



УДК 620.92

**ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
МАГИСТРАЛЬНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА**



**STUDY OF STABILITY OF OPERATION
OF FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE
THE OF MAIN PUMP UNIT**

Димукашева Гульназ Ержановна

студент группы БАЭ-17-01
кафедры электротехника
и электрохозяйство предприятий
факультета автоматизации
производственных процессов,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
dimukashevage@mail.ru

Стрельников Дмитрий Сергеевич

студент группы МАЭ02-19-01
кафедры электротехника
и электрохозяйство предприятий
факультета автоматизации
производственных процессов,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
dimastreln@mail.ru

Зекрин Булат Ринатович

студент группы БАЭ-16-01
кафедры электротехника
и электрохозяйство предприятий
факультета автоматизации
производственных процессов,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
bzkr1998@yandex.ru

Хазиева Регина Тагировна

Кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехника
и электрохозяйство предприятий,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
khazievart@mail.ru

Аннотация. В данной статье анализируются режимы работы частотно-регулируемого магистрального насосного агрегата при провалах питающего напряжения.

Ключевые слова: электропривод, магистральный насос, асинхронный двигатель, частотное регулирование, преобразователь частоты, математическая модель, коэффициент полезного действия.

Dimukasheva Gulnaz Erzhanovna

Student of the BAE-17-01 group
of the Department of electrical Engineering
and electrical management of enterprises
of the faculty of automation
of production processes,
Ufa state petroleum technological university
dimukashevage@mail.ru

Strelnikov Dmitry Sergeevich

Student of the MAE02-19-01 group
of the Department of electrical Engineering
and electrical management of enterprises
of the faculty of automation
of production processes,
Ufa state petroleum technological university
dimastreln@mail.ru

Zekrin Bulat Rinatovich

student of the BAE-16-01 group
of the Department of electrical Engineering
and electrical management of enterprises
of the faculty of automation
of production processes,
Ufa state petroleum technological university
bzkr1998@yandex.ru

Khazieva Regina Tagirovna

Candidate of technical Sciences,
Associate Professor of the Department
electrical Engineering
and electrical enterprises
khazievart@mail.ru

Annotation. This article analyzes the stability of a frequency-controlled main pumping unit in case of voltage dips.

Keywords: electric drive, main pump, asynchronous motor, frequency control, frequency Converter, mathematical model, efficiency.

А синхронные электродвигатели, составляющие большую часть электрических машин на сегодняшний день, используются как основные преобразователи электрической энергии в механическую [1]. Из-за нарушений устойчивой работы электрических машин нарушается работа



технологических процессов. Это приводит к тяжелым последствиям, устранение которых занимает много времени и сил оперативного персонала. Актуальной и значимой становится в наши дни проблема экономии потребления электроэнергии. Большое количество электродвигателей эксплуатируются нерационально ввиду малоэффективной системы регулирования или её отсутствия. Большинство из этих двигателей используются для магистральных насосных агрегатов. Использование современных технологий частотно-регулируемого электропривода позволяет сэкономить не менее 20 % электроэнергии по сравнению с классическими методами регулирования [2].

Для исследования устойчивости был рассмотрен режим работы электропривода с частотой $f = 50$ Гц. Модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода магистрального насосного агрегата, построенная в среде Simulink пакета MatLab, с помощью которой была исследована устойчивость при исчезновении напряжения, изображена на рисунке 1. Модель содержит: трехфазный программируемый источник напряжения, неуправляемый выпрямитель, низкочастотный фильтр – LC фильтр, IGBT инвертор, управляющийся ШИМ-генератором импульсов, модель электродвигателя и блок, в котором реализована модель насоса относительно момента сопротивления на валу приводного двигателя [2].

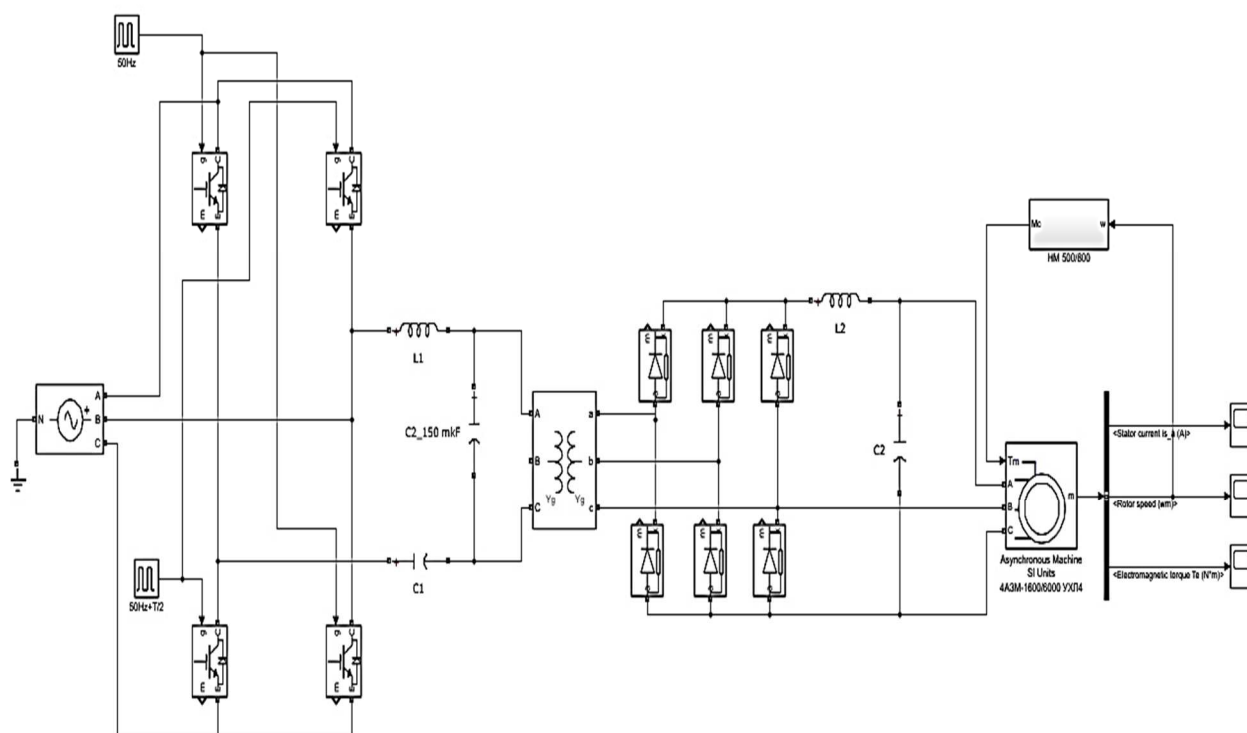


Рисунок 1 – Модель высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода

Модель насоса относительно создаваемого им момента сопротивления на валу приводного двигателя представлена на рисунке 2.

В окне настроек блока Three-Phase Programmable Voltage Source был задан период исчезновения напряжения $U = 0$ с 10 по 16 с последующим его восстановлением до значения $0,5U_{НОМ}$. В окне настройки данных блока Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units были заданы параметры, которые были получены в результате расчетов схемы замещения асинхронной машины, схема замещения приведена на рисунке 3 [4].

Существуют два принципа, позволяющих управлять частотными преобразователями – скалярный и векторный.

Скалярный – это принцип, управления который изменяет значения амплитуды и питающего напряжения по следующему закону:

$$\frac{U}{f^n} = const, \text{ где } n \geq 1.$$

Преимущества данного способа – это доступность и простота в реализации частотного управления.

Векторный принцип – это принцип, который позволяет максимально приблизить параметры асинхронного электропривода к характеристикам привода постоянного тока. Достигается данная особенность благодаря разделению каналов регулирования потокосцепления и скорости вращения электродвигателя.

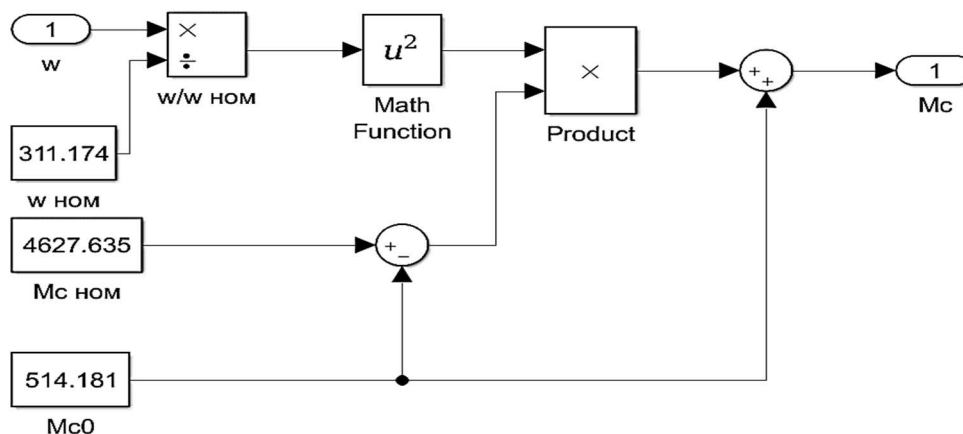


Рисунок 2 – Модель насоса относительно момента сопротивления

Для регулирования скорости АД используется скалярное частотное регулирование, которое является наиболее целесообразным, эффективным и перспективным способом регулирования для турбомеханизмов. При частотном регулировании, с целью поддержания постоянства магнитного потока, при одновременном изменении частоты, необходимо изменять напряжение в следующем соотношении $\frac{U}{f^2} = const$ (закон частотного управления для вентиляторной нагрузки).

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

$$M_c = M_{c0} + (M_{c,ном} - M_{c0}) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \tag{1}$$

где $M_{c,ном}$ – момент сопротивления производственного механизма при номинальной угловой скорости вращения вала; M_{c0} – момент сопротивления от трения в движущихся частях производственного механизма; ω – угловая скорость турбомеханизма; $\omega_{ном}$ – номинальная угловая скорость вращения вала.

Асинхронный двигатель при медленно изменяющемся возмущении постепенно нагружается до значения опрокидывающего момента.

Предельное снижение скорости вращения электродвигателей – до границы опрокидывания – может определяться величиной критического скольжения. В этом случае может быть применен обычный критерий устойчивости асинхронного электродвигателя:

$$\frac{dM_d}{ds} > 0 \text{ при } M_c = const \text{ или } \frac{dM_d}{ds} - \frac{dM_c}{ds} > 0 \text{ при } M_c = M_c(n),$$

где M_d – вращающий момент электродвигателя; M_c – сопротивление на валу электродвигателя.

Эти неравенства означают, что при снижении напряжения режим работы электродвигателя должен сохраняться на устойчивой части его механической характеристики.

Величина опрокидывающего момента асинхронного электродвигателя зависит от напряжения и частоты:

$$M_{max}(U, f) = M_{max} \left(\frac{U}{f} \right)^2, \tag{2}$$

где M_{max} – кратность опрокидывающего момента электродвигателя при номинальных значениях напряжения и частоты.

На основании этой зависимости и критерия устойчивости можно определить допустимый провал напряжения по условию сохранения устойчивой работы включенных электродвигателей:

$$\Delta U_{max} \leq \left(1 - f \sqrt{\frac{M_{c,кр}}{M_{max}}} \right) \cdot 100 \%, \tag{3}$$

где $M_{c,кр}$ – момент сопротивления на валу электродвигателя при критическом скольжении для вентиляторного момента.

Указанный критерий определяет устойчивость работы всей электроустановки в целом, ибо если электродвигатели в процессе затормаживания достигнут критического скольжения, то полные их сопротивления и коэффициент мощности резко уменьшаться и ток в цепи питания возрастает [6].



При быстром изменении возмущения динамический момент $J \frac{d\omega}{dt}$, алгебраически складывается с электромагнитным моментом двигателя [7].

Инерция (запасенная системой энергия) также имеет большее влияние на работу привода.

Для анализа устойчивости и режима работы двигателя при возмущении в питающей сети сравниваются значения вращающего электромагнитного момента двигателя и тормозного статического момента механизма [8].

В случае, если электромагнитный момент двигателя больше тормозного статического момента механизма, то возникает положительный динамический момент, что приведет к дальнейшему возрастанию скорости, пока не наступит установившийся режим.

В другом варианте, если электромагнитный момент двигателя меньше тормозного статического момента механизма, то возникает отрицательный динамический момент, он будет противодействовать движению привода, будет наблюдаться снижение скорости и двигатель будет тормозить, пока не наступит установившийся режим [9].

Двигатель работает устойчиво, если он вернулся в изначальное состояние после прекращения возмущения в сети [10].

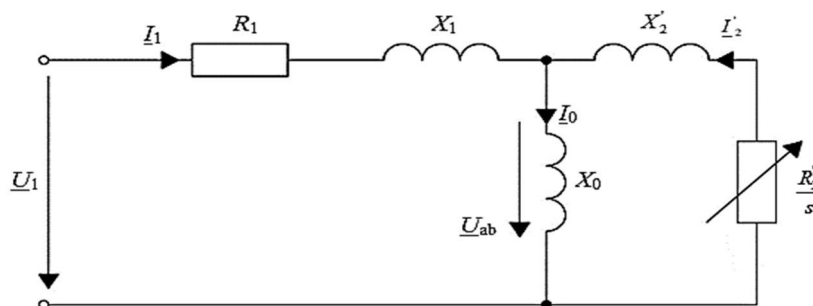


Рисунок 3 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

В начальный момент времени $t = 0$ с осуществляется запуск электродвигателя. При этом он плавно и быстро разгоняется до номинальной скорости вращения и в момент времени $t = 4$ с выходит на номинальный режим работы, который длится на промежутке времени с 4 по 10 с. В период времени $t = 10$ с происходит исчезновение напряжения.

На рисунке 4 представлены полученные в результате моделирования осциллограммы угловой скорости ротора, электромагнитного момента и тока одной фазы статора при исчезновении напряжения с 10 по 16 с и с последующим его восстановлением до 50 % от номинального значения (рис. 5).

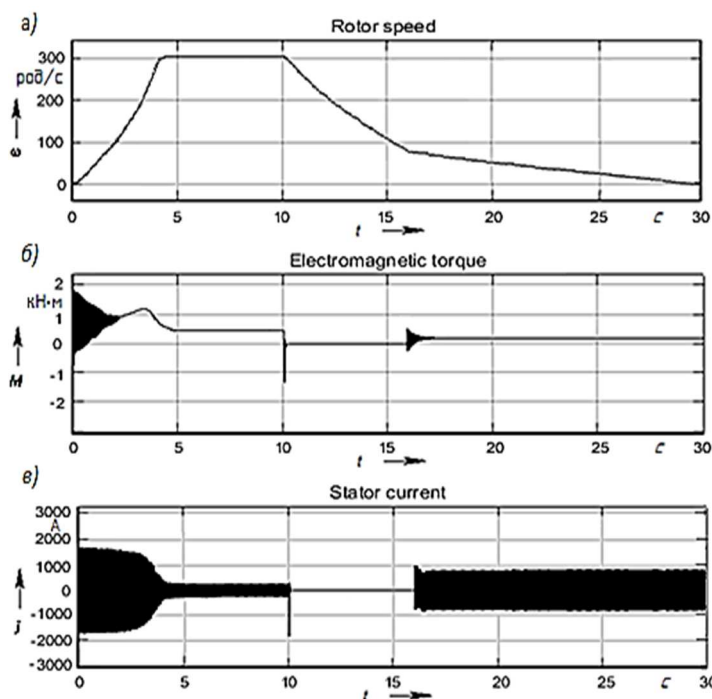


Рисунок 4 – Осциллограммы при исчезновении напряжения: а – угловой скорости ротора; б – электромагнитного момента; в – тока одной фазы статора

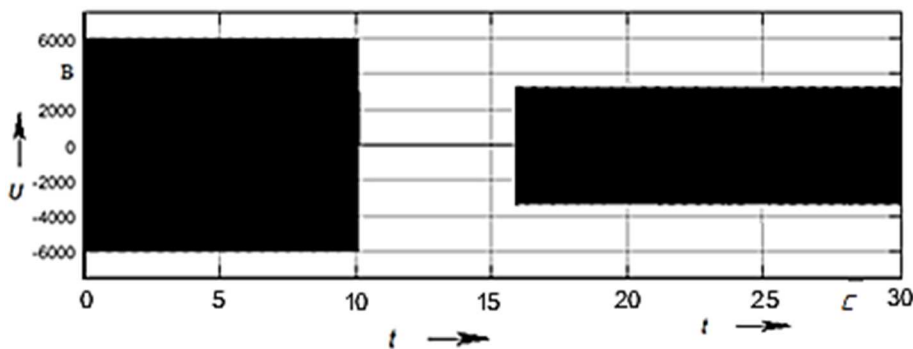


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения в сети 6 кВ при исчезновении напряжения и его восстановления до 50 %

Как видно из графика угловой скорости ротора (рисунок 4а) при исчезновении питания в момент времени $t = 10$ с значение скорости снижается до нуля, так как появился тормозной момент, под действием которого двигатель начинает процесс торможения.

Электромагнитный момент сохраняет постоянство за счёт установившихся значения напряжения за исключением временного интервала электромагнитных переходных процессов (рис. 4б) и восстанавливается до значения 1 кН·м в момент времени $t = 16$ с.

В результате исследования было выявлено, что при восстановлении напряжения до $0,5U_{ном}$ в момент времени $t = 16$ с в АД происходят броски тока.

При исчезновении напряжения в момент времени $t = 16$ с случилось опрокидывание двигателя, потому что значение скольжения s при торможении оказалось больше значения предельного скольжения $s_{пр}$. Следовательно, момент сопротивления механизма стал больше максимального момента двигателя и появился отрицательный динамический момент – $\Delta M_{дин}$, самозапуск не был обеспечен. В реальных условиях это могло бы привести к нарушению технологического процесса. Двигатель не вернулся в исходное состояние после прекращения воздействия, значит он работает неустойчиво.

При выбеге возможно использование динамического торможения, которое в отличие от режима свободного выбега, когда торможение осуществляется лишь за счет момента статического сопротивления, характеризуются появлением тормозных моментов, за счет которых остановка двигателя происходит за более короткое время. Но в данной работе такой вид торможения не применяется и не рассматривается, так как цель данной работы является анализ устойчивости электродвигателя.

На рисунке 6 видно, что чем ниже частота напряжения, питающего электродвигатель, тем ниже относительное снижение скорости вращения двигателя за время исчезновения напряжения. Потери мощности при частотном регулировании невелики, поскольку не сопровождаются увеличением скольжения. Получаемые при этом механические характеристики обладают высокой жесткостью. Следовательно, преобразователь частоты повышает устойчивость работы электропривода и магистрального насоса, что является преимуществом при обеспечении бесперебойности технологического процесса.

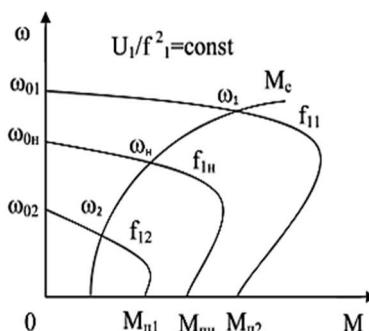


Рисунок 7 – Механические характеристики асинхронного электродвигателя для нагрузки вентиляторного характера

В процессе исследования показано, что устойчивость работы преобразователя частоты и привода чувствительна к провалам напряжения в сети питания. Устойчивость также зависит от режима работы привода, при котором происходит провал напряжения. С уменьшением потребляемой мощности возрастает устойчивость привода.

Был сделан вывод, что вопрос обеспечения устойчивости асинхронного двигателя имеет большое значение. Так как нарушение технологического процесса по причине аварии, вызванное нарушением



устойчивости работы электрических машин, приводит к серьёзным последствиям, на ликвидацию которых затрачивается большое количество времени. Также данный вопрос актуален не только для МНА, но и для поршневых и газопоршневых насосов.

Восстановление напряжения должно быть таким, чтобы значение скольжения при затормаживании оказалось меньше значения предельного скольжения. Также не допускать появления отрицательного динамического момента, в таком случае будет обеспечен самозапуск электродвигателя.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М. : Академия, 2007. – С. 101–102.
2. Проектирование систем частотного регулирования : каталог. – М. : Dandoss, 2012. – 4 с.
3. Горюнов В.Н., Хацевский К.В., Шагаров А.А., Шагаров Д.А. Исследование влияния полупроводниковых преобразователей на питающую сеть на основе математических моделей // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 125–126.
4. Радин В.И. Электрические машины: Асинхронные машины. – М. : Высш. шк., 1988. – С. 98–101.
5. Епифанов А.П. Основы электропривода. – СПб. : Лань, 2009. – 192 с.
6. Коломиец А.П. Электропривод и электрооборудование. – М. : КолосС, 2007. – 328 с.
7. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М. : Энергия, 1979. – 456 с.
8. Tong W. Mechanical Design of Electric Motors. Radford, CRC Press Publ., 2017, pp. 321–322.
9. Paul C., Oleg W., Scott D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Radford, Wiley-IEEE Press Publ., 2002, pp. 407–408.
10. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. – М. : Энергоиздат, 1981. – С. 32–33.

References

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. Automated electric drive of typical production mechanisms and technological complexes. – M. : Academy Publ., 2007. – P. 101–102.
2. Design of frequency control systems: catalog. – M. : Danfoss publ., 2012. – 4 p.
3. Goryunov V.N., Khatsevsky K.V., Shagaditch A.A., Shagarov D.A. Investigation of the effect of semiconductor converters on the power supply network based on mathematical models // Omsk Scientific Herald. – 2013. – № 2 (120). – P. 125–126.
4. Radin V.I. Electric machines: Asynchronous machines. – M. : Higher School Publ., 1988. – P. 98–101.
5. Epifanov A.P. Fundamentals of electric drive. – St. Petersburg : Lan Publ., 2009. – 192 p.
6. Kolomiets A.P. Electric drive and electrical equipment. – M. : KolosS Publ., 2007. – 328 p.
7. Zhdanov P.S. Stability issues of electrical systems. – M. : Energy Publ., 1979. – 456 p.
8. Tong W. Mechanical Design of Electric Motors. Radford, CRC Press Publ., 2017, pp. 321–322.
9. Paul C., Oleg W., Scott D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Radford, Wiley-IEEE Press Publ., 2002, pp. 407–408.
10. Chilikin M.G. General course of electric drive. – M.: Energoizdat Publ., 1981. – P. 32–33.