

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

https://mst.misis.ru/

2024:9(3):292-303

Ершов М. С., Ефимов Е. С. Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки.

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213 УДК 622:62-83



Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки в рабочих режимах и при провалах напряжения в сети

М.С. Ершов 🕞 🚾 🖂, Е.С. Ефимов 💿

Аннотация

Применение частотно-регулируемого привода штанговых насосных установок (ШНУ), широко используемых для добычи нефти, повышает энергетическую и технологическую эффективность добычи нефти, способствует снижению износа оборудования, но его применение сдерживается неустойчивой работой при недостаточной уравновешенности ШНУ и чувствительностью к кратковременным провалам напряжения, часто возникающим в протяженных электрических сетях нефтепромыслов. Недостаточная уравновешенность ШНУ приводит к появлению в цикле качания периода работы двигателя в генераторном режиме, обусловленном неравномерностью и изменением направления момента сопротивления рабочего механизма. Переход двигателя в генераторный режим так же, как и провалы питающего напряжения, приводит к выходу напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты за установленные пределы и к отключению преобразователя. Для исследования процессов при работе штанговых насосных установок и проверки способов устранения негативного влияния на преобразователь частоты генераторного режима, а также провалов напряжения питающей электросети с целью повышения устойчивости системы в среде Matlab, Simulink создана модель «электрическая сеть – частотно-регулируемый привод ШНУ» с характерной для данного применения нагрузкой, проведен ряд опытов и выполнен анализ результатов. Рассмотрена программная функция подавления генераторного режима и дана оценка возможности ее применения для реальных установок. Проанализировано применение системы бесперебойного питания на основе аккумуляторных накопителей энергии для предотвращения прерывания работы при разных уровнях провалов питающего напряжения. Модель, полученная в результате работы, может быть применена для общего анализа работоспособности и устойчивости, а также проверки правильности подбора ключевых элементов проектируемых систем штанговых насосных установок с частотно-регулируемым приводом.

Ключевые слова

штанговая насосная установка, частотно-регулируемый привод, преобразователь частоты, преобразователь постоянного тока, аккумуляторная батарея, генераторный режим, провал напряжения, компьютерное моделирование

Для цитирования

Ershov M.S., Efimov E.S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical network. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):292–303. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical network

M.S. Ershov 🝺 🚾 🖂, E.S. Efimov 🕩

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation msershov@yandex.ru

Abstract

The use of a variable frequency drive (VFD) for sucker-rod pump units (SRPUs), widely employed in oil extraction, enhances the energy and technological efficiency of oil production and reduces equipment wear. However, its application is hindered by unstable operation under insufficient balancing of the SRPU and sensitivity to short-term voltage dips, which frequently occur in the extensive electrical networks of oil fields. Insufficient balancing of the SRPU leads to the occurrence of a period within the pumping cycle where the



https://mst.misis.ru/

Ershov M. S., Efimov E. S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive..

motor operates in generator mode, caused by the unevenness and reversal of the resistance torque of the working mechanism. The motor's transition to generator mode, as well as voltage dips in the power supply, causes the voltage in the DC link of the VFD to exceed the set limits, resulting in the drive being shut down. To investigate the processes during the operation of sucker-rod pump units and to test methods for mitigating the negative impact of generator mode and voltage dips in the power supply network on the VFD, a model of the "power grid – variable frequency SRPU drive" system with a load characteristic of this application was developed in Matlab Simulink. A series of experiments were conducted, and the results were analyzed. The suppression function of the generator mode was examined, and the feasibility of its application to real SRPUs was evaluated. The use of an uninterruptible power supply system based on battery energy storage to prevent operational interruptions during different levels of power supply voltage dips was analyzed. The resulting model can be used for general analysis of operability and stability, as well as for verifying the correct selection of key elements in the design of sucker-rod pump unit systems with variable frequency drives.

Keywords

sucker-rod pump unit, variable frequency drive, frequency converter, DC converter, battery storage, generator mode, voltage dip, computer modeling

For citation

Ershov M.S., Efimov E.S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive under operating conditions and during voltage dips in the electrical network. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(3):292–303. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-213

Введение

Для повышения технологической и энергетической эффективности штанговые насосные установки (ШНУ), широко используемые для добычи нефти, оснащают частотно-регулируемым электроприводом (ЧРП), но его применение сдерживается неустойчивостью при работе в условиях недостаточной уравновешенности станков-качалок и в условиях частых возмущений в электрических сетях нефтепромыслов.

Практика применения ЧРП ШНУ показала, что основными причинами снижения устойчивости привода являются кратковременные провалы напряжения в электрических сетях нефтепромыслов, а также присутствие в цикле качания периода работы в генераторном режиме, который возникает по причине неравномерности нагрузки, из-за действия инерционных и вибрационных нагрузок, обусловленных характером движения колонны штанг. Кратковременный генераторный режим при качании может возникать даже во время работы хорошо уравновешенных установок с небольшой глубиной спуска насоса и, как следствие, малым усилием в точке подвеса штанг, создаваемым весом столба жидкости, когда разница максимальной и минимальной нагрузок за цикл невелика. При переходе в генераторный режим энергия, поступающая от двигателя через инвертор, не может быть рекуперирована в сеть через неуправляемый выпрямитель преобразователя частоты (ПЧ), при этом напряжение звена постоянного тока увеличивается, что приводит к последующему отключению ПЧ встроенной защитой от перенапряжения [1].

Для повышения устойчивости и исключения нежелательных аварийных отключений ЧРП ШНУ при генераторном режиме можно использовать ПЧ с возможностью рекуперации энергии, установить тормозной резистор или использовать специальную программную настройку. Применение рекуперативного ПЧ связано с существенным увеличением капитальных вложений по причине использования активного выпрямителя. Установка тормозного резистора связана с непроизводительным расходом рекуперируемой энергии, она рассеивается в виде тепла. Программная настройка частоты – функция предотвращения рекуперации (ФПР) сопровождается увеличением скорости двигателя, что может вызывать нежелательные динамические усилия в частях ШНУ. Каждый способ имеет свои достоинства и недостатки, таким образом, существует неоднозначность решения проблемы негативного влияния генераторного режима на работу ПЧ.

Также особенностью ЧРП является повышенная чувствительность к нарушениям электроснабжения, в частности, к провалам питающего напряжения [2]. При значительном снижении напряжения в звене постоянного тока произойдет отключение ПЧ от сети по причине срабатывания защиты минимального напряжения, что необходимо для предотвращения броска тока при заряде конденсатора после восстановления напряжения [3]. Повышение надежности работы ШНУ при провалах напряжения возможно обеспечить при помощи системы бесперебойного питания (СБП), подключаемой к звену постоянного тока.

В соответствии с обозначенными проблемами и их возможными решениями выполнено моделирование и рассмотрены способы устранения перенапряжения в звене постоянного тока, возникающего во время работы ЧРП ШНУ, применение СБП для поддержания работы при провалах питающего напряжения с целью определения влияния данных решений на устойчивость системы.

Методы

Для исследования способов устранения влияния генераторного режима и провалов питающего напряжения на работу ПЧ выполнено моделирование электротехнического комплекса штанговой насосной установки в среде Matlab, Simulink (библиотека Sim Power Systems). Разработана модель, основными элементами которой являются: участок электрической сети, преобразователь частоты, асинхронный короткозамкнутый электродвигатель, четырехзвенный механизм станка-качалки, скважина, а также двунаправленный преобразователь постоянного тока (*DC/DC*

eISSN 2500-0632

https://mst.misis.ru/



Ершов М. С., Ефимов Е. С. Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки

преобразователь) и свинцово-кислотная аккумуляторная батарея (АКБ).

Электротехническая система включает источник мощностью короткого замыкания $S_{\rm K3}$ = 100 MBA; воздушную линию (ВЛ – 6 кВ) длиной 6 км, сечением алюминиевого провода 16 мм²; трансформатор 6/0,4 кВ мощностью 40 кВА; кабельную линию от трансформатора до преобразователя частоты длиной 20 м с алюминиевыми жилами сечением 10 мм²; преобразователь частоты на базе нерегулируемого выпрямителя и трехфазного инвертора, управляемого по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ); асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с двумя парами полюсов, параметры которого включают: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 30$ кВт; номинальная скорость $n_{\text{ном}} = 1485$ об/мин; номинальный КПД $\eta = 0,91$; $\cos \varphi = 0,86$; номинальный ток $I_{\text{ном}} = 60$ А; кратность пускового тока $i_{\rm n}$ = 7,7; кратность пускового момента $m_{\rm m}$ = 2,7; кратность максимального момента $m_{\rm makc}$ = 3,2 и момент инерции J = 0,1326 кг·м² Управление преобразователем частоты в данной модели выполняется по скалярному закону с поддержанием заданной скорости электродвигателя.

Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя, представленная системой уравнений (1), которая построена для связанной с ротором (dq-оси) двухфазной ортогональной системы координат. Механическая часть привода представлена уравнением (2). Расчет параметров схемы замещения, используемой в модели, выполнен по формулам, представленным в [4].

Моделирование штанговой насосной установки выполнено для станка-качалки аксиального типа, кинематическая схема которого представлена на рис. 1 [5, 6]. На рис. 1 используются следующие обозначения: *R* – кривошип; *P* – шатун; *C* – заднее плечо балансира; *A* – переднее плечо балансира, также представлены вспомогательные длины и углы, которые были использованы для моделирования.



Рис. 1. Аксиальная кинематическая схема станка-качалки

$$U_{ds} = R_{s}i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega\psi_{qs};$$

$$U_{qs} = R_{s}i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} - \omega\psi_{ds};$$

$$U'_{dr} = R'_{r}i'_{dr} + \frac{d\psi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_{r})\psi'_{qr};$$

$$U'_{qr} = R'_{r}i'_{qr} + \frac{d\psi'_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_{r})\psi'_{dr};$$

$$T_{e} = 1,5p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds});$$

$$J\frac{d\omega_{m}}{dt} = T_{e} - F\omega_{m} - T_{m}.$$
(2)

Переменные в уравнениях (1) и (2) имеют следующие обозначения: U_{ds} , i_{ds} – проекции напряжения и тока статора на ось d; U_{qs} , i_{qs} – проекции напряжения и тока статора на ось d; U'_{dr} , i'_{dr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d; U'_{qr} , i'_{qr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d; U'_{qr} , i'_{qr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d; ψ'_{qs} , ψ_{qs} – проекции потокосцепления статора на оси d, q; ψ'_{dr} , ψ'_{qr} – проекции потокосцепления статора на оси d, q; ψ'_{dr} , ψ'_{qr} – проекции потокосцепления статора на оси d, q; R'_{s} , R'_{r} – активные сопротивления статорной и роторной обмоток; T_{e} , T_{m} – электромагнитный момент двигателя и момент сопротивления механизма, приведенный к валу двигателя; ω , ω_m и ω_r – угловая скорость системы координат, механическая угловая скорость вала двигателя; J, F – момент инерции и коэффициент вязкого трения ротора и нагрузки.

Работа ШНУ осуществляется циклически, пример динамограммы нормальной работы представлен на рис. 2, *a*, на ней обозначены следующие периоды [7]:

A–B – начало движения колонны штанг вверх, происходит передача нагрузки (веса колонны жидкости) от колонны труб колонне штанг, длина труб уменьшается, а штанг увеличивается, клапаны насоса закрыты;

B–*C* – движение колонны штанг вверх после завершения процесса передачи нагрузки, приемный клапан открыт, жидкость поступает в цилиндр насоса;

C–*D* – приемный клапан закрывается в крайнем верхнем положении колонны штанг, начало движения колонны штанг вниз, происходит передача нагрузки от колонны штанг колонне труб, длина труб увеличивается, а штанг уменьшается, клапаны насоса закрыты;

D–*A* – движение колонны штанг вниз после завершения процесса передачи нагрузки, нагнетательный клапан открыт. Крайнее нижнее положение – завершение цикла.

На рис. 2, б представлена диаграмма зависимости периодов качания от угла поворота вала кривошипа с разделением цикла на 4 квадранта, такое представление более удобно при настройке регулирования установки.

Как известно, работа даже хорошо уравновешенного станка-качалки может сопровождаться переходом двигателя в кратковременный генераторный режим на I и III периодах цикла качания, показанных на рис. 2. Длительность данного режима может увеличиваться при изменении параметров ШНУ в процессе работы при износе оборудования [1].

eISSN 2500-0632



2024;9(3):292-303

Ershov M. S., Efimov E. S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive...



Рис. 2. Периоды цикла качания: *a* – на устьевой и скважинной динамограммах; *б* – на диаграмме положения полированного штока относительно угла поворота кривошипа

В модели штанговой насосной установки, которая включает в себя редуктор, четырехзвенный механизм станка-качалки и скважинную часть, учтены цикличность нагрузки, давление на приеме, плотность и динамический уровень жидкости в скважине, вес колонны штанг в жидкости, вес столба жидкости, степень уравновешенности станка-качалки, а также потеря хода точки подвеса штанг, которая связана с упругими удлинениями при передаче нагрузки от колонны труб штанге [8, 9].

Используемые в математической модели уравнения и зависимости позволяют отслеживать положение, скорость и ускорение точки подвеса колонны штанг на основе информации о геометрических размерах механизма станка-качалки, а также позволяют определить коэффициент для вычисления момента сопротивления на валу кривошипа на основе информации о нагрузке в точке подвеса [10, 11].

Таким образом, созданная модель позволяет оценить режимы работы ШНУ с различной нагрузкой и степенью уравновешенности станка-качалки, определить потребляемую из сети энергию и энергию, рассеиваемую на тормозном резисторе в цепи постоянного тока ПЧ при работе асинхронного электродвигателя в генераторном режиме, возникающем при движении колонны штанг вниз под собственным весом.

Модель дополнена СБП, существует большое количество схем ее реализации. В моделировании рассмотрена система, которая представляет собой *DC/DC* преобразователь, подключенный к звену постоянного тока преобразователя частоты ШНУ. *DC/DC* преобразователь аналогичен инвертору преобразователя частоты, отличие заключается в системе управления, законе формирования сигналов управления работой IGBT [12]. К выходу *DC/DC* подключены дроссели и аккумуляторные батареи (АКБ), количество и схема соединения которых зависит от длительности резервирования. Система управления должна формировать сигналы открытия силовых ключей таким образом, чтобы поддерживать требуемый уровень напряжения в звене постоянного тока, а также регулировать ток и напряжения заряда и разряда аккумуляторных батарей. Она состоит из внутреннего контура с обратной связью по току *DC/DC* на стороне АКБ и внешнего контура с обратными связями по напряжению в звене постоянного тока ПЧ при разряде и по напряжению АКБ при заряде [13].

Существуют несколько видов моделей АКБ, они могут выполняться на основе только данных экспериментов, на основе математического описания химических процессов и на основе электрических эквивалентных схем замещения. При моделировании использовался третий вид, такая модель представлена в стандартной библиотеке Simulink. Параметры, требуемые для данной модели, возможно определить на основе технических данных и разрядных характеристик, предоставляемых производителем [14], но наиболее точной настройки можно добиться, проведя реальные испытания интересующей АКБ.

В системе управления задан диапазон напряжений на стороне АКБ: 310–435 В, а также диапазон напряжений на стороне звена постоянного тока ПЧ: 495–550 В. Максимальная погрешность модели АКБ стандартной библиотеки Simulink составляет 5% для диапазона уровня заряда от 10 до 100% и токов от 0 до удвоенного значения емкости при заряде, и токов от 0 до пятикратного значения емкости при разряде. Допущения рассматриваемой модели АКБ:

 – внутреннее сопротивление не изменяется с амплитудой тока и постоянно в течение циклов заряда и разряда;

– разрядные и зарядные характеристики одинаковы;

 – емкость батареи не изменяется с амплитудой тока, эффект Пейкерта [15] отсутствует; 2024;9(3):292-303

– саморазряд АКБ не реализован в данной модели, но его можно реализовать, добавив параллельно клеммам аккумулятора большое сопротивление;

– АКБ не обладает эффектом памяти.

n

Параметры системы АКБ из 32 штук подобраны из расчета поддержания работы нагрузки мощностью 30 кВт в течение 5 мин с поддержанием на каждой батарее напряжения 10,8 В. Для этого требуется, чтобы при разряде постоянной мощностью на каждый АКБ в системе приходилось, Вт/эл:

$$P_{\rm PAT} = \frac{P_{\rm Harp}}{\eta_{DC/DC} \eta_{\rm MHB} n} = 1017, 3.$$
(3)

В каталожных данных разных производителей указано, что для рассматриваемого случая система из 32 АКБ номинальной емкостью 33 Ач каждый способна обеспечить разряд постоянной мощностью 1020 Вт/эл, в модели заданы параметры, аналогичные такой системе из 32 АКБ.

Результаты моделирования ШНУ

Выполнено моделирование работы штанговой насосной установки с периодом генераторного режима. На рис. 3 представлены графики для станка-качалки со значительным небалансом ≈ 50%, степень небаланса определена при помощи коэффициента неуравновешенности по току [16, 17]. При помощи нижнего графика на рис. 3 можно определить начало генераторного режима – 8,2 с, когда момент нагрузки на валу принимает отрицательное значение. На верхнем графике кривая под номером *1* – мощность, рассеиваемая на тормозном резисторе, кривая под номером 2 – напряжение звена постоянного тока, для которого задано ограничение в 757 В, при достижении данного значения выполняется включение цепи с тормозным резистором и рассеивание избытка энергии.

Для разного уровня небаланса на рис. 4 и 5 на верхних графиках приведены кривые напряжения в звене постоянного тока: под номером 1 – при постоянной скорости (без ФПР), под номером 2 – при активной ФПР. Для более наглядного обозначения периода действия ФПР в нижней части данных рисунков приведены графики скорости, которые обозначены номером 3. Также номером 1 обозначены графики мощности, рассеиваемой на тормозном резисторе без ФПР, а номером 2 – при активной ФПР.

Результаты моделирования провалов напряжения и работы *DC / DC* преобразователя

Возмущения в электрической сети связаны с короткими замыканиями: близкими, начиная от воздушной линии электропередачи, и удаленными – в сетях 35 кВ и выше. Моделирование близких КЗ осуществлялось в узле, к которому подключена воздушная линия электропередачи напряжением 6 кВ. Установлено, что при однофазных КЗ в сети 6 кВ работа привода может быть продолжена. Трех- и двухфазные КЗ в сети 6 кВ приводят к отключениям, ЧРП ШНУ теряет питание. В случае неотключения двухфазного КЗ в звене постоянного тока возникают большие колебания напряжения, как это показано на рис. 6, *a*, и большие колебания тока на входе ПЧ, как это показано на рис. 6, *б*,



Рис. 3. Кривые напряжения звена постоянного тока и мощности, рассеиваемой на тормозном сопротивлении (верхний график), кривая крутящего момента на валу кривошипа с учетом действия противовесов (нижний график) при небалансе ≈ 50%

eISSN 2500-0632

https://mst.misis.ru/

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

2024;9(3):292-303

Ershov M. S., Efimov E. S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive..







Рис. 4. Кривые напряжения звена постоянного тока (верхний график), кривые скорости и рассеиваемой на тормозном сопротивлении мощности (нижний график) при отключенной и при активной ФПР и небалансе ≈ 50 %



Рис. 5. Кривые напряжения звена постоянного тока (верхний график), кривые скорости и рассеиваемой на тормозном сопротивлении мощности (нижний график) при отключенной и при активной ФПР и небалансе ≈ 5 %

2024;9(3):292-303

Ершов М. С., Ефимов Е. С. Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки

что с большой вероятностью приведет к выходу оборудования из строя. Отметим, что при соединении обмоток трансформатора 6/0,4 кВ по схеме Δ/Y_0-11 значение среднего напряжения в звене постоянного тока ПЧ выше, чем при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_0-12 . В случае неотключения питания РЗиА сети при аварийных режимах должна срабатывать индивидуальная защита привода. Рекомендуется использовать и автоматический выключатель, и быстродействующий плавкий предохранитель, соответствующие номинальным параметрам привода, для обеспечения полноценной защиты.

Удаленные КЗ проявляются в узлах нагрузки 6 кВ и на вводах ПЧ в виде провалов напряжения. Для сохранения в работе ЧРП с центробежными рабочими механизмами эффективным средством повышения устойчивости является опция «кинетический резерв» [18], по сути являющаяся функцией, обратной предотвращению рекуперации, о которой было сказано выше. Опция «кинетический резерв» за счет снижения задающей частоты на выходе ПЧ вызывает ускоренное снижение скорости двигателя, при этом избыточная энергия двигателя затрачивается на поддержание напряжения в звене постоянного тока. В приводе ШНУ применение опции «кинетический резерв» будет неэффективно в связи с тем, что момент сопротивления механизма зависит не пропорционально от квадрата скорости, как в центробежных механизмах, а по более сложному закону, зависимому от положения точки подвеса, и реализация данной опции возможна лишь на малом периоде цикла. В связи с этим исследована возможность подключения к звену постоянного тока ПЧ системы бесперебойного питания (СБП) на базе *DC/DC* преобразователя и АКБ.

Обычно ПЧ имеет встроенную защиту от провалов напряжения в звене постоянного тока – защита минимального напряжения (ЗМН), которая по умолчанию находится в пределах от 64–76 до 85–90% от значения номинального напряжения [3]. Уровень напряжения обусловлен допустимым значением тока диодов выпрямителя при восстановлении питания и броске зарядного тока конденсатора звена постоянного тока, для предотвращения которого выполняется подключение звена заряда конденсатора. Также уровень напряжения связан с минимально допустимым напряжением, которое необходимо для поддержания нормального рабочего режима установки.



Рис. 6. Двухфазное КЗ на участке питающей сети 6 кВ: *а* – напряжение в звене постоянного тока ПЧ; *б* – ток на входе ПЧ

eISSN 2500-0632 https://mst.misis.ru/



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ 2024;9(3):292-303

Ershov M. S., Efimov E. S. Stability of a controlled sucker-rod pump unit drive

Выполнено моделирование работы со снижением напряжения звена постоянного тока до 0,7 от номинального. На рис. 7, а представлены напряжения для двух режимов, а на рис. 7, *б* – соответствующие скорости двигателя.

На рис. 8 представлены результаты моделирования длительного провала напряжения в звене постоянного тока ($U_{\Pi^{q}}$ = 0,7 $U_{\Pi^{q}_{HOM}}$), но с подключенной к звену постоянного тока СБП – кривая под номером 2. Созданная модель с СБП способна поддерживать напряжение в звене постоянного тока при провалах напряжения без возникновения негативных колебаний на валу двигателя.

На рис. 9 представлены напряжение в звене постоянного тока и напряжение АКБ для опыта, при котором использовались следующие периоды провалов напряжения до значения $U_{\Pi Y} = 0,3U_{\Pi Y + 0M}$: 2–3 с; 4,1-5,1 c; 6,8-7,1 c.

Обсуждение результатов

На основании выполненных опытов можно заключить: функция подавления рекуперации позволяет полностью устранить генераторный режим только при необходимости рассеивания малой величины мощности, что показано на рис. 5; настройка уровня разгона при использовании функции подавления перенапряжения и ограничения скорости и момента должны проводиться с учетом реальных характеристик скважины и оборудования, потому что в некоторых случаях увеличение скорости может привести к недопустимым механическим нагрузкам в частях установки. ФПР приводит к уменьшению длительности цикла качания, что должно учитываться при планировании режима работы установки.

Электромагнитный момент оказывает на ротор тормозящее действие в генераторном режиме, но при активной ФПР электромагнитный момент остается



Рис. 7. Характеристика режимов: 1 – при номинальном напряжении и 2 – при снижении напряжения до 0,7 от номинального значения, представлены кривые: *а* – напряжения звена постоянного тока; *б* – скорости двигателя



https://mst.misis.ru/

2024;9(3):292-303

Ершов М. С., Ефимов Е. С. Устойчивость регулируемого привода штанговой насосной установки.

вращающим. При действии ФПР электромагнитный момент и момент сопротивления, который изменил знак и стал отрицательным при движении колонны штанг вниз, увеличивают скорость двигателя, и замедление колонны штанг в конце периода хода вниз происходит более интенсивно, быстро [1]. По результатам моделирования подтверждено, что чем больше длительность генераторного режима, тем большая мгновенная скорость ротора должна быть развита. Отсутствие ограничения по скорости при активной ФПР может привести к разгону до скорости, превышающей номинальную на 50–70%, если это допустимо для двигателя. Большая динамика скорости в конце IV и в I периоде цикла качания приводит к дополнительным инерционным усилиям в элементах станка-качалки и динамическим ударам в конструкции станка-качалки, что увеличивает износ и приводит к выходу установки из строя. Таким образом, ФПР без дополнительного использования тормозных резисторов может быть успешно применена, если она не приведет к критическому увеличению нагрузки, то есть для ШНУ с малым по длительности периодом генераторного режима, для устранения которого не требуется значительное увеличение скорости вращения вала двигателя, или при работе двигателя на скорости значительно меньше номинальной, поддерживаемой ПЧ.



Рис. 8. Напряжение звена постоянного тока в нормальном режиме – кривая *1*, и в режиме со снижением входного напряжения до 0,7 от номинального значения при подключенной СБП – кривая *2*



Рис. 9. Напряжение звена постоянного тока и АКБ в режиме с кратковременными провалами входного напряжения в трех фазах до 0,3 от номинального значения при подключенной СБП (Ы)



Следует отметить, что в случае отсутствия возможности передачи избыточной энергии в сеть рекомендуется применять тормозной резистор даже с активной функцией подавления рекуперации, если нет полной уверенности в том, что режим работы не изменится со временем и период генераторного режима не увеличится. Также следует учитывать, что превышение напряжения звена постоянного тока может быть вызвано не только переходом в генераторный режим, поэтому рекомендуется предпринять меры для снижения вероятности возникновения иных причин, таких как: высокое выходное напряжение, скачки напряжения на выходе ПЧ, неправильное подключение заземления, неисправность двигателя и др.

При снижении напряжения увеличиваются колебания момента, на рис. 7, *б* можно наблюдать увеличение колебаний и появление провалов скорости. В рассматриваемой модели не использовались ЗМН звена постоянного тока и защита от перегрузки ПЧ, которые могут сработать в данных условиях. Последующее снижение напряжения приводит к еще большему снижению стабильности работы установки и последующему останову двигателя, поэтому для поддержания работы при наличии значительных провалов напряжения или кратковременных прерываний можно рекомендовать СБП.

Результаты моделирования СБП, представленные на рис. 8 и 9, показали ее действенность как при длительных провалах напряжения в питающей сети, так и при кратковременных. Полученные результаты приближены к идеальным, проведение измерений на реальном объекте или выполнение физического моделирования СБП с нагрузкой такого характера позволят внести корректировки в данную модель при их необходимости.

Стоит заметить, что рассмотренные свинцово-кислотные АКБ имеют ряд ограничений и требований к глубине разряда, напряжению и току заряда при разных уровнях заряда батареи, параметрам при работе в буферном режиме, температурному диапазону и необходимости температурной компенсации зарядного напряжения. Требования указываются в инструкции на АКБ и должны учитываться системой управления зарядом и разрядом – системой управления *DC/DC* преобразователя для обеспечения максимально возможного срока службы. Альтернативным вариантом являются суперконденсаторы, которые в общем случае имеют больший срок службы, могут работать в более широком диапазоне температур и имеют меньше ограничений по допустимым уровням напряжения, тока и заряда. Подробные характеристики обычно указываются в паспортах и каталожных данных на то или иное оборудование.

Направление дальнейших исследований может быть связано с повышением точности данной модели и проверкой возможности применения динамического компенсатора искажения напряжения (ДКИН) с ЧРП ШНУ для компенсации отклонений и провалов напряжения.

Заключение

Для анализа устойчивости частотно-регулируемого привода штанговой насосной установки разработана модель, которая учитывает циклический неравномерный характер нагрузки, уравновешенность станка-качалки, процессы, связанные с возникновением генераторного режима, влияние провалов напряжения в сети. Рассмотрен такой способ устранения перенапряжения в звене постоянного тока, как функция подавления перенапряжения. Определено, что данная функция имеет ряд ограничений, которые в первую очередь связаны с длительностью генераторного режима (величиной небаланса) и периодом его появления в цикле качания. При значительном небалансе ФПР будет малоэффективна и потребуется использовать тормозной резистор, если же генераторный режим возникает в конце движения колонны штанг вверх или вниз, то увеличение скорости вращения приведет к нежелательным механическим усилиям, дополнительному износу или даже выходу оборудования из строя.

Другая задача работы заключалась в моделировании провалов напряжения в питающей сети и рассмотрении их влияния на устойчивость работы ШНУ. При малых провалах напряжения ЧРП способен оставаться в работе, в некоторых моделях ПЧ применяются специальные алгоритмы управления для поддержания стабильности работы. Как известно, при более значительных провалах напряжения сработает ЗМН. Одним из способов поддержания работы даже при исчезновении напряжения на короткий срок является СБП. Действие такой системы рассмотрено в ходе моделирования, результаты которого показали действенность данного способа повышения устойчивости работы. Модель, полученная в результате данной работы, может быть использована для выполнения общей оценки работоспособности подобной проектируемой системы и проверки правильности подбора конденсатора звена постоянного тока и дросселей на входе *DC/DC* преобразователя.

Список литературы / References

 Ярыш Р.Ф., Гарифуллина А.Р., Гарифуллин Р.И., Якунин А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20(11–12):56–64. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64
 Yarish R.F., Garifullina A.R., Garifullin R.I., Yakunin A.N. Investigation of operating modes of frequency-regulated electric drive of pumpjack. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2018;20(11–12):56–64. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64 2024;9(3):292-303

- Егоров А.В., Ершов М.С. Экспериментальное исследование устойчивости асинхронных частотно-регулируемых приводов при кратковременных провалах напряжения. Промышленная энергетика. 2018;(4):9–12.
 Egorov A.V., Ershov M.S. Experimental study of the stability of asynchronous variable-speed drives (VSD)

during short-term voltage failures. *Industrial Power Engineering*. 2018;(4):9–12. (In Russ.)

- Xu Y., Lu W., Wang K. et al. Sensitivity of low-voltage variable-frequency devices to voltage sags. *IEEE Access*. 2019;7:2068–2079. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2885402
- Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink. *Academy*. 2015;2(2):7–11.
 Pantel O.V. Method of calculating the parameters of an asynchronous motor to model its operating modes in the Matlab / Simulink environment. *Academy*. 2015;2(2):7–11. (In Russ.)
- Haisen Z., Yilong W., Yang Z. et al. Practical model for energy consumption analysis of beam pumping motor systems and its energy saving applications. In: 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 1–5 October 2017, Cincinnati, OH, USA. Pp. 1–9. http://dx.doi.org/10.1109/ IAS.2017.8101721
- 6. Zheng B., Gao X., Li X. Fault detection for sucker rod pump based on motor power. *Control Engineering Practice*. 2019;86:37–47. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001
- Fakher S., Khlaifat A., Hossain M.E., Nameer H. A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021;11:3815–3839. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01270-7
- Ершов М.С., Ефимов Е.С. Моделирование энергоэффективности электропривода штанговой насосной установки. В: Мартынов В.Г. (отв. ред.) Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: VI региональная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию М.М. Ивановой. 19–21 сентября 2022, Москва. Тезисы докладов. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина; 2022. С. 766–767.

Ershov M.S., Efimov E.S. Modeling of the energy efficiency of an electric drive for a rod pumping unit. In: Martynov V.G. (ed.) *Gubkin University in Addressing Issues of the Russian Oil and Gas Industry: VI Regional Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th Anniversary of M.M. Ivanov.* September 19–21, 2022, Moscow. Abstracts of Reports, Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU); 2022. Pp. 766–767. (In Russ.)

- Langbauer C., Langbauer T., Fruhwirth R., Mastobaev B. Sucker rod pump frequency-elastic drive mode development – from the numerical model to the field test. *Liquid and Gaseous Energy Resources*. 2021;1(1):64–85. https://doi.org/10.21595/lger.2021.22074
- 10. Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравновешивания. Записки Горного института. 2020;246:640–649. https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6 Urazakov K.R., Molchanova V.A., Tugunov P.M. Method for calculating dynamic loads and energy consumption of a sucker rod installation with an automatic balancing system. Journal of Mining Institute. 2020;246:640–649. (In Russ.) https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6
- Solodkiy E. M., Kazantsev V.P., Dadenkov D.A. Improving the energy efficiency of the sucker-rod pump via its optimal counterbalancing. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 8–14 September 2019, Sochi, Russia. Pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867737
- Higure H., Hoshi N., Haruna J. Inductor current control of three-phase interleaved DC-DC converter using single DC-link current sensor. In: 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). 16–19 December 2012, Bengaluru, India. Pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ PEDES.2012.6484495
- Nandankar P., Rothe J.P. Design and implementation of efficient three-phase interleaved DC-DC converter. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 3–5 March 2016, Chennai, India. Pp. 1632–1637. https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7754962
- 14. Tremblay O., Dessaint L.-A. Experimental validation of a battery dynamic model. *World Electric Vehicle Journal*. 2009;3(2):289–298. https://doi.org/10.3390/wevj3020289
- 15. Cugnet M., Dubarry M., Liaw B.Y. Peukert's law of a lead-acid battery simulated by a mathematical model. *ECS Transactions*. 2010;25(35):223–233. https://doi.org/10.1149/1.3414021
- 16. Зюзев А.М., Бубнов М.В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019;330(4):178–187. https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/226 Zyuzev A.M., Bubnov M.V. Diagnostics of the balance of the rod deep-well pumping unit by wattmetrogram. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2019;330(4):178–187. (In Russ.) https://doi.org/10.18799/24131830/2019/4/226

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA) ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

2024;9(3):292-303

https://mst.misis.ru/

- Галеев А.С., Нургалиев Р.З., Бикбулатова Г.И. и др. Критерий уравновешенности тихоходного привода скважинной штанговой насосной установки для повышения надежности редуктора. *Нефтегазовое дело.* 2019;17(6):96–101. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-6-96-101
 Galeev A.S., Nurgaliev R.Z., Bikbulatova G.I., Sabanov S.L., Boltneva Yu.A. Criterion of equilibrium of the slow-speed drive of the downhole rod pumping unit to improve the reliability of the gearbox. *Petroleum Engineering.* 2019;17(6):96–101. (In Russ.) https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-6-96-101
- Белоусенко И.В., Ершов М.С., Чернев М.Ю. Повышение устойчивости электротехнических систем непрерывных производств нефтегазового комплекса. Промышленная энергетика. 2019;(2):8–15.
 Belousenko I.V., Ershov M.S., Chernov M.Yu. Improving the stability of electrical systems in continuous oil and gas production complexes. *Industrial Power Engineering*. 2019;(2):8–15. (In Russ.)

Информация об авторах

Михаил Сергеевич Ершов – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-7772-0095, Scopus ID 56261333000; e-mail msershov@yandex.ru

Евгений Сергевич Ефимов – аспирант кафедры теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID 0009-0007-9189-8029; e-mail efimow. evgeniy@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail S. Ershov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID 0000-0002-7772-0095, Scopus ID 56261333000; e-mail msershov@ yandex.ru

Evgeniy S. Efimov – PhD-Student, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation; ORCID 0009-0007-9189-8029; e-mail efimow.evgeniy@yandex.ru

Поступила в редакцию	30.01.2024	Received	30.01.2024
Поступила после рецензирования	14.03.2024	Revised	14.03.2024
Принята к публикации	22.05.2024	Accepted	22.05.2024