DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

УДК 621.31

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Б.Ю.ВАСИЛЬЕВ[1], **В.А.ШПЕНСТ**[1], **О.В.КАЛАШНИКОВ**[1], **Г.Н.УЛЬЯНОВ**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Лианозовский электромеханический завод, Москва, Россия*

Предметом исследования являются промышленные электроприводы, которые обеспечивают работу главных исполнительных механизмов технологических машин и установок при освоении месторождений полезных ископаемых.

Цель работы заключается в исследовании возможности обеспечения энергетической развязки промышленных электроприводов и сетей электроснабжения за счет использования в структуре преобразователей частоты активных выпрямителей. Главной задачей энергетической развязки является исключение негативного влияния низкого качества электроэнергии и изменения ее параметров на работу электроприводов.

Для выполнения исследования энергетической развязки электропривода с активным выпрямителем использовались методы математического и имитационного моделирования с математическим пакетом прикладных программ. Была создана комплексная имитационная модель с двумя электроприводами, которые включали активный выпрямитель (энергетически развязанный электропривод) и диодный выпрямитель (стандартный тип электропривода). Имитационная модель снабжена средствами осциллографирования и исследования влияния показателей качества электроэнергии сети на работу преобразователей частоты и приводных двигателей.

Исследование эффективности энергетической развязки с помощью активного выпрямителя преобразователя частоты показывает, что приводной электродвигатель полностью сохраняет устойчивость и управляемость частотой вращения и моментом при изменении показателей качества электроэнергии в сети. Использование активного выпрямителя позволяет обеспечить работу электропривода в заданном режиме при снижении напряжения до 30 % при нормативно установленном значении 5-10 %, т.е. энергетическая развязка обеспечивает глубокий запас устойчивости по напряжения. Электропривод с активным выпрямителем обеспечивает энергетическую развязку при несимметрии напряжения сети. Контроль механических переменных асинхронного двигателя при отклонении амплитуды и частоты напряжения по всем фазам сети обеспечивается на заданном уровне.

***Ключевые слова*:** электропривод, сеть электроснабжения, энергетическая развязка, энергетическая совместимость

***Как цитировать эту статью*:** Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов / Б.Ю.Васильев, В.А.Шпенст, О.В.Калашников, Г.Н.Ульянов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 41-49. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

Введение. Для обеспечения заданных режимов работы приводных двигателей в промышленных электроприводах используются преобразователи частоты. Современные типы преобразователей обеспечивают возможность формирования характеристик приводных машин с заданными механическими и энергетическими параметрами.

Для управления приводными двигателями в современных промышленных электроприводах используются скалярные системы управления, векторные и прямого управления моментом.

Для управления преобразователями частоты современных промышленных электроприводов используются системы широтно-импульсной, пространственно-векторной и релейной модуляции.

Большая часть исследований в области промышленных электроприводов посвящена развитию и исследованию данных систем и эффективности их использования [4, 6, 9, 11, 14]. Другая часть исследований проводится в области развития структур преобразователей части и электроприводов в целом, включая область рационального выбора и обоснования типов приводных машин и типов преобразователей [1-3, 8, 13]. Необходимо отметить крупный комплекс исследований энергетической эффективности промышленных электроприводов [4, 5, 7, 10, 12].

В настоящее время характерной чертой промышленных электроприводов, особенно в горной и нефтегазовой промышленности, является работа в условиях низкого качества электроэнергии. Для обеспечения заданных режимов работы примышленных электроприводов и снижения влияния низкого качества электроэнергии сети используются методы модификации электроэнергетических систем промышленных предприятий, что не всегда является рациональным. Наиболее эффективным инструментом решения данной проблемы является обеспечения энергетической развязки электропривода и сети электроснабжения.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

Обеспечение энергетической развязки электропривода и сети необходимо рассматривать как часть комплексной проблемы обеспечения энергетической совместимости электроприводов [1]. Проблема энергетической совместимости включает в себя следующие основные вопросы: обеспечения энергетической развязки электропривода и сети, регулирование потоков тормозной мощности приводного двигателя, регулирование потоков потребляемой электроприводов мощности и другие.

В настоящей статье представлены результаты исследования эффективности обеспечения энергетической развязки электропривода и сети электроснабжения за счет использования в структуре приводного преобразователя частоты активного выпрямителя.

Постановка проблемы. Основой современных технических средств освоения месторождений полезных ископаемых являются электротехнические комплексы с высокотехнологичными электроприводами, которые характеризуются следующими особенностями:

• электроприводы современных технологических машин являются главными типами движителей их исполнительных механизмов;

• технико-эксплуатационные характеристики электроприводов определяют эффективность и рентабельность освоения месторождений полезных ископаемых;

• в состав электроприводов входят преобразователи частот, которые обеспечивают необходимые характеристики и режимы работы приводных двигателей;

• электроприводы являются главными потребителями электроэнергии;

• электроприводы строятся по одно- или многодвигательной схеме;

• электроснабжение промышленных электротехнических комплексов осуществляется по сетям с низким качеством электроэнергии, на которое оказывает существенное негативное влияние работа электроприводов, подключенных к этой сети промышленных электротехнических комплексов.

В качестве примера электроприводных промышленных электротехнических комплексов, соответствующих данным особенностям, можно привести:

• буровые установки нефтегазовых месторождений (электропривод главных механизмов – подъемной лебедки, стола ротора или верхнего вращателя, буровых насосов);

• карьерные экскаваторы открытых выработок месторождений твердых полезных ископаемых (электропривод главных механизмов – подъема, напора, поворота, хода);

• очистные комбайны подземных выработок месторождений твердых полезных ископаемых (электропривод главных механизмов – шнеков, напора, конвейера).

Современные электроприводы промышленных комплексов (буровых установок, карьерных экскаваторов, очистных комбайнов, конвейерных систем и др.) строятся на основе бесконтактных асинхронных, синхронных и вентильно-индукторных двигателей и двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ). Схема электропривода с преобразователем частоты представлена на рис.1.

На рис.1 показаны напряжения на различных участках схемы электропривода. Напряжение вторичных обмоток трансформатора (входное напряжение диодного выпрямителя ПЧ) формируется следующим образом

$$U_2 = \frac{U_1}{K_{\text{тр}}}, \tag{1}$$

где U_1 – напряжение сети электроснабжения (первичной обмотки трансформатора); $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации.

Постоянное напряжение диодного выпрямителя ПЧ (входное напряжение ЗПТ)

$$U_3 = \frac{\pi}{3} U_2 . \tag{2}$$

Постоянное напряжение автономного инвертора (выходное напряжение ЗПТ)

$$U_4 = K_{\text{сг}} U_3 , \tag{3}$$

где $K_{\text{сг}}$ – коэффициент сглаживания ЗПТ.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

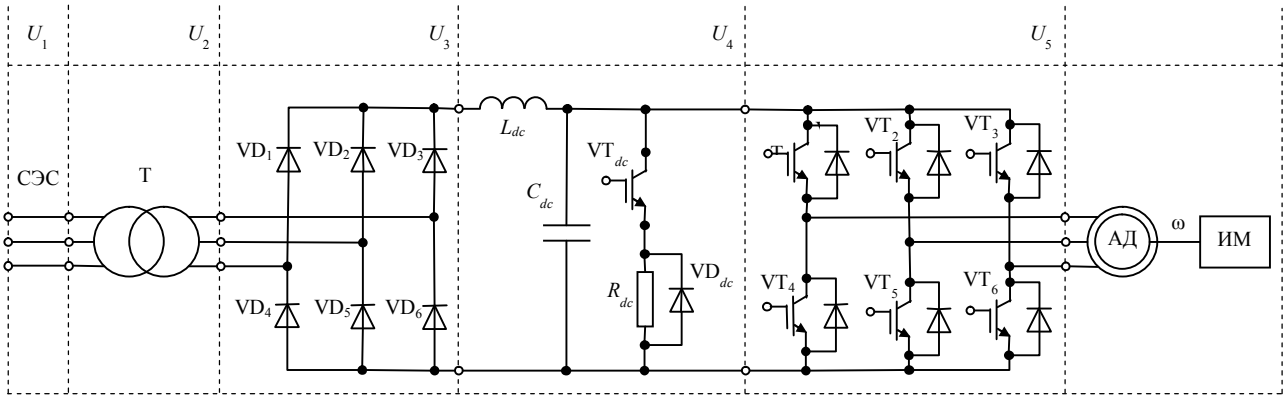


Рис.1. Схема электропривода с двухзвенным преобразователем частоты

Напряжение обмоток статора приводного двигателя (выходное напряжение автономного инвертора ПЧ)

$$U_5 = \frac{\sqrt{3}}{2}\mu U_4, \tag{4}$$

где μ – коэффициент модуляции автономного инвертора.

Обеспечение заданных режимов работы исполнительных механизмов промышленных комплексов осуществляется за счет изменения частоты вращения их приводных двигателей. Частота вращения ротора асинхронного двигателя при использовании в электроприводе скалярной системы управления

$$\omega = 2\pi f, \tag{5}$$

$$f = \frac{U_5}{K_{\text{упр}}},$$

где f – частота напряжения обмоток статора асинхронного двигателя; $K_{\text{упр}}$ – коэффициент пропорциональности скалярной системы управления,

$$\frac{U_5}{f} = K_{\text{упр}} = \text{const}. \tag{6}$$

Выражения (1)-(6) показывают, что изменение напряжения сети электроснабжения приводит к изменению частоты асинхронного двигателя и, как следствие, изменению режима работы исполнительно механизма и нарушению технологических процессов, которые они обеспечивают. Колебания напряжения в сетях промышленных предприятий, приводящие к негативному влиянию на работу промышленных комплексов, обусловлены следующими факторами:

- включение и выключение нерегулируемых электроприводов;
- тяжелые пуски и остановы электроприводов с высокомоментной нагрузкой;
- пуски и остановы груженных электроприводов;
- подключение и отключение других нагрузок;
- замыкания в линиях сети электроснабжения, аварийные отключения и др.

Для минимизации негативного влияния ненормативных отклонений напряжения на режимы работы электроприводов и исполнительных механизмов могут использоваться различные методы [2, 5, 10]. Недостатки данных методов заключаются в необходимости установки дополнительного оборудования, что требует дополнительных вложений и приводит к усложнению структуры электроэнергетической системы промышленного объекта. Эта факторы приводят к увеличению эксплуатационных затрат, а при низкой надежности и эффективности оборудования, к дефрагментации электроэнергетической системы промышленного объекта.

Также недостатков лишены методы обеспечения энергетической совместимости электропривода с сетями электроснабжения [1]. Суть данных методов заключается в обеспечении энер-

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

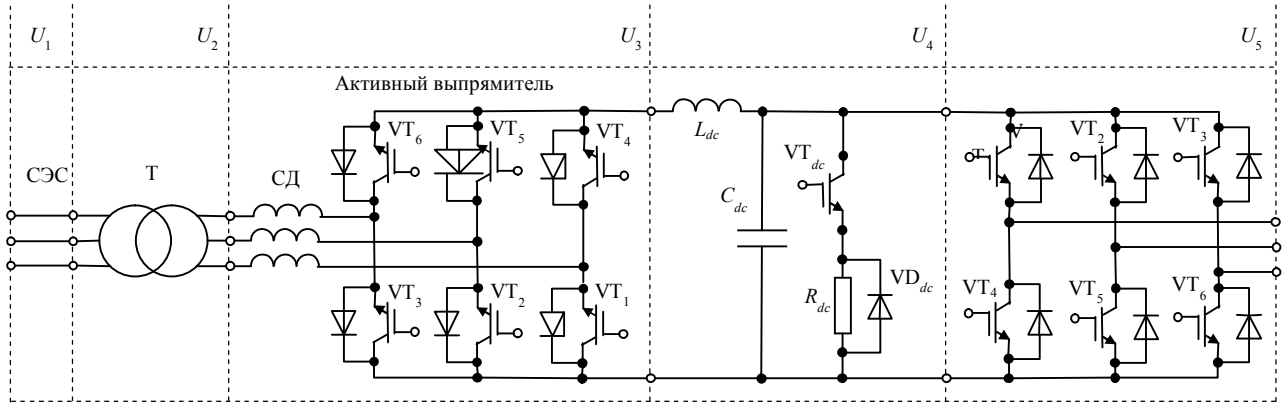


Рис.2. Схема электропривода с активным выпрямителем в преобразователе частоты

гетической совместимости за счет модернизации структуры и алгоритмов управления электропривода, без изменения структуры электроэнергетический системы промышленного объекта. Для исключения негативного влияния изменения напряжения сети на работу электроприводов необходимо обеспечить энергетическую развязку электропривода и сети электроснабжение. Рассмотрим способы и эффективность использования энергетической развязки в электроприводах.

Методология. Для обеспечения энергетической развязки электропривода и сети электроснабжения могут использоваться активные системы регулирования потоков мощности, которые строятся на основе полностью управляемых полупроводниковых модулей. Энергетическую развязку могут обеспечить:

• рекуператоры электроэнергии и функцией стабилизации постоянного напряжения в ЗПТ преобразователя частоты электропривода;

• активные фильтры последовательного и параллельного типов;

• внутренние накопители электроэнергии электроприводов с преобразователями постоянного тока;

• активные выпрямители преобразователей частоты.

Как показано в работах [4, 5, 7, 10, 12], активный выпрямитель ПЧ электроприводов является комплексным средством повышения энергетической эффективности электротехнических комплексов с электроприводами и обеспечения энергетической совместимости электропривода и сети. Использование активного выпрямителя позволяет обеспечить потребление и внешнюю рекуперацию тормозной электроэнергии в сеть электроснабжения удовлетворительного качества. Основное преимущество заключается в обеспечении энергетической развязки электропривода и сети электроснабжения.

Энергетическая развязка – это передача электроэнергии из сети электроснабжения к приводному двигателю без влияния отклонения показателей качества электроэнергии сети на характеристики и режимы работы приводных машин (и исполнительных механизмов) электроприводов промышленных электротехнических комплексов. В части обеспечения энергетической совместимости электропривода и сети электроснабжения активный выпрямитель снимает ограничения по односторонней проводимости электроэнергии ПЧ, которая обусловлена наличием диодного неуправляемого выпрямителя.

Активный выпрямитель (рис.2) состоит из сетевых дросселей и полупроводникового блока. Также АВ комплектуется системой управления и комплексом датчиков напряжения и тока сети и конденсатора ЗПТ.

Исследование характеристик АВ для обеспечения энергетической развязки выполнялось методом имитационного моделирования с использование математических пакетов. Для исследования необходимо построить имитационную модель с возможностью анализа следующих зависимостей отклонения амплитуды напряжения на характеристики приводного двигателя; отклонения частоты напряжения на характеристики приводного двигателя; несимметрии напряжения сети по амплитудам на характеристики двигателя; несимметрии напряжения сети по углам сдвига фаза на характеристики двигателя.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.41*

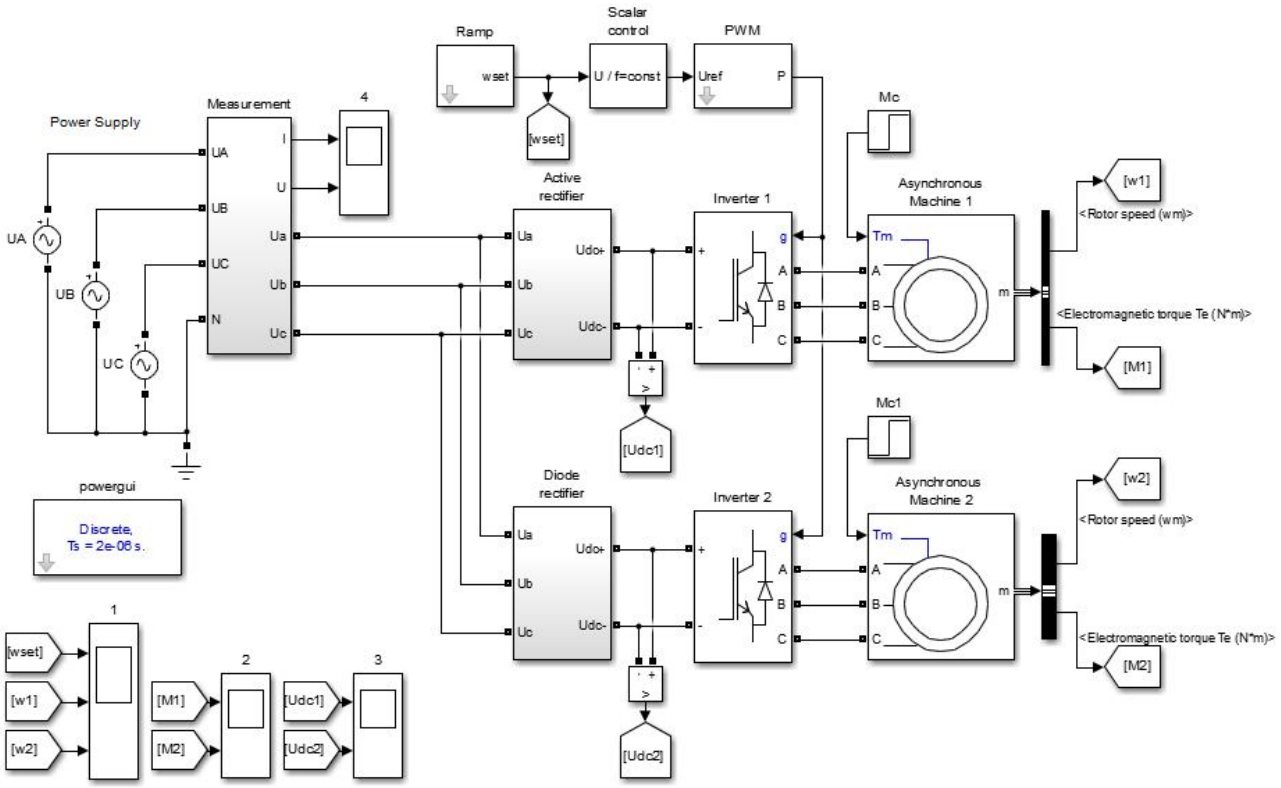


Рис.3. Имитационная модель для исследования энергетической совместимости

При выполнении исследования энергетической развязки с помощью активного выпрямителя ПЧ электропривода и сети целесообразно принять ряд допущений, которые должны ускорить расчет имитационных моделей и обеспечить сохранение адекватности результатов моделирования. Общепринятыми допущениями в исследовании электроприводной и преобразовательной техники является замена полупроводниковых приборов идеальными ключами, таким образом их включение и выключение происходит мгновенно, сопротивление в открытом состоянии равно нулю, в закрытом – бесконечности.

Имитационная модель электропривода с активным и диодным выпрямителями в ПЧ и скалярной системой управления представлена на рис.3. Имитационная модель реализована в среде MatLab с помощью блоков библиотек Simulink и SimPower Systems. Построение имитационной модели выполнялось по следующему алгоритму: построение эквивалентной схемы электропривода; поиск математического описания электропривода с учетом принятых допущений; построение структурной схемы математического описания; реализация структурных схем в среде MatLab.

Имитационная модель состоит из следующих элементов: Power Supply – сеть электроснабжения; Active rectifier – активный выпрямитель; Diode rectifier – диодный выпрямитель; Inverter (1 и 2) – автономные инверторы; Asynchronous machine (1 и 2) – асинхронные двигатели; Ramp – задатчик интенсивности; Load – нагрузка; Scalar control – скалярное управление; Pulse width modulation (PWM) – широтно-импульсная модуляция; Measurement – измеритель напряжения и тока.

Имитационная модель состоит из двух электроприводов – с активным и с диодным выпрямителем. Оба электропривода подключены к общей сети электроснабжения. Управление электроприводами осуществляется от общей скалярной системы управления. Нагрузка электроприводов также общая. Использование общего источника, системы управления и нагрузки позволяет исследовать свойства активного и диодного выпрямителей по обеспечению энергетической совместимости в одинаковых условиях работы.

Для сравнения характеристик активного и диодного выпрямителей по обеспечению энергетической развязки электропривода с сетью в имитационной модели выполняется осциллографирование следующих переменных:

- частот вращения электроприводов с АВ и ДВ, заданной частоты вращения;
- моментов асинхронных двигателей электроприводов с АВ и ДВ, момента нагрузки;

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

• напряжения в звене постоянного тока и задание на напряжения активного выпрямителя;
• напряжения сети электроснабжения.

Активный выпрямитель имеет следующие параметры: напряжение питания – 380 В, индуктивность дросселя – 1 мГн, активное сопротивление дросселя – 0,0001 Ом, выходное напряжение – 600 В, максимальный ток нагрузки – 500 А, емкость конденсатора – 50000 мкФ.

В электроприводах используется асинхронный двигатель мощностью 75 кВт, рассчитанный на напряжение 380 В.

Обсуждение. Для обеспечения энергетической развязки электропривода и сети электроснабжения необходимо обеспечить режимы работы приводного двигателя без влияния отклонения показателей качества электроэнергии сети. При исследовании энергетической развязки выполнялось моделирование работы асинхронного двигателя в следующих режимах:

• пуск без нагрузки до номинальной частоты вращения;
• наброс номинальной нагрузки при работе двигателя с номинальной частоты вращения;
• останов двигателя с действующей нагрузкой.

На рис.4-6 представлены осциллограммы следующих переменных электроприводов: напряжения сети (*а*); напряжения звена постоянного тока электроприводов с АД и АВ, а также задание на выпрямленное напряжение системы управления АВ (*б*); частот вращения асинхронных двигателей электроприводов с АВ и ДВ, задание на частоту вращения (*в*); моментов асинхронных двигателей электроприводов с АВ и ДВ, задание на момент (*г*).

Осциллограммы переменных электроприводов при синусоидальном симметричном напряжении сети с действующим линейным значением 380 В (амплитудным фазным значением 310 В) и частотой 50 Гц приведены на рис.4.

Анализ осциллограмм показывает, что при напряжении 310 В на выходе ДВ формируется напряжение на уровне 515 В, а АВ обеспечивает поддержание напряжения на заданном уровне 620 В. При частоте вращения асинхронного электропривода с ДВ и набросе нагрузки в 1 с происходит отклонение частоты вращения двигателя в два раза сильнее, чем при в электроприводе с АВ. По осциллограмме моментов видно, что отработка момента нагрузки электроприводом с АВ происходит быстрее, чем в электроприводе с ДВ. Пульсации момента в установившемся режиме электропривода с АВ в два раза меньше, чем в электроприводе с ДВ.

На рис.5 показаны осциллограммы при снижении амплитуды напряжения до уровня 220 В. Такой уровень снижения напряжения соответствует снижению действующего линейного напряжения сети на 30 % с 380 до 270 В. Осциллограммы показывают, что при снижении напряжения в сети электропривод с ДВ способен обеспечить разгон асинхронного двигателя, но при набросе нагрузки электродвигатель опрокидывается. Потеря управляемости обусловлена снижением напряжения звена постоянного тока до 370 В, что влечет снижения потока асинхронного двигателя. Электропривод с АВ обеспечивает стабилизацию напряжения на заданном уровне 620 В. Также видно, что снижение напряжения на 30 % не оказывает влияния на режимы работы приводного двигателя.

На рис.6 приведены осциллограммы переменных электроприводов при различном снижении амплитуды и частоты напряжения в линиях сети электроснабжения: U_A = 310 В; U_B = 310 В; U_C = 310 В; f_A = 50 Гц; f_B = 45 Гц; f_C = 40 Гц.

При этих значениях параметров сети электроснабжения увеличивается пульсации напряжения в звене постоянного тока электропривода с ДВ, причем пульсации выпрямленного напряжения усиливаются при набросе нагрузки. Осциллограммы частоты вращения показывают, что на работу приводного двигателя электропривода с АВ изменения показателей качества электроэнергии сети электроснабжения не оказывают влияния. Электропривод с ДВ при таких же параметрах качества электроэнергии не способен обеспечить отработку момента нагрузки. Наброс нагрузки вызывает появление значительных пульсаций момента и значительную длительность переходного процесса по частоты вращения.

Заключение. Электроприводы промышленных электроприводов обеспечивают работу главных исполнительных механизмов технологических комплексов. От их эффективной работы зависят технико-эксплуатационные характеристики промышленных электротехнических комплексов, рентабельность осваиваемых месторождений и другие факторы эффективности работы

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.41

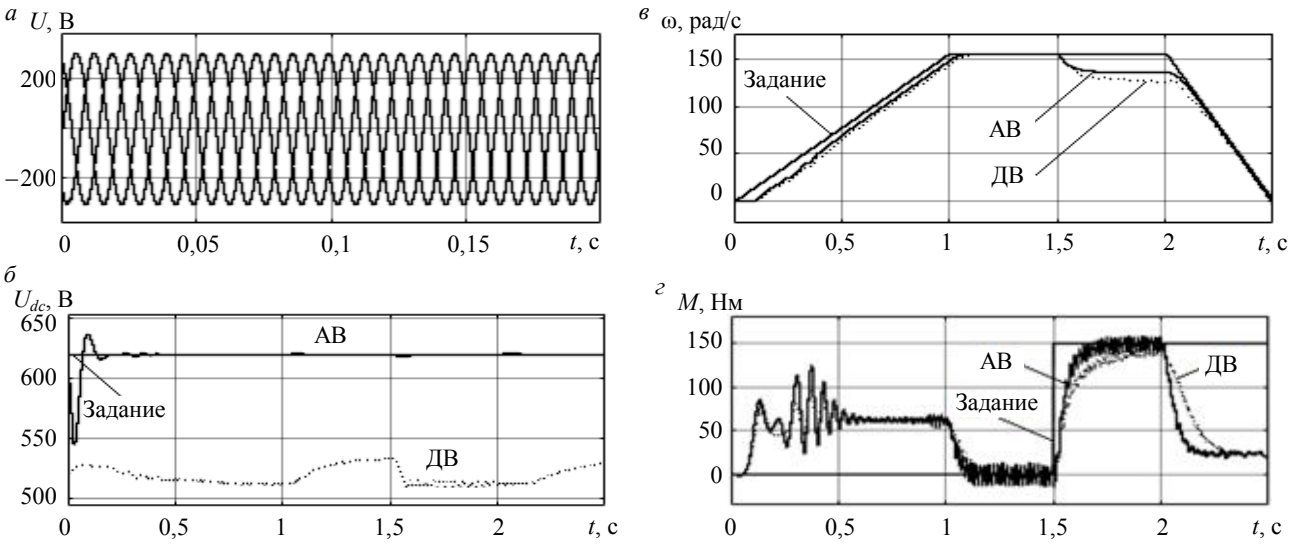


Рис.4. Осциллограммы переменных при синусоидальном и симметричном напряжении

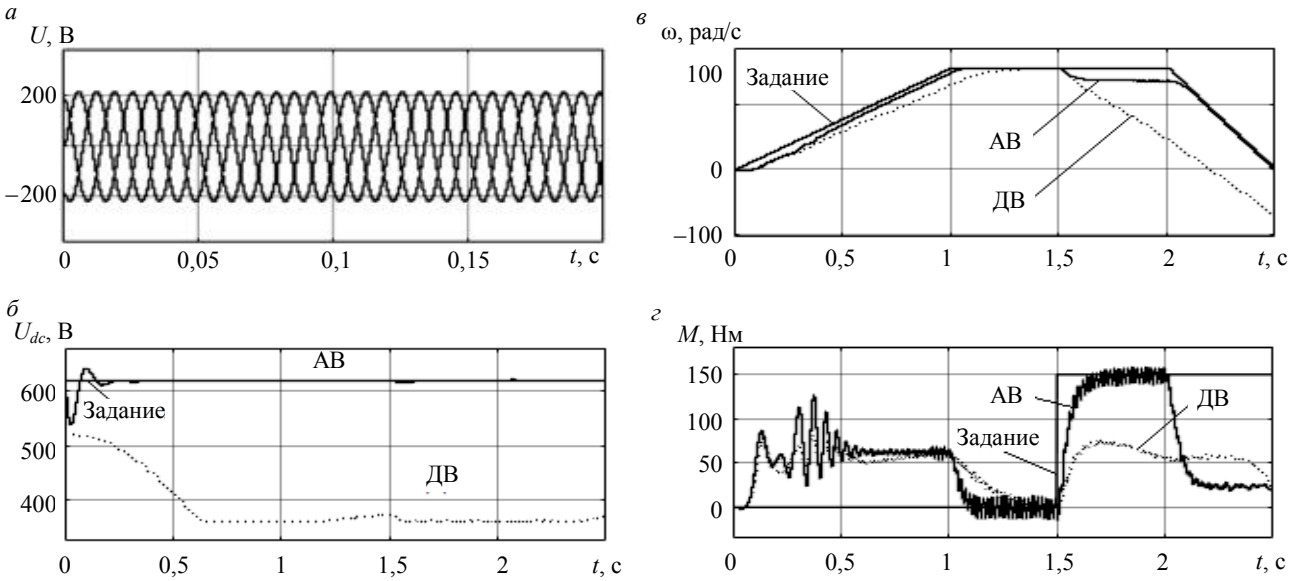


Рис.5. Осциллограммы переменных при снижении амплитуды напряжения во всех фазах сети

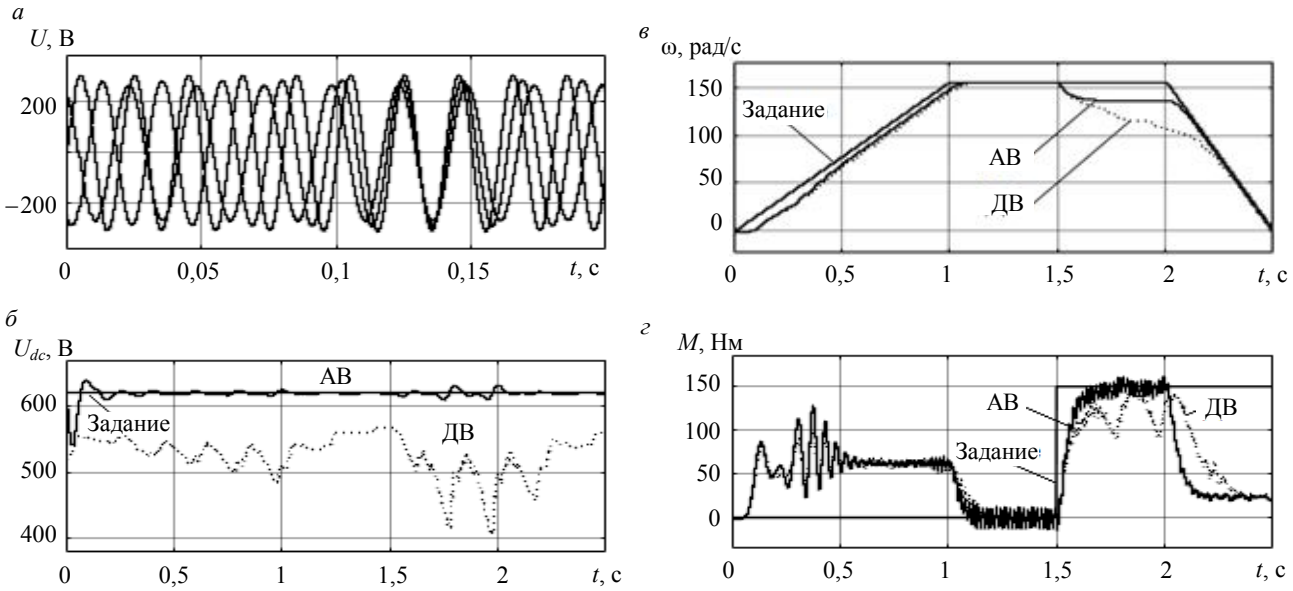


Рис.6. Осциллограммы переменных при искажении по амплитудам и частоты напряжения по фазам сети электроснабжения

индустриальных объектов. При этом энергообеспечение промышленных объектов обеспечивается электроэнергией низкого качества, что напрямую влияет на работу электроприводов главных механизмов. Негативное влияние может приводить как к отклонению расчетных параметров электроприводов, так и к полному отказу основного электротехнического оборудования промышленных электроприводов.

Для исключения негативного влияния целесообразно обеспечивать энергетическую развязку электроприводов основного электротехнического оборудования и сетей электроснабжения. Самыми действующими способами обеспечения энергетической развязки являются внутренние средства электроприводов. Их использование не требует модернизации сетей электроснабжения и установки в них дополнительного оборудования. Наиболее эффективными средствами обеспечения энергетической развязки являются активные выпрямители преобразователей частоты электроприводов переменного тока.

Исследование эффективности энергетической развязки, обеспечиваемой с помощью преобразователя частоты с активным выпрямителем, показывает, что приводной электродвигатель полностью сохраняет устойчивость и управляемость частотой вращения и моментом при изменении показателей качества электроэнергии в сети. Использование активного выпрямителя позволяет обеспечить работы электропривода в заданном режиме при снижении напряжении до 30 % при нормативно установленном значении 5-10 %, т.е. энергетическая развязка обеспечивает глубокий запас устойчивости по напряжения. Электропривод с активным выпрямителем обеспечивает энергетическую развязку при несимметрии напряжения сети. Контроль механических переменных асинхронного двигателя при отклонении амплитуды и частоты напряжения по всем фазам сети обеспечивается за заданном уровне.

Выполненные исследования показывают, что без использования энергетической развязки обеспечить работу электропривода при изменении параметров качества электроэнергии в сети невозможно. Это показывают исследования электропривода с ДВ. Обеспечение энергетической развязки как части комплексного подхода к энергетической совместимости промышленных электроприводов и сетей электроснабжения на сегодняшний день является важнейшим фактором обеспечения не только технико-эксплуатационных характеристик электроприводов, но и комплекса электротехнического оборудования промышленных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Васильев Б.Ю.* Электропривод. Энергетика электропривода. М.: СОЛОН-Пресс, 2015. 268 с.

2. *Васильев Б.Ю.* Энергосбережение и энергоэффективность в промышленности / Б.Ю.Васильев, Ю.Л.Жуковский // СПб: Энергетика, 2016. 214 с.

3. *Пустоветов М.Ю.* Помехи в частотно-регулируемом электроприводе переменного тока / М.Ю.Пустоветов, Л.И.Вербицкий // Труды всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012»; Ростовский государственный университет путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2012. С. 414-416.

4. *Akagi H.* A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor / H.Akagi, S.Tamuramore // IEEE Transactions on Power Electronics. 2006. Vol. 21. № 5. P. 1459-1469. DOI:10.1109/TPIL.2006.880.239

5. A complete excitation-shaft-bearing model to overcome the shaft induced voltage and bearing current / Reza Kazemi Golkhandan, Mohammad Tavakoli Bina, Masoud Aliakbar Golkar, Mohsen Jokar // Power Electronics. Drive Systems and Technologies Conference. 2011. P. 362-366. DOI:10.1109/PEDSTC.2011.5742447

6. *Chen S.* Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters / S.Chen, T.A.Lipo, D.Fitzgerald // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1996. Vol. 11. № 1. P. 25-32. DOI:10.1109/60.4865572

7. *Kalaiselvi J.* Bearing currents and shaft voltage reduction in dual-inverter-fed open-end winding induction motor with reduced CMV PWM methods / J.Kalaiselvi, S.Srinivas // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 62. № 1. P. 144-152. DOI:10.1109/TIE.2014.2336614

8. *Link P.J.* Minimizing electric bearing currents in ASD systems // IEEE Industry Applications Magazine. 1999. Vol. 5. № 4. P. 55-66. DOI:10.1109/2943.771367

9. *Muetze Annette.* Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW / Annette Muetze, Andreas Binder // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1999. Vol. 54. № 3. P. 1614-1622. DOI:10.1109/TIE.2007.894698

10. Mitigation of bearing current and shaft voltage using five level inverter in three phase induction motor drive with SPWM technique / Rajendra K. Dhatrak, Rajesh K. Nema, Soubhagya Kumar Dash, Dinesh M. Deshpande // International Conference Industrial Instrumentation and Control. 2015. P. 1184-1189. DOI:10.1109/ITC.2015.7150927

11. Research of bearing voltage and bearing current in induction motor drive system / Zhuxia Fan, Yongjian Zhi, Bingquan Zhu, Guanglin Yan, Yu Shi // Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Shenzhen, China. 2016. 1195. P. 1195-1198.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.41*

12. Research on electrostatic shield for discharge bearing currents suppression in variable-frequency motors / Jing Quan, Baodong Bai, Yu Wang, Weifeng Liu // International Conference on Electrical Machines and Systems. 2014. P. 139-143. DOI:10.1109/ICEMS.2014.7013453

13. *Reddy Sharana*. Simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in two-level and three-level PWM inverter fed induction motor drive with long cable / Sharana Reddy, B.Basavaraja // International Conference on power and advanced control engineering. Bangalore. 2015. P. 221-226. DOI:10.1109/ICPACE.2015.7274949

14. *Schiferl R.F*. Bearing current remediation options / R.F.Schiferl, M.J.Melfi // IEEE Industry Applications Magazine. 2004. Vol. 10. № 4. P. 40-50. DOI:10.1109/MIA.2004.1311162

***Авторы*: Б.Ю.Васильев,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *vasilev.bu@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **В.А.Шпенст,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *shpenst@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **О.В.Калашников,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Г.Н.Ульянов,** *д-р техн. наук*, *ведущий научный сотрудник* (*Лианозовский электромеханический завод*, *Москва*, *Россия*).

Статья принята к публикации 27.12.2017.