭУ, анализ которых позволяет предположить, что, помимо характеристик скважины, пласта, добываемой жидкости, наименее изученными, но оказывающими преобладающее влияние на отказы и аварийность ПЭУ, являются электромагнитные физические воздействия при эксплуатации ПЭУ, снижающие надежность си-

системы нефтедобычи в целом. Интегральным технико-экономическим отражением снижения надежности является недобор нефти, прежде всего определяющий ущербы, вызванные необходимостью восстановления технологического процесса и ремонта электроустановок и оборудования нефтедобычи. Поэтому, учитывая последствия отказов технических средств защиты, повышение требований к ее устойчивости и введенные в отношении России санкции, разработка отечественных методов защиты является актуальной проблемой.

Среди различных жестких электромагнитных физических воздействий в эксплуатации ПЭУ выделяются внешние (атмосферные) и внутренние (коммутационные, дуговые, феррорезонансные и др.) перенапряжения. Они интенсивно вырабатывают ресурсы изоляции элементов ПЭУ (собственно ПЭД, а также систем «жила–экран» и «экран–земля» кабельных линий) перенапряжениями (более 5 кВ, 70–100 Гц) [3, 7, 8]. Все это в комплексе приводит к интенсивной выработке ресурсов ПЭУ и кабельных линий (КЛ), что требует их тщательной защиты. Не умаляя значимости всех перечисленных воздействий, можно особо выделить необходимость защиты от перенапряжений с помощью ОПН – специфичных нелинейных устройств, которые можно в значительной мере ориентировать на решение повышения надежности ПЭУ нефтедобычи [3, 6].



**Рис. 4.** Зависимость перенапряжений при коммутациях погружного электродвигателя без средств защиты от времени эксплуатации: 1 – среднее значение; 2 – при доверительном интервале с надежностью оценки 90 %; 3 – при доверительном интервале с надежностью оценки 95 %

**Fig. 4.** Dependence of overvoltage during switching of a submersible electric motor without means of protection from operating time: 1 – the average value; 2 – with a confidence interval with an estimate reliability of 90%; 3 – with a confidence interval with an estimate reliability of 95 %

Необходимость этой защиты подтверждается статистическими данными исследований кратности коммутационных перенапряжений  $K_t = U_{\text{нф}}/U_{\text{н}}$  (отношения  $U_{\text{нф}}$  – фазных и  $U_{\text{н}}$  – номинальных напряжений), проведенных на восьми типовых ПЭД различной мощности с рабочими напряжениями: 1,04; 1,5; 2,0; 2,5 кВ [3, 6] (рис. 4 и 5).

Можно констатировать, что кратности перенапряжений на изоляции ПЭД в основном находятся в пределах  $K_t = 3-7$ , а вероятность возникновения кратности  $K_t > 8$  составляет менее 3 % [3, 4, 6].

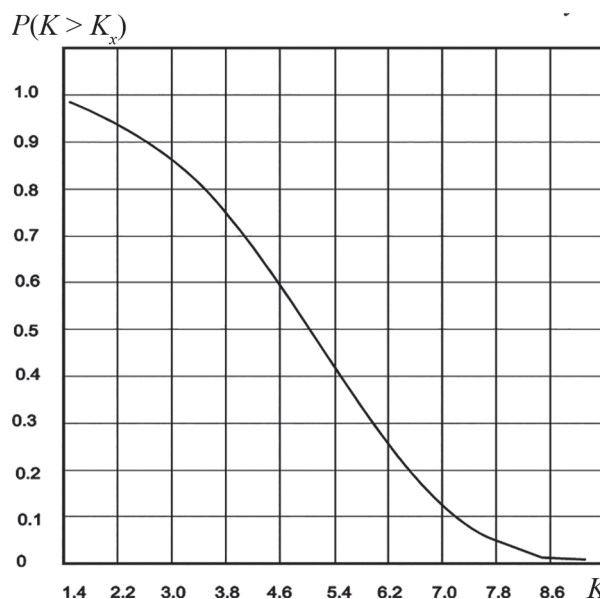
По условиям эксплуатации ПЭУ, для которых проводились анализ и исследования [3, 12, 13] коммутационных перенапряжений для определения усредненных значений (при  $K_t \geq 5,4$ ), сделано допущение, что эти ПЭД имеют в среднем по 20 коммутаций в год. С учетом этого методом наименьших квадратов была получена закономерность годового числа перенапряжений по полученным их статистическим рядам в виде экспоненциальной функции

$$N_{\text{кг}} = a \exp[-b(K - \tilde{K})]$$

или, после подстановки численных значений,  $N_{\text{кг}} = 7e^{-0,75(K - 5,4)}$  [3, 6]. Экстраполируя эту зависимость в область больших кратностей, можно записать

$$K_t = 5,4 + \frac{1}{0,75} \ln 7t.$$

Из рис. 4 видно, что амплитуда перенапряжений, вызванных коммутацией, значительно больше амплитуды испытательного напряжения. Это говорит о том,



**Рис. 5.** Распределение кратности перенапряжений на зажимах (изоляции) ПЭД

**Fig. 5.** Distribution of the multiplicity of overvoltage on the clamps (insulation) of the SEM

что эффективное принудительное ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях погружных установок вакуумными выключателями, практически возможно только при защите ПЭУ с помощью ОПН, характеристики которых ориентированы на условия работы ПЭУ. Технические требования к ОПН для защиты ПЭД приведены в таблице [6, 14, 15].

Аналогичные исследования были проведены для КЛ 0,5–2,5 кВ, питающих ПЭД. После установки ОПН кратности перенапряжения  $K_{\max}$  снизились с 8,2–8,6 до 3,5–4,0.

Установлено, что замена вентильных разрядников на ОПН в сетях 6(10) кВ в каждом конкретном случае существенно улучшает показатели надежности грозозащиты. Анализ распределения кратностей перенапряжений (рис. 6) при отсутствии и наличии ОПН в сетях 6(10) кВ, питающих ПЭД, позволяет констатировать увеличение этих показателей при использовании ОПН в каскадных схемах грозозащиты подстанций до 10 раз [6]. На рис. 7 и 8 показано распределение перенапряжений в сетях 6 и 10 кВ, питающих ПЭД, при наличии и отсутствии ОПН.

При эксплуатации комплекса КЛ и ПЭД [9] следует учитывать, что значения максимально наведенного напряжения на разомкнутом конце экрана одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в несимметричных режимах при однофазном КЗ не должны превышать величины электрической прочности изоляции «экран–земля». При этом расчетными случаями считаются нормальный трехфазный режим и режим однофазного КЗ вне кабеля, а при смене положения экранов между фазными кабелями – нормальный трехфазный режим и трехфазное КЗ.

На КЛ импульсы большой крутизны могут проходить через трансформаторы связи при переключениях в сети, коротких замыканиях, грозовых перенапряжениях [13].

При нарушении целостности экрана напряжение для одножильных кабелей высокого и сверхвысокого напряжения с СПЭ-изоляцией находится в пределе от 60 до 95 % амплитуды падающей волны. Следовательно, для защиты изоляции экранов КЛ с СПЭ-изоляцией при одностороннем заземлении экранов и в узлах транспозиции требуется установка ограничителей перенапряжения с уровнем изоляции «экран–земля».

Заземление экрана выполняют с той стороны КЛ, где имеется наибольшая вероятность попадания волны с крутым фронтом, поскольку наивысшее напряжение будет на разземленном конце экрана. Такое напряжение не повредит изоляцию экрана, так как заземление экрана подавляет попадающие в него волны.

При выборе ОПН [3, 15] необходимо учитывать в первую очередь климатические условия, в которых будет работать аппарат, а также присутствие агрессивной среды для защиты изоляции и оболочки кабеля от вероятных перенапряжений.

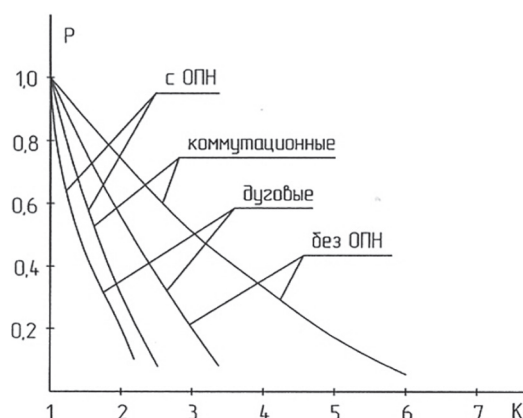


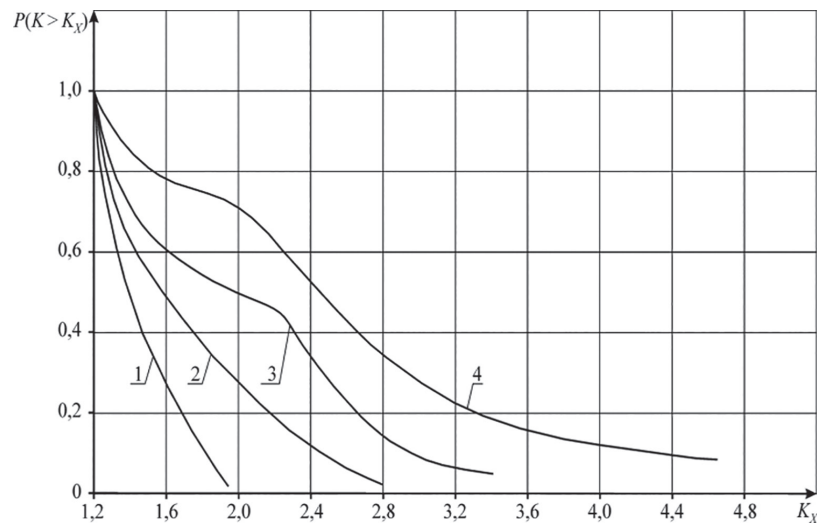
Рис. 6. Распределение кратности перенапряжений при отсутствии и наличии ОПН в сетях 6, 10 кВ, питающих ПЭД

Fig. 6. Distribution of overvoltage ratios in 6 kV networks supplying SEM, with and without surge arresters

### Технические требования к ОПН-0,5–2,5 кВ для защиты ПЭД Technical requirements for surge arresters - 0.5–2.5 kV for SEM protection

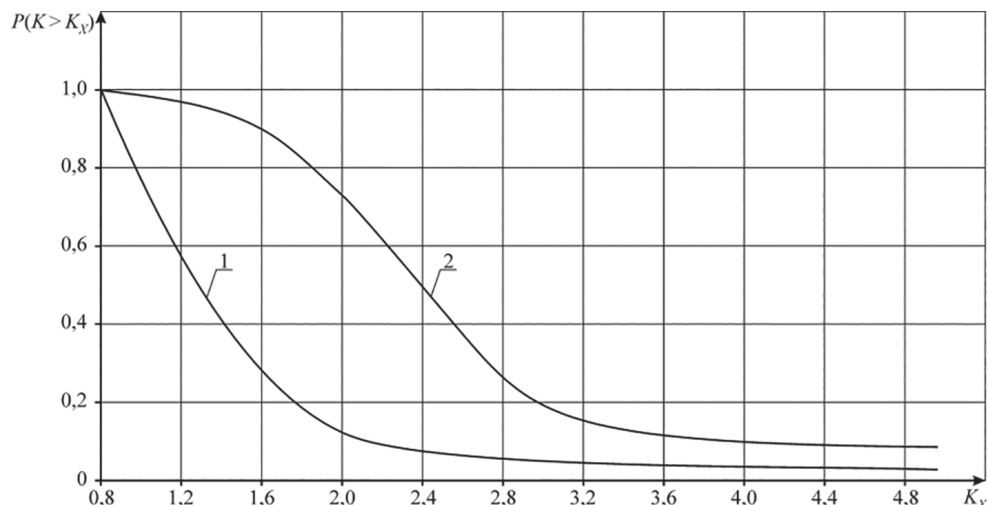
Параметры	ОПН-0,5	ОПН-1	ОПН-1,5	ОПН-2	ОПН-2,5
Номинальное напряжение защитного аппарата, кВ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Максимальное рабочее напряжение, длительно допустимое на аппарате, кВ	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Расчетный ток коммутационных перенапряжений при волне 1,2/2,5 мс, выдерживаемый не менее 20 раз, А	200				
Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационных перенапряжений, не более, кВ	1,55	3,1	4,65	6,2	7,75
Расчетный ток грозовых перенапряжений при волне 8/20 мкс, выдерживаемый не менее 20 раз, кА	1				
Остающееся напряжение при расчетном токе грозовых перенапряжений, не более, кВ	1,7	3,4	5,1	3,8	8,5
Внешняя изоляция должна соответствовать ГОСТ для аппаратов класса напряжения, кВ	3				
Климатическое исполнение	У; УХЛ				
Категория размещения ГОСТ 15160-697	1				





**Рис. 7.** Распределение перенапряжений в сетях 6 кВ, питающих ПЭД, при наличии и отсутствии ОПН: 1 – без замыкания на землю со стороны питания и с ОПН; 2 – то же, но без ОПН; 3 – при замыкании на землю со стороны питания и с ОПН; 4 – то же, но без ОПН

**Fig. 7.** Overvoltage distribution in 6 kV networks feeding the SEM, with and without surge arrester: 1 – when there is no ground fault on the supply side and there is a surge arrester; 2 – the same, without surge arrester; 3 – when there is a ground fault on the supply side and there is a surge arrester; 4 – the same, but without surge arrester



**Рис. 8.** Распределение перенапряжений в сетях 10 кВ, питающих ПЭД: 1 – с ОПН; 2 – без ОПН

**Fig. 8.** Overvoltage distribution in 10 kV networks supplying SEM with (1) and without (2) surge arresters

Каждому виду ограничителя перенапряжения для экранов кабелей соответствует различный расчётный режим рабочего напряжения, который, в свою очередь, будет учитывать возможность продолжительного действия данного напряжения. Из этого следует, что при расчетах необходимо учитывать особенности систем его заземления. В электроснабжении нефтедобычи по результатам предварительных расчетов режимов выбираются ОПН 3 класса энергоемкости [3–5].

Для защиты изоляции «жила–экран» устанавливаются определенные ОПН между жилой и землей. Выбор защиты проводится на основе анализа возможных электрических и неэлектрических воздействий.

Работа ОПН в электрических сетях нефтедобычи с обеспечением защиты изоляции электрооборудования

от перенапряжений (в данном случае изоляции ПЭД, жилы и экрана КЛ [9]) может считаться надёжной, если ОПН выдерживает ряд нормативных электрических и неэлектрических воздействий [6]. Т.е. должно быть проведено согласование защищаемой изоляции с его защитными характеристиками по грозовым, коммутационным, феррорезонансным и дуговым перенапряжениям с учетом категории размещения оборудования, климатических условий, а также по неэлектрическим воздействиям на ОПН (сейсмоустойчивость, виброустойчивость, механические воздействия, увлажнение и загрязнение) [6, 11].

В течение всего срока службы ОПН длительное допустимое напряжение частотой 50 Гц [6] является наиболее значимым показателем, определяющим его

работоспособность. Инструктивными документами [1, 2] определяется верхняя граница показателя, а изменения могут быть вызваны отклонениями рабочего напряжения или резонансными процессами.

Заводом-изготовителем и нормативными документами для всех видов ОПН устанавливаются сроки предельной эксплуатации [6] и сроки проведения регулярных профилактических испытаний [14], которые должны соблюдаться неукоснительно. На защитном аппарате при этом должно быть максимально допустимое длительное напряжение, а зафиксированный ток должен быть не более паспортного значения [6, 8].

При испытании присоединений и сборных шин, изоляции электрооборудования необходимо отключить ОПН. Несоблюдение данного условия может привести к их аварийному выходу из строя [6, 14] от воздействия постоянно приложенного повышенного испытательного напряжения. Необходимо помнить, что испытательное напряжение ОПН значительно выше, чем длительное и максимально допустимое [6].

Обратим внимание на аппараты регистрации токов утечки через ОПН под рабочим напряжением. Ими обычно комплектуются ОПН 110 кВ и выше, однако они, по нашему мнению, [3, 6] должны иметь место во всех присоединениях такого ответственного погружного электрооборудования нефтедобычи как ПЭД, поскольку позволяют определять развивающиеся повреждения на ранних стадиях. Они, как показывает анализ, в основном связаны с несоблюдением технических требований к эксплуатации ОПН и расхождением технических параметров защитных аппаратов с характеристиками защищаемых объектов.

В процессе эксплуатации часто причиной массовых повреждений и выхода из строя ОПН являются феррорезонансные явления, связанные с процессами в трансформаторах напряжения, из-за системных повреждений при продолжительных металлических замыканиях на землю, феррорезонансов в присоединениях «силовой трансформатор – кабель 6 кВ», отсутствия учета пропускной способности ОПН 6(10) кВ при их включении вместе с батареей статических конденсаторов [3, 6, 13].

В ряде случаев на действующих подстанциях нефтедобычи защита от перенапряжений реализуется и вентильными разрядниками, и ОПН. Причиной этого может быть отсутствие резерва защитных аппаратов конкретного вида (ОПН или разрядников) и как следствие, их вынужденная замена вплоть до установки в трех фазах комплекта с разными защитными аппаратами.

При установке на подстанциях одновременно вентильных разрядников и ОПН большая часть электромагнитной энергии волны перенапряжений будет уходить на землю через ОПН, поскольку их вольт-амперные характеристики лучше (ближе к идеальному порогу) [6]. Иначе говоря, они принимают на себя основную часть защитных функций, что часто приводит к их повреждениям от перегрузок. Поэтому в каждом

конкретном случае вынужденной совместной установки защитных аппаратов разных типов необходим тщательный анализ и индивидуальное решение.

Можно констатировать, что при замене вентильных разрядников на ОПН на подстанциях низких и средних классов напряжения, в том числе для нестандартных напряжений ПЭД, показатель надежности грозозащиты улучшается до 2 раз [6].

**Выводы.** Атмосферные перенапряжения при ударах молнии представляют наибольшую опасность для погружного электрооборудования с возможными амплитудами до 20–25 кВ в низковольтных сетях нефтедобычи.

С точки зрения надежности грозозащиты оптимальным решением можно считать (рис. 2,а) установку ОПН-6 в точке 1 и ОПН на рабочее фазное напряжение ПЭД в точке 2. Также возможна установка в точке 1 РВМ, а в точке 2 – ОПН, который будет гарантировать надежность ПЭД. Грозозащита ПЭД на стороне 6 кВ (рис. 2,б) вполне надежна без защитных аппаратов.

По сравнению с воздействиями на зажимах ПЭД на главной изоляции внутри ПЭД перенапряжений нет.

ОПН принимают на себя основную часть защитных функций при вынужденной совместной установке защитных аппаратов разных типов, что приводит к их повреждениям от перегрузок.

Замена вентильных разрядников на ОПН в схемах грозозащиты подстанций сетей 6(10) кВ, питающих ПЭД, значительно улучшает показатели надежности грозозащиты.

По аналогии со схемами включения ОПН 110 кВ в ПЭУ нефтедобычи необходимо использовать приборы регистрации токов утечки через ОПН под рабочим напряжением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007-29.240.01.221-2016. Руководство по защите электрических сетей напряжением 110–750 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2016, 92 с.
2. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозовых перенапряжений. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2008, 52 с.
3. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Повышение эффективности эксплуатации погружных электроустановок нефтедобычи. М.: Электроэнергия. Передача и распределение, 2023, 190 с.
4. Назаров А.А., Кавченков В.П. Разработка методики оценки надежности и приоритетности ремонтов в региональной энергосистеме с учетом возможного риска. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2020, № 3, с. 50–57.
5. Стариков А.В. и др. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя. – Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2019, № 4 (64), с. 155–167.
6. Халилов Ф.Х. и др. Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозовых и внутренних перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 2010, 264 с.
7. Jacobsen E. et al. Dynamic Rating of Transmission Cables, CIGRE Session, Paris, 2010.
8. Srinivas N.N. UtilX Corporation, USA. Strategies for Preventive Maintenance of Power Cable System. 2011.

9. Mendelsohn A., Ramachandran R., Richardson B. Importance of Quality Compounds for Utility Cable Reliability. – IEEE Rural Electric Power Conference, 2008, DOI:10.1109/REPCON.2008.4520138.

10. Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецова Л.В. Повышение эксплуатационно-энергетических характеристик электротехнического комплекса добывающей скважины при добыче вязкой и высоковязкой нефти. – Промышленная энергетика, 2015, № 8, с. 18–22.

11. Корявин А.Р. Проблемы выбора внешней изоляции для работы в условиях загрязнения. – Электричество, 2017, № 4, с. 22–30.

12. Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V. An Algorithm to Assess the Risk of Loss in Oil Production in the Event of an Electric Submersible Motor Failure. – IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2016, DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819089.

13. Хренников А.Ю. Комплексное диагностическое моделирование параметров технического состояния трансформаторно-реакторного электрооборудования: дис. ... докт. техн. наук. Самара, 2009, 373 с.

14. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2009, 392 с.

15. Фархадзаде Э.М. и др. Совершенствование методов повышения надежности объектов электроэнергетических систем. – Электричество, 2016, № 8, с. 18–28.

Авторы:



**Гольдштейн Валерий Геннадьевич** – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные Электроэнергетические системы», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия.



**Джагаров Николай Филев** – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры электротехники, Высшее военно-морское училище им. Николая Вапцарова, Варна, Болгария.



**Романов Владимир Сергеевич** – кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела типового проектирования и стандартизации ООО «СамараНИПИнефть»; доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника», Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия.

Поступила в редакцию [19.06.2023]  
Принята к публикации [29.06.2023]

## Overvoltage Protection of Submersible Oil Production Electrical Installations

**GOL'DSHTEYN Valeriy G.** (Samara State Technical University, Samara, Russia) – Professor of the Automated Electric Power Systems Dept., Dr. Sci. (Eng.), Professor.

**DZHAGAROV Nikolay F.** (Nikola Vaptsarov Naval Academy, Varna, Bulgaria) – Professor of the Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.), Professor.

**ROMANOV Vladimir S.** (LLC SamaraNIPIneft, Samara; Togliatti State University; Togliatti, Russia) – Senior Researcher of the Standard Design and Standardization Dept.; Docent of the Power Supply and Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng.).

The article discusses the results of studies aimed at ensuring reliable power supply and improving the energy efficiency of oil production equipment electrical installations. The operational data on failures of submersible electrical equipment and organizational and technical measures to improve its reliability and energy efficiency are analyzed. The classification of factors causing abnormalities and failures of power cables and electric motors is presented and analyzed. Among numerous hazardous operational factors causing an essential reduction in the service life of submersible electrical equipment, electromagnetic impacts in the form of external and internal overvoltages are singled out. Possible options for protection against overvoltages arising during the operation of electric centrifugal oil production pumps are estimated and compared with one another. The specific features and configuration of a power supply system for submersible electrical equipment via cable transmission lines with polymeric insulation, and application of overvoltage protection based on the use and taking into account the features of nonlinear zinc oxide overvoltage limiters in the oil production power supply systems are considered.

**Key words:** submersible electrical installations, overvoltage protection, oil production power supply, overvoltage limiters, defects, failures, descending depth, heat resistance, oil underproduction, damages, resources



REFERENCES

1. **STO 56947007-29.240.01.221-2016.** *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey napryazheniem 110–750 kV ot grozovykh i vnutrennih perenapryazheniy* (Guidelines for the Protection of 110-750 kV Electrical Networks from Lightning and Internal Overvoltage). M.: PAO «FSK EES», 2016, 92 p.
2. **Metodicheskie ukazaniya po zashchite raspredelitel'nykh elektricheskikh setey napryazheniem 0,4–10 kV ot grozovykh perenapryazheniy** (Methodological Guidelines for the Protection of Distribution Electrical Networks with a 0.4–10 kV Voltage from Lightning Overvoltage). M.: OAO «FSK EES», 2008, 52 p.
3. **Romanov V.S., Gol'dshteyn V.G.** *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii pogruzhnykh elektroustanovok nefte dobychi* (Improving the Operation Efficiency of Submersible Electrical Installations of Oil Production). M.: Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie, 2023, 190 p.
4. **Nazarov A.A., Kavchenkov V.P.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and Distribution)*, 2020, No. 3, pp. 50–57.
5. **Starikov A.B. et al.** *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki» – in Russ. (Bulletin of Samara State Technical University. Series "Technical Sciences")*, 2019, No. 4 (64), pp. 155–167.
6. **Halilov F.H. et al.** *Ogranichiteli perenapryazheniy dlya zashchity izolyatsii elektrooborudovaniya i liniy setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya ot grozovykh i vnutrennih perenapryazheniy* (Surge Arresters to Protect the Insulation of Electrical Equipment and Lines of Medium, High and Ultra-High Voltage Networks from Lightning and Internal Overvoltage). M.: Energoatomizdat, 2010, 264 p.

7. **Jacobsen E. et al.** *Dynamic Rating of Transmission Cables*, CIGRE Session, Paris, 2010.
8. **Srinivas N.N.** UtilX Corporation, USA. *Strategies for Preventive Maintenance of Power Cable System*. 2011.
9. **Mendelsohn A., Ramachandran R., Richardson B.** *Importance of Quality Compounds for Utility Cable Reliability*. – IEEE Rural Electric Power Conference, 2008, DOI:10.1109/REPCON.2008.4520138.
10. **Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Shvetskova L.V.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2015, No. 8, pp. 18–22.
11. **Koryavin A.R.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 4, pp. 22–30.
12. **Sukhachev I.S., Gladkikh T.D., Sushkov V.V.** *An Algorithm to Assess the Risk of Loss in Oil Production in the Event of an Electric Submersible Motor Failure*. – IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2016, DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819089.
13. **Hrennikov A.Yu.** *Kompleksnoe diagnosticheskoe modelirovanie parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya transformatorno-reaktornogo elektrooborudovaniya: dis. ... dokt. tekhn. nauk* (Complex Diagnostic Modeling of the technical condition parameters of transformer – reactor electrical equipment: dis. ... Dr. Sci.(Eng.)). Samara, 2009, 373 p.
14. **Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey** (Handbook on the Design of Electrical Networks) / Ed. by D.L. Faibisovich. M.: ENAS, 2009, 392 p.
15. **Farhadzade E.M. et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 8, pp. 18–28.

Received [19.06.2023]

Accepted [29.06.2023]