

УДК 621.316; 621.31-83-52; 62-83

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ НА НПС ПРИ НАРУШЕНИЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Шабанов В.А., Гилязов Р.Ф.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*  
*e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru*

**Аннотация.** *Рассматривается поведение частотно-регулируемых магистральных насосных агрегатов нефтеперекачивающих станций при возмущениях в системе электроснабжения. Исследовано влияние частоты питающего напряжения на характер изменения скорости вращения электродвигателей при снижении напряжения в питающей сети. Приведены модели релейной защиты, магистрального насоса и нефтепровода. Показано, что чем ниже частота питающего напряжения, тем меньше относительное изменение скорости вращения двигателя и напора, развиваемого насосом, за время отклонения напряжения, что повышает устойчивость работы электропривода по сравнению с работой на номинальной частоте.*

**Ключевые слова:** *магистральный насос, электродвигатель, частотное регулирование, система электроснабжения, релейная защита, возмущения в системе электроснабжения*

Одной из причин нарушения устойчивой работы нефтеперекачивающих станций (НПС) магистральных нефтепроводов являются возмущения в системе электроснабжения, приводящие к перерывам нормального электроснабжения от одного из внешних источников питания [1 - 3]. При перерывах электроснабжения или глубоких посадках напряжения снижается скорость вращения электродвигателей и центробежных магистральных насосов (МН). При этом в трубопроводе возникают волны давления, которые, распространяясь по трубопроводу, могут привести к отключению отдельных насосных агрегатов или НПС в целом [4]. В последние годы большое внимание уделяется разработке частотно-регулируемых электроприводов МН [5 - 9]. При возмущениях в системе электроснабжения на характер переходных процессов в таком электроприводе влияет режим работы преобразователей частоты и, в первую очередь, частота питающего напряжения. Поэтому представляет интерес исследование переходных процессов в частотно-регулируемом электроприводе при нарушениях электроснабжения или глубоких посадках напряжения в питающей сети.

Электропривод МН является одним из компонентов сложной электротехнической системы, в которую входит система электроснабжения с релейной защитой и автоматикой, преобразователи частоты, электродвигатели, МН и трубопро-

вод [10]. Исследование переходных процессов в таких системах невозможно без математического моделирования. В данной работе электротехнический комплекс рассмотрен как сложная система, в которой выделены две основные подсистемы: подсистема релейной защиты и автоматики (РЗА) и электромеханическая подсистема, реализованные в среде SimPowerSystems пакета MatLab. Комплексная модель подсистемы РЗА представлена на рис. 1.

Модель содержит два независимых источника питания ES1 и ES2; вводные (Q1 и Q2) и секционный (Q3) выключатели; модели двух комплектов защиты минимального напряжения (ЗМН) на реле напряжения, реализованные в блоках  $U_{ab1}$ ,  $U_{bc1}$ ,  $U_{ca1}$  и  $U_{ab2}$ ,  $U_{bc2}$ ,  $U_{ca2}$ ; модель двухступенчатой защиты от потери питания (блоки ЗПП1 и ЗПП2) первой (C1) и второй (C2) секций шин, модель устройства автоматического включения резерва (ABP).

Модели независимых источников питания ES1 и ES2 позволяют имитировать различные режимы потери питания, в том числе: ступенчатое снижение напряжения на заданную величину, линейное или нелинейное изменение напряжения в функции времени с момента потери питания. На рис. 2 показано изменение линейных напряжений  $U_{ab1}$ ,  $U_{bc1}$ ,  $U_{ca1}$  на шинах первой секции шин при исчезновении питания от внешнего источника в момент  $t = 0,5$  с.

В момент времени  $t = 1,2$  с запускается первая ступень защиты минимального напряжения ЗМН-1 и через 0,5 с действует на отключение вводного выключателя Q1 (сигнал  $U_{uQ1}$ ). В результате через 0,5 с срабатывает ABP и подается сигнал  $U_{uQ3}$  на включение секционного выключателя Q3.

Модель электромеханической подсистемы приведена на рис. 3. Модель электромеханической подсистемы содержит модель преобразователя частоты (блоки Universal Bridge1, Universal Bridge2, звено постоянного тока с элементами L1, L2, C1, C2, R)), модель электродвигателя (блок SI Units)), модель магистрального насоса (блоки NMMC и NMHQ) и модель трубопровода (блок TR).

Модель магистрального насоса состоит из двух частей: блока NMMC, в котором реализована модель насоса относительно момента сопротивления на валу приводного двигателя SI Units, и блока NMHQ, в котором реализована модель насоса относительно напора, создаваемого насосом в трубопроводе TR.

Инвертор (Universal Bridge2) управляется ШИМ-генератором импульсов (Discrete PWM Generator). На вход Uref ШИМ-генератора подается трехфазный сигнал, являющийся заданием. Частота и модуль сигнала задания определяют частоту и модуль выходного напряжения (тока) инвертора. Сигнал задания формируется в блоке Subsystem. Структура блока представлена на рис. 4. На вход блока Subsystem подаются значения угловой скорости вращения  $\omega$  с блока omega и амплитуды напряжения с блока mag.

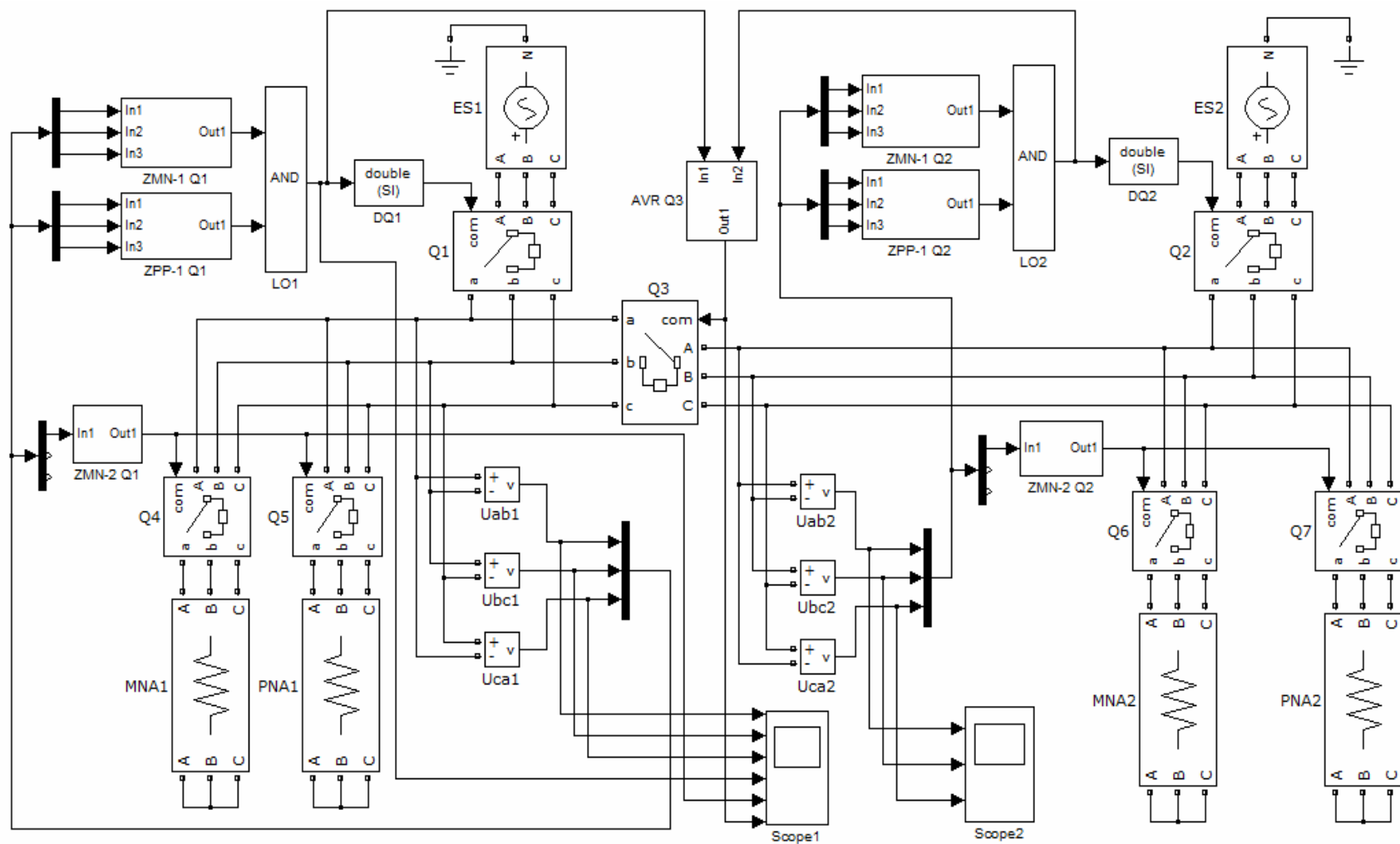


Рис. 1. Модель подсистемы РЗА

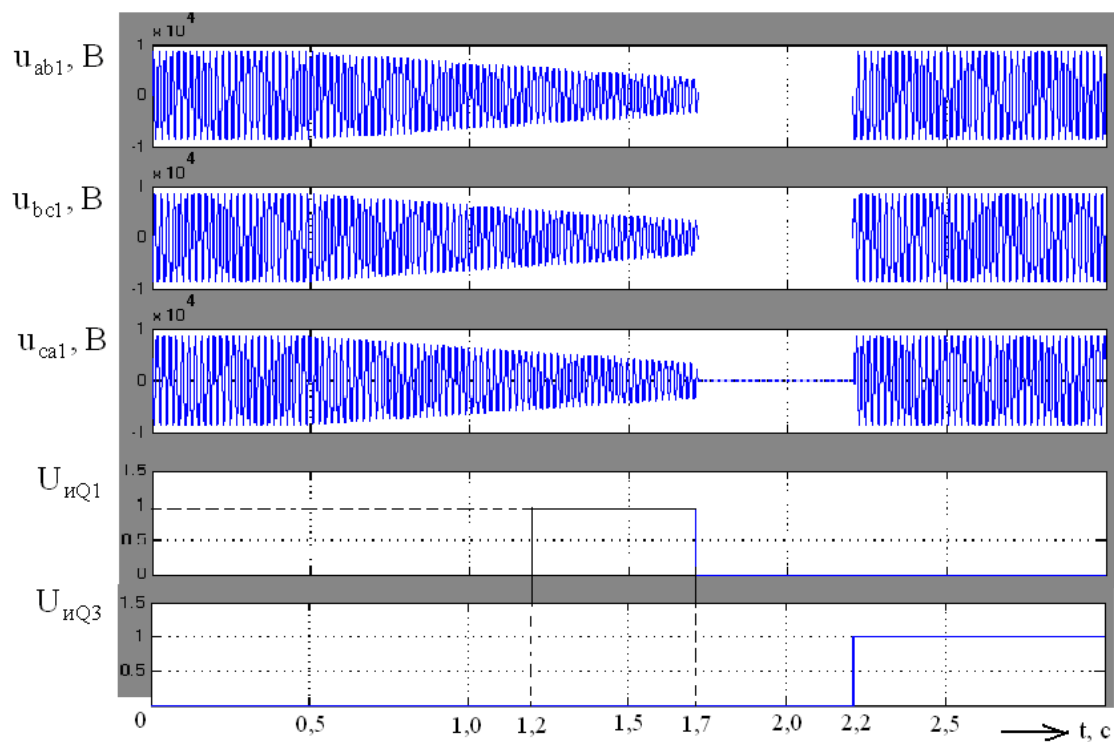


Рис. 2. Диаграммы напряжений при исчезновении питания

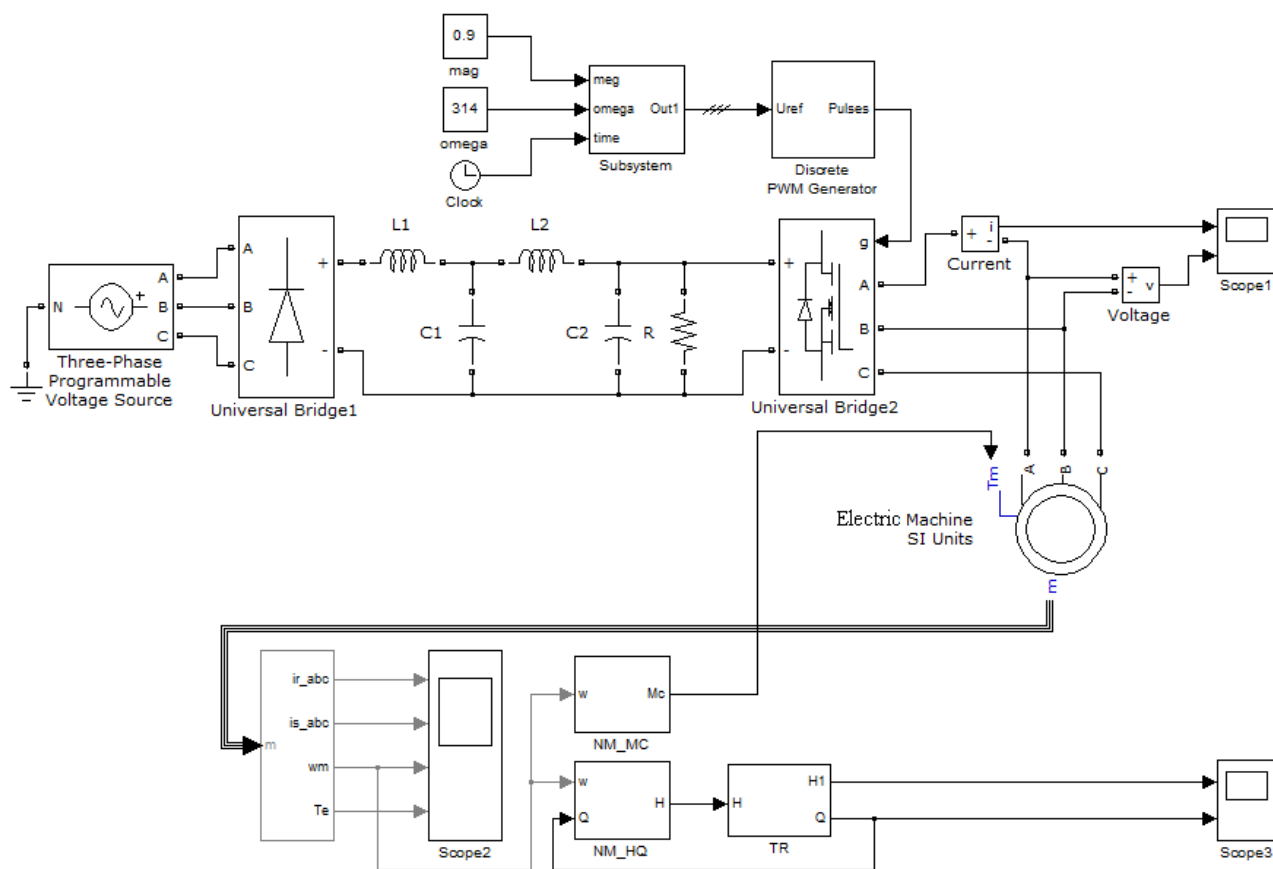


Рис. 3. Модель электропривода МН

Блок Subsystem формирует трехфазную систему напряжений

$$\begin{cases} u_1 = \sin(\omega t); \\ u_2 = \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ u_3 = \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \end{cases}$$

Механическая характеристика магистрального насоса имеет сложную форму с падающим участком [3]. Рабочий участок механической характеристики магистрального насоса может быть описан уравнением:

$$M_C = M_{C0} + (M_{C.ном} - M_{C0}) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2,$$

где  $M_{C0}$  – момент сопротивления в режиме холостого хода;

$M_{C.ном}$  – момент сопротивления при номинальной скорости вращения,

$\omega_{ном}$  – номинальная угловая скорость вращения.

При анализе для насоса НМ 1250-260 было принято:

$$M_{C.ном} = 0,9 \cdot M_{ном} = 0,9 \cdot 5139 = 4625 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{C0} = 0,1 \cdot M_{C.ном} = 0,1 \cdot 5139 = 513,9 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Модель насоса относительно создаваемого им момента сопротивления в среде Simulink пакета MatLab представлена на рис. 4.

Напорная характеристика магистрального насоса задается заводом в виде графиков. В результате аппроксимации заводской характеристики насоса НМ 1250-260 в MS Office Excel 2007 была получена следующая зависимость:

$$H = 315,45 + 0,0045 Q - 4 \cdot 10^{-5} Q^2$$

Параметры нефтепровода, использованные в модели, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трубопровода

Наименование параметра	Значение
Расчетная длина трубопровода $L_p$ , км	304
Разность геодезических отметок $\Delta z$ , м	30
Плотность нефти $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	870
Вязкость нефти $\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	20
Расчетная часовая производительность $Q_n$ , м <sup>3</sup> /ч	1250

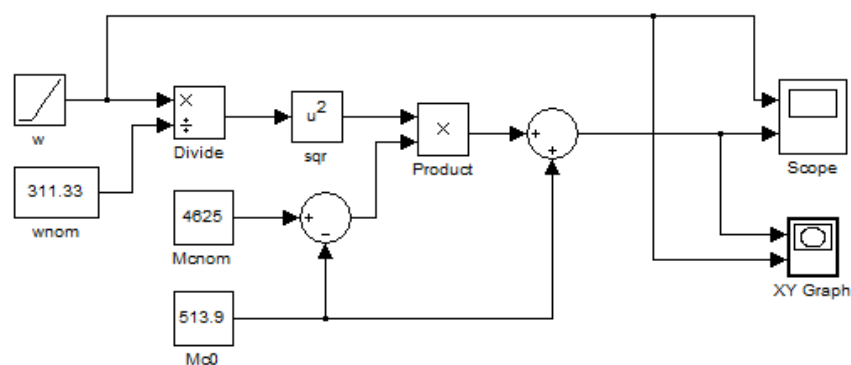


Рис. 4. Модель насоса относительно момента сопротивления

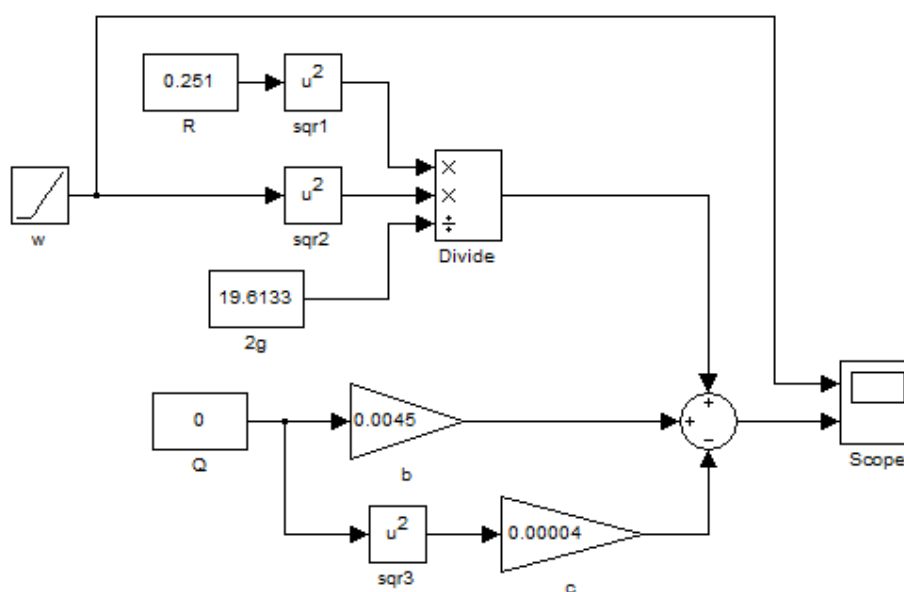


Рис. 5. Модель насоса относительно напора

Напорная характеристика трубопровода описывается выражением

$$H = 1,02 \cdot h_{\tau} + \Delta z + h_{ocm},$$

где 1,02 – коэффициент, учитывающий надбавку на местные сопротивления в линейной части нефтепровода;

$h_{\tau}$  – потери напора на трение, м;

$h_{ocm}$  – остаточный напор в конце эксплуатационного участка;  $h_{ocm} = 40$  м.

В модели трубопровода TR выходным параметром является производительность  $Q$ :

$$Q = \left( \frac{H - 70}{9,283 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,5263}.$$

Модель трубопровода в среде Simulink пакета MatLab представлена на рис. 6.

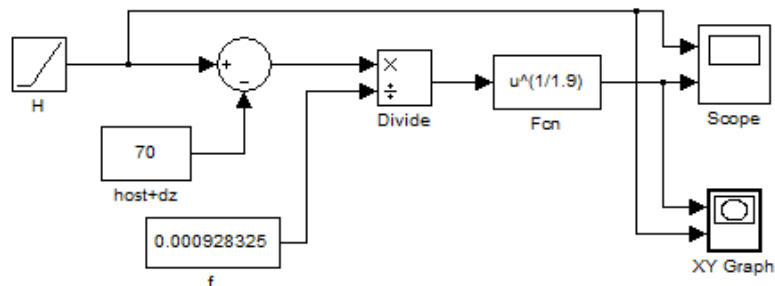
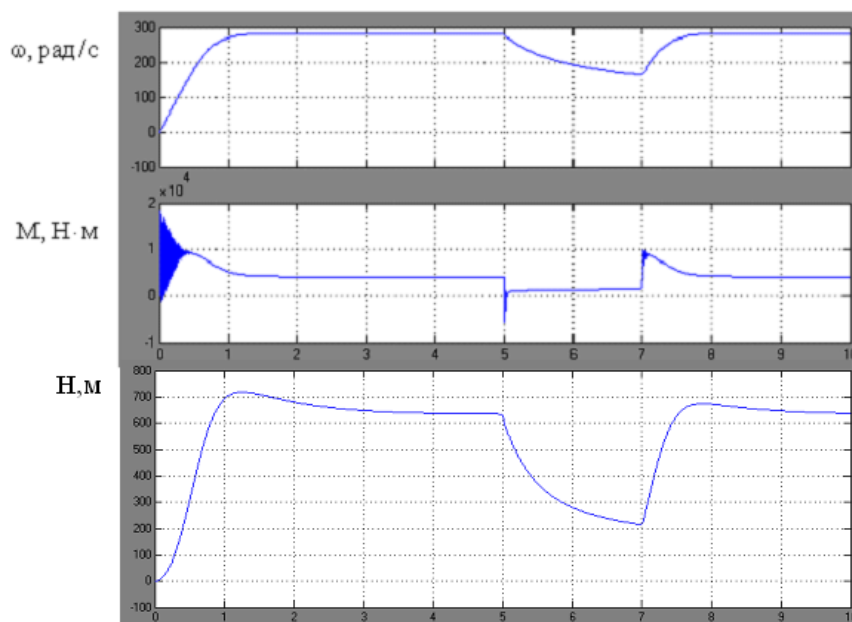


Рис. 6. Модель трубопровода

Для исследования влияния частотного регулирования на переходные процессы при возмущениях в системе электроснабжения были рассмотрены три режима работы электропривода с различными частотами:  $f = 50$  Гц (работа от сети); 45 Гц и 40 Гц (работа от преобразователя частоты). В каждом режиме напряжение на 5-й сек. снижалось скачком до значений  $0,8U_{ном}$ ,  $0,6U_{ном}$ ,  $0,4U_{ном}$  или  $0,2U_{ном}$ , затем через 2 с вновь восстанавливалось до номинального. Примеры осциллограмм, полученных в результате моделирования, представлены на рис. 7 и 8. На каждом из рисунков приведены осциллограммы изменения угловой частоты вращения  $\omega$ , электромагнитного момента  $M$  двигателя и напора  $H$ , развиваемого магистральным насосом в трубопроводе.

По полученным осциллограммам определялись значения снижений угловой скорости вращения, момента двигателя, броска тока статора и тока ротора двигателя, снижения напора, развиваемого насосом. Графические зависимости, иллюстрирующие результаты моделирования, представлены на рис. 9 - 11.

Рис. 7. Осциллограммы при  $f = 50$  Гц и снижении напряжения до  $U = 0,4U_{ном}$

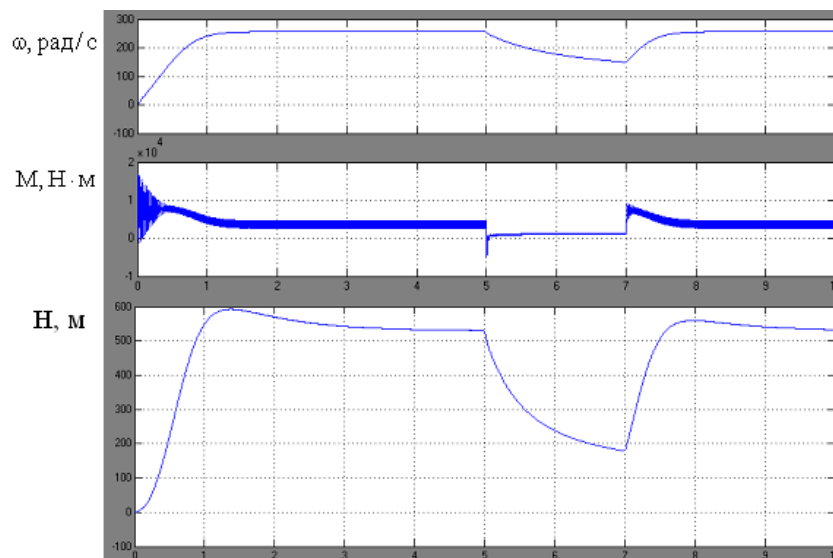


Рис. 8. Осциллограммы при  $f = 45$  Гц и снижении напряжения до  $U = 0,4U_{ном}$

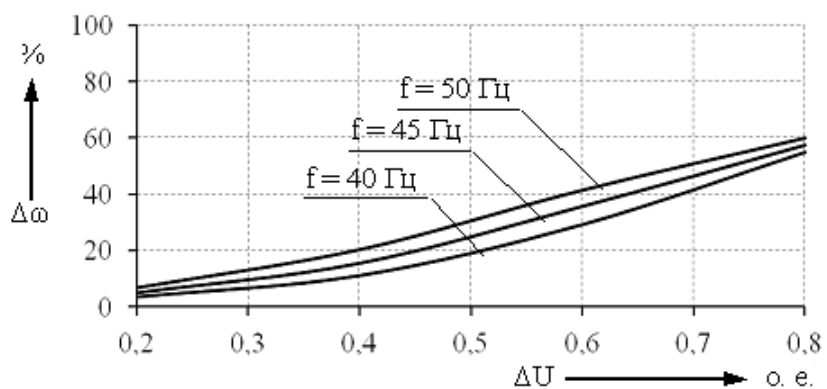


Рис. 9. Зависимости  $\Delta\omega = f(\Delta U)$  при различных значениях частоты

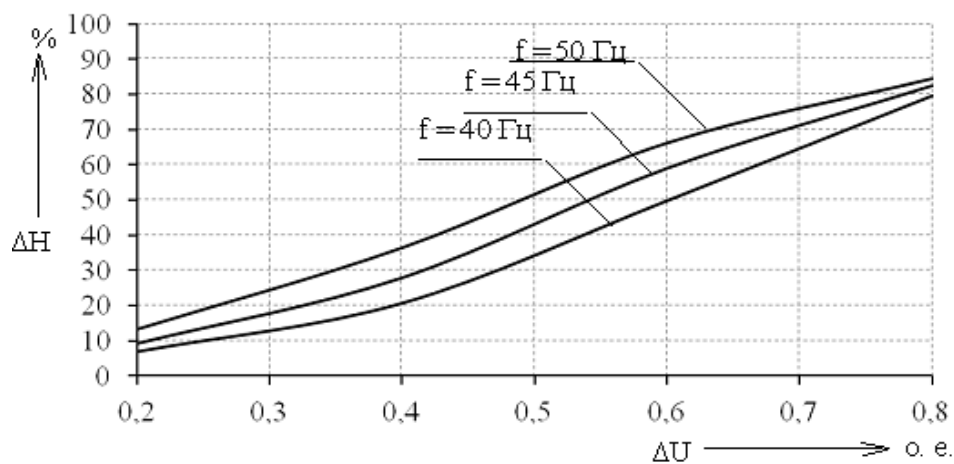


Рис. 10. Зависимости  $\Delta H = f(\Delta U)$  при различных значениях частоты



Как видно из рис. 9-10, чем ниже частота напряжения, питающего электродвигатель, тем ниже относительное снижение скорости вращения двигателя и напора, развиваемого насосом за время отклонения напряжения. Следовательно, преобразователь частоты повышает устойчивость работы электропривода и МН, что является преимуществом при обеспечении бесперебойности технологического процесса.

*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. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Кабаргина О.В., Юсупов Р.З. Электротехнические средства снижения волн давления в магистральных нефтепроводах при нарушении электроснабжения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. № 1(89). С. 77 - 84.
2. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю. Ускорение включения технологического резерва на НПС при нарушениях в системе электроснабжения // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 31 - 35.
3. Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Перспективы использования частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС: монография. Уфа: изд-во УГНТУ, 2010. 61 с.
4. Захаров Н.П., Тажигулов А.М. К вопросу повышения надежности и эффективности эксплуатации насосной станции // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2007. № 4(70). С. 80 - 83.
5. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Кабаргина О.В. Снижение потерь электроэнергии в сети при замене нерегулируемого привода центробежных насосов на частотно-регулируемый // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. 4 с. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/AlekseevVY/AlekseevVY\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/AlekseevVY/AlekseevVY_1.pdf).
6. 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.
7. Сокол Е.И., Бару А.Ю., Лукпанов Ш.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов магистральных нефтепроводов // Электротехника. 2004. № 7. С. 52 - 57.
8. Павлова З.Х., Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Частотное регулирование синхронных двигателей магистральных насосов при постоянной перегрузочной

способности // Вестник АИНГ (Атырауский институт нефти и газа, Казахстан). 2010. № 4 (23). С. 142 - 146.

9. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Кабаргина О.В. О перспективах применения частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов на НПС. Энергоэффективность и энергобезопасность на предприятиях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства // Тр. Всерос. науч.-практ. семинара. Уфа: «Гилем», 2010. С. 285 - 289.

10. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Юсупов Р.З. Понятие устойчивости электротехнических комплексов транспорта нефти и нефтепродуктов при нарушениях в системе электроснабжения// Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. Т.1. Уфа: изд-во УГНТУ, 2009. С. 237 - 244.

**Investigation the variable-frequency drives  
of the main pumps in case  
electrical supply system disturbances**

V.A. Shabanov, R.F. Gilayzov  
*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*  
*e-mail: ShabanovVAI@yandex.ru*

**Abstract.** *The article is devoted to the investigation of variable-frequency drives of the main pumps. The influence of the electric power frequency on the electric motor drives speed pumps in conditions of action of casual disturbances in electrical supply system is considered. Examples of relay protection, main pump and pipeline models are given. The main results of the investigations are given as well.*

**Keywords:** *main pump, electric motor, frequency regulation, electrical supply system, relay protection, disturbances in electrical supply system*

**References**

1. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kabargina O.V., Yusupov R.Z. Elektrotekhnicheskie sredstva snizheniya voln davleniya v magistral'nykh nefteprovodakh pri narushenii elektrosnabzheniya (Electrotechnical ways of reducing pressure fluctuations in petroleum product pipelines in case of power supply interruption). *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2010, Issue 1 (79), pp. 77 - 84.
2. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu. Uskorenie vklyucheniya tekhnologicheskogo rezerva na NPS pri narusheniyakh v sisteme elektrosnabzheniya (Accelerating inclusion of technological reserve at pumping stations in case interruptions in the electricity system). *Promyshlennaya energetika*, 2010, Issue 6, pp. 31 - 35.
3. Shabanov V.A., Kabargina O.V. Perspektivy ispol'zovaniya chastot-no-reguliruemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na NPS (Prospects for using variable-frequency electric drives of main pumps at pumping station). Ufa: UGNTU, 2010. 61 p.
4. Zakharov N.P., Tazhigulov A.M. K voprosu povysheniya nadezhnosti i effektivnosti ekspluatatsii nasosnoi stantsii (The problem of increasing reliability and operational efficiency pumping station). *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2007, Issue 4 (70), pp. 80 - 83.
5. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kabargina O.V. Snizhenie poter' elektroenergii v seti pri zamene nereguliruemogo privoda tsentrobezhnykh nasosov na chastotno-reguliruemymi (Reducing energy losses in the network for replacing unregulated drive

centrifugal pumps for frequency-regulate). *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*. 4 p. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/AlekseevVY/AlekseevVY\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/AlekseevVY/AlekseevVY_1.pdf)

6. Tumanskii A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistral'nykh truboprovodam s perekachivayushchimi stantsiyami, oborudovannymi chastotno-reguliruemym privodom (Optimization of pumping through pipelines with pumping stations equipped with variable frequency drive). *Transport i khranenie nefteproduktov*, 2005, Issue 8, pp. 11-14.

7. 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.

8. Pavlova Z.Kh., Shabanov V.A., Kabargina O.V. Chastotnoe regulirovanie sinkhronnykh dvigatelei magistral'nykh nasosov pri postoyannoй peregruzochnoi sposobnosti (The frequency control of synchronous motors of the main pumps at a constant overload capability). *Vestnik AING*, 2010, Issue 4 (23), pp. 142 - 146.

9. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Kabargina O.V. O perspektivakh primeneniya chastotno-reguliruemyykh электроприводов magistral'nykh nasosov na NPS. Energoeffektivnost' i energobezopasnost' na predpriyatiyakh promyshlennosti i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva (On the prospects of variable frequency drives at main pump station. Energy efficiency and energy safety in industrial enterprises and housing and public utilities) in *Tr. Vseros. nauch.-prakt. seminara (Proceedings of the All-Russia. Scientific-Practical. workshop)*. Ufa: "Gilem", 2010. pp. 285 - 289.

10. Shabanov V.A., Alekseev V.Yu., Yusupov R.Z. Ponyatie ustoichivosti elektrotekhnicheskikh kompleksov transporta nefi i nefteproduktov pri narusheniyyakh v sisteme elektrosnabzheniya (The concept of stability of electrical systems for oil transportation in case disturbances of electricity supply system) in *Elektrotekhnologii, электропривод i elektrooborudovanie predpriyatii: sb. nauch. tr. II vseros. nauch.-tekhn. konf (Electrotechnology, electric and electrical equipment of enterprises: Proceedings of II all-Russia sci.-tech. conf): in 2 vol. Vol. 1. Ufa: UGNTU, 2009. pp. 237 - 244.*