

УДК 621.316.13

А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Результаты теоретических и экспериментальных исследований в электрических сетях и электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи показали: качество электрической энергии во многих случаях не удовлетворяет требованиям действующих стандартов, что приводит к нарушению непрерывности технологического процесса добычи нефти. Это обусловлено тем, что в распределительных сетях нефтедобывающих предприятий из-за их значительной протяженности и большого количества нелинейных потребителей провалы напряжения и искажения синусоидальности токов и напряжений значительно превышают допустимые значения.

Снижение уровня питающего напряжения ниже минимально допустимого, а также перемены в электроснабжении длительностью свыше 0,15 с могут привести к расстройству сложных технологических процессов, ложным срабатываниям системы электросетевой автоматики и защиты, отказам в электроснабжении особой группы потребителей первой категории надежности [1], значительному экономическому ущербу и повышению потерь нефтедобычи. Искажения напряжения из-за интенсивного роста

нелинейной преобразовательной нагрузки значительно сокращают срок службы основного нефтепромыслового электрооборудования.

В [2] приведены результаты исследования режимов эксплуатации установок с электроцентробежными насосами (УЭЦН). Исследования проведены на математической модели в среде MatLab с использованием пакета SimULink. В модели рассмотрен вариант питания погружного электродвигателя типа ПЭД-45 (параметры двигателя приведены в Приложении 1), по кабелю КПБП 3×16 (параметры кабеля приведены в Приложении 1) от шин бесконечной мощности. На рис. 1 представлены зависимости допустимой потери напряжения ΔU_d , при которой обеспечивается работоспособность УЭЦН (двигателя) независимо от продолжительности существования такого режима, при различных значениях глубины подвески (L) и коэффициента загрузки (k_3). Глубина подвески — это длина кабеля от питающего трансформатора до погружного двигателя, согласно которой учтена потеря напряжения. Коэффициент загрузки — это отношение фактического момента двигателя к его номинальному моменту.

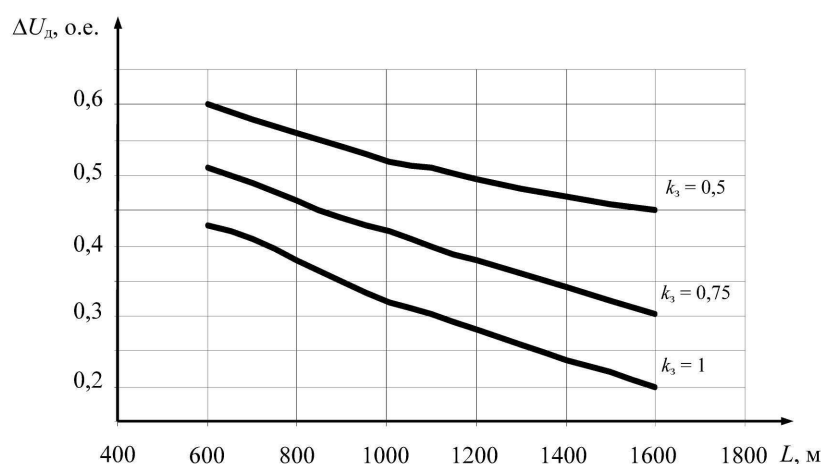


Рис. 1. Зависимости допустимой потери напряжения от глубины подвески и коэффициента использования ПЭД

Согласно рис. 1 при $k_3 = 1$ и $L = 1600$ м допустимая потеря напряжения составляет 0,2 о.е. За базис для ΔU_d принято номинальное напряжение ПЭД. С уменьшением k_3 и L допустимая величина ΔU_d увеличивается и достигает 0,6 о.е. при $k_3 = 0,5$ и $L = 600$ м.

С помощью описанной выше модели также получены зависимости допустимой потери напряжения (ΔU_d) от длительности и уровней (U_B) его восстановления при коэффициенте загрузки $k_3 = 1$ (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что при глубине подвеса ПЭД $L = 1600$ м и $k_3 = 1$ будет $\Delta U_d = 0,3$ о.е. при длительности $t_{пр} = 0,18$ с и $U_B = 0,8 U_{ном}$. При $L = 1000$ м и $k_3 = 1$ будет $\Delta U_d = 0,4$ о.е. при длительности $t_{пр} = 1,25$ с и $U_B = 0,8 U_{ном}$. Время $t_{пр}$ соответствует продолжительности работы двигателя, которая определяется его критическим скольжением. С уменьшением глубины подвески L и коэффициента загрузки k_3 ПЭД увеличивается допустимая глубина и длительность потери напряжения, при которых обеспечивается непрерывность технологического процесса.

Исследования, проведенные при напряжении восстановления, уменьшенном до $U_B = 0,7 U_{ном}$, выявили, что предельная величина допустимой потери напряжения при $L = 1000$ м и длительности существования провала 0,45 с составляет 0,4 о.е. Полученные зависимости позволяют определить предельно допустимую величину потери напряжения в системе электроснабжения УЭЦН, при которой обеспечивается непрерывность технологического процесса.

Для обеспечения устойчивости работы погружных электродвигателей (ПЭД) электроцентробежных насосов (ЭЦН) необходимо выявить уровень потери напряжения при пуске электродвигателей главных приводов буровой установки (БУ), а также определить распределение этой потери напряжения при удаленности от источника питания.

Для решения поставленных задач необходима разработка имитационной модели электро-механического комплекса с синхронным (СД) и асинхронным (АД) двигателями, которая позволяла бы оценить влияние потери напряжения в ЛЭП при пуске СД на работу параллельно подключенному электрооборудованию. Разработана имитационная математическая модель в среде MatLab с использованием пакета SimULink. При этом необходимо было разработать обобщенную систему уравнений, описывающих работу различного типа электроприводов и сети. Потокосцепления представим в виде

$$\begin{cases} \Psi_d = x_d i_d + x_{ad} (i_f + i_{kd}); \\ \Psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_{kq}; \\ \Psi_f = x_{ad} (i_d + i_{kd}) + x_f i_f; \\ \Psi_{kd} = x_{ad} (i_d + i_f) + x_{kd} i_{kd}; \\ \Psi_{kq} = x_{aq} i_q + x_{kq} i_{kq}. \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ — потокосцепление; i — ток. Индексы указывают, что величина относится к продольной оси (d), к поперечной оси (q), к статору (a), к обмотке возбуждения двигателя (f), к демпферной обмотке (k).

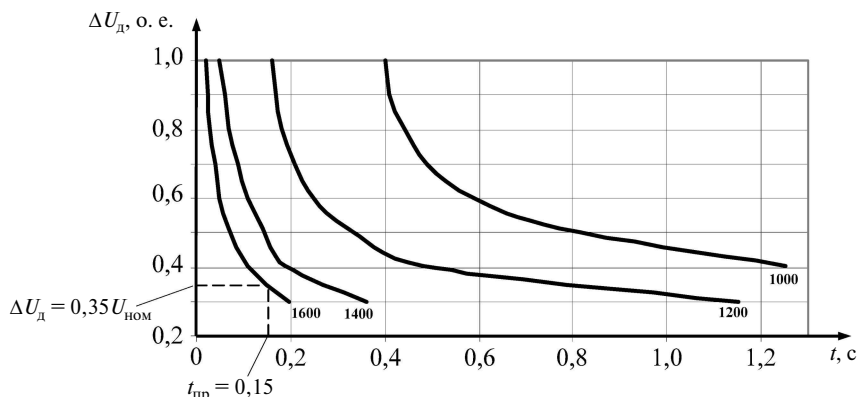


Рис. 2. Зависимость допустимой потери напряжения питания ПЭД от ее продолжительности при последующем восстановлении питания до $U_B = 0,8 U_{ном}$ при глубинах подвески 1000, 1200, 1400 и 1600 м

Подставим систему (1) в систему уравнений Парка — Горева, подробно и многократно описанную в отечественной и зарубежной литературе [3], и, введя разделительные коэффициенты b (характеризует явнополюсность) и k (характеризует состояние обмотки возбуждения), получим следующую обобщенную систему уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{d(i_d(x_\ell + x_s) + x_{ad}(i_f k + i_{kd} + i_d))}{dt} = \\ & = 2\pi f(U_M \sin \Theta - (r + r_s)i_d + \\ & + (i_q(x_\ell + x_s) + (x_{ad}(1-b) + x_{aq}b)(i_q + i_{kq}))\omega); \\ & \frac{d(i_q(x_\ell + x_s) + (x_{ad}(1-b) + x_{aq}b)(i_q + i_{kq}))}{dt} = \\ & = 2\pi f(U_M \cos \Theta - (r + r_s)i_q - \\ & - (i_d(x_\ell + x_s) + x_{ad}(i_f k + i_{kd} + i_d))\omega); \\ & \frac{d(x_{ad}(i_d + i_{kd}) + x_f i_f k)}{dt} = 2\pi f k (U_f - r_f i_f); \\ & \frac{d(x_{ad}(i_d + i_f k) + x_{kd} i_{kd})}{dt} = 2\pi f (-r_{kd} i_{kd}); \\ & \frac{d((x_{ad}(1-b) + x_{aq}b)i_q + (x_{kd}(1-b) + x_{kq}b)i_{kq})}{dt} = \\ & = 2\pi f (-i_{kq}(r_{kd}(1-b) + r_{kq}b)); \\ & \frac{d\omega}{dt} = \frac{A}{T_j}; \end{aligned}$$

где $A = (i_d(x_\ell + x_s) + x_{ad}(i_f k + i_{kd} + i_d))i_q - (i_q(x_\ell + x_s) + (x_{ad}(1-b) + x_{aq}b)(i_q + i_{kq}))i_d + M_c$;

$$\frac{d\Theta}{dt} = 2\pi f(\omega - 1). \quad (2)$$

Здесь $x_d = x_{ad} + x_\ell + x_s$; $x_q = x_{aq} + x_\ell + x_s$; M_c — механический момент на валу машины; Θ — угол между продольной осью полюсов ротора и осью поля статора (угол нагрузки); r — активное сопротивление статора; r_s — активное сопротивление питающей сети; x_ℓ — сопротивление рассеяния статора; x_s — сопротивление питающей сети.

При $k = b = 1$ получим систему уравнений, описывающих явнополюсный СД; при $k = 1$, $b = 0$ — неявнополюсный СД; при $k = b = 0$ — асинхронный двигатель.

Полученная модель позволяет определить допустимую длительность перерыва электропитания СД и АД. В данной модели рассмотрен вариант электроснабжения электрооборудования установок нефтедобычи от общих воздушных радиально-магистральных линий электропередачи напряжением 6 кВ, в котором в конце линии подключена буровая установка, а погружные электродвигатели (ПЭД-45) электроцентробежных насосов распределены по длине линии. Причем при пуске электродвигателей главных приводов БУ нарушается работоспособность ПЭД. В качестве синхронного двигателя привода насоса в модели использован СДЗ-12-46-8А (параметры двигателя указаны в Приложении 2). ЛЭП протяженностью 10 км выполнена проводом марки АС-95. С помощью данной модели определены уровни работоспособности установок электроцентробежных насосов с погружными электродвигателями при изменении входного напряжения, вызванного потерей напряжения в пусковых режимах главных электроприводов буровых установок.

На рис. 3 показано изменение напряжения при пуске СД. На рис. 3, а — расчетная кривая напряжения непосредственно у СД при удалении от источника питания на 10 км; на рис. 3, б — расчетная кривая напряжения при удалении от источника питания на 1 км; в — расчетная кривая напряжения непосредственно у источника питания. Из анализа полученных расчетных кривых видно, что наибольшая потеря напряжения наблюдается при наибольшем удалении от источника питания (при удалении на 10 км напряжение снижается до 3 кВ).

Длительность пуска двигателя БУ, а соответственно, длительность потери напряжения в сети составляют около 2 с. При этом допустимая потеря напряжения для ПЭД с коэффициентом загрузки $k_3 = 0,75$ при глубине подвески ПЭД 1600 м равна 0,3 о.е. (т. е. напряжение питания $U = 4200$ кВ), а при 1100 м — 0,4 о.е. (напряжение питания $U = 3600$ кВ). На рис. 4 приведены зависимости изменения напряжения в ЛЭП от протяженности линии при пуске СД. Из анализа полученных зависимостей следует,

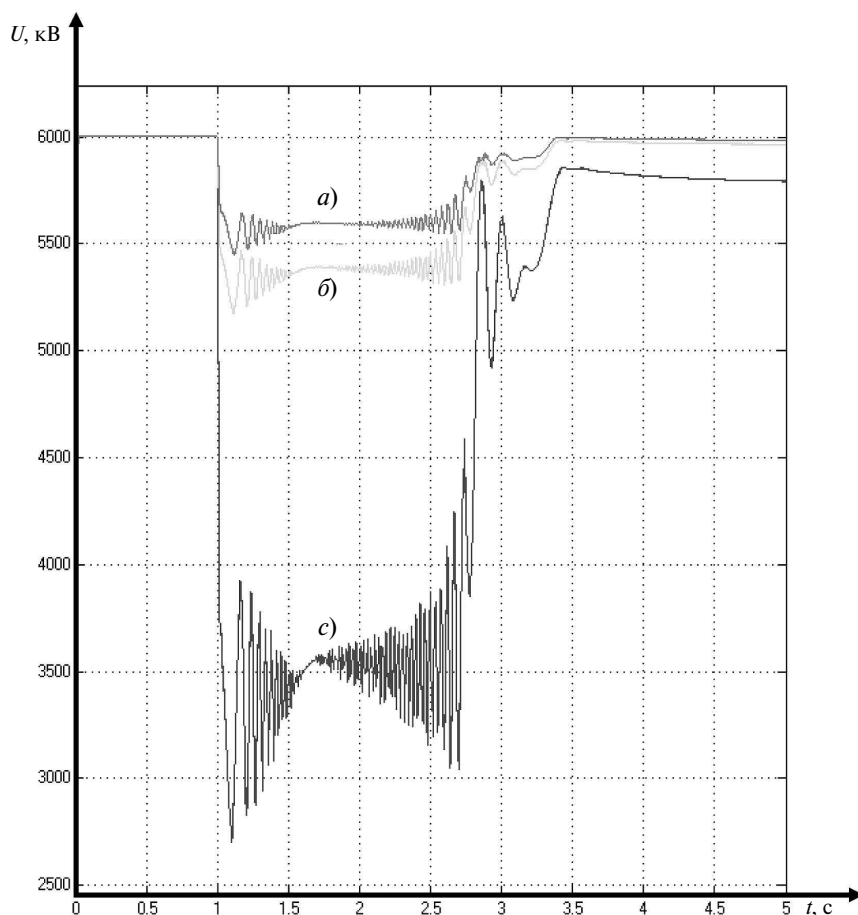


Рис. 3. Изменение напряжения при пуске СД

что из-за снижения напряжения питания до 4200 кВ при пуске СД двигателя УЭЦН (при глубине подвески ПЭД 1600 м и более) останутся, если источник питания удален свыше 6,25 км при ЛЭП с проводом АС-70, более 6,8 км — при АС-95, дальше 7,2 км — при АС-120.

Для повышения работоспособности ПЭД на всем протяжении ЛЭП необходимо снизить влияние пусковых режимов главных приводов БУ. Этого можно добиться следующими способами:

- ограничением пускового тока при использовании пускорегулирующих устройств, например преобразователей частоты (ПЧ) или тиристорных пусковых устройств;

- компенсацией потери напряжения в ЛЭП с помощью вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) или динамических компенсаторов искажений напряжения (ДКИН);

- комбинацией вариантов ограничения пускового тока и компенсации потери напряжения в ЛЭП.

Использование ПЧ позволит снизить пусковой ток главных приводов БУ до 1,2–1,5 от $I_{ном}$. Однако может привести к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения свыше допустимых значений. При этом увеличение количества ПЧ приведет к ухудшению гармонического состава кривых тока и напряжения.

Динамический компенсатор искажений напряжения позволяет полностью компенсировать потерю напряжения в ЛЭП при коротком замыкании или пусковых режимах [4, 7]. Устройство ДКИН нашло широкое применение в сетях 6–10 кВ. ДКИН представляет собой преобразователь напряжения, содержащий выпрямитель и инвертор с пофазным управлением на базе полностью управляемых выпрямителей, который подключен к питающей сети потребителя через вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) и создает на вторичной обмотке добавку напряжения ΔU , полностью компенсирующую провал

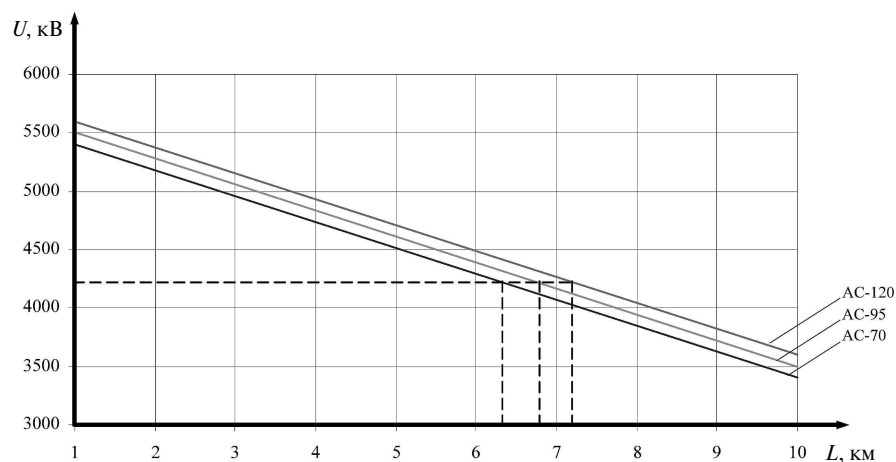


Рис. 4. Зависимости изменения напряжения в ЛЭП при пуске СД от протяженности линии

напряжения при внешнем КЗ или потере напряжения. Одно устройство ДКИН может быть использовано для обеспечения работоспособности нескольких ПЭД, рассредоточенных по ЛЭП. При этом для повышения эффективности компенсации потери напряжения произведено совершенствование устройства ДКИН, связанное с фазовой синхронизацией токов и напряжений, что существенно расширяет функциональные возможности ДКИН [5, 6].

При увеличении числа и мощности установленного оборудования целесообразно совместное использование указанных устройств для снижения влияния пусковых режимов главных приводов БУ. При этом распределение долей на компенсацию потери напряжения может быть определено с учетом минимума приведенных затрат на эксплуатацию оборудования ПЧ и ДКИН.

Основные результаты исследования сводятся к следующему:

1. Разработана имитационная модель, описывающая работу электромеханических ком-

плексов с синхронными и асинхронными электродвигателями в системе электроснабжения и позволяющая оценить вариацию параметров системы электроснабжения и двигательной нагрузки. Модель позволяет одновременно рассмотреть работу электропривода в генераторном и двигательном режимах, что необходимо при моделировании пуска, самозапуска, при возникновении коротких замыканий, работы АВР.

2. Выявлено, что при снижении напряжения питания до 4200 кВ при пуске СД двигателя УЭЦН при глубине подвески ПЭД 1600 м и более останутся, если источник питания удален свыше 6,25 км при ЛЭП с проводом АС-70, либо 6,8 км при АС-95, либо 7,2 км при АС-120.

3. Проведен анализ различных способов снижения влияния пусковых режимов главных приводов БУ. Выявлено, что выпускаемые промышленностью динамические компенсаторы искажений напряжения позволяют полностью компенсировать потери напряжения в ЛЭП и повысить работоспособность ПЭД.

Приложение 1

Параметры двигателя:

номинальная мощность $P_{2н} = 45$ кВт;
 номинальное напряжение $U_{1н} = 1400$ В;
 номинальные частота вращения $n_n = 2830$ об/мин
 и скольжение $s_n = 0,055$;
 номинальный КПД $\eta_n = 0,81$;

номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,84$;

число пар полюсов $z_p = 1$.

Параметры кабеля:

$R_k = 1,32$ Ом/км;
 $X_k = 0,1$ Ом/км.

Приложение 2

Параметры двигателя:

номинальная мощность $P_n = 320$ кВт;
номинальное напряжение $U_{1n} = 6$ кВ, кратность форсировки по напряжению 1,75;

длительность форсировки до 60 с, согласно ГОСТ 24688–81 «Возбудители статические полупроводниковые для трехфазных синхронных двигателей».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок [Текст] / Главгосэнергонадзор России.— М.: ЗАО «Энергосервис», 1998.
2. **Абрамович, Б.Н.** Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными и асинхронными двигателями на предприятиях нефтедобычи [Электрон. ресурс] / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, И.Г. Плотников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело».— 2011. № 3.— С. 17–25.— URL: http://www.ogbus.ru/authors/Abramovich/Abramovich_1.pdf.
3. **Пронин, М.В.** Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) [Текст] / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов / Под ред. Е.А. Крутякова.— СПб.: Изд-во «Силовые машины»-«Электросила», 2004 г.
4. **Гамазин, С.П.** Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии [Текст] / С.П. Гамазин, В.М. Пупин, Ю.В. Марков // Промышленная энергетика.— 2006. № 11.— С. 51–56.
5. **Патент на изобретение № 2453021.** [Текст] / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов. Устройство регулирования отклонений напряжения и реактивной мощности.— 10.06.2012.— БИ № 16.
6. **Патент на изобретение № 2446537.** [Текст] / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский, Д.А. Устинов. Устройство регулирования напряжения и передаваемой мощности электрической сети.— 27.03.2012.— БИ № 9.
7. **Абрамович, Б.Н.** Электроснабжение нефтегазовых предприятий [Текст]: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов. Санкт-Петербургский государственный горный институт. — СПб., 2008.— 88 с.