

УДК 622.692.4:621.67.001.5

**Е.В. Вязунов**, канд. техн. наук, с.н.с., главный специалист отдела математического моделирования;**А.Ф. Бархатов**, инженер 1-й категории отдела математического моделирования,

ОАО «Гипротрубопровод» (Москва), аспирант Томского политехнического университета

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ НПС МОЩНОСТИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ДАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЧРП

*Рассматривается зависимость потребляемой насосными агрегатами станции электроэнергии от создаваемого напора при частотном регулировании с помощью преобразователя частоты (ПЧ). Приводится методика расчета минимальной потребляемой насосными агрегатами мощности при заданной подаче в зависимости от напора станции (функции Джефферсона) с учетом КПД всех элементов привода (ПЧ, мультипликатор, электродвигатель). Функция минимального расхода электроэнергии от напора станции в зависимости от подачи может определяться в связанной области или в нескольких непересекающихся областях. Использование функций Джефферсона существенно упрощает поиск глобального минимума энергозатрат на перекачку по участку нефтепровода с произвольным числом станций. [1]*

**Ключевые слова:** насос, преобразователь частоты, КПД, оптимизация энергозатрат.

## ВВЕДЕНИЕ

В 2011 г. издержки на электроэнергию по системе ОАО «АК «Транснефть» составили 8–39%, в среднем по системе – 20%. Снижение электропотребления при транспорте нефти является одним из пунктов Государственной программы РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики». [2]

Расход электроэнергии зависит от технологического режима работы магистрального нефтепровода (МН), который задается количеством включенных насосов на станции и уставками САР давления, реологическими свойствами нефти, эффективным диаметром МН, неравномерностью перекачки. Режим перекачки в течение планируемого периода не остается постоянным по причинам:

- неравномерности поставок нефти от грузоотправителей, перераспределения грузопотоков по сети нефтепроводов;
- изменения реологических свойств нефти, эффективного диаметра;
- аварий, ремонтных и диагностических работ.

Регулирование давлений на НПС осуществляется комбинированным способом: ступенчатое регулирование (изменение набора работающих насосов на станции, отличающихся, например, диаметрами рабочих колес) и плавное регулирование (дросселирование или изменение частоты вращения ротора). Наиболее распространенным способом плавного регулирования является дросселирование. Дросселирование приводит к безвозвратным потерям напора станции. Как правило, дросселирование происходит на режимах, отличных от проектных (максимальных), на проектных режимах дросселирование отсутствует или минимально и дроссель полностью открыт.

В последнее время все большее распространение находит регулирование давления с использованием частотно-регулируемых приводов (ЧРП) насосов. ЧРП состоит из электродвигателя, ПЧ, мультипликатора (при необходимости) и вспомогательных систем. ПЧ изменяет частоту вращения ротора

электродвигателя и насоса. Характеристика насоса изменяется в диапазоне от максимальной относительной частоты ротора  $x_{\max}$  до минимальной  $x_{\min}$  (рис. 1), где относительная частота вращения ротора  $x$  – это отношение текущей частоты вращения к номинальной частоте. При этом максимальный КПД насоса уменьшается на 1–2%. КПД современных ПЧ лежит в диапазоне от 96,5 до 98,5% [3]. В системе ОАО «АК «Транснефть» ЧРП оснащены насосы ТС ВСТО-I.

Обзор литературы свидетельствует о том, что имеется достаточно большое количество работ, связанных с оптимизацией перекачки при регулировании с помощью дросселирования потока [4–7] и оптимизацией за счет замены узла дросселирования на насосы с ЧРП при продолжительной работе МН на режимах с частым и глубоким дросселированием [8–11]. Оптимизация работы станции, оборудованной насосными агрегатами с ПЧ, частично рассмотрена в [1].

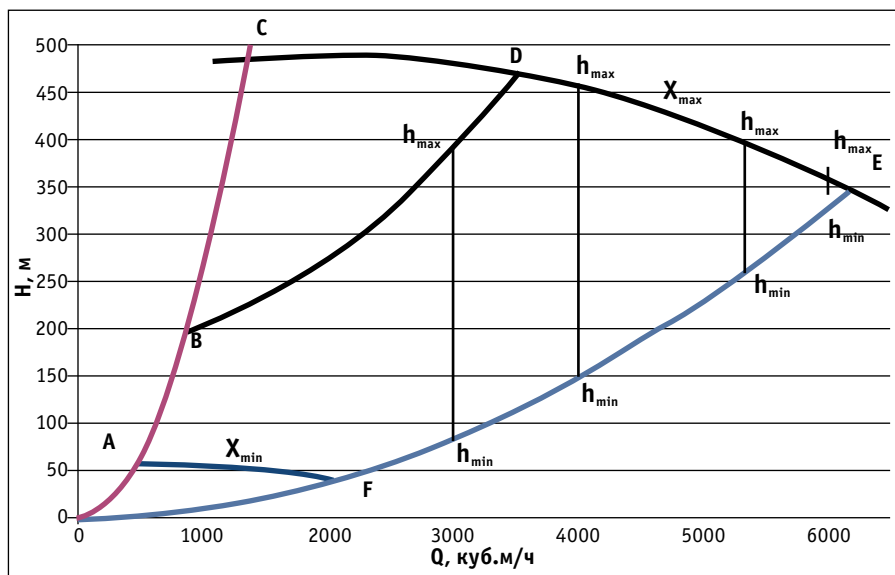


Рис. 1. Поле насоса (фигура ACEF) [1]

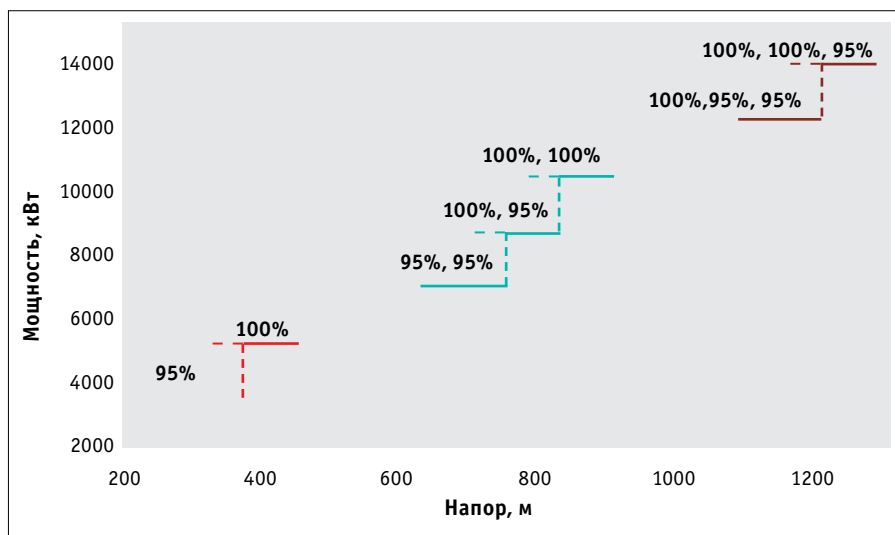


Рис. 2. Функция Джефферсона при регулировании дросселированием и выбором комбинации включенных насосов  $Q = 4000 \text{ м}^3/\text{ч}$  [1]

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Цель настоящей работы – построить функцию минимального энергопотребления станции при частотном регулировании давления для заданной производительности с учетом КПД насоса и элементов привода (мультипликатора (при наличии), электродвигателя, ПЧ).

**Оптимизация потребляемой НПС мощности при дросселировании [1]**

Методика выбора оптимального (по энергозатратам) режима перекачки при заданной производительности достаточно хорошо разработана [4–6] для случая регулирования давления методом дросселирования потока.

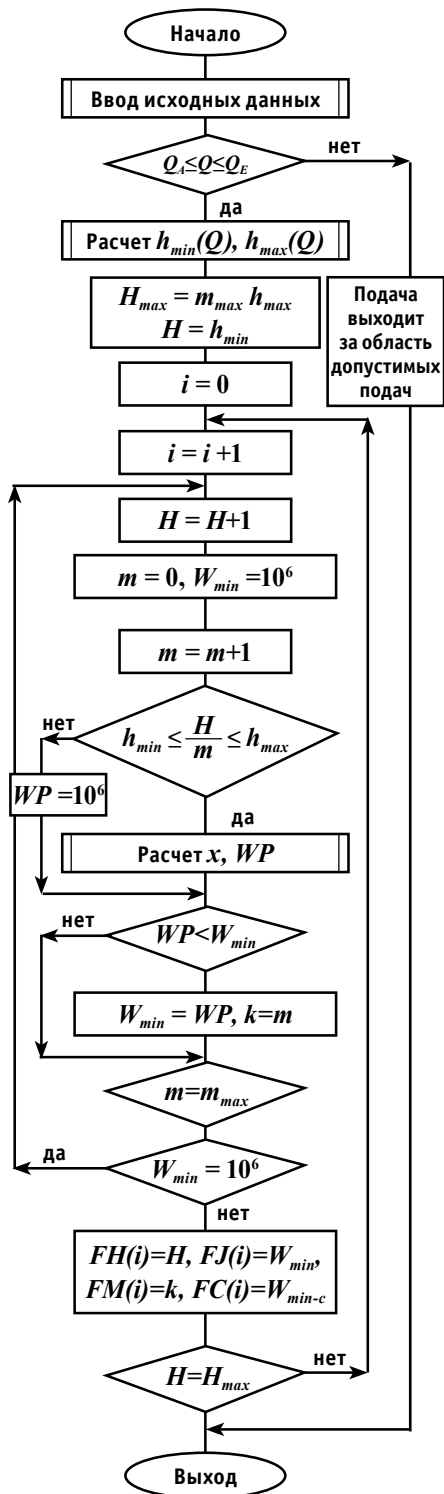
Подлежащий минимизации функционал в этой задаче представляет собой сумму энергозатрат по всем станциям МН. Джефферсон [4] для каждой станции, на которой регулирование давления осуществляется дросселированием потока, рассматривает функцию минимальных энергозатрат на перекачку от создаваемого станцией напора при заданной подаче насосов. Использование функций Джефферсона позволяет существенно упростить многошаговую процедуру динамического программирования при поиске глобального минимума расхода электроэнергии при перекачке продукта по технологическому участку МН с несколькими НПС. Вид функции

Джефферсона для станции, на которой из четырех последовательно соединенных насосов имеется две пары насосов с разными характеристиками (в одной паре наружный диаметр рабочего колеса  $D_2 = 100\%$ , а в другой паре –  $D_2 = 95\%$ ), показан на рисунке 2. Поскольку при фиксированной подаче мощность насоса (и агрегата в целом) не зависит от величины дросселируемого напора, функция имеет вид горизонтальных отрезков, ограниченных справа максимальным суммарным напором, развиваемым насосами комбинации при данной подаче, а слева – максимально допустимой величиной дросселирования. Для каждой комбинации включенных насосов работа при максимальном напоре означает отсутствие дросселирования и является оптимальной. Количество таких отрезков равно числу возможных комбинаций включения насосов. Так, если все насосы на станции одинаковые, то при трех рабочих насосах таких комбинаций будет в общем случае четыре: включено 0 насосов, 1 насос, 2 насоса, 3 насоса. Если на станции все насосы различные, например имеют разные внешние диаметры рабочих колес, то таких комбинаций 15. Область всех возможных напоров может не быть связанной областью. При одном и том же напоре потребляемые мощности разных комбинаций в общем случае различны, поэтому функция Джефферсона определяется как мощность комбинации насосов с минимальным потреблением электроэнергии при заданном напоре. В [7] показано, как строится функция Джефферсона для выбора оптимальных диаметров рабочих колес насосов на нефтепроводе. [1]

**Оптимизация потребляемой НПС мощности при частотном регулировании давления**

Определить минимальное энергопотребление НПС возможно, построив функцию Джефферсона при регулировании с помощью ПЧ при заданной производительности НПС.

Введем следующие обозначения: [1]  
 $Q$  – подача насоса (производительность перекачки),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;



**Рис. 3. Блок-схема построения функции минимального энергопотребления для частотного регулирования давления**

$\rho$  – плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $n$  – текущая частота вращения рабочего колеса насоса, об./мин.;  
 $n_0$  – оптимальная частота вращения рабочего колеса насоса, об./мин.;  
 $x = n/n_0$  – относительная частота вращения рабочего колеса насоса;

$h$  – напор насоса, м;  
 $h_{min}(Q), h_{max}(Q)$  – минимальный и максимальный напоры насоса, определяемые полем насоса, м;  
 $H$  – напор станции, м;  
 $a_i$  – коэффициенты аппроксимации напорной характеристики при частоте вращения  $n_0, i=0, L$ ;  
 $L$  – степень полинома, сглаживающего напорную характеристику насоса (в расчетах принято  $L=2$ );  
 $m$  – число включенных на станции насосов;  
 $m_{max}$  – максимальное число включаемых насосов на станции (в расчетах принято  $m_{max}=3$ );  
 $W_n(n, Q)$  – мощность насоса, кВт;  
 $W_0$  – номинальная мощность двигателя, кВт;  
 $c$  – стоимость электроэнергии на НПС, руб./кВт·ч.  
 Тогда задачу можно сформулировать следующим образом: при заданных значениях напора станции  $H$  и подачи насосов  $Q$  определить количество включенных насосов  $m$  и частоту вращения рабочего колеса насоса  $n$ , при которых потребляемая всеми включенными агрегатами мощность  $F$  принимает минимальное значение:  $F = \min \{m W_n(n, Q)\}$  при ограничениях на число насосов и напор каждого насоса:

$$\begin{cases} 0 \leq m \leq m_{max}; h = \frac{H}{m}; \\ h_{min}(Q) \leq h \leq h_{max}(Q) \end{cases} \quad (1)$$

Порядок расчета целевой функции  $F$  следующий.

После ввода и проверки (заданная производительность должна быть в пределах подач, допускаемых полем насоса) (рис. 3) исходных данных выполняются следующие процедуры:

1. Определяются ограничения на напор насоса  $h_{min}(Q)$  и  $h_{max}(Q)$ , в соответствии с рисунком 1. Максимальный напор станции определяется как  $H_{max} = m_{max} \cdot h_{max}$ , первоначальное значение напора станции присваивается  $h_{min}$ .
2. Формируется таблица значений возможных напоров станции  $FH(j)$ , где  $j$  – номер строки в таблице, с шагом

$1 \cdot m^*$  начиная с  $h_{min}$  до тех пор, пока напор станции не достигнет своего максимального значения  $H_{max}$ . Для каждого значения  $H$  по выполнению соотношений (1) проверяется возможность включения  $m$  насосов ( $m=1, m_{max}$ ).

Если соотношения не выполняются, то значению мощности комбинации включенных насосов присваивается заведомо недостижимая величина (код недостоверности), например  $10^6$  кВт, и выполняется проверка для следующего значения  $m$ .

3. Если соотношения (1) выполняются, то определяется относительная частота вращения рабочего колеса насоса  $x$  как решение уравнения [12]

$$h(Q, x) = \sum_{i=0}^L a_i \cdot Q^i \cdot x^{2-i} \quad (2)$$

Рассчитывается суммарная мощность  $m$  насосных агрегатов в соответствии с указаниями, приведенными в таблице 1, и определяется число включенных агрегатов  $k$ , при котором суммарная потребляемая мощность принимает минимальное значение. Минимальное значение мощности записывается в массив  $FJ(j)$ , а число насосов  $k$  – в массив  $FM(j)$ , минимальное значение мощности умножается на стоимость электроэнергии и записывается в массив  $FC(j)$ . Осуществляется переход к следующему значению напора станции, и номер строки массивов  $FH, FJ, FC$  и  $FM$  увеличивается на 1.

4. Если минимальное значение мощности для всех значений  $m$  равно коду недостоверности, т.е. соотношения (1) не выполняются, то осуществляется переход к следующему значению напора станции без изменения номера строки  $j$ .

Сформированные таким образом массивы  $FH, FJ, FC$  и  $FM$  представляют таблицу функций Джефферсона – зависимость минимальной суммарной мощности  $FJ$  насосных агрегатов станции и числа включенных насосов  $FM$  от напора станции.

Формула (3) для расчета КПД электродвигателя получена по результатам

\* Возможен другой шаг, при соответствующем изменении формулы для расчета  $H_{max}$ .

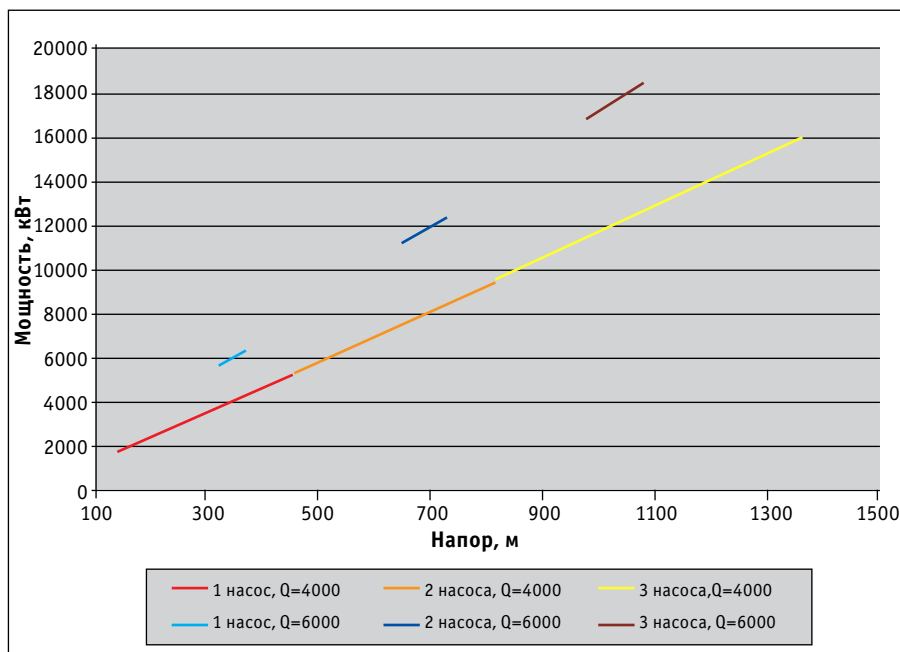


Рис. 4. Функция Джефферсона при регулировании с помощью ЧП, Q = 4000 и Q = 6000 м³/ч [1]

Таблица. Расчет мощности насосного агрегата с ПЧ [1]

Показатель	Насос с мультипликатором и ЧП
КПД насоса, $\eta_n(Q, n)$	В соответствии с методикой, изложенной в [12]
Мощность насоса, $W_n$	$W_n = \frac{Q \cdot h \cdot \rho \cdot g}{3600 \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}$
Нагрузка двигателя, $W_{нд}$	$W_{нд} = \frac{W_n}{\eta_{мульти}}$
КПД двигателя, $\eta_{дв}$	$\eta_{дв} = -0,0006 \cdot \left(\frac{W_{нд}}{W_0}\right)^2 + 0,1116 \cdot \frac{W_{нд}}{W_0} + 93,6023$
Мощность включенных агрегатов, $m \cdot W(n, Q)$	$m \cdot W(n, Q) = \frac{m \cdot W_{нд}}{\eta_{дв} \cdot \eta_{ЧП}}$

обработки данных, предоставленных изготовителем двигателя. КПД мультипликатора  $\eta_{мульти}$  принят равным 99,1%, КПД ЧП  $\eta_{ЧП}$  – 98%. В таблицу записываются найденные значения  $H, m \cdot W, n$ . [1]

**Результаты расчетов**

По изложенной методике была разработана программа для расчета минимального энергопотребления НПС при заданной производительности для случая регулирования давления изменением частоты вращения колеса насоса с помощью ЧРП для различных подач. Некоторые из функций представлены на рисунке 4. Функ-

ции Джефферсона на данном рисунке обозначены жирными линиями. Тонкие линии показывают возможные, но не оптимальные режимы. Рисунки подтверждают, что в зависимости от подачи насосов область определения функции Джефферсона может быть связанной областью или представлять собой несколько не пересекающихся друг с другом областей. Располагая такими функциями для НПС конкретного технологического участка, можно рассчитывать оптимальные режимы перекачки по этому участку. [1] Разработанные алгоритмы могут быть использованы при оптимизации режимов ТС ВСТО-I.

**ВЫВОДЫ**

1. Разработана методика оптимизации потребляемой насосной станцией электроэнергии (выбора оптимальной комбинации включаемых насосов) при заданной подаче насосов. Использование зависимости минимальной потребляемой мощности от создаваемого станцией напора с учетом различной стоимости электроэнергии на разных станциях позволяет существенно упростить определение оптимального режима технологического участка.
2. При больших подачах минимальная потребляемая мощность не является непрерывной функцией от напора станции. [1]
3. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при оптимизации режимов ТС ВСТО-I.
4. Разработана программа для расчета минимума энергопотребления НПС при регулировании с помощью ЧРП.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Вязунов Е.В., Бархатов А.Ф. Оптимизация потребляемой НПС мощности при различных способах регулирования // Трубопроводный транспорт [теория и практика]. – 2013. – № 4. – С. 4–7.
2. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» // Министерство энергетики Российской Федерации. – 2013. – URL: <http://minenergo.gov.ru> (дата обращения – 20.05.2013).
3. Лазарев Г.И. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. – 2007. – № 3. – С. 41–48.
4. Jefferson J.T. Shell Pipe Line calls it Dynamic Programing. It's proving effective as a means of optimizing power on crude-oil pipeline // The Oil and gas Journal. – 1961. – Vol. 59. – № 19. – P. 102–107.
5. Шилин Ю.И. Выбор оптимального управления магистральным нефтепроводом в режиме «из насоса в насос» // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – ВНИИОЭНГ, 1965. – № 10. – С. 3–5.
6. Вязунов Е.В. Расчет оптимального режима перекачки по магистральному трубопроводу при регулировании методом дросселирования потока // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – ВНИИОЭНГ. – 1969. – № 12. – С. 7–9.
7. Вязунов Е.В. Определение оптимальных характеристик насосных агрегатов магистральных трубопроводов // Транспорт и

- хранение нефти и нефтепродуктов. – ВНИИОЭНГ, 1968. – № 5. – С. 10–13.
8. Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Анализ коэффициента полезного действия магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов при использовании частотно регулируемого электропривода в функции регуляторов давления // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 324–333.
  9. Щербань А.И., Борисов К.А., Ахиярtdинов Э.М. К вопросу разработки технологии транспорта нефтепродуктов на основе регулирования частоты вращения переключающих насосных агрегатов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2007. – № 6. – С. 7–10.
  10. Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия агрегатов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2011. – № 6. – С. 24–29.
  11. Шабанов В.А., Павлова З.Х., Калимгулов А.Р. О влиянии частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на цикличность нагружения трубопровода // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2012. – № 5. – С. 23–30.
  12. Вязунов Е.В., Путин С.В. Аналитическое представление характеристик центробежных насосов при переменной частоте вращения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 4. – С. 67–69.

## Pumps

**Ye.V. Vyazunov**, PhD in engineering, senior research associate, chief specialists of the mathematical modeling department; **A.F. Barkhatov**, engineer (category 1) of the mathematical modeling department, Giprotuboprovod OJSC (Moscow), Postgraduate of Tomsk Polytechnic University

### Reducing the level of consumed power by adjusting pressure with VFD

*Dependence of electric power consumed by the station pump units on the head generated under frequency control by means of frequency transformer (FT) is considered. Methods for calculation of minimum power consumed by pump units under pre-defined supply depending on the pump station head (Jefferson functions) with due regard to all the driver elements efficiency (FT, multiplier, electric motor) are given. Function of minimum electric power consumption dependence on the pump station head depending on supply can be defined in connected domain or in several non-overlapping domains. Application of Jefferson function significantly facilitates search for global minimum of energy consumption for pumping through pipeline section with arbitrary number of stations.*

**Keywords:** pump, frequency transformer, efficiency, optimization of energy consumption.

#### References:

1. Vyazunov E.V., Barkhatov A.F. Optimizatsiya potrebyaemoi NPS motshnosti pri razlichnykh sposobakh regulirovaniya (Reducing the level of pump station power consumption in different control modes) // Pipeline Transport [theory and practice]. – 2013. – No. 4. – Pp. 4–7.
2. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoi Federatsii «Energoeffektivnost' I razvitie energetiki» (Government program of the Russian Federation titled Energy Efficiency and Development of Power Industry) // Ministry of Energy of the Russian Federation. – 2013. – URL: <http://minenergo.gov.ru> (date of visit – 20.05.2013).
3. Lazarev G.I. Chastotno-reguliruemyyi elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok – effektivnaya tekhnologiya energo- i resursoberezheniya na teplovykh elektrostantsiyakh (Frequency controlled electric drive of pump and ventilation installations – efficient technology of energy and resources saving at thermal power plants) // Power electronics. – 2007. – No. 3. – P. 41–48.
4. Jefferson J.T. Shell Pipe Line calls it Dynamic Programming. It's proving effective as a means of optimizing power on crude-oil pipeline // The Oil and Gas Journal. – 1961. – Vol. 59. – No. 19. – P. 102–107.
5. Shilin Yu.I. Vybór optimal'nogo upravleniya magistral'nykh nefteprovodom v rezhime «iz nasosa v nasos» (Selection of optimal control over trunk pipeline for pump to pump mode) // Oil and oil products transportation and storage. – VNIIOENG, 1965. – No. 10. – P. 3–5.
6. Vyazunov Ye.V. Raschet optimal'nogo rezhima perekachki po magistral'nomu truboprovodu pri regulirovanii metodom drosselirovaniya potoka (Calculation of optimal mode of pumping through trunk pipeline by flow throttling regulation method) // Oil and oil products transportation and storage. – VNIIOENG. – 1969. – No. 12. – P. 7–9.
7. Vyazunov Ye.V. Opredelenie optimal'nykh kharakteristik nasosnykh agregatov magistral'nykh truboprovodov (Definition of optimal characteristics of trunk pipelines pumping units) // Oil and oil products transportation and storage. – VNIIOENG, 1968. – No. 5. – P. 10–13.
8. Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F. Analiz koeffitsienta poleznogo deistviya magistral'nykh nasosov ekspluatiruemyykh nefteprovodom pri ispol'zovanii chastotno reguliruemogo elektroprivoda v funktsii regulyatorov davleniya (Analysis of efficiency of the operated oil pipelines trunk pumps when using frequency controlled electric drive as pressure controllers) // Oil and gas business: electronic scientific journal. – 2013. – No. 1. – P. 324–333.
9. Scherban A.I., Borisov K.A., Akhiyartdinov E.M. K voprosu razrabotki tekhnologii transporta nefteproduktov na osnove regulirovaniya chastoty vratsheniya perekachivayutshikh nasosnykh agregatov (Development of oil products transportation technology on the basis of pumping units rotation frequency control) // Oil products transportation and storage. – 2007. – No. 6. – P. 7–10.
10. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Pavlova Z.Kh. Otsenka effektivnosti chastotnogo regulirovaniya magistral'nykh nasosov po ekvivalentnomu koeffitsientu poleznogo deistviya agregatov (Evaluation of trunk pumps frequency control performance by the units' equivalent efficiency) // Oil and gas business: electronic scientific journal. – 2011. – No. 6. – P. 24–29.
11. Shabanov V.A., Pavlova Z.Kh., Kalimgulov A.R. O vliyaniy chastotno-reguliruemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na tsiklichnost' nagruzheniya truboprovoda (On effect of the trunk pumps frequency controlled electric drive on the pipeline load cycle) // Oil and gas business: electronic scientific journal. – 2012. – No. 5. – P. 23–30.
12. Vyazunov Ye.V., Putin S.V. Analiticheskoe predstavlenie kharakteristik tsentrobezhnykh nasosov pri peremennoi chastote vratsheniya (Analytical representation of centrifugal pumps characteristics under variable rotation frequency) // Science and technology of oil products transportation by pipelines. – 2012. – No. 4. – P. 67–69.



# АРМ ГАРАНТ



## Электроприводы ЭВИМТА

для задвижек  
Ду 50 - 1200 мм



## Пневмоприводы ПСДС для шаровых

кранов Ду 300 - 1000 мм

**Монтажные,  
пусконаладочные,  
ремонтные работы**  
на объектах нефтегазового  
комплекса



на правах рекламы

**450059, г. Уфа, ул. Р. Зорге, 35**  
**тел./факс: (347) 223-74-15, 223-74-17**  
**e-mail: [armgarant@ufamail.ru](mailto:armgarant@ufamail.ru)**  
**[www.armgarant.ru](http://www.armgarant.ru)**