

УДК 621.313; 621.316

## ТРЕБОВАНИЯ К СТУПЕНИ СНИЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ

Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет  
e-mail: ShabanovVAI@yandex.ru*

**Аннотация.** *Исследуется ступенчатое снижение частоты питающего напряжения при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов на нефтеперекачивающих станциях. Рассмотрено формирование волн давления в нефтепроводе при ступенчатом снижении частоты. Получены условия, при выполнении которых ступенчатое снижение частоты не приводит к появлению опасных для трубопровода волн повышения давления. Приведены аналитические выражения для определения максимально допустимой степени снижения частоты.*

**Ключевые слова:** *частотно-регулируемый электропривод, степень частотного регулирования, магистральный насос, нефтеперекачивающая станция, нефтепровод*

В последние годы частотно-регулируемый электропривод (ЧРЭП) активно проникает во все отрасли промышленности. Главные достоинства применения ЧРЭП для магистральных насосов (МН) трубопроводного транспорта нефти – это экономичность и возможность снижения волн давления в нефтепроводах при переходе от одного режима перекачки к другому [1, 2, 3]. Снижение волн давления в трубопроводе при частотном регулировании зависит от скорости и диапазона изменения частоты напряжения, подводимого к обмотке статора электродвигателя МН. Очевидно, что величина допустимого диапазона изменения частоты будет зависеть от скорости ее изменения. Наименьшее значение допустимого диапазона изменения частоты будет при ступенчатом изменении. В статье рассматриваются условия, при которых ступенчатое снижение частоты питающего напряжения не приводит к появлению опасных для трубопровода волн повышения давления. Фрагмент трубопровода из трех нефтеперекачивающих насосных станций НС1, НС2 и НС3 приведен на рис. 1.

Частотно-регулируемый электродвигатель ЭД насосной станции НС2 получает питание от электрической сети через преобразователь частоты (ПЧ). Электродвигатель и МН образуют магистральный насосный агрегат (МНА). При ступенчатом снижении частоты  $f$  напряжения на выходе ПЧ вследствие снижения частоты вращения МН на насосной станции НС2 происходит снижение пропускной способности насоса, что по характеру возмущения равносильно частичному перекрытию сечения потока. При этом в трубопроводе против потока в сторону предыдущей станции НС1 распространяется волна повышения давления, а по ходу потока к НС3 – волна понижения давления [4, 5, 6]. Распространяясь по

трубопроводу, волны «накладываются» на имеющееся рабочее давление, суммируясь с ним.

Наибольшие волны давления возникают при отключении МНА. При этом скорость вращения насоса на НС2 плавно снижается по кривой 1 на рис. 2, форма которой определяется инерционными свойствами вращающихся частей МНА. При этом давление на приеме насоса  $P_{вх2}$  растет по кривой 2 и волна давления достигает своего максимального значения  $\Delta p_m$  [7].

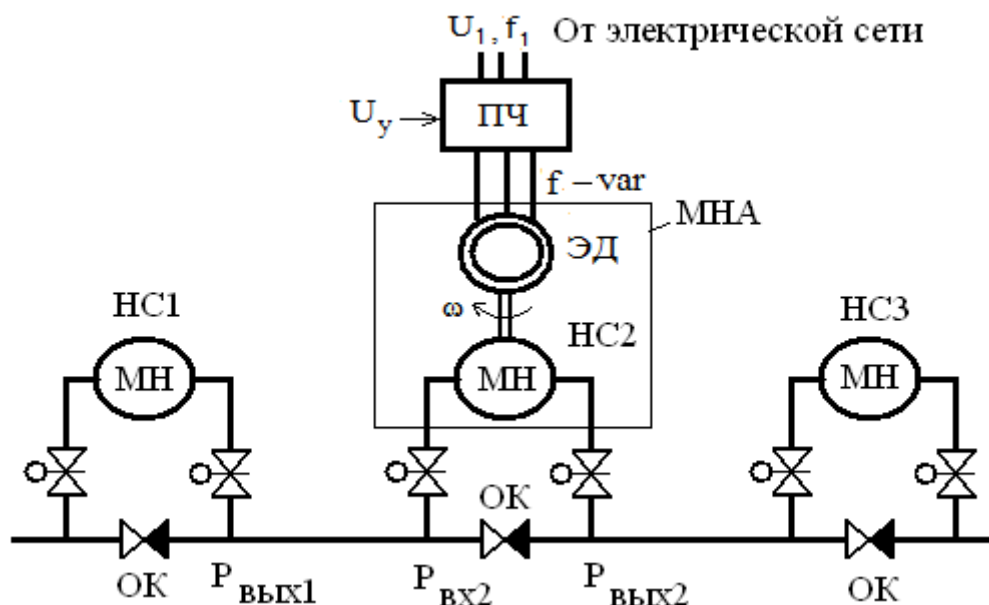


Рис. 1. Трубопровод с ЧРЭП на насосной станции НС2

Для привода МН на нефтеперекачивающих станциях широко применяются синхронные двигатели серии СТД с номинальным числом оборотов 3000 об/мин. При таком синхронном электроприводе угловая частота вращения МН  $\omega$  и частота  $f$  напряжения на выходе ПЧ связаны соотношением

$$f = 2\pi\omega. \quad (1)$$

В обвязке каждого МН в трубопроводе устанавливается обратный клапан ОК (рис. 1). В рабочем режиме обратный клапан закрыт. При снижении частоты вращения насоса до некоторого значения  $\omega_{ОК}$  обратный клапан открывается, и насос перестает участвовать в процессе перекачки жидкости по нефтепроводу. Это происходит при частоте питающего напряжения на выходе ПЧ  $f_{ОК} = 2\pi\omega_{ОК}$ .

Если степень частотного регулирования будет равна или больше, чем  $\Delta f < 50 - f_{ОК}$ , то амплитуда волны повышения давления достигает своего максимального значения  $\Delta p_m$ . При  $\Delta f = 50 - f_{ОК}$  изменение частоты вращения МНА будет происходить по кривой 3. При этом амплитуда волны давления будет такой же, как и при отключении электродвигателя МН от сети (кривая 4). Поэтому для снижения амплитуды волны давления степень частотного регулирования должна удовлетворять условию  $\Delta f_{НАИБ} < 50 - f_{ОК}$ .

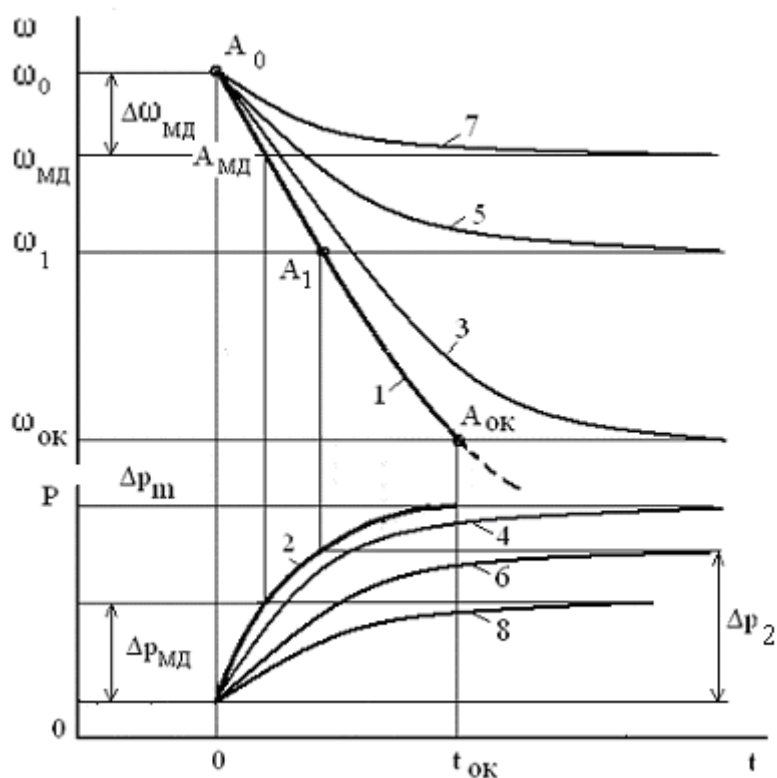


Рис. 2. Изменение частоты и давлений:

1, 3, 5, 7 – изменение частоты вращения насоса;  
2, 4, 6, 8 – изменение давления на входе насоса

При ступенчатом снижении частоты на величину  $\Delta f < \Delta f_{\text{НАИБ}}$  до некоторого значения  $f_1 < f_{\text{OK}}$  формирование фронта волны давления заканчивается при снижении частоты вращения насоса до нового установившегося значения  $\omega_1$ . Происходит это по кривой 5, а фронт волны давления при этом формируется в соответствии с кривой 6. Амплитуда волны  $\Delta p_2$  на входе насосной станции НС2 будет при этом меньше максимально возможной  $\Delta p_m$ .

Возникшая волна давления амплитудой  $\Delta p_2$  перемещается вдоль трубопровода от насосной станции НС2 к насосной станции НС1, расстояние между которыми равно  $L$ . Вследствие сопротивления, которое оказывают распространяющейся волне инерция потока жидкости и жесткость стенок трубопровода, волна затухает, амплитуда ее снижается, а фронт волны давления постепенно сглаживается (рис. 3). При этом, чем больше расстояние « $x$ » проходит волна давления, тем меньше ее амплитуда (прямая 4) и тем положе фронт волны (кривые 1, 2 и 3). К моменту прихода волны к предыдущей насосной станции НС1 ее амплитуда снизится до значения  $\Delta p_1$ . Разность амплитуд волны давления в начале и конце участка трубопровода между насосными станциями

$$\Delta p_{12} = \Delta p_2 - \Delta p_1 \quad (2)$$

представляет собой затухание амплитуды волны в трубопроводе.

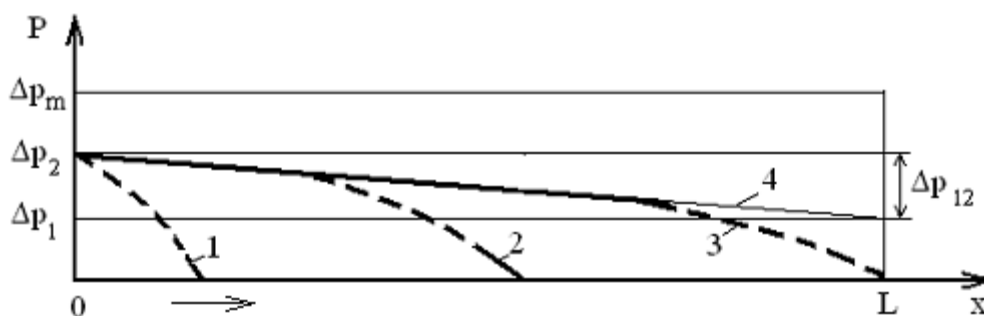


Рис. 3. Изменение амплитуды волны в процессе движения от НС2 к НС1

Чем меньше степень регулирования частоты  $\Delta f$  на выходе ПЧ, тем меньше будет амплитуда волны давления  $\Delta p_2$  в месте ее возникновения и тем меньше будет амплитуда волны давления  $\Delta p_1$  на выходе предыдущей насосной станции. При постоянном затухании амплитуды волны в трубопроводе прямая 4 при изменении значения  $\Delta p_2$  будет перемещаться параллельно самой себе. При некотором значении степени снижения частоты амплитуда волны давления на выходе предыдущей насосной станции  $\Delta p_1$  станет равной нулю. Это означает, что волна давления в процессе ее движения к предыдущей станции полностью затухла. В соответствии с рис. 3 и выражением (2) амплитуда волны давления в месте ее возникновения для этого случая

$$\Delta p_2 = \Delta p_{12}. \quad (3)$$

На рис. 4 показано давление в трубопроводе (прямая 2), полученное наложением волнового давления с начальной амплитудой по выражению (3) на рабочее давление (прямая 1), которое было в трубопроводе до возникновения волны.

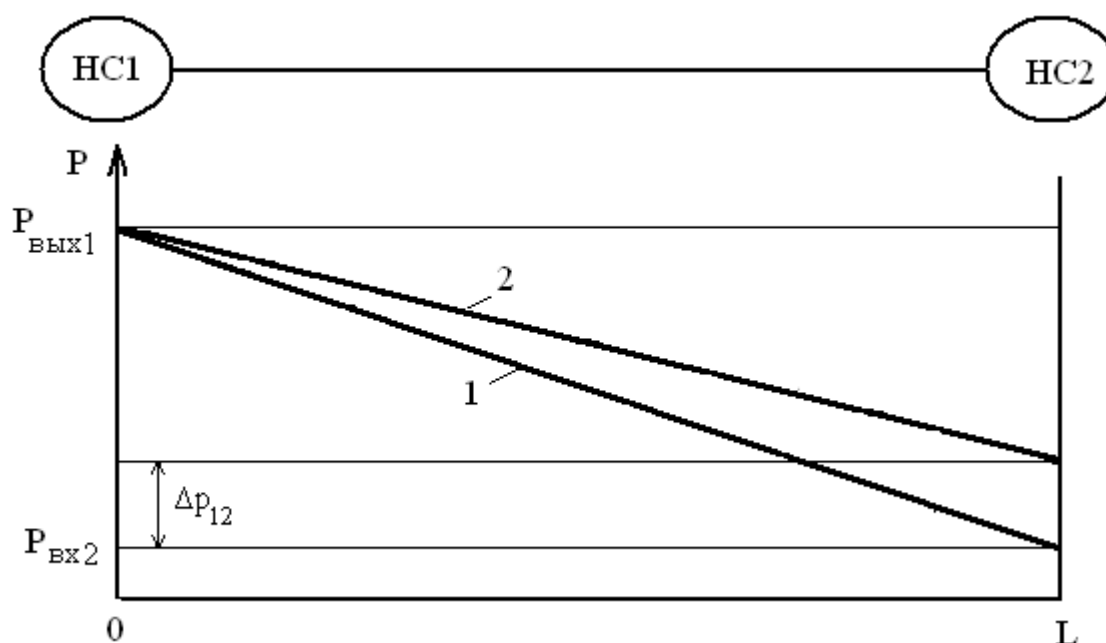


Рис. 4. Распределение давления на участке НС1 - НС2

Из рис. 4 видно, что наибольшее давление в трубопроводе не превышает давления  $P_{\text{вых1}}$  на выходе станции НС1 в установившемся режиме. При этом волна давления при частотном регулировании на насосной станции НС2 не приведет к опасному повышению давления в трубопроводе. Следовательно, значение  $\Delta p_{12}$  может быть принято за максимально допустимое значение амплитуды волны давления  $\Delta p_{\text{МД}}$  при ступенчатом регулировании частоты на выходе ПЧ при ЧРЭП МН

$$\Delta p_{\text{МД}} = \Delta p_{12} . \quad (4)$$

Снижение амплитуды волны давления в процессе ее движения к предыдущей насосной станции можно представить в виде

$$\Delta p_{12} = k_3 \cdot L , \quad (5)$$

где  $k_3$  – снижение (затухание) амплитуды волны давления на единицу длины.

Максимально допустимому значению амплитуды волны давления  $\Delta p_{\text{МД}}$  соответствует снижение частоты вращения насоса до значения  $\omega_{\text{МД}}$  (рис. 2). При этом максимально допустимая степень изменения частоты на выходе ПЧ будет

$$\Delta f_{\text{МД}} = 2\pi \cdot \Delta \omega_{\text{МД}} . \quad (6)$$

При ступенчатом изменении частоты на выходе ПЧ на максимально-допустимое значение  $\Delta f_{\text{МД}}$  скорость вращения МН будет изменяться по кривой 7 на рис. 2, а давление на входе НС2 – по кривой 8. Изменение давления на входе насоса, потерявшего питание, также происходит с той же постоянной времени, что и изменение частоты вращения МН [7, 8]. Поэтому справедливо соотношение

$$\Delta p_{\text{МД}} / \Delta p_m = \Delta \omega_{\text{МД}} / \omega_{\text{нач}} = \Delta f_{\text{МД}} / f_{\text{нач}} ,$$

где  $\omega_{\text{нач}}$  и  $f_{\text{нач}}$  – начальные значения частоты вращения МН и частоты питающего напряжения до начала регулирования.

При известном значении максимально допустимой амплитуды волны давления для максимально допустимой степени частоты получаем

$$\Delta f_{\text{МД}} = f_{\text{нач}} \cdot \Delta p_{\text{МД}} / \Delta p_m . \quad (7)$$

Таким образом, при ЧРЭП МН нефтепроводов степень регулирования частоты не должна превышать значений, вычисленных по выражению (7), в котором значение максимально допустимой амплитуды волны давления определяется по выражениям (4) и (5). При этом волна давления в трубопроводе, образовавшаяся при ступенчатом снижении частоты на выходе ПЧ, к моменту прихода к предыдущей станции полностью затухнет и не приведет к опасному повышению давления.

*При подготовке статьи использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по комплексному проекту «Разработка и организация серийного производства мощных высоковольтных частотно-регулируемых приводов (ВЧРП)» (договор №13.G25.31.0060)*

### Литература

1. Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. № 8. С. 11-14.
2. Сокол Е.И., Бару А.Ю., Шинднес Ю.Л., Лукпанов Ш.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов МН // Электротехника. 2004. №7. С. 52 - 57.
3. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС. Уфа: изд-во УГНТУ, 2010. 63 с.
4. Зайцев Л.А., Ясинский Г.С. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1980. 187 с.
5. Коршак А.А., Нечваль А.М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа: учеб. для вузов. Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2001. 571 с.
6. Трубопроводный транспорт нефти и газа. Под ред. Юфина В.А. М.: Недра, 1978. 407 с.
7. Ротте А.Э., Кокоринов В.Ф., Шериязданов Ф.М., Лебедич Ф.М. Исследование процесса останковки центробежного насосного агрегата // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1970. № 9. С. 5 - 10.
8. Перевощиков С.И. Изменение подачи и давления перекачивающих станций при их отключении // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1981. № 12. С. 3 - 4.

## REQUIREMENTS FOR STEPS OF REDUCING FREQUENCY OF ELECTRIC MAIN PUMP

V.A. Shabanov, O.V. Kabargina, Z.H. Pavlova

*Ufa state petroleum technological university*

*e-mail: ShabanovVAI@yandex.ru*

**Abstract.** *Range of frequency control of main pumps of oil pumping stations is considered. Wave form pressure in pipelines and basic requirements to the: variable-frequency electric drives are resulted. Mathematical expressions for maximal range of frequency control of main pumps are given.*

**Keywords:** *variable-frequency drive, range of frequency control, main pump, oil pumping station, pipeline*

### References

1. Tumanskii A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistral'nym truboprovodam s perekachivayushchimi stantsiyami, oborudovannymi chastotno-reguliruемым приводом (Optimization of pumping through pipelines with pumping stations equipped with variable frequency drive). *Transport i khranenie nefteproduktov*, 2005, Issue 8, pp. 11-14.
2. Sokol E.I., Baru A.Yu., Shindnes Yu.L., Lukpanov Sh.K. Opyt razrabotki i vnedreniya preobrazovatelei chastoty dlya reguliruемого электропривода насосных агрегатов MN (Experience of design and implementation of frequency converters for variable speed electric drive of oil pipeline main pumps). *Elektrotehnika*, 2004, Issue 7, pp. 52 - 57.
3. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Perspektivy ispol'zovaniya chastotno-reguliruемого электропривода магистрал'nykh насосов на NPS (Prospects for using variable-frequency electric drives of main pumps at pumping station). Ufa: UGNTU, 2010. 63 p.
4. Zaitsev L.A., Yasinskii G.S. Regulirovanie rezhimov magistral'nykh nefteprovodo (Control of main oil pipelines). Moscow: Nedra, 1980. 187 p.
5. Korshak A.A., Nechval' A.M. Truboprovodnyi transport nefi, nefteproduktov i gaza: ucheb. dlya vuzov (Oil and gas pipeline transportation. Textbook for high schools). Ufa.: "DizainPoligrafServis", 2001. 571 p.
6. Truboprovodnyj transport nefi i gaza (Oil and gas pipeline transportation) under ed. V.A. Yufin. Moscow: Nedra. 407 p.
7. Rotte A.Je., Kokorinov V.F., Sheriazdanov F.M., Lebedich F.M. Issledovanie processa ostanovki centrobezhnogo насосного агрегата // Transport i hranenie nefi i nefteproduktov (Research of process stopping the centrifugal pump unit). *Transport i hranenie nefi i nefteproduktov*, 1970, Issue 9, pp. 5 - 10.
8. Pervovikov S.I. Izmenenie podachi i davlenija perekachivajuvih stancij pri ih otkljuchenii (Changing the flow rate and pressure of pumping stations when they turn off). *Transport i hranenie nefi i nefteproduktov*, 1981, Issue 12, pp. 3 - 4.