

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА ПОГРУЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статья посвящена моделированию асинхронного электропривода (АЭП) погружного центробежного насоса, используемого в составе нефтегазового технологического оборудования и установок подводных аппаратов. Исследуемая электротехническая система включает источник энергии, автономный инвертор напряжения (АИН), кабельную линию и LC -фильтры на выходе АИН, питающего асинхронный двигатель (АД). Невозможность непосредственного измерения частоты вращения АД предопределяет разомкнутый принцип построения системы управления АЭП. Созданная имитационная модель электропривода обеспечивает анализ его статических и динамических характеристик во всем диапазоне изменения механической нагрузки асинхронного двигателя. Кроме того, модель позволяет оценить состав гармонического спектра фазного тока и напряжения АД. Показано, что основной вклад в искажение формы фазного тока АД вносят 7-ю, 11-ю и 16-ю гармоники. Получены результаты имитационного моделирования при скалярном управлении частотой вращения АД и «вентиляторном» законе регулирования. Установлено, что в разомкнутой системе управления АЭП с пропорциональным законом управления, угловую скорость асинхронного двигателя можно регулировать в диапазоне от номинального значения до половины номинальной с ошибкой стабилизации, не превышающей 5%. Такой закон управления не требует корректировки выходного напряжения АИН. При «вентиляторном» законе регулирования ошибка стабилизации также не превышает 5% во всем диапазоне изменения механической нагрузки асинхронного двигателя. Однако при снижении частоты вращения АД ниже $0,6\omega_{\text{ном}}$ требуется корректировка напряжения питания АД, которая может быть организована перенастройкой параметров регулятора АИН с использованием наблюдателя частоты вращения асинхронного двигателя.

Ключевые слова: система электропитания, асинхронный электропривод, гармонический спектр, имитационное моделирование, *Matlab/Simulink*.

ВВЕДЕНИЕ

Системы электропитания асинхронных электроприводов (АЭП) большинства насосных установок удаленных погружных аппаратов и центробежных насосов, как правило, содержат протяженную кабельную линию и, как правило, большое число LC -фильтров низкой и высокой частоты, расположенных после автономного инвертора напряжения (АИН). Известно, что в пусковых режимах асинхронного двигателя (АД) возникают большие пусковые токи и перенапряжения, которые приводят к существенным потерям в кабельной линии и возникновению неустойчивых процессов в распределенной электромеханической системе [1-3].

Кроме того, широтно-импульсный способ формирования напряжения на выходе АИН вносит искажения в форму фазного тока и напряжения асинхронного двигателя. При этом наличие токов высших гармоник, создающих активные потери мощности, обуславливает перегрев электрооборудования, снижение коэффициента мощности, а также уменьшение электрического и механического КПД асинхронного двигателя [4-8].

Особенно сложные электрические и электромеханические процессы наблюдаются в установках электроцентробежных насосов (УЭЦН), применяемых в нефтегазовой отрасли [9-12].

Так, частотное регулирование скорости вращения погружного АД позволяет поддерживать высокий уровень эксплуатации скважин, поддерживая работу насоса и электродвигателя в режиме максимального КПД.

При этом для эффективного управления насосной установкой необходимо иметь информацию о скважинных параметрах в месте расположения насоса. Создание эффективной системы управления АЭП такого технологического оборудования предполагает предварительное моделирование не только законов регулирования, но и алгоритмов обработки данных измерительной информации.

Все это определяет необходимость создания имитационной модели асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования, позволяющую исследовать статические и динамические режимы во всем диапазоне изменения механической нагрузки при различных законах управления электроприводом, а также проводить оценку гармонического спектра тока и напряжения.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассматривается вариант компоновки основных элементов электропривода, когда насос с электродвигателем расположены на незначительном удалении от источника энергии переменного тока, силового преобразователя и блоков управления электроприводом (рис. 1).

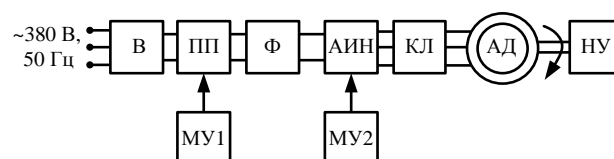


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения электропривода насосной установки

Переменное трехфазное напряжение поступает на неуправляемый выпрямитель (В), включение в схему понижающего преобразователя (ПП) дает возможность по сигналу управления, поступающего с модуля управления (МУ1), регулировать величину выпрямленного напряжения. Для сглаживания пульсаций напряжения присутствуют фильтры низких и высоких частот, представленные на **рис. 1** общим блоком (Ф). Для специального технологического оборудования кабельная линия (КЛ) может иметь небольшую длину и при моделировании рабочих режимов насосной установки (НУ) рассматривается как линия с сосредоточенными параметрами.

Напряжение, подаваемое на обмотку статора асинхронного двигателя (АД), формируется автономным инвертором напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) по сигналам управления, поступающим с модуля управления (МУ2).

Высокая крутизна фронтов (0,05–0,1 мкс) и большая частота (5–15 кГц) ШИМ-импульсов, формируемых IGBT-модулями инвертора, создают волновые электромагнитные процессы в кабельной линии, также при наличии резонансных частот в спектре выходного напряжения АИН на входе двигателя могут возникать многократные перенапряжения, способные вывести его из строя [1,13,14]. Для устранения этих нежелательных явлений в схему введен синусный фильтр, входящий в блок КЛ.

На основе анализа характеристик реальной установки в программной среде моделирования *Matlab* разработана имитационная модель (**рис. 2**), позволяющая с достаточной точностью моделировать основные режимы ее работы при различных законах управления АИН [15-17].

Алгоритм формирования напряжений в АИН строится на основе вертикальной системы управления. Блок *Source* (см. **рис. 2**) генерирует моделирующие напряжения, имеющие в своем спектре первую и третью гармоники:

$$u_{am}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin(\omega t) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right];$$

$$u_{bm}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right];$$

$$u_{cm}(t) = \frac{k_m U_m}{\cos\left(\frac{\pi}{6}\right)} \times \left[\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)\right) \sin(3\omega t) \right],$$

где k_m , U_m – коэффициент модуляции и амплитуда управляющих сигналов.

Добавление сигнала тройной частоты позволяет повысить коэффициент преобразования по напряжению, а также повышает качество выходного напряжения АИН [7,18,19].

Генератор модулирующего напряжения инвертора представлен блоком *Source* (**рис. 3**) с тремя задающими входными сигналами. Первый сигнал определяет коэффициент модуляции, а значит, и величину основной гармоники выходного напряжения инвертора, значением второго сигнала является текущее время моделирования, третий сигнал определяет частоту моделирующего напряжения и является отношением требуемой частоты к номинальному значению.

Содержание блока *Control block*, осуществляющего управление инвертором, представлено на **рис. 4**. Генератор опорного напряжения треугольной формы имеет частоту 15 кГц, определяющую частоту коммутации ШИМ.

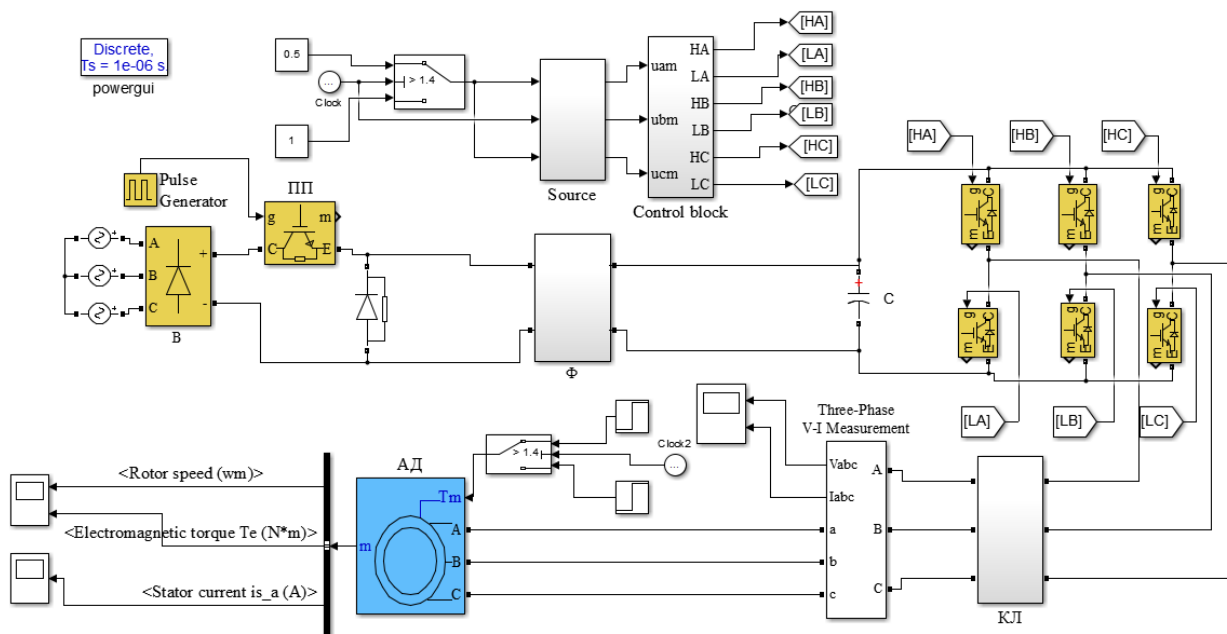


Рис. 2. Имитационная модель электропривода насосной установки в системе Matlab

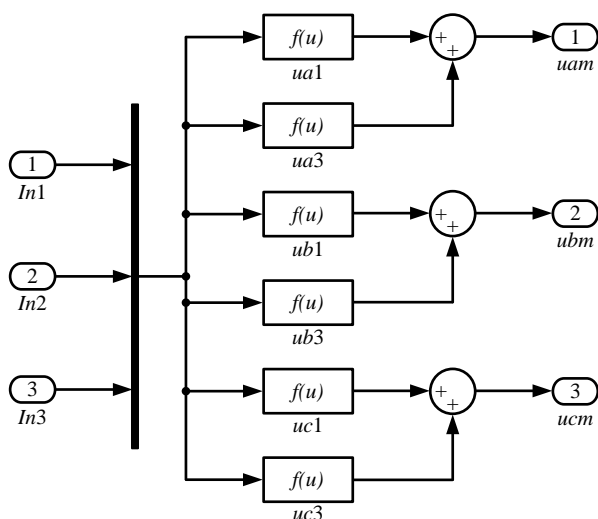


Рис. 3. Блок *Source*, задающий модулирующие напряжения инвертора

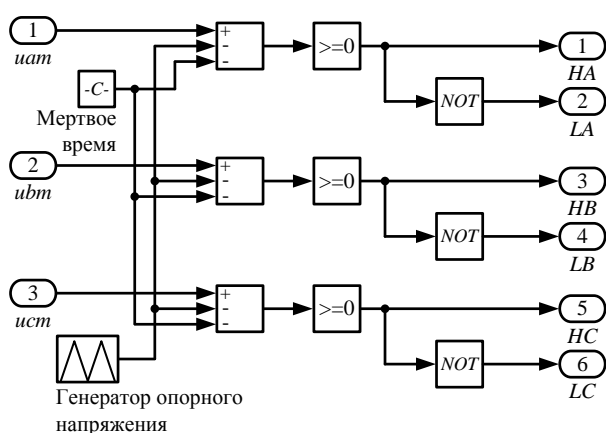


Рис. 4. Блок *Control block*, реализующий управление ключами инвертора

Устройства сравнения в каждом канале дают импульсы управления для соответствующих IGBT-транзисторов катодной группы инвертора, а импульсы управления для анодной группы поступают с выходов блоков инверсии.

В модели учтено «мертвое время» (рис. 4, блок «Мертвое время»), т.е. задержка на переключение ключей для предотвращения одновременного открытия двух ключей в одной стойке инвертора. В течение «мертвого времени» напряжение на фазе соответствующей стойки определяется направлением протекания тока. В имитационной модели кабельная линия представлена активно-индуктивным продольным и активно-емкостным поперечным сопротивлениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 представлены результаты моделирования работы насосной установки мощностью 40 кВт в установившемся режиме работы при моменте нагрузки, равном номинальному моменту асинхронного двигателя (рис. 5, а), и при моменте, равном 2/3 от номинального (рис. 5, б). На этих же графиках представлены данные, полученные в результате работы реальной установки при таких же нагрузках (выделены курсивом). Как показали проведенные исследования, относительная погрешность по амплитудным значениям тока статора не превышает 5%, что говорит об адек-

ватности представленной модели. Отклонение действующего значения фазного напряжения АД от номинального составило 7% при номинальной нагрузке и, соответственно, 3,2% при статическом моменте, равном 2/3 от номинального.

На рис. 6 представлен гармонический спектр тока фазы А при работе на номинальную нагрузку. Коэффициент гармоник равен 0,47%, при этом наблюдаются высокие уровни в области 7-й, 11-й и 16-й гармоник, что подтверждается экспериментальными данными [6].

Разработанная модель позволяет исследовать влияние вибраций, вызванных моментом нагрузки, на частоту вращения и гармонический состав тока статора. Так, на рис. 7 представлен гармонический спектр частоты вращения вала двигателя при появлении в моменте нагрузки гармоники с частотой 300 Гц.

Имитационное моделирование работы насосной установки позволило исследовать ее реакцию на скалярное управление приводом при различных режимах работы. Как известно, скалярный принцип частотного управления характеризуется минимальными затратами при технической реализации, а также возможностью построения разомкнутых систем управления без датчика скорости. Управление асинхронным двигателем обеспечивается совместным регулированием частоты и напряжения обмоток статора.

На рис. 8 представлены результаты моделирования электропривода установки с использованием пропорционального закона управления. Следует отметить, что по технологическим условиям регулирование угловой скорости асинхронного двигателя должно осуществляться в пределах от номинальной $\omega_{\text{ном}}$ до $0,5\omega_{\text{ном}}$.

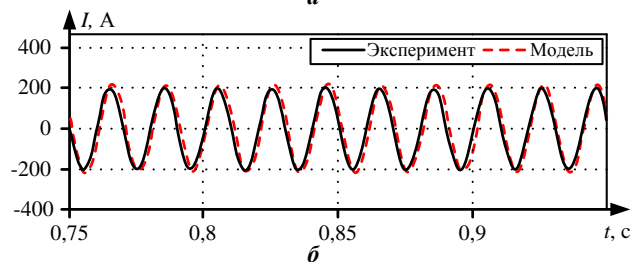
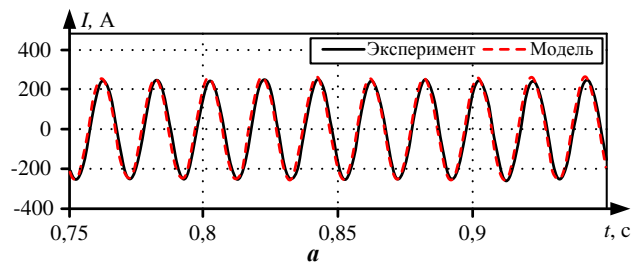


Рис. 5. Ток в обмотке статора АД

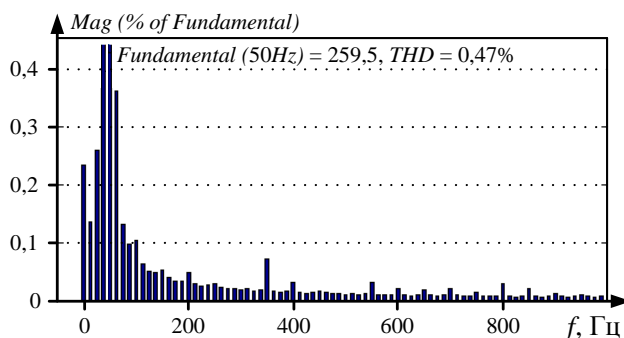


Рис. 6. Гармонический спектр тока статора фазы А

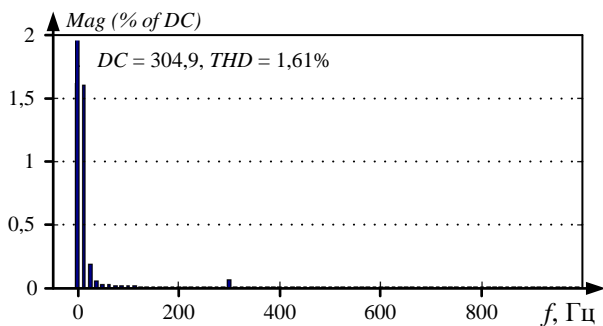


Рис. 7. Гармонический спектр частоты вращения двигателя

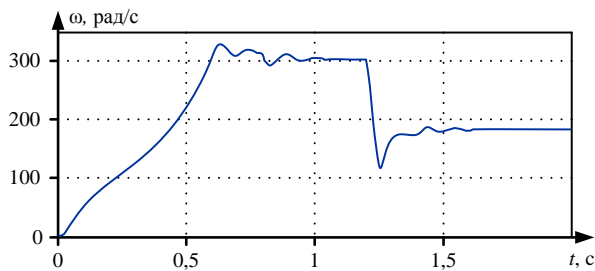


Рис. 8. Зависимость частоты вращения вала АД при пропорциональном законе управления

Включение установки происходит в режиме холостого хода, во время которого происходит зарядка всех конденсаторов, входящих в состав фильтров. После окончания переходного процесса в момент времени 0,8 с подключается насосная установка, работающая в номинальном режиме, двигатель при этом работает с номинальной частотой. В момент времени 1,2 с на инвертор подаются управляющие сигналы, и частота напряжения, вырабатываемая инвертором, уменьшается до $0,6f_{\text{ном}}$ и пропорционально частоте изменяется напряжение на выходе инвертора. В момент времени 1,4 с момент нагрузки уменьшается в 2,6 раз от номинального.

Как показали исследования, использование принципа пропорционального изменения частоты и напряжения позволяет регулировать угловую скорость от номинальной до $0,5\omega_{\text{ном}}$ во всем диапазоне изменения момента на валу двигателя, при этом погрешность регулирования не превышает 5%. При пропорциональном законе регулирования установившееся значение тока в обмотке статора не превышает номинального значения.

Следующим этапом являлось исследование работы модели при «вентиляторном» законе управления.

Для механизмов с вентиляторным характером момента нагрузки, в частности для насосов, закон регулирования представляется в виде $U/f^2 = \text{const}$.

На рис. 9 представлены результаты моделирования электропривода установки с использованием «вентиляторного» закона управления.

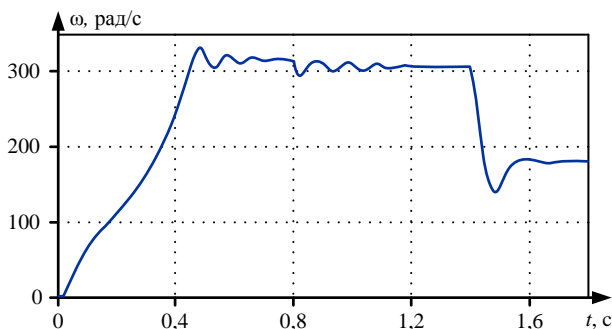


Рис. 9. Зависимость частоты вращения вала АД при «вентиляторном» законе управления

Включение установки также происходит в режиме холостого хода, в момент времени 0,8 с подключается насосная установка, работающая в номинальном режиме, двигатель при этом работает с номинальной скоростью. В момент времени 1,4 с на инвертор подаются управляющие сигналы, и частота напряжения, вырабатываемая инвертором, уменьшается до $0,6f_{\text{ном}}$. Соответственно, пропорционально квадрату частоты уменьшается напряжение на выходе инвертора. Также при снижении частоты уменьшается момент нагрузки в соответствии с вентиляторной характеристикой:

$$M(\omega) = M_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2.$$

Регулирование угловой скорости без корректировки напряжения в данном случае возможно при регулировании в диапазоне от $\omega_{\text{ном}}$ до $0,6\omega_{\text{ном}}$. При дальнейшем снижении угловой скорости до значения, равного $0,5\omega_{\text{ном}}$, требуется корректировка напряжения, поступающего на инвертор, которое осуществляется преобразователем напряжения.

Сравнение кривых, представленных на рис. 8 и 9, показало, что при «вентиляторном» законе управления время регулирования при подключении номинальной нагрузки в 1,2 раза больше, чем при использовании скалярного закона, при этом величина перерегулирования практически одинакова. При снижении угловой скорости величина перерегулирования в 1,27 раз больше при скалярном законе управления, при этом время регулирования практически одинаково. Погрешность регулирования частоты вращения при выбранных законах управления не превышает 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований построена имитационная модель асинхронного электропривода, позволяющая моделировать статические и динамические режимы во всем диапазоне изменения нагрузки насосной установки погружного технологического оборудования, а также проводить оценку гармонического спектра фазных тока и напряжения двигателя. Адекватность модели подтверждается сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными.

В результате моделирования установлено, что при номинальной частоте на выходе АИН отклонение действующего значения фазного напряжения АД от номинального составляет 7% при номинальной нагрузке, что не соответствует требованиям по условиям эксплуатации. Значение коэффициента гармоник, характеризующего степень искажения фазного тока АД при номинальной нагрузке, составило 0,47%, при этом основной вклад в искажение сигнала вносили 7-я, 11-я и 16-я гармоники.

Рассмотрена работа имитационной модели при скалярном управлении частотой вращения асинхронного двигателя. Показано, что при пропорциональном законе управления угловую скорость можно регулировать в диапазоне $\omega_{\text{ном}}$ до $0,5\omega_{\text{ном}}$ с погрешностью, не превышающей 5% без корректировки напряжения. При «вентиляторном» законе погрешность также не пре-

вышает 5% во всем диапазоне изменения нагрузки, но при снижении скорости ниже $0,6\omega_{ном}$ требуется корректировка напряжения на выходе инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М., Аникин В.В. Электротехнологические установки для нефтедобычи: монография / Омск: Минобрнауки России, Изд-во ОмГТУ, 2015. 160 с.
2. Лезнов Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. 176 с.
3. Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. Pp. 1-4. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308
4. Arumugam D., Sivasailam K. Investigation of pressure pulsation in the stages of an electric submersible pump at best efficiency point under various speeds // 8th Joint Fluids Engineering Conference. 2019. № 3B. doi: 10.1115/AJKFluids2019-5081
5. Steckling L., Heldwein M.L. Model-based synchronous optimal modulation for three-level inverters applied to electrical submersible pumps systems // PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2019. Pp. 408-415. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8767524> (дата обращения 28.11.2020).
6. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритмов и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2021. С. 210-214.
7. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров. М.: Изд-во Юрайт, 2015. 667 с.
8. Начаров Р.А., Рябишина Л.А. Оценка электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах добычи нефти с частотно-регулируемым электроприводом // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Вып. 5. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 95-103.
9. Говорков Д.А., Курлаев Г.Н. Технология анализа режимов эксплуатации скважины с электронасосом в условиях реального времени // Вестник кибернетики. 2011. № 10. С. 22-26.
10. Феофилактов С.В. Системы погружной телеметрии для «жестких» условий эксплуатации // Инженерная практика. 2013. № 10. С. 8-11.
11. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. К вопросу о повреждаемости, обслуживании и ремонтах погружного электрооборудования нефтедобычи // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. Т. 28. №2. С. 111-123. doi: 10.14498/tech.2020.2.8
12. Романов В.С., Гольдштейн В.Г. Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. № 5(3). С. 96-100. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-96-100
13. Liang X., El-Kadri A. Operational parameters affecting harmonic resonance in electrical submersible pump systems // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019. № 42(3). Pp. 183-197. doi: 10.1109/CJEECE.2019.2922384
14. Persson E. Transient effects in application of PWM inverters to induction motors // Transactions on Industry Applications. IEEE, 1992. № 28(5). Pp. 1095-1101. doi: 10.1109/28.158834
15. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
16. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. № 329(4). С. 119-131.
17. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 273 с.
18. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2011. № 5. С. 53-61.
19. Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Кондратьев Д.Е. Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения // Электричество. 2008. № 7. С. 23а-31

Поступила в редакцию 16 сентября 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION MODELING OF INDUCTION MOTOR DRIVE OF A SUBMERSIBLE TECHNOLOGICAL EQUIPMENT PUMP

Elena B. Shandarova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7473-2771>

Victor G. Bukreev

D.Sc. (Engineering), Professor, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, shandarovaelena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9861-9765>

Evgeniy A. Bystrov

Postgraduate Student, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, bystrov-evgen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1829-6845>

The article is devoted to the research of induction motor drive (IMD) of a submersible pump for oil, gas and underwater processing equipment. The investigated electrotechnical system includes a cable line and LC-filters from the output of the voltage

source inverter, which supplies an induction motor (IM). A simulation model was created, which makes it possible to research the static and dynamic modes of IMD in the whole range of mechanical load variation of the IM, as well as to estimate the

harmonic spectrum of phase current and voltage. It is shown that the main contribution to the distortion of the motor phase current form is made by 7, 11 and 16 harmonics. The operation of the simulation model for scalar speed control of an induction motor is considered. It was established that in the open-loop control system of the IMD with proportional control mode, the angular speed of the IM can be regulated in the range from the nominal value to half of the nominal value with an error, that does not exceed 5%, without voltage correction. At the "fan" control mode, the error also does not exceed 5% in the whole range of mechanical load variation of the IM, but when the rotational speed decreases below $0.6\omega_{nom}$, it is required to correct the voltage at the output of the IMD. However, when the rotational speed of the IM decreases below $0.6\omega_{nom}$, it is required to correct of the supply voltage of the IM, which can be organized by readjustment of the VSI regulator parameters based on the induction motor rotational speed observer.

Keywords: power supply system, induction motor drive, harmonic spectrum, simulation modeling, Matlab/Simulink.

REFERENCES

1. Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M., Anikin V.V. *Elektrotekhnologicheskie ustanovki dlya nefte dobychi* [Electrotechnological installations for oil production]. Omsk, Omsk State University, 2015. 160 p. (In Russian)
2. Leznov B.S. *Chastotno-reguliruemyy elektropriwod nasosnykh ustanovok* [Frequency-controlled electric drive of pumping units]. Moscow, Machine building, 2013. 176 p. (In Russian)
3. Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. 2020, no. 9271308. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308
4. Arumugam D., Sivasailam K. Investigation of pressure pulsation in the stages of an electric submersible pump at best efficiency point under various speeds. 8th Joint Fluids Engineering Conference. 2019, vol. 3B, no. 5081. doi: 10.1115/AJKFluids2019-5081
5. Steckling L., Heldwein M.L. Model-based synchronous optimal modulation for three-level inverters applied to electrical submersible pumps systems. PCIM Europe Conference Proceedings. 2019, pp. 408-415.
6. Bogdanov A. A., Bystrov E. A. Analysis of the influence of algorithms and operating modes of a three-phase inverter on the spectral composition of output currents. *Sbornik nauchnykh trudov "Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustroystva"* [Materials of scientific papers "Electronic and electromechanical systems and devices"]. Tomsk, TSU Publ., 2021, pp. 210-214. (In Russian)
7. Zinoviev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurayt Publ., 2015. 667 p. (In Russian)
8. Nacharov R.A., Ryabishina L.P. Evaluation of electromagnetic compatibility in electrical oil production complexes with a frequency-controlled electric drive. *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov "Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy"* [International collection of scientific papers "Power and electrical systems"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2018, pp. 96-104. (In Russian)
9. Govorkov D.A., Kurlaev G.N. Technology for analyzing well operation modes with an electric pump in real time. *Vestnik kibernetiki* [Proceedings of Cybernetics], 2011, no. 10, pp. 22-26. (In Russian)
10. Feofilaktov S.V. Submersible telemetry systems for "harsh" operating conditions. *Inzhenernaya praktika* [Engineering practice], 2013, no. 10, pp. 8-11. (In Russian)
11. Romanov V.S., Goldstein V.G. To the question of damage, maintenance and repairs of submersible electric equipment for oil production. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2020, vol. 28, no. 2 (66), pp. 111-123. doi: 10.14498/tech.2020.2.8. (In Russian)
12. Romanov V.S., Goldstein V.G. Methods of dynamic improvement of energy efficiency and reliability of submersible electric motors for oil production. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines], 2017, no. 5 (3), pp. 96-100. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-96-100. (In Russian)
13. Liang X., El-Kadri A. Operational parameters affecting harmonic resonance in electrical submersible pump systems. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019, vol. 42(3), no. 8770309, pp. 183-197. doi: 10.1109/CJECE.2019.2922384
14. Persson E. Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors. Transactions on Industry Applications. IEEE, 1992, 28(5), pp. 1095-1101. doi: 10.1109/28.158834
15. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MPEI Publ., 2015. 373 p. (In Russian)
16. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering]. 2018, no. 329(4), pp. 119-132. (In Russian)
17. Sokolovsky G.G. *Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable frequency AC drives]. Moscow, Publishing house Academia, 2006. 273 p. (In Russian)
18. Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Pulse-width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo* [Electricity], 2011, no. 5, pp. 53-61. (In Russian)
19. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondratyev D.E. Pulse-width modulation in three-phase voltage inverters. *Elektrichestvo* [Electricity], 2008, no. 7, pp. 23-31. (In Russian)

Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 13-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18)

Shandarova E.B., Bukreev V.G., Bystrov E.A. Simulation Modeling of Induction Motor Drive of a Submersible Technological Equipment Pump. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 13-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-13-18)