

Электросиловые установки для нагрева и депарафинизации нефтескважин

ИВАНОВ А.Г., АРЗАМАСОВ В.Л.

Отмечаются преимущества метода прямого электронагрева по сравнению с другими методами очистки нефтескважин от парафиновых отложений. Рассмотрено применение непосредственных преобразователей частоты и преобразователей частоты на базе автономных инверторов напряжения в установках электронагрева и депарафинизации. Предложено схемотехническое решение для автономных инверторов напряжения, исключающее использование конденсаторов в преобразователе частоты.

Ключевые слова: нефтескважина, электронагрев, депарафинизация, автономный инвертор частоты, схемотехника

Отложение парафина в насосно-компрессорной трубе (НКТ) нефтескважин приводит к уменьшению полезного сечения НКТ и, как следствие, к значительному снижению производительности добычи нефти и увеличению расхода электроэнергии при ее откачке. Предотвращение формирования асфальтеносмолопарафиновых отложений (АСПО) и очистка от них НКТ позволяют существенно снизить текущие и капитальные затраты нефтедобычи [1]. В статье приводятся технические решения указанной проблемы с использованием автоматизированных установок на базе силовой электроники.

Методы очистки нефтескважины от парафина. Сложности борьбы с АСПО связаны со слабой изученностью механизма формирования этих отложений. Согласно теории кристаллизации отложения парафина, асфальтенов и смол происходит на активных центрах кристаллизации – как внутри объема жидкости, так и на стенках НКТ. Нефть в процессе подъема по НКТ к устью скважины обволакивает металлическую поверхность НКТ и штанг и всплывает вверх. В результате при хорошем смачивании поверхности металлической НКТ на ней образуются парафиносодержащие фракции. Предотвращение парафинизации НКТ может быть достигнуто путем исключения смачиваемости поверхности НКТ и штанг либо путем создания искусственных активных центров кристаллизации внутри объема жидкости. На сегодня известно множество методов очистки НКТ от АСПО, основными из которых являются:

Advantages of the direct electric heating method over other methods for cleaning petroleum boreholes from paraffin deposits are pointed out. The use of direct frequency converters and frequency converters on the basis of self-excited voltage inverters in electric heating and deparaffinating installations is considered. A schematic solution for self-excited voltage inverters excluding the need of using capacitors in the frequency converter is proposed.

Key words: petroleum borehole, electric heating, deparaffination, self-excited frequency inverter, circuit engineering

промывка скважин ингибиторами, химическими реагентами, горячей водой или горячей нефтью (гидрохимический метод);

использование скребковых инструментов (механический метод);

применение футерованных НКТ (с нанесением на их внутреннюю поверхность гранулированного стекла или эпоксидной смолы);

применение бактерицидной защиты;

применение магнитных методов защиты;

применение специальных электронагревателей (косвенный электронагрев) с расплавлением парафиновых отложений в НКТ;

применение электронагрева нефтескважины с помощью специальных электроустановок с использованием в качестве нагревательного элемента НКТ и обсадной колонны скважины (прямой электронагрев).

Недостатком первого метода являются большое число промывок на участке нефтедобычи (до шести и более на одной скважине в год) и экологическое загрязнение окружающей среды. Недостаток второго метода – быстрый износ скребков, высокие трудозатраты по их восстановлению и низкая надежность системы очистки нефтескважин в целом. Третий метод связан с большими капитальными затратами по производству, оснащению и переноске скважин футерованными трубами. Четвертый метод показал на практике низкую эффективность.

Применение магнитных и электрических методов очистки НКТ от парафина наиболее перспективно. Казалось бы, наиболее экономичным спосо-

бом должен быть пятый способ – магнитной очистки, получивший наибольшее распространение в Канаде. Однако испытания установок «Магнифло» в России выявили их недостаточную эффективность, особенно когда в нефти кроме парафина имеется повышенное содержание окисленных высокооктановых компонентов. В результате, после некоторого времени работы, НКТ засоряются.

Применение шестого метода предполагает использование дорогостоящего специального кабеля – электронагревателя с внешним источником регулируемого тока. Наиболее перспективным методом очистки нефтескважин от парафина является прямой электронагрев, который, кроме своего основного назначения, обеспечивает также снижение вязкости нефти, что уменьшает расход электроэнергии при ее откачке.

Метод прямого электронагрева нефтескважин. Этот метод заключается в том, что в скважине НКТ обсадная колонна и погружной электрический контакт, опускаемый на глубину ниже начала зоны парафиноотложения, образуют электрическую цепь, через которую пропускают электрический ток [1, 2]. За счет выделения тепла в этой цепи НКТ разогревается, при этом парафин размягчается и откачивается вместе с нефтью. Температура подогретой нефти на выходе скважины обычно составляет 24–37 °С, что достаточно для очистки НКТ от АСПО. При этом в зависимости от температуры нагрева и глубины установки погружного контакта ток в электрической цепи составляет 300–500 А. Для осуществления данного способа необходимо обеспечить:

электрическую изоляцию НКТ от обсадной колонны с помощью специальных изоляторов;

электрическую изоляцию подземной части НКТ от ее наземной части и станка-качалки с помощью изоляционной муфты, а также изоляцию стальной штанги от электрической цепи.

Напряжение к указанной цепи подводится кабелем от регулируемого источника переменного тока через блок ввода и герметизации. Учитывая, что электрическая цепь «НКТ – погружной контакт – обсадная колонна» представляет собой активно-индуктивную нагрузку с распределенными параметрами активного сопротивления R и индуктивности L , модуль сопротивления цепи

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота.

Из (1) следует, что с уменьшением частоты ω снижается значение $|Z|$, что при требуемом значении тока обеспечивает снижение напряжения, под-

водимого к электрической цепи скважины, и установленной мощности как силового трансформатора, так и электросиловой установки в целом. При этом независимо от значения R активная мощность, затрачиваемая на депарафинизацию, есть величина постоянная для данной скважины. Очевидно, минимальная установленная мощность будет при нагреве постоянным током ($\omega=0$), но в этом случае в межтрубном пространстве скважины вероятно возникновение электролиза и коррозии с разрушением НКТ и разложением имеющейся там воды на кислород и водород с возможностью взрыва. Поэтому целесообразно применение установки электронагрева и депарафинизации скважин (УЭНДС) с частотой примерно на порядок меньше частоты питающей сети [1, 2]. В [2] показано, что при работе установки на низких частотах (1–4) Гц удельный расход электроэнергии на 25 % меньше, чем при промышленной частоте 50 Гц, при этом полная установленная мощность установки уменьшается в 1,65 раза, а напряжение, приложенное на входе электрической цепи скважины (в устье скважины, – почти в 3 раза, что позволяет повысить ее надежность, электробезопасность и экономичность. Оптимальным вариантом является использование полупроводникового преобразователя частоты в режиме источника тока с частотой до 5 Гц. При этом УЭНДС может быть передвижной или стационарной. Цикл очистки НКТ от парафина на каждой скважине составляет 3–5 сут в месяц в зависимости от режима работы установки электронагрева и депарафинизации.

Внедрение установок прямого электронагрева нефтескважин обеспечивает:

- увеличение дебита скважины;
- сохранение эксплуатационных качеств пласта нефти;
- экологическую безопасность при откачке нефти;
- очистку НКТ одновременно с подъемом нефти без остановки станка-качалки;
- низкие эксплуатационные затраты на очистку по сравнению с другими методами;
- снижение общих расходов по обслуживанию скважины.

Отметим, что система прямого электронагрева, применяемая, например, в установках «Паратрол» (США) при частоте 50 Гц и в наших установках УЭНДС с частотой до 5 Гц (внедрена в Татарстане), показала достаточную надёжность в работе [1, 2].

Электросиловые установки для электронагрева и депарафинизации нефтескважины. Источник тока пониженной частоты может быть выполнен на основе непосредственного преобразователя частоты

(НПЧ) или на основе преобразователя частоты (ПЧ) с использованием схемы «выпрямитель—автомный инвертор». На рис. 1 представлена функциональная схема установки для варианта с НПЧ, выполненного на основе серийного тиристорного преобразователя.

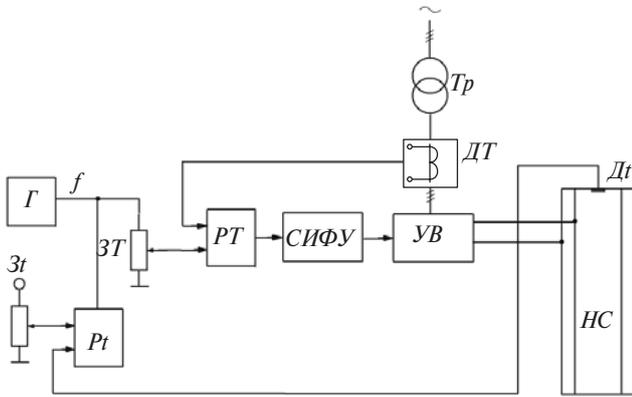


Рис. 1. Функциональная схема установки на базе НПЧ: T_r – трансформатор; $УВ$ – управляемый выпрямитель; $ЗТ$ – задатчик тока; $СИФУ$ – система импульсно-фазового управления

Электрическая цепь нефтескважины $НС$ представляет собой RL -нагрузку с распределенными параметрами, а система регулирования – двухконтурную структуру с регулятором тока $РТ$ и регулятором температуры нефти $Рт$. Задающим сигналом $РТ$ является выходное напряжение генератора $Г$ с частотой $f=1\div 5$ Гц, сигналом обратной связи – напряжение датчика тока $ДТ$. Использование $РТ$ позволяет ограничить значение тока при уменьшении сопротивления электрической цепи $НС$ из-за возможных в ней переключений (между НКТ и обсадной колонной). Внешний контур регулирования содержит регулятор температуры нефти $Рт$ на выходе $НС$, измеряемой датчиком $Дт$. Задание температуры нефти в устье $НС$ осуществляется задатчиком $Зт$. Данная система регулирования была внедрена ОАО «ВНИИР» в установках УЭНДС в ОАО «Татнефть» в 1994–1999 гг. и обеспечила качественную очистку нефтескважин от парафиновых отложений [1–3].

В настоящее время возможно создать более современную экономичную и надежную установку депарафинизации. На рис. 2 приведена функциональная схема такой установки на базе ПЧ с частотой f . В отличие от схемы с НПЧ, здесь отсутствует фазовое регулирование напряжения преобразователя, что обеспечивает более высокий коэффициент мощности. Двухконтурная система регулирования аналогична системе на рис. 1, за исключением построения ПЧ, состоящего из выпрямителя $В$, автономного инвертора напряжения АИН и системы управления $СУ$. Преобразователи пониженной

частоты на основе АИН достаточно давно применяются в электротермии. Один из примеров применения подобных ПЧ приведен в [4]. Их общим существенным недостатком является необходимость увеличения сглаживающего фильтра при снижении выходной частоты, что приводит к увеличению массогабаритных показателей и стоимости установки.

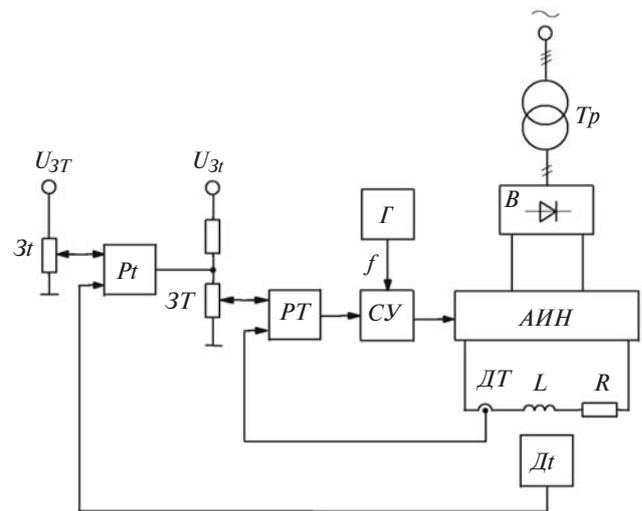


Рис. 2. Функциональная схема установки на базе ПЧ с АИН: T_r – трансформатор; $В$ – выпрямитель; АИН – автономный инвертор напряжения; L, R – параметры нагрузки (электрической цепи $НС$); $ДТ$ – датчик тока; $Дт$ – датчик температуры нефти на выходе $НС$; $СУ$ – система управления АИН; $Г$ – генератор частоты f ; $РТ, Рт$ – регуляторы тока и температуры; $ЗТ, Зт$ – задатчики тока и температуры

Применение традиционных АИН и автономных инверторов тока (АИТ) при низкой частоте f , большой нагрузке (до 500 А) с индуктивностью 8–10 мГн, что характерно для параметров нелинейной электрической цепи $НС$, технически нецелесообразно. Это обусловлено большими значениями емкости конденсаторов фильтра АИН, необходимых при регулировании тока для приема выпрямителем реактивной энергии, запасенной в индуктивности нагрузки, а также конденсаторов и сглаживающего реактора в АИТ. Емкость конденсаторов фильтра C_Φ в стандартном мостовом АИН определяется [5] как

$$C_\Phi = \frac{U_d T_H}{R \Delta U_C} \left(\frac{1 - e^{-T/2T_H}}{1 + e^{-T/2T_H}} - \ln \frac{2}{1 + e^{-T/2T_H}} \right) \quad (2)$$

где U_d – среднее значение выпрямленного напряжения; ΔU_C – допустимое повышение напряжения на конденсаторах фильтра; $T=1/f$ – период выходного напряжения; $T_H=L/R$ – постоянная времени цепи нагрузки.

Так, для нашего случая при $f=1$ Гц ($T=1$ с), $R=0,2$ Ом, $T_H=40$ мс, $\Delta U_C \approx 0,1 U_d$ из (2) получим:

$$C_{\phi} = \frac{U_d T_H}{R \Delta U_C} (1 - \ln 2) = 3,1 T_H / R, \quad (3)$$

т.е. $C_{\phi} = 620000$ мкФ. Такая емкость конденсаторов приводит к значительному увеличению габаритов и стоимости ПЧ и установки депарафинизации в целом.

Для устранения указанных недостатков нами предложены несколько новых силовых схем ПЧ и принцип управления, исключая использование конденсаторов в АИН низкой частоты [6]. Рассмотрим более подробно работу ПЧ на основе одного из предлагаемых вариантов.

На рис. 3 ПЧ содержит выпрямитель B и АИН, выполненный на однооперационных тиристорах $VS1, VS2$, транзисторах IGBT $VT1, VT2$ и антипараллельных диодах $VD1, VD2$. К выходу АИН подключена RL -нагрузка. Управление силовыми ключами осуществляется системой управления $СУ$, содержащей генератор тактовых импульсов ГТИ с выходными противофазными тактовыми импульсами $ТИ1, ТИ2$ с частотой f , управляющий орган $УО$ и два идентичных канала управления $КУ1, КУ2$, в каждом из которых имеются формирователь импульсов $\Phi И1$ с запускаящим входом и формирователь импульсов $\Phi И2$ с двумя входами – запускающим

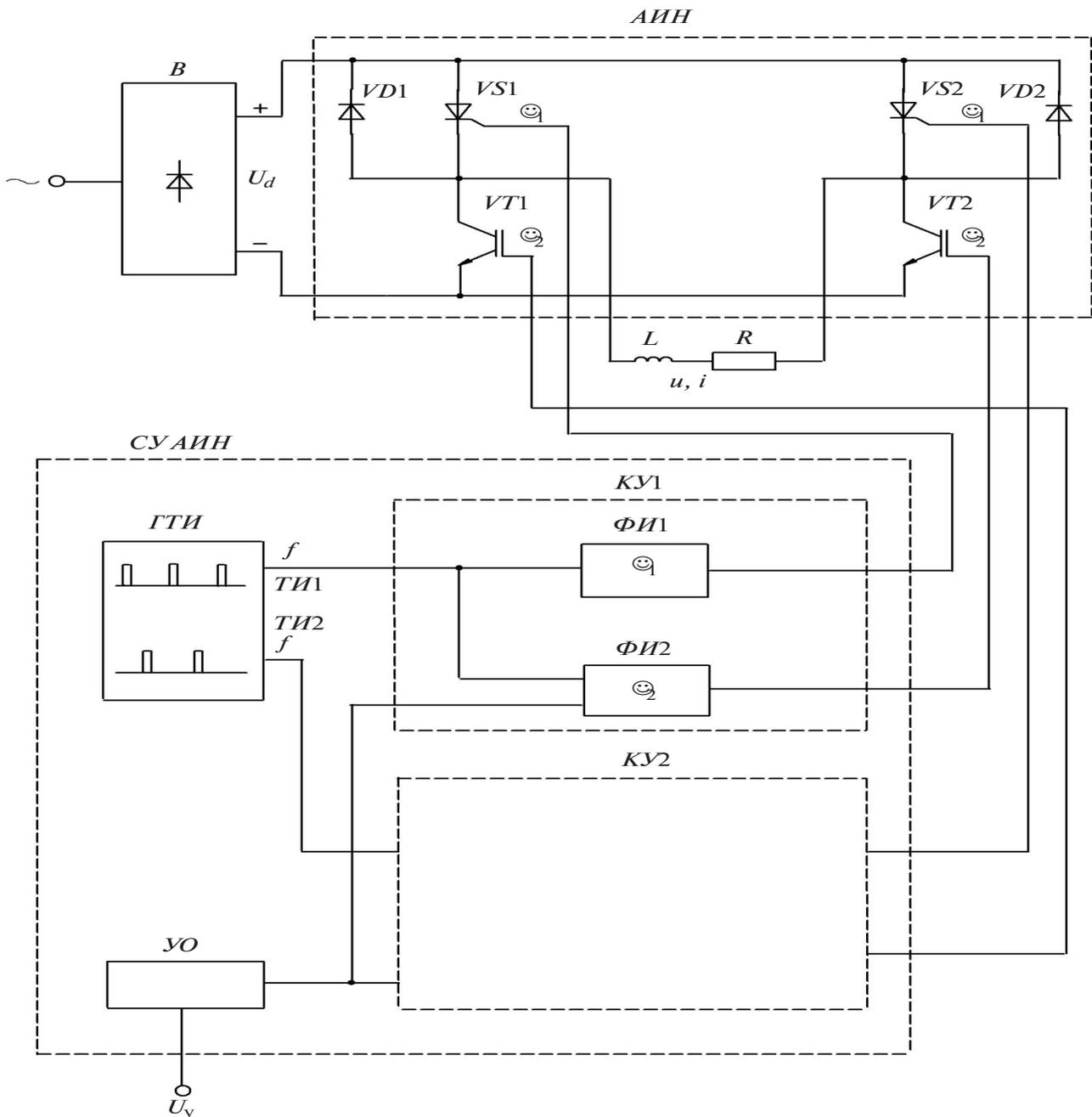


Рис. 3. Функциональная схема ПЧ

щим и управляющим. Формирователь импульсов $\Phi И1$ генерирует импульсы длительностью τ_1 , формирователь импульсов $\Phi И13$ – импульсы длительностью τ_2 . Запускающие входы $\Phi И1$, $\Phi И2$ в каждом КУ соединены между собой и подключены соответственно к первому и второму противофазным выходам ГТИ, выходы $\Phi И1$, $\Phi И2$ подсоединены к соответствующим входам силовых ключей, выход

УО подключён к управляющим входам $\Phi И2$ в каждом канале.

Диаграммы работы АИН представлены на рис. 4, где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока в нагрузке. Управление силовыми ключами осуществляется каналами управления КУ1, КУ2. Тиристоры $VS1$, $VS2$ управляются противофазными узкими импульсами длительностью τ_1 ,

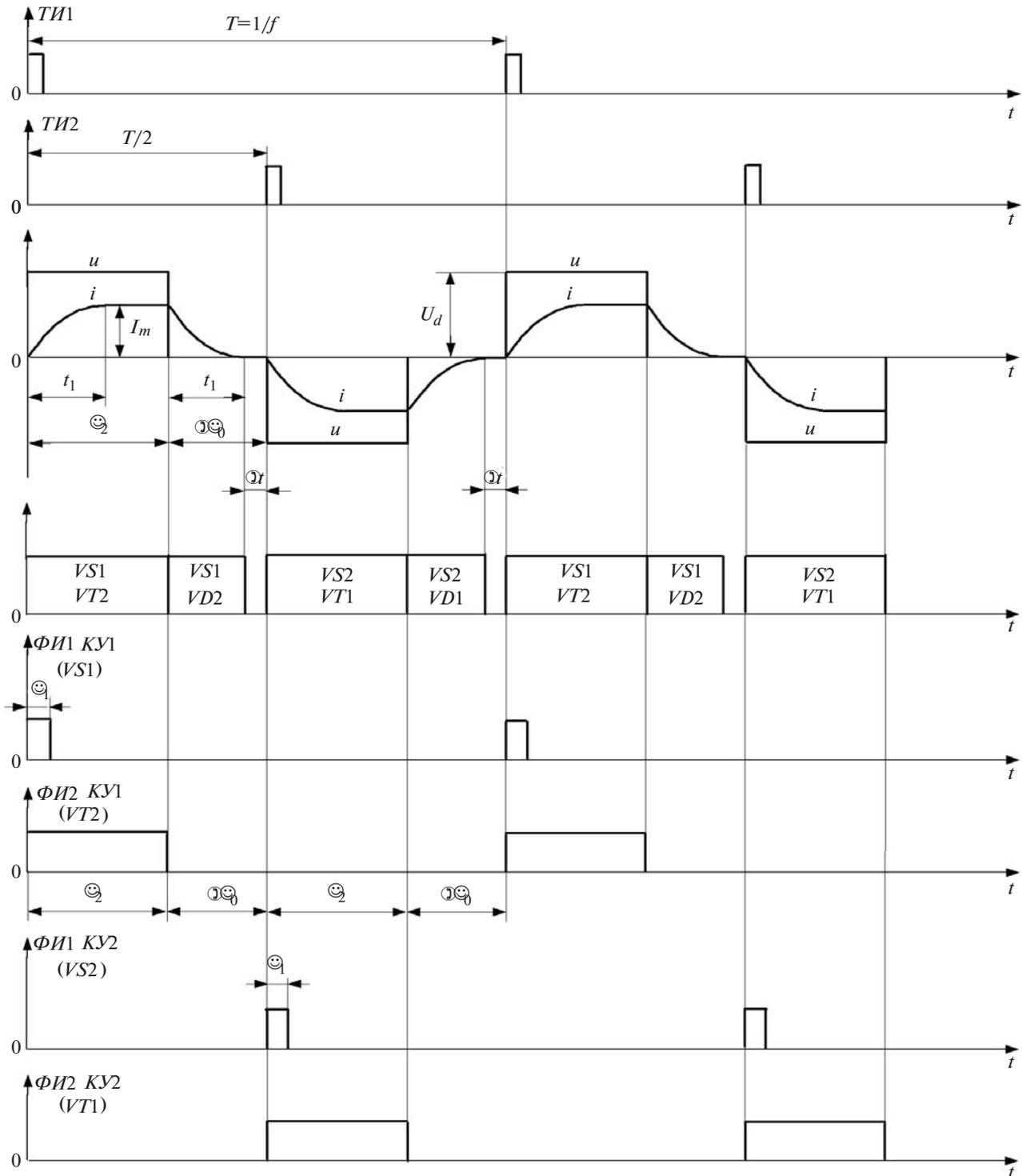


Рис. 4. Диаграммы работы АИН

достаточной для их включения, а транзисторы $VT1$, $VT2$ – противофазными широкими импульсами длительностью τ_2 . В результате по окончании импульсов с длительностью τ_2 транзисторы закрываются, и ток нагрузки замыкается и спадает до нуля соответственно через диод $VD2$ и тиристор $VS1$ в первый полупериод частоты f и через диод $VD1$ и тиристор $VS2$ во второй полупериод. В этом случае на диаграмме напряжения на RL -нагрузке имеется временной интервал Δt_0 , равный суммарному времени спада тока нагрузки до нуля t_1 и времени задержки Δt . Включение следующей пары ключей происходит после задержки Δt (несколько микросекунд), исключая одновременное включенное состояние ключей $VS1$, $VT1$ или $VS2$, $VT2$, что могло бы привести к КЗ на выходе выпрямителя B . Управление другими вариантами $АИН$ имеет свою специфику при сохранении общего принципа. В предложенных схемах $АИН$ при низкочастотном управлении исключены конденсаторные фильтры.

Значение выходного напряжения $АИН$ изменяется в функции управляющего сигнала U_y , определяющего длительность τ_2 .

Действующее значение напряжения на выходе $АИН$

$$U = U_d \sqrt{\frac{\tau_2^p}{\pi}} = U_d \sqrt{2} f \tau_2^c, \quad (4)$$

где τ_2^p – регулируемая длительность импульса $\PhiИ2$, измеряемая в радианах; τ_2^c – регулируемая длительность импульса $\PhiИ2$, измеряемая в секундах; f – частота, Гц.

Для предлагаемого способа регулирования ПЧ максимальное значение частоты f_{\max} определяется постоянной времени T_H цепи нагрузки. В этом случае из рис. 4 имеем: $(T/2)_{\min} = 2t_1$; $t_1 \approx 3T_H$; $f_{\max} \approx 1/T_{\min}$, откуда $f_{\max} \approx 1/12T_H$.

Ниже приведены значения f_{\max} в зависимости от значения T_H цепи нагрузки:

Постоянная времени T_H , мс	10	20	30	40
Максимальная частота f_{\max} , Гц	8,32	4,16	3,0	2,08

В заключение отметим, что применение НПЧ позволяет получать более широкий диапазон частот, так как здесь ток спадает значительно быстрее из-за наличия противоЭДС инверторного режима. Однако в данном случае такой диапазон частот не требуется.

Таким образом, предлагаемая система регулирования с различными вариантами $АИН$ имеет лучшие энергетические и стоимостные показатели и может быть рекомендована для применения в установках нагрева и депарафинизации нефтескважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаронов В.Я., Иванов А.Г., Михайлов В.В. и др. Автоматизированная система электронагрева и депарафинизации нефтескважин/Под ред. В.Я. Чаронова и А.Г. Иванова. – Альметьевск: Изд-во ОАО «Татнефть», 1998.
2. Миронов Ю.М., Иванов А.Г., Арзамасов В.Л., Михайлов В.В. Оптимизация установок электронагрева для депарафинизации нефтескважин. – Электричество, 2001, №6.
3. Иванов А.Г., Арзамасов В.Л. Динамические электротепловые процессы в системе «НПЧ – электрическая цепь нефтескважины». – Материалы VII Всероссийской научно-технической конф. ИТЭЭ-2010 «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2010.
4. Васильев А.В., Грачев В.Г., Кузькин В.И. и др. Статический преобразователь частоты для электромагнитного перемешивания жидкой стали. – Электротехника, 2002, №12.
5. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1980.
6. Патент на полезную модель RU 98650 U1. Однофазный инвертор напряжения / А.Г. Иванов, В.Л. Арзамасов. – БИ, 2010, №29.

[25.11.10]

Авторы: Иванов Александр Григорьевич окончил в 1960 г. электромеханический факультет Ивановского энергетического института им. В.И. Ленина. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Создание и исследование электротехнических систем с управляемыми выпрямителями для машиностроения и нефтедобычи» в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова (ЧГУ). Главный научный сотрудник ОАО «ВНИИР», профессор ЧГУ.

Арзамасов Владислав Леонидович окончил в 1981 г. факультет электрификации промышленности ЧГУ. Научный сотрудник ОАО «ВНИИР».