

6
A-29

СОВЕТ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ им. М. АЗИЗБЕКОВА
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПО ЭНЕРГЕТИКЕ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

На правах рукописи

И. А. КУЛИЕВ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОГРУЖНЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(Специальность 232 — Электрооборудование)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук

Баку — 1968

СОВЕТ АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА НЕФТИ И ХИМИИ им. М. АЗИЗБЕКОВА
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ПО ЭНЕРГЕТИКЕ И АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

На правах рукописи

И. А. КУЛИЕВ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОГРУЖНЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(Специальность 232 — Электрооборудование)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание ученой степени
доктора технических наук

Баку — 1968

Работа выполнена на кафедрах электротехники и энергетики нефтяной промышленности и теоретических основ электротехники Азербайджанского института нефти и химии им. М. Азизбекова. Значительная часть экспериментальных исследований и опытно-промышленные испытания проводились на промыслах МНДП Азерб. ССР.

Официальные оппоненты:

1. Член-корр. АН Азерб. ССР, доктор технических наук, профессор А. А. Эфендизаде.
 2. Доктор технических наук, профессор А. М. Мелли-Шахназаров.
 3. Доктор технических наук, профессор Ф. Г. Гусейнов.
- Ведущее предприятие — ОКБ по бесштанговым насосам (Москва).

Автореферат разослан « 8 » октября 1968 года.

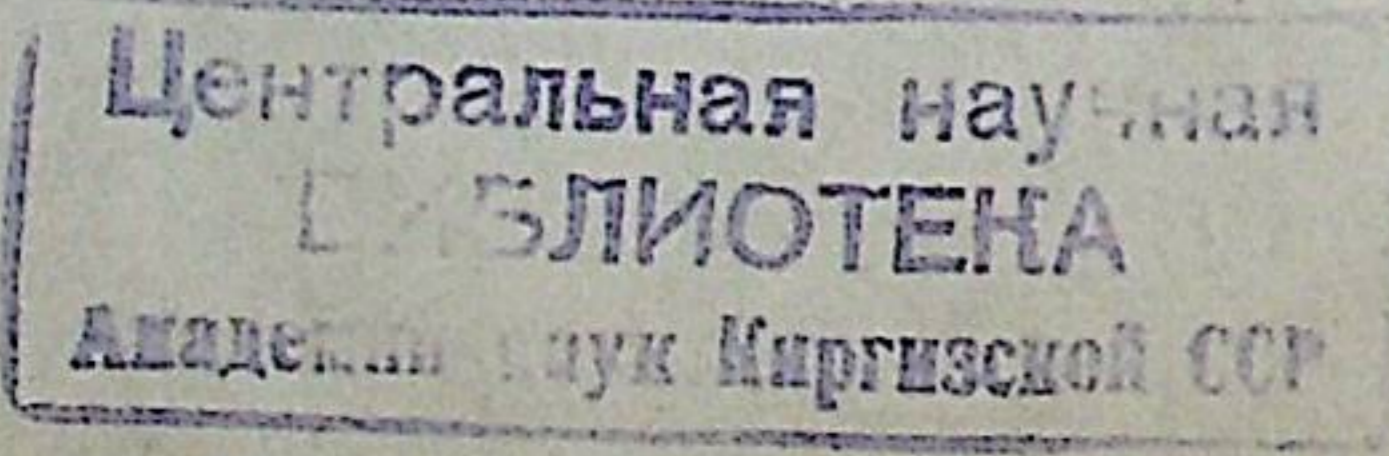
Защита диссертации состоится « » ноября 1968 года на заседании Совета Азербайджанского ордена Трудового Красного Знамени института нефти и химии им. М. Азизбекова по присуждению ученых степеней по энергетике и автоматизации производственных процессов. (Адрес: Баку, проспект Ленина, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке института.

Ученый секретарь Совета,
доктор технических наук, профессор

К. Н. Кулизаде.

319508



Решение задач, поставленных партией и правительством в области развития нефтяной промышленности, требует систематического роста добычи нефти и газа в стране, что невозможно без применения передовой техники и технологии, способствующих улучшению и совершенствованию процессов разработки нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений.

Одним из основных резервов в деле увеличения добычи нефти является широкое применение в нефтедобывающей промышленности электробуров и погружных центробежных электронасосов.

Узловым моментом, способствующим обеспечению эффективной и надежной работы электробура и погружного центробежного насоса, являются разработка и исследование систем токоподводов.

Недостаточная устойчивость работы существующих систем токоподводов зачастую приводит к нарушению нормальной работы установок (особенно электробура). Повышение надежности работы упомянутых установок достигается при использовании колонны труб в качестве канала передачи электрической энергии в системе токоподводов погружных электродвигателей. Поэтому не случайно за последние годы многие исследовательские, конструкторские и производственные организации проявляют все больший интерес к использованию колонны труб для передачи электрической энергии на забой нефтяных скважин по схеме «два провода — колонна труб» (ДПТ) или же «один провод — колонна труб» (ОПТ).

Система токоподвода ДПТ для питания двигателя электробура в настоящее время нашла широкое применение на практике, что привело к значительному росту технико-экономических показателей процесса бурения. Это явилось основанием для проведения специальных исследовательских работ с целью выявления возможности применения указанной систе-

мы токоподвода в скважинах, эксплуатируемых погружными центробежными электронасосами.

Применение систем токоподводов, где колонна труб используется как канал передачи электрической энергии, потребовало разрешения ряда теоретических и практических задач.

Необходимо было исследовать электрические параметры кабеля в условиях скважины, что связано с соответствующими тепловыми исследованиями и изучением распределения поля по поперечному сечению кабеля. Экспериментальным путем следовало определить электрические параметры колонны труб и провести исследования нелинейных несимметричных трехфазных цепей. Надо было выявить целесообразность применения систем токоподвода ДПТ, исследовать переходные процессы, возникающие в различных системах токоподвода, и ряд других вопросов. Требовалось провести исследовательские работы также и по использованию токоподводов погружных электродвигателей в качестве глубинных каналов связи. Исследованию указанных вопросов посвящена реферируемая работа. В ней приводится общий анализ различных систем токоподводов, рекомендуется методика определения электрических параметров кабеля и колонны труб в условиях скважины, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по выявлению условий передачи электрической энергии по различным системам токоподводов при установившемся и при переходном режимах, а также освещается теория глубинных каналов связи с применением теории четырехполюсников и однородных и неоднородных цепей с распределенными параметрами.

В первой главе — «Анализ систем токоподводов погружных электродвигателей» — приводятся схемы существующих и возможных систем токоподводов погружных электродвигателей. Дается сравнительный анализ их преимуществ и недостатков, приведен ряд соображений о целесообразности использования колонны труб в качестве канала для передачи электрической энергии для питания погружных электродвигателей по системам ДПТ и ОПТ.

Применение системы токоподвода ОПТ в основном лимитируется трудностью запуска погружных однофазных двигателей. В связи с этим в работе предлагаются различные способы осуществления системы ОПТ, исключая указанный недостаток. Сравнительный анализ показывает, что система токоподвода ДПТ, не требующая специальной установки, для

существующих погружных двигателей является наиболее целесообразной.

Рассматриваются методы контроля состояния изоляции, осуществляемые при различных системах токоподвода, и для своевременной защиты погружного электродвигателя предлагается дифференциальный метод контроля состояния изоляции его обмоток в процессе работы по качеству залитого в него масла. Результаты исследования показали, что основной величиной, характеризующей увлажненность масла, находящегося внутри двигателя, является его удельная проводимость.

Во второй главе — «Исследование электрических параметров линейных элементов различных систем токоподводов» — освещаются условия работы систем токоподводов в скважине, которые в общем виде рассматриваются как цепи с распределенными параметрами.

В данной главе приводится анализ зависимостей параметров схем замещения различных систем токоподводов от условий их работы в скважине.

Вследствие изменения температуры в скважине с глубиной изменяется активное сопротивление жилы кабеля, причем это изменение связано с распределением температуры среды, окружающей кабель в бурящейся или эксплуатируемой скважине. С целью изучения закономерности распределения температурного фактора предлагается инженерный метод построения температурного графика нисходящего потока промышленной жидкости по стволу бурящейся скважины.

Активное сопротивление жилы кабеля электробура, находящегося в скважине, нами предлагается определять по формуле

$$r = \frac{\rho_{20}}{s} \int_0^h [1 + \alpha(t_{ж} - 20)] dh, \quad (1)$$

где ρ_{20} — удельное сопротивление жилы кабеля при 20°C , $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; α — температурный коэффициент сопротивления

жилы кабеля, $1/^\circ\text{C}$; s — сечение жилы кабеля, мм^2 ; $t_{ж}$ — температура жилы кабеля, которая является функцией глубины h и определяется по выведенной нами формуле

$$t_{ж} = \frac{t_{ок} + A(1 - 20\alpha)}{1 - A \cdot \alpha}. \quad (2)$$

Здесь $t_{ок}$ — температура среды, окружающей кабель;

$$A = 0,86 \cdot n \cdot I^2 \frac{\rho_{20}}{\pi s} \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_{n+1}} \right),$$

где n — число жил кабеля; I — ток, протекающий по одной жиле кабеля, а; λ_i — теплопроводность изоляционных и защитных слоев кабеля, $\frac{\text{м} \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{ккал}}$; d_i — диаметр соответствующих изоляционных и защитных слоев кабеля, м; α_i — коэффициент теплоотдачи от поверхности кабеля в окружающую среду, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{С}$; d_{n+1} — наружный диаметр кабеля, м.

На основе выражений (1) и (2) для определения активного сопротивления погружного кабеля при промышленной частоте была выведена формула, учитывающая изменение температуры промывочной жидкости с увеличением глубины скважины,

$$r_k = \frac{\rho_{20} \cdot h}{s} [1 + \alpha(K + K_1 \cdot H + K_2 \cdot h)], \quad (3)$$

где h — глубина до рассматриваемой точки, м; H — глубина скважины, м;

$$K = \frac{2A - a}{2(1 - A \cdot a)}, \quad K_1 = \frac{b}{2(1 - A \cdot a)}, \quad K_2 = \frac{c}{2(1 - A \cdot a)}.$$

Для участка Карадага (г. Баку) $a = 11$, $b = 0,015$, $c = 0,017$.

При высокой частоте величина активного сопротивления жилы кабеля несколько больше и определяется по формуле

$$r_f = \kappa_f \cdot \kappa_c \cdot r_k + \Delta r_k. \quad (4)$$

Здесь κ_f — отношение активного сопротивления сплошного провода при переменном токе к сопротивлению при постоянном токе; κ_c — коэффициент скрутки; Δr_k — дополнительное сопротивление, возникающее за счет эффекта близости между жилами кабеля и потерь в окружающей его среде.

Индуктивность кабеля при такой системе может изменяться по глубине скважины вследствие изменения давления, которое может вызвать изменение геометрических размеров кабеля. Однако изменением последних при практических расчетах можно пренебречь ввиду его незначительной величины.

Емкость кабеля изменяется вдоль скважины вследствие влияния роста температуры по глубине на диэлектрические

свойства изоляции кабеля. Изменением емкости кабеля от изменения давления вдоль скважины, как и в случае индуктивности, пренебрегается.

С целью определения соответствующих значений емкостей «жила—жила» и «жила—земля» двухжильного кабеля, используемого в системе токоподвода ДПТ, составлены соответствующие системы уравнений Максвелла для электростатического поля с емкостными коэффициентами. В результате решения этих уравнений получены следующие формулы:

$$C_{кт} = 2C_{11} + \frac{3}{2} C_{12},$$

$$C_{кк} = C_{11} + \frac{7}{4} \cdot C_{12}, \quad (5)$$

где C_{11} — частичная емкость жилы кабеля относительно земли; C_{12} — частичная емкость между жилами кабеля.

Для определения величины C_{11} плоского кабеля, принимая его сечение эллиптическим, выведена следующая формула:

$$C_{11} = \frac{\epsilon_r}{36 \left(\alpha_0 - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{th} n \alpha_0}{n} \cdot \cos^2 n \beta^* \right)} \frac{\text{мкф}}{\text{км}}, \quad (6)$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая постоянная изоляции кабеля;

$$\alpha_0 = \text{arctg} \frac{b}{a}; \quad \beta^* = \text{arc} \cos \frac{d}{c};$$

a , b — соответственно большая и малая полуоси эллипса; $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ — половина расстояния между фокусами эллипса; d — расстояние от центра эллипса до центра жилы кабеля.

Определение частичной емкости одной жилы двухжильного кабеля относительно земли C_{11} произведено при наличии и отсутствии другой жилы. Для погружных кабелей, применяемых при бурении и эксплуатации нефтяных скважин, наличие другой жилы уменьшает частичную емкость на величину порядка 2%.

Для телеизмерения и телеконтроля глубинных параметров применяются такие частоты, для которых $\gamma/2\pi f \epsilon \gg 1$ (где γ — удельная проводимость промывочной жидкости,

ϵ — диэлектрическая постоянная промывочной жидкости; f — частота тока). При этом среда, окружающая кабель электробура, считается проводящей, как и принято нами при определении частичной емкости жилы кабеля относительно земли.

На основе связи между потенциальными коэффициентами и коэффициентами индукции в работе определяется самоиндукция жилы L_k и взаимоиндукция между жилами кабеля M_{kk} для различных систем токоподводов с учетом влияния земли.

Что касается активной проводимости, то величина ее при низких частотах незначительна. Поэтому она учитывается в расчетах, проводимых для сравнительно высоких частот, начиная примерно с 25—30 кгц.

В системах токопровода ДПТ и ОПТ, в отличие от трехпроводной системы, суммарное магнитное поле, создаваемое жилами в среде, окружающей кабель, отличается от нуля. Вследствие этого при электробурении в промывочной жидкости и при эксплуатации скважин погружными центробежными электронасосами в броне кабеля появляются дополнительные потери мощности. Указанные факторы способствуют увеличению активного сопротивления и уменьшению индуктивности кабеля, работающего в условиях скважины.

Для количественной оценки указанных сопротивлений были проведены теоретические исследования по изучению распределения компонентов электромагнитного поля в поперечном сечении кабеля различных конструкций. На основе этих исследований определены дополнительные сопротивления, возникающие за счет потерь в среде, окружающей кабель. В частности, принимая сечение плоского кабеля, применяемого в системе токопровода ДПТ, эллиптическим, для определения дополнительного сопротивления на единицу длины его была выведена следующая формула:

$$R_{20} = X_{20} = \frac{\kappa}{2\pi\gamma} \left[\frac{F\left(\kappa_1, \frac{\pi}{2}\right)}{c_1 \cdot \text{ch}\alpha_0'} - \frac{F\left(\kappa_2, \frac{\pi}{2}\right)}{c_2 \cdot \text{ch}\alpha_0''} \right] \cdot e^{-2\kappa\delta}, \quad (7)$$

где $F\left(\kappa', \frac{\pi}{2}\right) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - (\kappa')^2 \cdot \sin^2\psi}}$ — полный эллиптический интеграл;

$$\kappa = \sqrt{\frac{\omega\mu\gamma}{2}}; \quad \kappa_1 = \frac{1}{\text{ch}\alpha_0}; \quad \kappa_2 = \frac{1}{\text{ch}\alpha_0};$$

μ — абсолютная магнитная проницаемость среды, окружающей кабель; γ — удельная проводимость среды, окружающей кабель; α_0, α_0' — эллиптические координаты, определяющие положение соответственно внутреннего и наружного элементов экранного сечения кабеля; c_1, c_2 — половина расстояния между фокусами соответственно внутреннего и наружного эллипсов экранного сечения кабеля; δ — толщина стенки экранного сечения кабеля.

Для плоских кабелей со стальными оболочками формула (7) принимает вид

$$R_{20} = X_{20} = \frac{\kappa}{2\pi c\gamma} \cdot \frac{F\left(\kappa_0, \frac{\pi}{2}\right)}{\text{ch}\alpha_0} (1 - e^{-2\kappa\delta}), \quad (8)$$

где $c = \frac{c_1 + c_2}{2}$; $\alpha_0 = \frac{\alpha_0' + \alpha_0''}{2}$; $\kappa_0 = \frac{1}{\text{ch}\alpha_0}$.

На основе выведенных формул определены дополнительные сопротивления погружного кабеля, используемого в системах ДПТ и ОПТ, в результате чего найдено, что величина активного сопротивления жилы кабеля электробура при промышленной частоте увеличивается на 3%, погружного центробежного электронасоса — на 7% от сопротивления жилы кабеля, а индуктивное сопротивление соответственно уменьшается на такую же величину.

Третья глава — «Исследование нелинейных элементов токоподводов» — посвящается определению электрических параметров колонн бурильных и эксплуатационных труб в условиях скважины, которые рассматриваются как ферромагнитные тела. Исследованию распространения электромагнитных волн в ферромагнитных телах посвящено много работ. Профессор Л. Р. Нейман на базе решения основных уравнений Максвелла с учетом нелинейности ферромагнитных материалов путем использования результатов проведенных им экспериментов получил конкретные формулы для определения сопротивления тел, имеющих сечения любой формы как при сильном, так и при слабом проявлении поверхностного эффекта.

На основе анализа теоретических исследований установлено, что электрические параметры фазы, в качестве которой используется колонна бурильных труб электробура, в скважине не будут зависеть от параметров окружающей среды (промывочной жидкости) и обсадной трубы. Это объясняется расположением погружного кабеля внутри колонны бурильных труб. В случае передачи электрической энергии на забой постоянным током и током сравнительно низких частот, при котором толщина стенки окажется намного меньше, чем глубина затухания электромагнитной волны, или же при использовании бурильных труб из немагнитного материала окружающая среда и обсадная труба могут оказать существенное влияние на электрические параметры фазы, в качестве которой используется колонна бурильных труб.

Определение расчетным путем электрических параметров колонны труб с учетом всех факторов (влияние механических нагрузок, температуры, соприкосновения со стенками скважины) представляет значительную трудность. В этой связи рабочие сопротивления колонны труб, используемой в системах токоподвода ОПТ и ДПТ, определяются экспериментальным путем. Эксперименты в условиях скважины проведены по разработанной нами методике — по однофазной и трехфазной схемам (см. рис. 1 и 2).

Для определения рабочих электрических параметров бурильных труб опыты были проведены на экспериментальной скважине ЭКЭБ и на буровой № 192 НПУ «Карадагнефть», а для параметров насосных труб — на буровых № 1382 и № 1460 НПУ «Орджоникидзенефть» МНДП Азерб. ССР.

Расхождения в данных экспериментов, проведенных по однофазной и трехфазной схемам, не превышают 3%.

На основании проведенных экспериментов были построены графики зависимости активных r_t , индуктивных x_t и полных Z_t сопротивлений бурильных и эксплуатационных труб от протекающего по ним тока.

Для определения сопротивления колонны бурильных и насосных труб в зависимости от протекающего по ним тока I в условиях скважины выведены эмпирические формулы в следующем виде:

$$r_t = A_1 \cdot I^{n_1}, \quad x_t = A_2 \cdot I^{n_2}.$$

Значения коэффициентов A_1 , n_1 и A_2 , n_2 в указанных формулах приведены в таблицах 1 и 2, которые справедливы:

для колонных насосных труб погружного центробежного электронасоса:

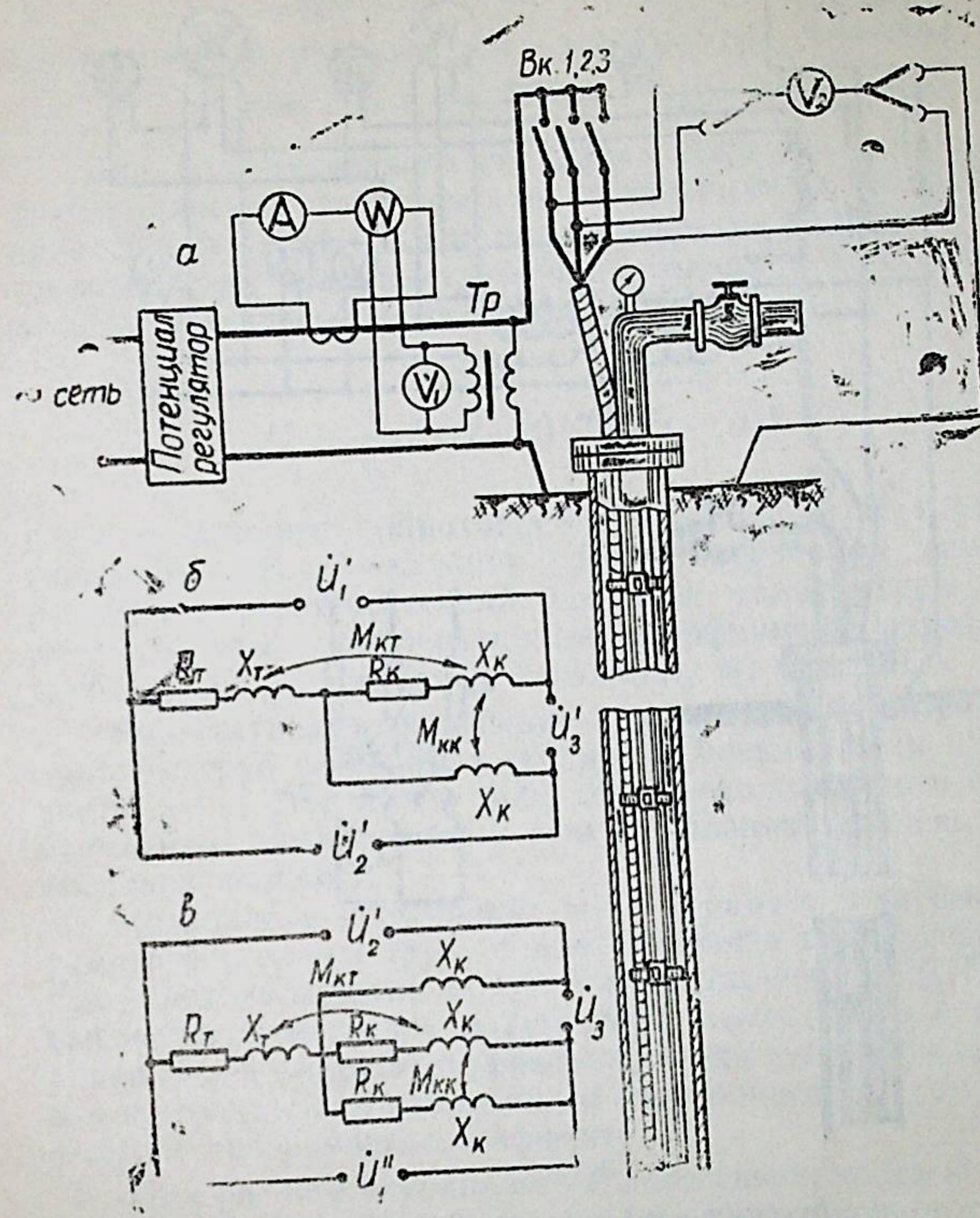


Рис. 1

$$r_t = \frac{2P'' - P'}{I^2}, \quad r_k = \frac{2(P' - P'')}{I^2}$$

$$x_t = x_t + x_{kk} - x_{kt} = \frac{1}{I^2} \sqrt{(U'_1 I)^2 - (P')^2}$$

$$x_k = x_k - x_{kk} = \frac{1}{I^2} \sqrt{(U'_2 I)^2 - 4(P' - P'')^2}$$

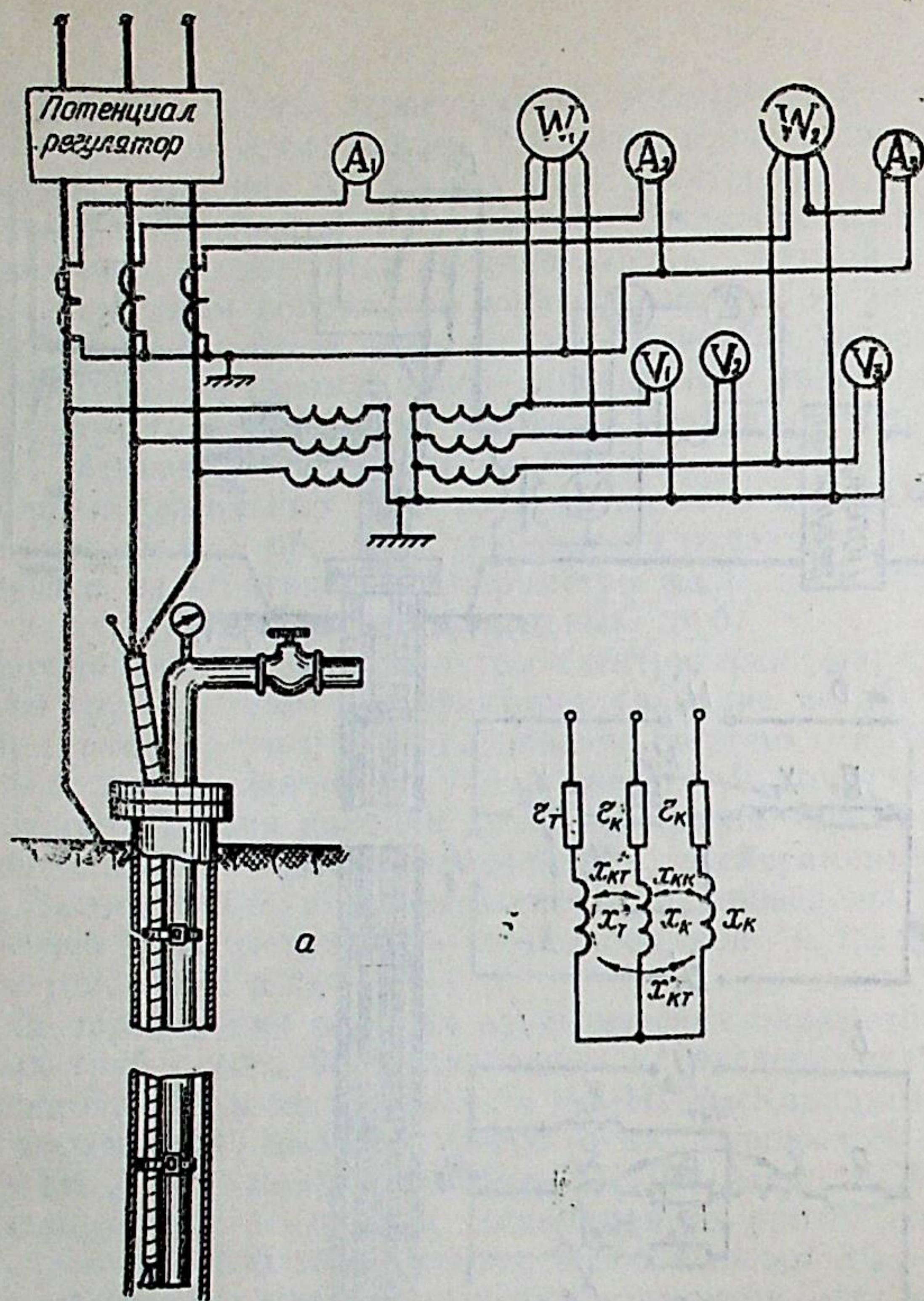


Рис 2

$$r_k = \frac{I_B \cdot \cos(\gamma - \varphi_2) + I_C \cdot \cos(2\gamma - \varphi_2)}{I_A^2 + 4I_B \cdot I_C \cdot \cos\gamma} \cdot U_{BC}$$

$$x_k = \frac{I_B \cdot \sin(\gamma - \varphi_2) + I_C \cdot \sin(2\gamma - \varphi_2)}{I_A^2 + 4I_B \cdot I_C \cdot \cos\gamma} \cdot U_{BC}$$

$$r_T = \frac{U_{AB} \cdot \cos\varphi_1 + U_{CA} \cdot \cos(\alpha - \varphi_1)}{2 \cdot I_A} - r_k$$

$$X_T' = \frac{U_{AB} \cdot \sin\varphi_1 + U_{CA} \cdot \cos(\alpha + \varphi_1)}{2 \cdot I_A} - x_k$$

$$\varphi_1 = \arccos \frac{P_1}{U_{AB} \cdot I_A}, \quad \varphi_2 = \arccos \frac{P_2}{U_{BC} \cdot I_C}, \quad \alpha = \arccos \frac{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - U_{BC}^2}{2 \cdot U_{AB} \cdot U_{CA}}$$

$$\gamma = \arccos \frac{I_B^2 + I_C^2 - I_A^2}{2I_B \cdot I_C}$$

$$\text{при } I \geq 50 \text{ а, } t_{cp} = 35^\circ \text{С,}$$

для колонны бурильных труб электробура

$$\text{при } 60a \leq I \leq 300, \quad t_{cp} = 20^\circ \text{С.}$$

Для количественного сравнения сопротивления колонны труб в условиях скважины и на поверхности их значения были приведены к одной и той же температуре (20°С). При этом сопротивление колонны труб, приведенное к 20°С , определялось по выведенной нами формуле

$$r_{T_{20}} = \frac{r_T}{H + \frac{\alpha}{4} [\Gamma(H-a)^2 - b(H-a)]}, \quad (9)$$

где r_T — активное сопротивление колонны труб в условиях скважины, ом ; a — глубина уровня постоянной температуры, м ; Γ — геотермический градиент температуры в скважине, $^\circ \text{С/м}$; α — температурный коэффициент сопротивления трубы, $1/^\circ \text{С}$; H — глубина скважины, м ; ($b = 10^\circ \text{С}$).

Количественное сравнение показало, что сопротивление колонны труб в условиях скважины меньше, чем на поверхности земли. Это может быть объяснено тем, что в скважине местами возникает контакт между колонной насосных труб и обсадной колонной.

Из анализа полученных нами в работе зависимостей параметров колонны труб от протекающего тока следует, что при передаче электрической энергии по системе ДПТ для существующих нагрузок электробура имеет место слабое проявление поверхностного эффекта, а для существующих нагрузок погружного центробежного электронасоса — сильное проявление поверхностного эффекта.

При расчете глубинных каналов связи, когда колонна бурильных труб участвует в цепи токов высокочастотных сигналов во время работы погружных двигателей, следует учесть влияние величины силового тока.

Для определения активного и индуктивного сопротивлений колонны бурильных труб, с учетом наложения токов промышленной и высокой частоты, выведены следующие формулы:

$$r_{Tf} = \sqrt{\nu} \cdot \kappa_t \cdot h \cdot A_1 \cdot I^{n_1},$$

$$x_{Tf} = \sqrt{\nu} \cdot \kappa_t \cdot h \cdot A_2 \cdot I^{n_2}, \quad (10)$$

где $\nu = \frac{f}{f_H}$ — относительная частота тока; κ_1 — коэффициент, учитывающий распределение температуры по глубине скважины (например, для участка Карадаг, г. Баку $\kappa_1 = 0,9857 + 0,0052 \cdot h + 0,0215 \cdot H$); I — эффективное значение силового тока, протекающего по трубе.

Таблица 1

| Скважины НПУ „Орджоникидзе-нефть“ МНДП Азерб. ССР | Нелинейный элемент системы токоподвода ДПТ и ОПТ погружного центробежного электронасоса | A_1 | n_1 | A_2 | n_2 |
|---|---|-------|---------|-------|---------|
| 469 | 2,5" колонна насосных труб при 8" обсадной колонне | 38,68 | -0,8760 | 32,57 | -0,9432 |
| 1690 | 2,5" колонна насосных труб при 6" обсадной колонне | 61,81 | -0,9893 | 45,48 | -1,0412 |
| Экспериментальная | 3" колонна насосных труб при 6" обсадной колонне | 18,24 | -0,4880 | 5,587 | -0,488 |

Таблица 2

| Скважины | Нелинейный элемент системы токоподвода ДПТ и ОПТ электробура | Частота, гц | A_1 | n_1 | A_2 | n_2 |
|--|--|-------------|---------|--------|---------|--------|
| Экспериментальная ЭКЭБ МНДП Азерб. ССР | Бурильная труба Н168 в среде морской воды, обсадная труба 11" | 50 | 0,0646 | 0,269 | 0,0446 | 0,237 |
| Буровая № 277 НПУ „Карадагнефть“ МНДП Азерб. ССР | Бурильная труба Н-141 в среде промывочной жидкости, обсадная труба 11" | 49 | 0,02266 | 0,5332 | 0,1004 | 0,3113 |
| | | 36 | 0,02602 | 0,4545 | 0,04327 | 0,4262 |
| | | 26 | 0,02152 | 0,4563 | 0,03156 | 0,4582 |
| | | 20 | 0,02912 | 0,3526 | 0,02247 | 0,4440 |

Четвертая глава — «Исследование систем токоподводов при установившихся режимах» — посвящается изучению условий передачи электрической энергии к погружным электродвигателям, осуществляемой по различным системам токоподводов.

Создание нормальных условий работы погружных электродвигателей связано с правильным подбором параметров и положений переключателей ответвлений трансформатора на устье скважины. Поэтому проведено исследование по определению падения напряжения и потери мощности в токоподводах.

Для определения потери мощности в симметричной системе токоподвода предлагаются следующие формулы: в случае погружного центробежного электронасоса

$$\Delta P = I^2 \cdot r_{20} \left[1 + \alpha \left(\frac{I^2}{3s} - 20 \right) \right] \cdot H, \quad (11)$$

в случае электробура

$$\Delta P = I^2 (r_{20} + 10^{-2}) \cdot \kappa'_1 \cdot H, \quad (12)$$

для участка Карадаг, г. Баку

$$\kappa'_1 = 1,0175 + 0,01564h + 0,0354H.$$

Из-за наличия нелинейного элемента в системе токоподвода ДПТ установление связи между линейными напряжениями и токами соответствующих фаз в несимметричном режиме работы погружных двигателей представляет большие трудности в связи с тем, что исследование многих явлений, возникающих в указанной системе, связано с исследованием нелинейных несимметричных трехфазных цепей.

В работе дана обобщенная методика исследования трехфазных цепей, содержащих нелинейные и несимметричные элементы, применение которой исключает вышеуказанные трудности. При этом в зависимости от ожидаемых пределов изменения нагрузки задаются примерными значениями токов в фазах, чтобы аппроксимировать те участки характеристик, на которых работают рассматриваемые нелинейные элементы.

При линеаризации исходной нелинейной системы учитывается, что определение токов и напряжений производится по заданным значениям момента на валу двигателя. Поэтому линеаризация нелинейной системы производится путем аппроксимации вольтамперных характеристик, построенных для эффективных (среднеквадратичных) значений токов и напряжений.

Однако, так как в общем случае рассматриваемая нелинейная система является несимметричной, значения токов в различных фазах и сдвиги их фаз по отношению к напряжениям соответствующих фаз будут различны. Поэтому для определения комплексных значений искомых напряжений рассматриваемая исходная система заменяется такой линейной системой, для которой возможно применение метода симметричных составляющих.

В такой системе всякое изменение фазы тока будет вызывать аналогичное изменение фазы падения напряжения в токоподводе при любых значениях нагрузки, а это в свою очередь будет иметь место в том случае, если линеаризованные вольтамперные характеристики различных фаз рассматриваемой системы будут проходить через начало координат. Поэтому сведение исходных линеаризованных характеристик нелинейной системы к характеристикам линейной системы производится путем соответствующего преобразования координат.

Применение разработанной методики к условиям токоподвода ДПТ приводит к совместному решению следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= (Z_1 + Z'_1) \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}'_1 \\ \dot{E}_2 &= (Z_2 + Z'_2) \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}'_2 \\ \dot{U}'_0 + \dot{U}'_1 + \dot{U}'_2 &= A_2(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \\ \dot{U}'_0 + a^2\dot{U}'_1 + a\dot{U}'_2 &= B_2(a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2) \\ \dot{U}'_0 + a\dot{U}'_1 + a^2\dot{U}'_2 &= C_2(a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2) \end{aligned} \quad (13)$$

где \dot{E}_1, \dot{E}_2 — э.д.с. составляющих прямой и обратной последовательностей источника питания; Z_1, Z_2 — сопротивления прямой и обратной последовательностей токоподвода (после преобразования); Z'_1, Z'_2 — сопротивления прямой и обратной последовательностей погружного двигателя, которые определяются при заданном значении момента двигателя; $\dot{U}'_0, \dot{U}'_1, \dot{U}'_2$ — фиктивные значения составляющих нулевой, прямой и обратной последовательностей напряжения на несимметричном участке цепи (токоподвода); \dot{I}_1 и \dot{I}_2 — токи прямой и обратной последовательностей; A_2, B_2 и C_2 — коэффициенты, найденные из характеристик нелинейных элементов.

После решения системы уравнений (13) действительные значения напряжений на зажимах нелинейных элементов определяются как

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AA_1} &= (\dot{U}'_0 + \dot{U}'_1 + \dot{U}'_2) \cdot e^{-j\psi_a} + A_1 \\ \dot{U}_{BB_1} &= (\dot{U}'_0 + a^2\dot{U}'_1 + a\dot{U}'_2) \cdot e^{-j\psi_b} + B_1 \\ \dot{U}_{CC_1} &= (\dot{U}'_0 + a\dot{U}'_1 + a^2\dot{U}'_2) \cdot e^{-j\psi_c} + C_1. \end{aligned} \quad (14)$$

где ψ_a, ψ_b, ψ_c — начальные фазы токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$; A_1, B_1 и C_1 — коэффициенты, находимые из характеристик нелинейных элементов.

Далее, пользуясь характеристиками $U(I)$ нелинейных элементов, построенными на основании соответствующих характеристик $R(I)$ и $X(I)$, определяются значения токов в фазах. В случае резкого отличия положения определяемой точки от точек, лежащих на линеаризованной вольтамперной характеристике, нелинейная характеристика линеаризуется снова, так, чтобы прямая проходила через найденную точку, лежащую на данной характеристике $R(I)$ и $X(I)$, после чего производятся аналогичные расчеты.

Расчеты, проведенные по предложенной методике, показывают, что при симметричном напряжении на устье скважины ($U = 540$ в) на зажимах погружного двигателя ПЭД-35, питаемого по системе ДПТ (2,5" колонна насосных труб и двухжильным кабелем сечением жил 25 мм²) и приводящего в движение погружной насос типа ЭЦНН-160 при глубине его подвески 1000 м, степень асимметрии по напряжению составляет 16,3%, что значительно превосходит допускаемую норму.

Для устранения этого недостатка считается целесообразным с помощью переключателей ответвлений трансформатора создать необходимую несимметричную систему напряжений на устье скважины, обеспечивающую симметричный режим работы погружных электродвигателей. При этом линейные значения напряжения в начале токоподвода предлагается определять как:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{I}[(Z_a + Z_n) - a^2(Z_b + Z_n)] \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{I}(a^2 - a)(Z_b - Z_n) \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{I}[a(Z_b + Z_n) - (Z_a + Z_n)] \end{aligned} \quad (15)$$

где $a = e^{j120^\circ}$.

Пользуясь ранее полученными эмпирическими формулами и учитывая изменение сопротивления жилы кабеля электробура по глубине скважины, для определения потери мощности в системе токоподвода ДПТ при различных значениях частоты выведена следующая формула:

$$\Delta P = [0,7707 I^2 + (33,4 - 0,227 \cdot f) \cdot 10^{-3} \cdot I^{2,23+0,0071f}] \cdot H \cdot 10^3 + [5,919 \cdot I^2 + (85,17 - 0,583 \cdot f) \cdot 10^{-3} I^{2,23+0,0071f}] \cdot H^2 \cdot 10^{-5} \text{ кВт}, \quad (16)$$

Для токоподвода погружного центробежного электронасоса с использованием 3" колонны насосных труб в качестве третьей фазы и двухжильного кабеля сечением 35 мм² получена следующая формула потери мощности для частоты 50 гц:

$$\Delta P = (2,16 \cdot r_k \cdot I^2 + 20,14 \cdot I^{1,371}) \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ кВт}. \quad (17)$$

В случае использования 2,5" насосной трубы

$$\Delta P = (2,16 \cdot r_k \cdot I^2 + 40,23 \cdot I^{1,124}) \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ кВт}. \quad (18)$$

В формулах (16) и (17) r_k есть сопротивление жилы кабеля длиной 1 км при температуре 20°C; H — глубина подвески в км.

Далее, пользуясь выведенными аналитическими и эмпирическими формулами, определялись падения напряжения и потери мощности в системе токоподвода ОПТ электробура и погружного центробежного электронасоса.

С целью проверки работоспособности системы токоподвода ДПТ для электробура до применения ее в промышленности с участием автора проведены экспериментальные исследования на стендовой буровой экспериментальной конторы электробурения МНДП Азерб. ССР.

Произведены соответствующие замеры и сняты осциллограммы как при пуске, так и при установившемся режиме работы электробура.

При холостой работе электробура (двигатель МАП 1-25-617/10) со шпинделем на шариковых спорах при симметричном напряжении на устье скважины 1100 в потребляемая активная мощность составляла 40 кВт, токи в жилах кабеля 90 а, а в трубе 96 а. На основе анализа полученных из эксперимента данных было установлено, что система токоподвода ДПТ для электробура вполне пригодна.

Промышленные испытания и опытно-промышленная эксплуатация погружных центробежных электронасосов по системе токоподвода ДПТ были проведены на эксплуатационных скважинах № 1382 НПУ «Орджоникидзенефть» и № 2066 НПУ «Лениннефть» МНДП Азерб. ССР.

В насосной скважине № 1382 II участка 4-го промысла НПУ «Орджоникидзенефть» в течение месяца находился в эксплуатации погружной центробежный электронасос типа ЭЦНИ-160 с электродвигателем ПЭД-35, питание которого осу-

ществлялось по системе ДПТ с использованием двух жил кабеля КРБК-3 × 25 и колонны насосных труб диаметром 2" и 2,5" общей длиной 758 м при 6" обсадной колонне.

Распределение токов по фазам было следующим: $I_A = 52$ а (колонна труб), $I_B = 56$ а и $I_C = 58$ а, линейные напряжения на устье скважины $U_{AB} = 600$ в, $U_{BC} = 540$ в, $U_{CA} = 592$ в.

В насосной скважине № 2066 III участка 12-го промысла НПУ «Лениннефть» в течение 81 дня находился в эксплуатации погружной центробежный электронасос типа ЭЦНИ-250 с электродвигателем ПЭД-35, питание которого осуществлялось по системе ДПТ с использованием двух жил кабеля КРБК-25 и колонны насосных труб 2,5" общей длиной 490 м при 8" колонне. Распределение токов по фазам было следующим: $I_A = 67$ а (колонна труб), $I_B = 68$ а, $I_C = 69$ а, линейные напряжения на устье скважины $U_{AB} = 530$ в, $U_{BC} = 490$ в, $U_{CA} = 520$ в.

Применение системы ДПТ в электробурении дало значительный технический эффект и является экономичным. Использование указанной системы токоподвода для погружных центробежных электронасосов требует технико-экономического обоснования, так как в ряде случаев такая система способствует росту потерь мощности в токоподводе.

С целью выявления целесообразных областей применения системы ДПТ произведен сравнительный экономический расчет для наиболее широко применяемых погружных центробежных электронасосов с двигателями типа ПЭД-28, ПЭД-35 и ПЭД-46, получающих энергию по трехжильным кабелям типа КРБК-25 и КРБК-16 и по двухжильным кабелям таких же сечений с использованием 2,5 и 3" насосных труб. Из анализа полученных результатов следует:

1. Область экономически целесообразного использования колонны труб в системе токоподвода ДПТ практически не зависит от сечения кабеля, а зависит лишь от диаметра насосных труб.

2. Система токоподвода ДПТ для питания погружного двигателя ПЭД-35 (ПЭД-46) с использованием 3" насосных труб экономически целесообразна для всех глубин спуска насосов, начиная с 320 м, а при использовании 2,5" труб — начиная с 440 м.

3. Для погружного двигателя типа ПЭД-28 система ДПТ с использованием 3" насосных труб экономически целесооб-

разна начиная с глубины около 400 м, а при 2,5" трубах — начиная с глубины спуска насоса 600 м.

Кроме вышеуказанного, применение системы ДПТ приводит к уменьшению поперечных размеров кабеля, что повышает надежность работы его в условиях скважины.

В пятой главе — «Анализ переходных процессов в системах токоподводов» — освещаются некоторые вопросы, связанные с влиянием систем токоподводов на характер протекания переходного процесса погружных электродвигателей.

Для исследования переходного процесса, возникающего в симметричной трехфазной системе токоподвода, в качестве основной принята система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс асинхронного двигателя при симметричном режиме его работы.

С целью выявления характера переходного процесса, протекающего при включении установок погружного центробежного электронасоса в сеть, где скольжение является переменным, были произведены необходимые вычисления на ЭЦВМ БЭСМ-2 для различных вариантов питающего напряжения и глубины спуска двигателя ПЭД-35 кВт, приводящего в движение насос ЭЦН-160. В качестве токоподвода принят кабель типа КРБК-3 × 25 мм².

Далее рассматриваются переходные процессы при параллельной работе конденсаторов с погружными центробежными электронасосами, которые применяются для улучшения энергетических показателей установки и облегчения запуска и самозапуска ПЭД. Исследование нестационарных явлений в вышеуказанной схеме приводит к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

$$u = r_n \cdot i + (r_1 + jv \cdot x_1) \cdot i_1 + x_m \frac{di}{dt} + x_m \left(jv \cdot i_2 + \frac{di_2}{dt} \right)$$

$$0 = x_m \left(jsv \cdot i_1 + \frac{di_1}{dt} \right) + (r_2 + jS \cdot v \cdot x_2) \cdot i_2 + x_2 \frac{di_2}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{v}{x_c} u = j(i_1 - i) + \frac{r_n}{x_c} \left(v \cdot i - j \frac{di}{dt} \right)$$

$$\operatorname{Re}[jv x_m \cdot i_1 \cdot i_2^*] = M_c - J \frac{dS}{dt}$$

где i , i_1 , i_2 — переходные токи соответственно до конденсатора, после конденсатора и в цепи ротора ПЭД; r_n — ак-

тивное сопротивление элементов схемы до погружного кабеля; x_c — сопротивление конденсатора при $f = 50$ гц ($v = 1$).

В работе приводится решение системы дифференциальных уравнений (19) для случаев непосредственного подсоединения конденсаторов к зажимам токоподвода и подсоединения к линии электропередачи на устье скважины.

В случае электробурения момент на валу двигателя пульсирует. Вследствие этого форма кривой тока двигателя отличается от синусоиды, что вызывает в сети дополнительные потери мощности.

С целью определения отдельных гармоник тока, потребляемого погружными двигателями, и исследования их на устойчивость при пульсирующем режиме работы за исходное принято уравнение напряжения асинхронного двигателя для переходного процесса. В качестве примера рассматривается случай, когда нагрузка на валу двигателя изменяется с постоянной частотой, в результате чего создается следующий закон изменения скольжения:

$$S = S_0 [1 + m \cos(\Omega \cdot t + \alpha)], \quad (20)$$

где $m = \frac{\Delta S}{S_0}$ — глубина модуляции скольжения; Ω — угловая частота пульсации нагрузки двигателя.

Для определения гармоник токов статора и ротора асинхронного двигателя, решив уравнение напряжения для случая (20), находятся следующие системы рекуррентных уравнений:

$$a_k \cdot (i_1)_k + b_k (i_1)_{k-1} + c_k (i_1)_{k+1} + d_k \cdot \dot{U}_k + e_k \cdot \dot{U}_{k-1} + \kappa_k \cdot \dot{U}_{k+1} = 0, \quad (21)$$

$$A_k (i_2)_k + B_k (i_2)_{k-1} + C_k (i_2)_{k+1} + D_k \cdot \dot{U}_k + E_k \dot{U}_{k-1} + K_k \cdot \dot{U}_{k+1} = 0 \quad (22)$$

где $(i_1)_k$, $(i_2)_k$ — относительные значения соответственно токов статора и ротора k -й гармоники; U_k — относительное значение напряжения на зажимах двигателя k -й гармоники;

$$a_k = \left\{ \frac{r_1 + j(v + \kappa \Omega) \cdot x_1}{j(v + \kappa \Omega) \cdot x_m} \left[r_2 + j(v \cdot S_0 + \kappa \Omega) \cdot x_2 \right] - j(v S_0 + \kappa \Omega) \cdot x_m \right\};$$

$$b_k = - \frac{v \cdot S_0 \cdot m}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot x_2 - j[v + (\kappa - 1)\Omega](x_1 \cdot x_2 - x_m^2)}{[v + (\kappa - 1)\Omega] \cdot x_m};$$

$$c_k = -\frac{\nu \cdot S_0 \cdot m}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot x_2 - j[\nu + (\kappa + 1)\Omega](x_1 \cdot x_2 - x_m^2)}{[\nu + (\kappa - 1)\Omega] \cdot x_m};$$

$$d_k = \frac{r_2 + j(\nu S_0 + \kappa\Omega) \cdot x_2}{j(\nu + \kappa\Omega) \cdot x_m}; \quad e_k = \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m} \cdot x_2}{2[\nu + (\kappa - 1) \cdot \Omega] \cdot x_m};$$

$$\kappa_k = \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m} \cdot x_2}{2[\nu + (\kappa + 1)\Omega] \cdot x_m};$$

$$A_k = \left[r_2 + j(\nu S_0 + \kappa\Omega) \cdot x_2 + \frac{(\nu + \kappa\Omega) \cdot (\nu S_0 + \kappa\Omega) \cdot x_m^2}{r_1 + j(\nu + \kappa\Omega) \cdot x_1} \right];$$

$$B_k = j \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m}}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot x_2 + j[\nu + (\kappa - 1)\Omega] \cdot (x_1 \cdot x_2 - x_m^2)}{r_1 + j[\nu + (\kappa + 1) \cdot \Omega] \cdot x_1};$$

$$C_k = j \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m}}{2} \cdot \frac{r_1 \cdot x_2 + j[\nu + (\kappa + 1)\Omega] \cdot (x_1 \cdot x_2 - x_m^2)}{r_1 + j[\nu + (\kappa + 1)\Omega] \cdot x_1};$$

$$D_k = j \frac{(\nu S_0 + \kappa\Omega) \cdot x_m}{r_1 + j(\nu + \kappa\Omega) \cdot x_1}; \quad E_k = j \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m}}{2} \times$$

$$\times \frac{x_m}{r_1 + j[\nu + (\kappa - 1)\Omega] \cdot x_1};$$

$$K_k = j \frac{\nu \cdot S_0 \cdot \dot{m}}{2} \cdot \frac{x_m}{r_1 + j[\nu + (\kappa + 1)\Omega] \cdot x_1};$$

$$\dot{m} = m \cdot e^{j\alpha}; \quad \dot{\bar{m}} = m \cdot e^{-j\alpha}.$$

Из систем (21) и (22) определяются значения комплексных амплитуд κ -й гармоники тока статора и ротора:

$$(\dot{I}_1)_k = \frac{\Delta_{1k}}{\Delta_1}, \quad (\dot{I}_2)_k = \frac{\Delta_{2k}}{\Delta_2},$$

где Δ_1 и Δ_2 — соответствующие определители систем (21) и (22); Δ_{1k} и Δ_{2k} — определители, полученные соответственно из Δ_1 и Δ_2 заменой столбца правыми частями соответствующих уравнений систем (21) и (22).

Пользуясь уравнением (21) составлена схема замещения для цепи статора асинхронного двигателя при пульсирующей

нагрузке, где учитываются взаимосвязи, возникающие между отдельными гармониками тока. Аналогичным путем по уравнению (22) можно построить эквивалентную схему для цепи ротора асинхронного двигателя.

Для исследования устойчивости работы асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке получено следующее уравнение:

$$\sin \frac{\pi}{j\Omega} (p + S_0 + j\omega) + \frac{\pi D}{j\Omega} \cdot \cos \frac{\pi}{j\Omega} (p + S_0 + j\omega) = 0, \quad (23)$$

$$\text{где} \quad D = -j \frac{m \cdot S_0}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{b}{c^2 - 1};$$

$$b = \frac{m \cdot S_0}{2\Omega^2}; \quad c = \frac{2\omega}{\Omega}.$$

На основе годографа Михайлова, построенного по уравнению (23), определяется область устойчивой работы асинхронного двигателя при гармонически пульсирующей нагрузке.

Предложенный метод исследования погружного асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке применим и для любого другого периодического закона изменения момента на его валу и при питании его по различным системам токоподвода.

Далее рассматриваются переходные процессы, возникающие при системах токоподводов ДПТ и ОПТ, для чего в качестве основных приняты дифференциальные уравнения, описывающие переходный процесс асинхронного двигателя при несимметричном режиме его работы.

Для определения необходимых характерных параметров при переходном процессе, возникающем в системе ДПТ, составляются следующие дополнительные уравнения напряжений:

$$\begin{aligned} u_{1y} - u_1 - u_{1c} &= 0, \\ u_{2y} - u_2 - u_{2c} &= 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где u_{1y} , u_{2y} — составляющие напряжения прямой и обратной последовательностей на устье скважины; u_1 , u_2 и u_{1c} , u_{2c} — составляющие падения напряжения прямой и обратной последовательностей соответственно в токоподводе и на зажимах погружного двигателя.

В результате совместного решения основных дифференциальных уравнений с дополнительными (24) найдены измене-

Ний значений переходных токов в фазах, электромагнитного момента на валу двигателя и скольжения при запуске его по системе токоподвода ДПТ. Вычисления были произведены на ЭЦВМ типа БЭСМ-2.

С целью исследования переходного процесса, возникающего при системе ОПТ, в качестве примера были рассмотрены две схемы конденсаторных двигателей, а именно: 1) соединение двух обмоток двигателя через конденсатор, 2) последовательно-параллельное подсоединение конденсатора к обмоткам двигателя.

Для первого случая дополнительные уравнения напряжения имеют вид

$$\sqrt{3} e^{-j3\omega t} \left[\frac{d}{dt} (u_{1c} - u_{2c}) + j(u_{1c} - u_{2c}) \right] - x_c (i_{1c} + a \cdot i_{2c}) = 0 \quad (25)$$

$$X_{\text{опт}} \frac{d}{dt} (i_{1c} + i_{2c}) + Z_{\text{опт}} \cdot (i_{1c} + i_{2c}) + \sqrt{3} \cdot e^{-j3\omega t} (u_{1c} \cdot e^{j60} + u_{2c}) = u,$$

а для второго случая

$$\begin{aligned} x_{c_1} (i_{c_1} + i_{c_2} + i_{c_3}) &= j \left[\frac{2}{3} (1-a) \cdot u_a + u_{1c} - u_{oc} \right] + \\ &+ \frac{d}{dt} \left[\frac{2}{3} \times (1-a) u_a + u_{1c} - u_{oc} \right] \\ x_{c_2} \left[(a^2 - a) \cdot i_{c_1} + (a^2 - a) \cdot i_{c_2} + 2 \cdot i_{c_3} \right] &= j \left[\frac{1}{3} (1-a) u_a + \right. \\ &+ \left. u_{1c} + u_{oc} \right] + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{3} (1-a) u_a + u_{1c} - u_{oc} \right] \quad (26) \\ u_{1c} - u_{2c} &= \frac{1}{3} (a - a^2) \cdot u_a \\ u_a + Z_{\text{опт}} (a \cdot i_{1c} + a^2 \cdot i_{2c} - 2 \cdot i_{oc}) &+ \\ + X_{\text{опт}} \frac{d}{dt} (a \cdot i_{1c} + a^2 \cdot i_{2c} - 2 \cdot i_{oc}) &= u, \end{aligned}$$

где u — напряжение на устье скважины; u_a — напряжение на зажимах погружного конденсаторного двигателя; x_c — сопротивление конденсатора для первого случая; x_{c_1} — сопротивление последовательно включенного конденсатора для

второго случая; x_{c_2} — сопротивление параллельно включенного конденсатора; $Z_{\text{опт}} = R_{\text{опт}} + jX_{\text{опт}}$ — комплексное сопротивление токоподвода; $R_{\text{опт}} = r_T + r_K$ — активное сопротивление токоподвода; $X_{\text{опт}} = x_T + x_K - 2x_{KT}$ — индуктивное сопротивление токоподвода;

Анализ переходных процессов в системе токоподвода ОПТ для рассматриваемых случаев приводит к совместному решению основных уравнений с дополнительными (25) или (26).

В шестой главе — «Исследование токоподводов погружных электродвигателей в качестве глубинного канала связи» — рассматриваются существующие и возможные системы телеизмерения глубинных параметров и приводится исследование глубинных каналов связи, осуществляемых по различным системам токоподводов.

Важное значение для телеизмерительных устройств скважин имеют простота и надежность глубинной части устройства, подвергающейся, как правило, воздействиям вибрации, высокой температуры, давления, агрессивной скважинной жидкости и других факторов.

В существующих системах телеизмерения (число-импульсная, кодо-импульсная, время-импульсная, частотная и т. д.) необходимы соответствующие преобразовательные устройства, располагающиеся на месте производства измерений, что приводит к увеличению габарита глубинной части измерительного устройства и уменьшает надежность ее работы.

Нами предложена схема телеизмерения глубинных параметров с использованием дифференциального метода измерения (см. рис. 3), преимуществом которой перед существующими являются отсутствие сложных преобразователей в месте измерения, что дает возможность значительно упростить глубинное устройство, уменьшить его габариты, повысить надежность работы и снизить стоимость аппаратуры. Предложенная схема телеизмерения основана на сравнении сопротивлений пассивных датчиков; отличительными особенностями ее являются:

1. Использование дифференциальной системы измерения.
2. Возможность использования пассивных, чрезвычайно простых по конструкции датчиков.
3. Возможность тарировки устройства в процессе работы телеизмерительной системы на месте ее установки.

Все виды погрешностей предложенной нами схемы в основном могут быть разделены на две группы, а именно: систе-

матические погрешности, источники которых находятся в основном в измерительных приборах и определяются качеством элементов блоков и узлов, составляющих измерительное устройство как в наземной, так и в глубинной его части. В рассматриваемом случае требования к точности измерений невелики и они относительно легко обеспечиваются без специальных усложняющих схему мероприятий; и погрешности, вызываемые изменением параметров канала связи, а также внешними помехами.

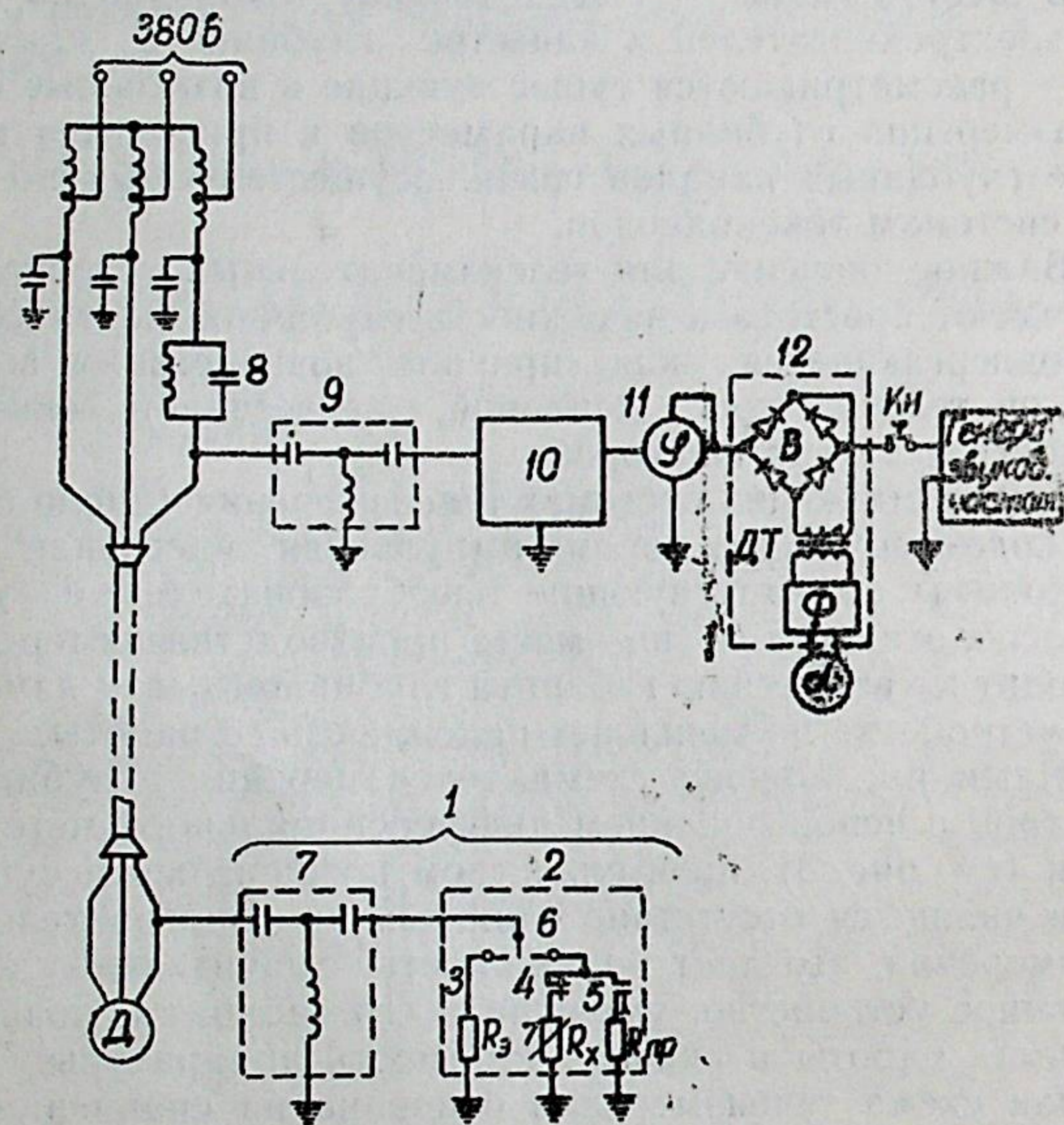


Рис. 3

1—глубинное устройство, 2—модулятор, 3—Эталонное сопротивление (R_3), 4—сопротивление измерительного датчика (R_x), 5—контрольное сопротивление ($R_{пр}$), 6—вибропереключатель, 7—присоединительный фильтр, 7—заградительный фильтр, 10—фазосдвигающее устройство, 11—фазометр, 12—демодулятор

Влияние измерения параметров канала связи представляется возможным скорректировать, а внешние помехи в зна-

чительной мере устраняются в результате действия переключающих устройств, помещенных в наземной и глубинной частях, работающих синхронно.

Представляется перспективным исследование возможности замены системы синхронного детектирования соответствующими параметрическими устройствами.

Предложенная схема телеизмерения глубинных параметров апробирована как в лабораторных, так и в промышленных условиях и показала хорошие результаты.

С целью определения параметров отдельных узлов предложенной телеизмерительной системы были исследованы каналы связи с периодически меняющейся нагрузкой, для чего в качестве исходных были использованы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 \cdot i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 \cdot u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (27)$$

где u , i — мгновенные значения напряжения и тока в точке, находящейся на расстоянии x от начала линии.

Вначале рассматривается случай, когда нагрузка в конце линии представляет собой активное сопротивление и изменяется по закону

$$R_{н} = R_0 [1 + m \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha)] , \quad (28)$$

где $m = \frac{\Delta R}{R_0}$ — глубина модуляции; Ω — угловая скорость изменения сопротивления.

Были получены следующие системы рекуррентных уравнений для определения отдельных гармоник токов и напряжений:

$$\begin{aligned} (\dot{U}_1)_k &= (R_0 \cdot \text{ch} \gamma_k \cdot l + Z_{ск} \cdot \text{sh} \gamma_k \cdot l) (\dot{I}_2)_k + \\ &+ \left[\frac{\dot{m}}{2} (\dot{I}_2)_{k-1} + \frac{\dot{m}^*}{2} (\dot{I}_2)_{k+1} \right] R_0 \cdot \text{ch} \gamma_k \cdot l \\ (\dot{I}_1)_k &= \left(\frac{R_0}{Z_{ск}} \cdot \text{sh} \gamma_k \cdot l + \text{ch} \gamma_k \cdot l \right) \cdot (\dot{I}_2)_k + \\ &+ \left[\frac{\dot{m}}{2} (\dot{I}_2)_{k-1} + \frac{\dot{m}^*}{2} (\dot{I}_2)_{k+1} \right] \cdot \frac{R_0}{Z_{ск}} \cdot \text{sh} \gamma_k \cdot l \end{aligned}$$

где $Z_{ck} = \sqrt{\frac{r_0 + j(\omega + k\Omega) \cdot L_0}{g_0 + j(\omega + k\Omega) \cdot C_0}}$ — волновое сопротивление

k -й гармоники; $\gamma_k = \sqrt{[r_0 + j(\omega + k\Omega) L_0] [g_0 + j(\omega + k\Omega) C_0]}$ — коэффициент распространения k -й гармоники; $(\dot{U}_1)_k$, $(\dot{I}_1)_k$ и $(\dot{U}_2)_k$, $(\dot{I}_2)_k$ — соответственно комплексы эффективных значений напряжения тока k -й гармоники в начале и в конце линии.

Предлагаемая методика расчета может быть применена как при любом характере и различных законах изменения во времени сопротивления нагрузки линий с распределенными параметрами, так и при любом характере изменения приложенного напряжения.

Отличительной особенностью глубинных каналов связи является то, что у них погонные электрические параметры изменяются с изменением глубины скважины. Исследование таких неоднородных линий ведется нами на основе теории четырехполюсников. При этом для определения зависимости постоянных четырехполюсников от расстояния составлены следующие дифференциальные уравнения:

$$\begin{aligned} -\frac{dA(x)}{dy} &= a(x) \cdot C(x) \\ -\frac{dB(x)}{dy} &= a(x) \cdot D(x) \\ -\frac{dC(x)}{dy} &= A(x) \\ -\frac{dD(x)}{dy} &= B(x) \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$a(x) = \frac{Z_0(x)}{Y_0(x)}; \quad \int_0^x Y_0(x) dx = y.$$

Пользуясь системой уравнений (29), можно вывести уравнение, связывающее коэффициенты четырехполюсника между собой, т. е.

$$A(x) \cdot D(x) - B(x) \cdot C(x) = 1,$$

что является подтверждением справедливости полученных исходных дифференциальных уравнений (29).

Исходя из того, что в ряде случаев при расчете и исследовании неоднородных длинных линий задаются величиной и характером их входного сопротивления, можно составить еще одно уравнение, а именно:

$$\rho(x) = \frac{A(x) Z_2 + B(x)}{C(x) Z_2 + D(x)}.$$

В зависимости от значения функций все практически возможные случаи неоднородных длинных линий разделены на несколько категорий. В частности, доказывается, что в случае, когда $a(x) = \text{const}$, неоднородная длинная линия может быть заменена симметричным четырехполюсником. Для некоторых остальных значений функций $a(x)$ в работе приведены формулы для определения коэффициентов эквивалентного четырехполюсника.

В случае, когда нагрузка изменяется во времени по периодическому закону, в качестве исходных дифференциальных уравнений для определения коэффициентов эквивалентного четырехполюсника для k -й гармоники пользуются уравнениями (29). При этом коэффициенты уравнения отличаются тем, что в них вместо ω участвует $\omega + k\Omega$.

С учетом этих замечаний устанавливаются связи между отдельными гармониками напряжения и токов начала и конца линии для случая, когда нагрузка меняется по закону (28), следующими рекуррентными уравнениями:

$$\begin{aligned} (\dot{U}_1)_k &= [A_k(x) \cdot R_0 + B_k(x)] \cdot \dot{I}_{2k} + \\ &+ A_k(x) \cdot R_0 \left[\frac{m}{2} (\dot{I}_2)_{k-1} + \frac{m}{2} (\dot{I}_2)_{k+1} \right] \\ (\dot{I}_1)_k &= [C_k(x) \cdot R_0 + D_k(x)] \cdot \dot{I}_{2k} + \\ &+ C_k(x) \cdot R_0 \left[\frac{m}{2} (\dot{I}_2)_{k-1} + \frac{m}{2} (\dot{I}_2)_{k+1} \right] \end{aligned} \quad (30)$$

На основе полученных уравнений (30) в работе дается схема замещения четырехполюсника при периодически меняющейся нагрузке.

Далее приводятся исследования канала связи при периодически меняющейся нагрузке с учетом влияния других проводов кабеля. Сначала рассматривается случай, когда сопротивление нагрузки не зависит от времени. При этом глубинный канал связи рассматривается как трехфазная цепь с несимметричными распределенными параметрами. Нами исходные дифференциальные уравнения решаются в общем виде, а затем полученные зависимости применяются для ряда частных случаев, в том числе для глубинного канала связи, осуществляемого по системе токопровода ДПТ.

Учитывая, что на вход трехфазной линии с несимметричными распределенными параметрами подключен источник синусоидальной э. д. с., составляем следующие дифференциальные уравнения для фазовых напряжений и токов:

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_a}{dx} &= (r_a + j\omega L_a) \cdot \dot{I}_a + j\omega M_{ab} \cdot \dot{I}_b + j\omega M_{ac} \cdot \dot{I}_c, \\ -\frac{d\dot{U}_b}{dx} &= (r_b + j\omega L_b) \cdot \dot{I}_b + j\omega M_{ab} \cdot \dot{I}_a + j\omega M_{bc} \cdot \dot{I}_c, \\ -\frac{d\dot{U}_c}{dx} &= (r_c + j\omega L_c) \cdot \dot{I}_c + j\omega M_{ac} \cdot \dot{I}_a + j\omega M_{bc} \cdot \dot{I}_b, \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} -\frac{d\dot{I}_a}{dx} &= (g_{ab} + j\omega C_{ab}) \cdot \dot{U}_{ab} + (g_{ac} + j\omega C_{ac}) \cdot \dot{U}_{ac} \\ -\frac{d\dot{I}_b}{dx} &= (g_{ab} + j\omega C_{ab}) \cdot \dot{U}_{ab} + (g_{bc} + j\omega C_{bc}) \cdot \dot{U}_{bc} \\ -\frac{d\dot{I}_c}{dx} &= (g_{ac} + j\omega C_{ac}) \cdot \dot{U}_{ca} + (g_{bc} + j\omega C_{bc}) \cdot \dot{U}_{cb} \end{aligned}$$

где $r_a, r_b, r_c, L_a, L_b, L_c$ — активные сопротивления и индуктивности соответствующих фаз; $M_{ab}, M_{bc}, M_{ca}, g_{ab}, g_{bc}, g_{ca}, C_{ab}, C_{bc}, C_{ca}$ — междуфазные взаимоиנדуктивность, проводимость и емкость.

Решением системы этих уравнений находятся выражения токов и напряжений в общем виде. В случае передачи сигналов по системе «два провода—колонна труб» уравнения токов и напряжений принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a_2} &= \dot{I}_{a_1} \cdot \text{ch} \gamma_1 \cdot l + \frac{Y_{12}}{\gamma_1} (2\dot{U}_{ab_1} + \dot{U}_{bc_1}) \cdot \text{sh} \gamma_1 \cdot l \\ \dot{I}_{b_2} &= \left(\frac{\dot{I}_{a_1}}{\kappa_2} + \dot{I}_{b_1} \right) \cdot \text{ch} \gamma_2 \cdot l + \\ &+ \frac{(Y_{11} + \kappa_2 \cdot Y_{21}) \cdot \dot{U}_{ab_1} + (Y_{12} + \kappa_2 \cdot Y_{22}) \cdot \dot{U}_{bc_1}}{\kappa_2 \cdot \gamma_2} \cdot \text{sh} \gamma_2 \cdot l - \\ &- \frac{\dot{I}_{a_1}}{\kappa_2} \cdot \text{ch} \gamma_1 \cdot l - \frac{Y_{11} \cdot \dot{U}_{ab_1} + Y_{12} \cdot \dot{U}_{bc_1}}{\kappa_2 \cdot \gamma_1} \cdot \text{sh} \gamma_1 \cdot l \\ \dot{U}_{ab_2} &= \frac{Y_{12} + \kappa_2 \cdot Y_{22}}{\kappa_2 (Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21} \cdot Y_{12})} \times \\ &\times \left[\dot{I}_{a_1} \cdot \gamma_1 \cdot \text{sh} \gamma_1 \cdot l + (Y_{11} \cdot \dot{U}_{ab_1} + Y_{12} \cdot \dot{U}_{bc_1}) \times \right. \\ &\times \left. \text{ch} \gamma_1 \cdot l \right] - \frac{Y_{12}}{\kappa_2 (Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21} \cdot Y_{12})} \left\{ \dot{I}_{a_1} + \gamma_2 \cdot \text{sh} \gamma_2 \cdot l + \right. \\ &\left. + [(Y_{11} + \kappa_2 Y_{21}) \cdot \dot{U}_{ab_1} + (Y_{12} + \kappa_2 Y_{22}) \cdot \dot{U}_{bc_1}] \cdot \text{ch} \gamma_2 \cdot l \right\} \\ \dot{U}_{bc_2} &= \frac{Y_{11}}{\kappa_2 (Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21} \cdot Y_{12})} \left\{ (\dot{I}_{a_1} + \kappa_2 \cdot \dot{I}_{b_1}) \cdot \gamma_2 \cdot \text{sh} \gamma_2 \cdot l + \right. \\ &\left. + [(Y_{11} + \kappa_2 Y_{21}) \cdot \dot{U}_{ab_1} + (Y_{12} + \kappa_2 Y_{22}) \cdot \dot{U}_{bc_1}] \cdot \text{ch} \gamma_2 \cdot l - \right. \\ &\left. - \frac{Y_{11} + \kappa_2 \cdot Y_{22}}{\kappa_2 (Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21} \cdot Y_{12})} [\dot{I}_{a_1} \cdot \gamma_1 \cdot \text{sh} \gamma_1 \cdot l - \right. \\ &\left. - (Y_{11} \cdot \dot{U}_{ab_1} + Y_{12} \cdot \dot{U}_{bc_1}) \cdot \text{ch} \gamma_1 \cdot l] \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

где

$$\gamma_{11} = \sqrt{Y_{11} \cdot Z_{11} + Y_{12} \cdot Z_{21}}; \quad \gamma_{12} = \sqrt{Y_{11} \cdot Z_{12} + Z_{12} \cdot Z_{22}};$$

$$\gamma_{21} = \sqrt{Y_{21} \cdot Z_{11} + Y_{22} \cdot Z_{21}}; \quad \gamma_{22} = \sqrt{Y_{21} \cdot Z_{12} + Y_{22} \cdot Z_{22}};$$

$$\gamma_1^2 = \gamma_{11}^2 + \kappa_1 \cdot \gamma_{21}^2; \quad \gamma_2^2 = \gamma_{11}^2 + \kappa_2 \cdot \gamma_{21}^2;$$

$$\kappa_1 = \frac{-(\gamma_{11}^2 - \gamma_{22}^2) + \sqrt{(\gamma_{11}^2 - \gamma_{22}^2)^2 + 4\gamma_{21}^2 \cdot \gamma_{12}^2}}{2 \cdot \gamma_{21}^2};$$

$$\kappa_2 = \frac{-(\gamma_{11}^2 - \gamma_{22}^2) - \sqrt{(\gamma_{11}^2 - \gamma_{22}^2)^2 + 4\gamma_{21}^2 \gamma_{12}^2}}{2\gamma_{21}^2}$$

$$Y_{11} = -(g_{ab} + g_{ac} + j\omega(C_{ab} + C_{bc}));$$

$$Y_{12} = -(g_{ac} + j\omega C_{ac});$$

$$Y_{21} = (g_{ab} + j\omega C_{ab});$$

$$Y_{22} = -(g_{bc} + j\omega C_{bc});$$

$$Z_{11} = -[r_a + j\omega(L_a - M_{ab} - M_{ac} + M_{bc})];$$

$$Z_{12} = [r_b + j\omega(L_b - M_{ab} + M_{ac} - M_{bc})];$$

$$Z_{21} = -[r_c + j\omega(L_c + M_{ab} - M_{ac} - M_{bc})];$$

$$Z_{22} = -[r_b + r_c + j\omega(L_b + L_c - 2M_{bc})].$$

Если сопротивление нагрузки изменяется по гармоническому закону, то для установления связи между отдельными гармониками токов и напряжений в начале и в конце канала связи получают следующие рекуррентные уравнения:

$$(\dot{U}_{ab})_k = a_k (I_{a_1})_k + b_k \left[\frac{m}{2} (I_{a_2})_{k-1} + \frac{m}{2} (I_{a_2})_{k+1} \right]$$

$$(I_{a_1})_k = c_k (I_{a_2})_k + d_k \left[\frac{m}{2} (I_{a_2})_{k-1} + \frac{m}{2} (I_{a_2})_{k+1} \right] \quad (33)$$

где $a_k = A_k \cdot R_0 + B_k; \quad c_k = C_k \cdot R_0 + D_k;$

$$b_k = A_k \cdot R_0; \quad d_k = C_k \cdot R_0;$$

$$A_k = \frac{1}{\kappa_{2k}(Y_k - 2Y_{22k})} \left\{ \frac{3}{2} (\kappa_{2k} \cdot Y_{22k} - Y_k) \cdot \text{ch} \gamma_{1k} \cdot l + \right.$$

$$\left. + [\kappa_{2k} \cdot (2Y_k - Y_{22k}) - Y_k] \cdot \text{ch} \gamma_{2k} \cdot l \right\};$$

$$B_k = \frac{1}{\kappa_{2k}(Y_k - 2Y_{22k})} \left[\kappa_{2k} \frac{Y_{22k}}{Y_k} - 1 \right] \cdot \gamma_{1k} \cdot \text{sh} \gamma_{1k} \cdot l - \gamma_{2k} \cdot \text{sh} \gamma_{2k} \cdot l;$$

$$C_k = \frac{3}{2} \cdot \frac{Y_k}{\gamma_{1k}} \cdot \text{sh} \gamma_{1k} \cdot l, \quad D_k = \text{ch} \gamma_{1k} \cdot l;$$

$$Y_k = [g_{кт} + j(\omega + \kappa\Omega)C_{кт}].$$

Выводы, сделанные на основе проведенных исследований, расчетов и обобщений, даются по каждой главе и в конце работы.

В работе прилагаются акты промышленных испытаний системы ДПТ и предложенного устройства для измерения глубинных параметров.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании результатов проведенных исследовательских работ предложены соответствующие расчетные формулы, при помощи которых определяются параметры линейных элементов различных систем токоподводов, находящихся в условиях скважины, учитывающие характер их изменения с изменением глубины скважины.

2. Предложен метод определения дополнительного сопротивления, возникающего в системах токоподводов ДПТ и ОПТ за счет потери мощности в среде, окружающей кабель. Результаты расчета показали, что активное сопротивление при промышленной частоте для жилы кабеля электробура увеличивается на 3%, а для жилы кабеля погружного центробежного электронасоса — на 7%; индуктивное сопротивление соответственно уменьшается на такую же величину.

3. Установлено, что при использовании колонны бурильных труб электробура в системах токоподводов ДПТ и ОПТ окружающая среда — промывочная жидкость и обсадная труба — практически не оказывают шунтирующего влияния на их активное и внутреннее индуктивное сопротивления, а величина рабочего индуктивного сопротивления колонны бурильных труб будет зависеть от состава исходящего потока промывочной жидкости.

4. Предложен метод экспериментального определения электрических параметров колонны труб в условиях скважины, при помощи которого определялись электрические параметры нелинейных элементов токоподвода ДПТ и ОПТ.

5. Предлагается метод исследования нелинейных несимметричных трехфазных цепей, который, в частности, был применен при анализе режима работы системы токоподвода ДПТ.

6. Сравнение потерь мощности в различных системах токоподводов погружных электродвигателей показало следующее:

а) в системах токоподводов с использованием колонны труб потери мощности зависят от частоты. С уменьшением частоты потери мощности уменьшаются;

б) для существующих нагрузок ПЭД потери мощности при 50 гц в токоподводе ДПТ погружного центробежного

электронасоса больше, чем в системе трехжильного кабеля, а в случае электробура указанные потери в обеих системах почти одинаковы;

в) в системе токоподвода ОПТ как в случае электробура, так и в случае погружного центробежного электронасоса потери мощности больше, чем в других системах токоподводов.

7. Проведенные эксперименты показали, что система токоподвода ДПТ, с точки зрения изоляции и распределения токов в фазах, может применяться для питания серийно выпускаемых погружных электродвигателей, предназначенных для бурения и для эксплуатации нефтяных скважин. Использование колонны труб для передачи электрической энергии к забойным электродвигателям способствует уменьшению вероятности нарушения нормальной работы токоподводов.

8. На основе технико-экономических исследований установлено, что целесообразность применения системы токоподвода ДПТ для погружных центробежных электронасосов в основном связана с мощностью установки, размерами насосных труб и глубиной их подвески. Применение данной системы способствует повышению технико-экономических показателей скважин, эксплуатируемых погружными центробежными электронасосами.

9. С применением вычислительной техники проведены исследования переходных процессов, возникающих как при симметричных, так и при несимметричных системах токоподводов погружных центробежных электронасосов. В результате установлено, что в процессе запуска погружных электродвигателей по системе ДПТ при соответствующем несимметричном напряжении на устье скважины отличия переходных токов в фазах невелики, что подтверждается данными экспериментов.

10. Предлагается метод исследования асинхронных двигателей при пульсирующей нагрузке, который рекомендуется использовать для определения величины тока в токоподводе и исследования на устойчивость ПЭД электробура.

11. Предлагается устройство для телеизмерения глубинных параметров с использованием дифференциально-модуляционной системы, которое отличается от существующих отсутствием преобразователя в местах измерения, что дает возможность упростить глубинное устройство.

12. Проведено исследование токоподвода как глубинного канала связи с учетом взаимного влияния, возникающего между отдельными элементами фаз токоподвода.

13. Предложена методика исследования цепей с распределенными параметрами с периодически меняющейся нагрузкой, при помощи которой выведены основные расчетные формулы для определения характерных параметров предложенной схемы.

14. Выводятся исходные дифференциальные уравнения для исследования неоднородных цепей с распределенными параметрами, которые вполне приемлемы при исследованиях глубинных каналов связи.

Основные положения диссертационной работы были доложены на научных конференциях профессорско-преподавательского состава и на конференциях, посвященных важнейшим проблемным работам Азербайджанского института нефти и химии им. М. Азизбекова в 1957—1968 гг.; на XI и XVI научных конференциях профессорско-преподавательского состава технических вузов Закавказья (Баку, 1963, 1967 гг.); на межвузовской конференции по теории и практике применения автоматики, телемеханики, радиоэлектроники и энергетики в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности (Москва, 1966 г.).

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Некоторые вопросы исследования токоподводов к электробуру. Труды АЗИИ им. М. Азизбекова, вып. XX, 1958.

2. Исследование системы токоподводов к погружным центробежным электронасосам, АНХ, № 7, 1958.

3. О характере изменения сопротивления токоподводов погружных электродвигателей. «Энергетический бюллетень», № 9, 1958 (в соавторстве с Погорельским А. М.).

4. Исследование системы токоподводов электробура. АНХ, № 8, 1960.

5. Трехфазные цепи с несимметричными распределенными параметрами. «Энергетика», № 11, 1960 (в соавторстве с Ельяшевичем З. Б., Кязим-заде З. И.).

6. Выравнивание неравномерно-нагруженной трехфазной сети на нефтяных промыслах. АНХ, № 12, 1960 (в соавторстве с Кязим-заде З. И.).

7. Исследование параметров каротажного кабеля при помощи четырехполюсников. АНХ, № 10, 1961 (в соавторстве с Зейналовой М. К.).

8. Условия самозапуска асинхронных двигателей при индивидуальной компенсации их реактивных нагрузок. ЗТП, № 6, 1963 (в соавторстве с Кулизаде К. Н., Хайкиным И. Е.).

9. Влияние индивидуальной компенсации реактивных нагрузок на характер процессов при самозапуске электродвигателей. Аннотации докладов XI научной конференции профессорско-преподавательского состава технич. вузов Закавказья, 1963 (в соавторстве с Кулизаде К. Н., Хайкиным И. Е.).

10. Построение температурного графика промывочной жидкости в бурящейся скважине. АНХ, № 14, 1963 (в соавторстве с Погорельским А. М.).

11. Методика определения электрических параметров колонны труб в условиях скважины. «Ученые записки» АЗИНЕФТЕХИМа, IX серия, № 2, 1964.

12. Расчет каналов связи с периодически изменяющейся нагрузкой для нефтепромысловых глубинных измерительных устройств. «Нефть и газ», № 1, 1964.

13. Установка для телеизмерения глубинных параметров скважин. Авторское свидетельство № В473, 1964.

14. Исследование режимов работы асинхронных двигателей при пульсирующей нагрузке. «Ученые записки» АЗИНЕФТЕХИМа, IX серия, № 3, 1964 (в соавторстве с Бабасвым А. З.).

15. К исследованию электрических параметров колонны труб электробура в условиях скважины. АНХ, № 12, 1966 (в соавторстве с Касумбековым И. С., Мамедовой З. М.).

16. К исследованию глубинных каналов связи в бурящихся и эксплуатационных нефтяных скважинах. «Нефть и газ», № 11, 1965.

17. Применение метода симметричных составляющих к расчету нелинейных несимметричных трехфазных цепей. ЗТП, № 11, 1966.

18. К исследованию электрических параметров глубинных каналов связи. «Ученые записки» АЗИНЕФТЕХИМа, серия IX, № 1, 1967 (в соавторстве с Кязим-заде З. И., Ельяшевичем З. Б., Спириным П. А., Мирзоевым Р. М., Мамедовым А. А.).

19. Определение активного сопротивления жилы кабеля электробура в условиях скважины. «Нефть и газ», № 3, 1967 (в соавторстве с Погорельским А. М.).

20. Автоматическое управление и энергетика установок нефтяной и газовой промышленности, гл. XI. ВНИИОЭНГ, 1967.

21. Технико-экономическая эффективность применения различных систем токоподводов погружных центробежных электронасосов. ЗТП, № 7, 1967.

22. К исследованию глубинных каналов связи при эксплуатации скважин погружными электронасосами. ЗТП, № 1, 1968 (в соавторстве с Мамедовым А. А.).