Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 62-83::621.313.3
ГРНТИ 45.41.31 50.43.00 52.13.29
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:
Исполнитель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева»**
От имени Руководителя организации **_____ / В.А. Ковалев /** **М.П.**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 6 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 г.

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»
Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.
Проект: Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии
Руководитель проекта: **_____/Семыкина Ирина Юрьевна** (подпись)

Кемерово
2013 г.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ
по Государственному контракту 14.740.11.1105 от 24 мая 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Руководитель темы:

доцент кафедры «Электропривод и автоматизация», кандидат технических наук, доцент	_____ подпись, дата	Семыкина И. Ю.

Исполнители темы:

аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____ подпись, дата	Гаргаев А.Н.
аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____ подпись, дата	Кольцов Р. А.
ассистент кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____ подпись, дата	Киселев А. В.
ассистент кафедры «Электропривод и автоматизация»	_____ подпись, дата	Евстратов А.Э.
студент группы ЭАм-131	_____ подпись, дата	Пыпа А.А.
студент группы ЭАб-111	_____ подпись, дата	Вернер Д.Ю.
студент группы ЭАб-111	_____ подпись, дата	Конев А.И.

Реферат

Отчет 108с., 3 ч., 50 рис., 1 табл., 15 источн..

Ключевые слова: горные машины, асинхронный электродвигатель, регулируемый электропривод, энергоэффективность.

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 6 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 "Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии" (шифр "2011-1.2.2-226-011") от 24 мая 2011 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук в следующих областях:- атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;- водородная энергетика; - новые и возобновляемые источники энергии; - производства топлив и энергии из органического сырья; - создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии; - создание энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных средств" в рамках мероприятия 1.2.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы – обобщенная оценка полученных в ходе выполнения НИР результатов с возможностью их дальнейшего использования как в реальном секторе экономики так и в научно-исследовательской и учебной деятельности.

При выполнении работ по этапу использовались:

1. Методы компьютерного моделирования.
2. Методы планирования и выполнения эксперимента.

Результаты, полученные при выполнении 6 этапа Государственного контракта:

1. Рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики
2. Рекомендаций по возможности использования результатов при создании научно-образовательных курсов

Содержание

Определения 5
Обозначения и сокращения 6
Введение 7
Обобщенная оценка полученных результатов 8
1. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов разработанных средств управления и существующих решений 9
1.1 Сравнительная оценка градиентного управления с различными регуляторами 9
1.2 Сравнительная оценка энергоэффективности критериев минимизации потерь 17
1.2.1 Оптимизация на этапе составления целевой функции 19
1.2.2 Оптимизация на этапе формировании задания 25
1.2.3 Результаты вычислительных экспериментов 31
1.3 Сравнительная оценка динамических свойств энергоэффективных систем упрваления 39
2 Разработка рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики 54
3 Разработка рекомендаций по возможности использования результатов при создании научно-образовательных курсов 63
3.1 Рабочая программа по дисциплине «Автоматизированный электропривод» 63
3.2 Рабочая программа по дисциплине «Системы управления электроприводов» 80
3.3 Рабочая программа по дисциплине «Теория электропривода» 97
Заключение 106
Список использованных источников 107

Определения

Коэффициент полезного действия – характеристика эффективности системы электропривода в отношении выполнения электромеханического преобразования энергии.

Энергоэффективность – комплексное понятие, в рамках данной работы подразумевающее эффективное использование электрической энергии, потребляемой электроприводом а процессе своего функционирования.

Энергооптимальность – характеристика, свидетельствующая о достижении экстремума (максимума или минимума) какого-либо энергетического показателя качества функционирования.

Математическая модель – представление объекта автоматизации в виде математических формул описывающих процессы происходящие в объекте с максимальным приближением.

Обозначения и сокращения

Список использованных обозначений:
$\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ – n-мерный вектор переменных состояния;
$\mathbf{u} = \boldsymbol{u}(t)$ – m-мерный вектор входов;
M – электромагнитный момент;
$M_{зад}$ – заданный электромагнитный момент;
Ψ_1 – потокосцепление статора;
$\Psi_{1зад}$ – заданное потокосцепление статора;
Ψ_2 – потокосцепление ротора;
$\Psi_{2зад}$ – заданное потокосцепление ротора;
γ – угол между потокосцеплением статора и ротора;
$\gamma_{зад}$ – заданный угол между потокосцеплением статора и ротора;
ΔP – величина омических потерь;
$\mathbf{H}$ – диагональная матрица настроечных коэффициентов;
$Q(\mathbf{x})$ – целевой функционал;
$\mathbf{\Gamma}$ – матрица весовых коэффициентов.

Введение

Выполнение научно-исследовательских работ по 6 этапу Государственного контракта № 14.740.11.1105 «Исследование процесса электромеханического преобразования энергии в динамических режимах» предполагает следующие виды работ:

3. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов разработанных средств управления и существующих решений
4. Разработка рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики
5. Разработка рекомендаций по возможности использования результатов при создании научно-образовательных курсов

Представленный этап посвящен обобщенной оценки полученных результатов в ходе исследований энергооптимального закона управления электродвигателями переменного тока.

Целью данного этапа является обобщенная оценка полученных в ходе выполнения НИР результатов с возможностью их дальнейшего использования как в реальном секторе экономики так и в научно-исследовательской и учебной деятельности. В рамках достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов разработанных средств управления и существующих решений.
2. Разработать рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики
3. Разработать рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики

Обобщенная оценка полученных результатов

Для анализа работоспособности градиентного управления и проверки выводов, сформированных на предыдущих этапах НИР, были проведены вычислительные эксперименты методом компьютерного моделирования, для чего в среде Delphi было разработано специальное программное средство. В качестве объекта для моделирования выступала обобщенная электрическая машина с параметрами, соответствующими электродвигателю мощностью 200 кВт

1. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов разработанных средств управления и существующих решений

1.1 Сравнительная оценка градиентного управления с различными регуляторами

Эксперименты проводились при номинальной нагрузке и ступенчатом приложении задающих воздействий. В первой серии экспериментов управляющее воздействие, подаваемое на двигатель, формировалось при помощи алгоритмов полученных ранее без учета ограничений, а также комбинации алгоритмов. Для примера на рис. 1.1 – рис. 1.4 приведены результаты вычислительных экспериментов где в качестве заданий использовались номинальные значения электромагнитного момента $M_н$ и амплитуд векторов потокосцепления статора $\psi_{1н}$ и ротора $\psi_{2н}$.

По результатам моделирования оценивалась статическая и динамическая точность, обеспечиваемая различными вариантами

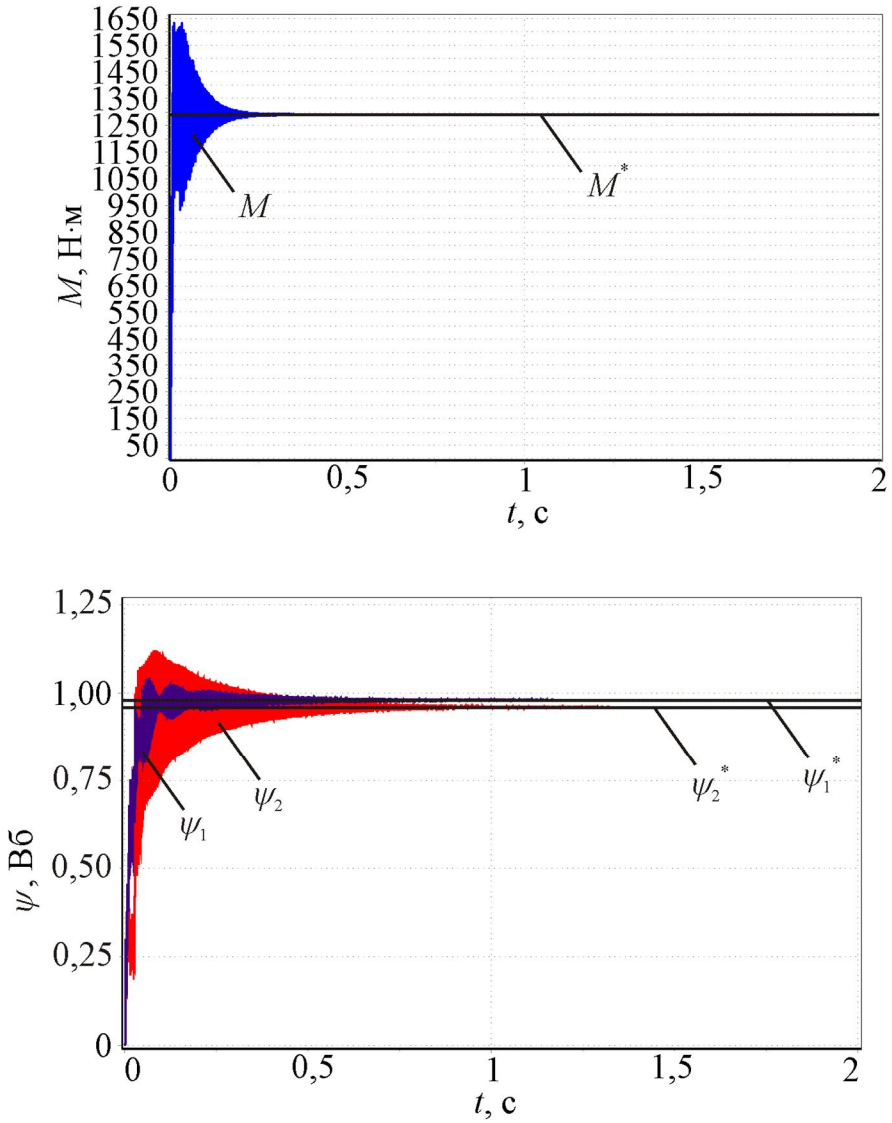


Рис. 1.1. Градиентное управление с использованием интегрального закона регулирования

градиентного управления. При этом, поскольку для всех исследуемых вариантов в результате вычислительных экспериментов в установившихся режимах наблюдались автоколебания как электромагнитного момента, так амплитуд векторов потокосцеплений, количественная оценка ошибки регулирования в установившемся режиме производилась по средневзвешенному показателю:

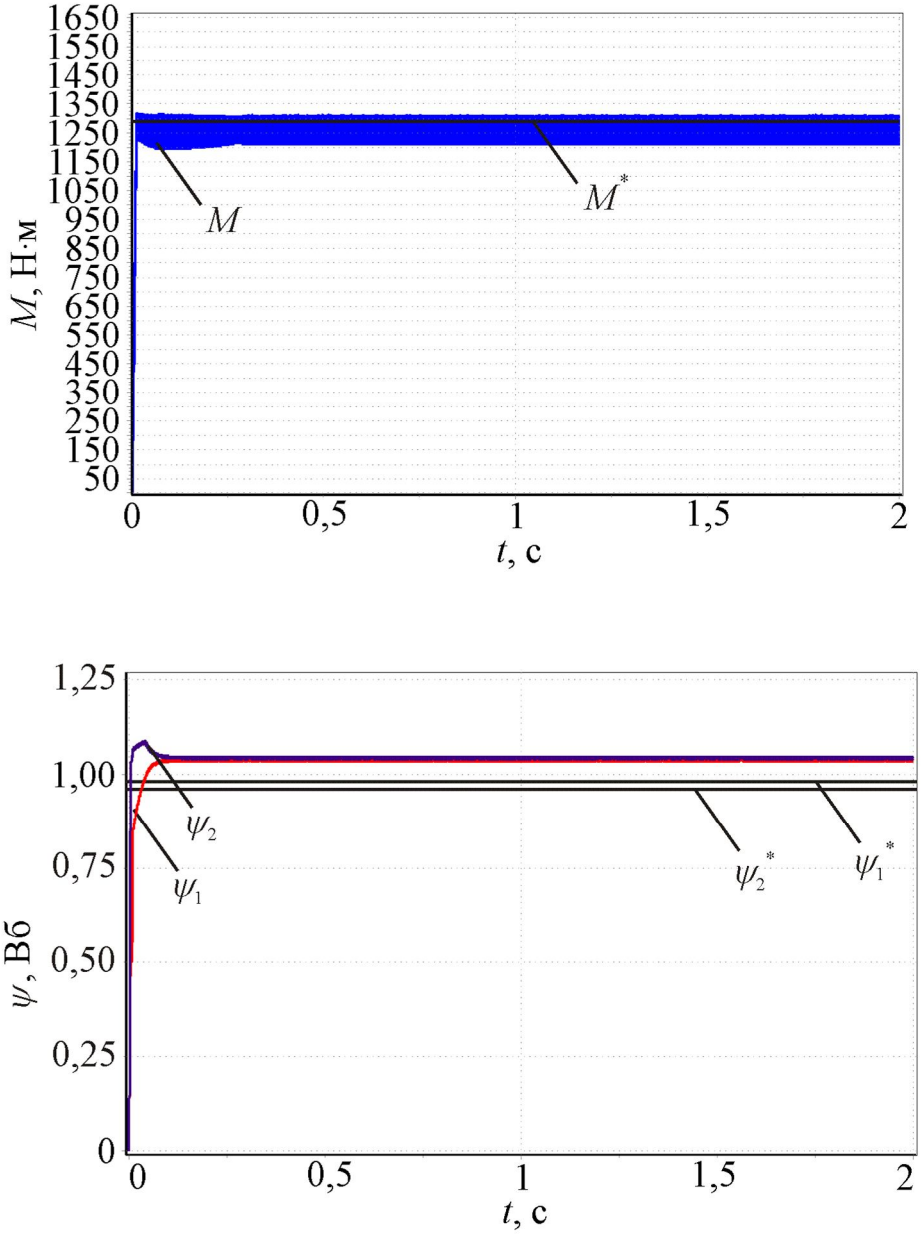


Рис. 1.2. Градиентное управление с использованием вектор-функции

$$\delta \mathbf{y} = \frac{\max\left(\frac{\mathbf{y}-\mathbf{y}^*}{\mathbf{y}^*}\right) - \min\left(\frac{\mathbf{y}-\mathbf{y}^*}{\mathbf{y}^*}\right)}{2} 100\,\%,$$

который следует понимать покомпонентно. В дальнейшем данный показатель будет называться средневзвешенной ошибкой.

Как можно видеть на представленных графиках, наибольшей

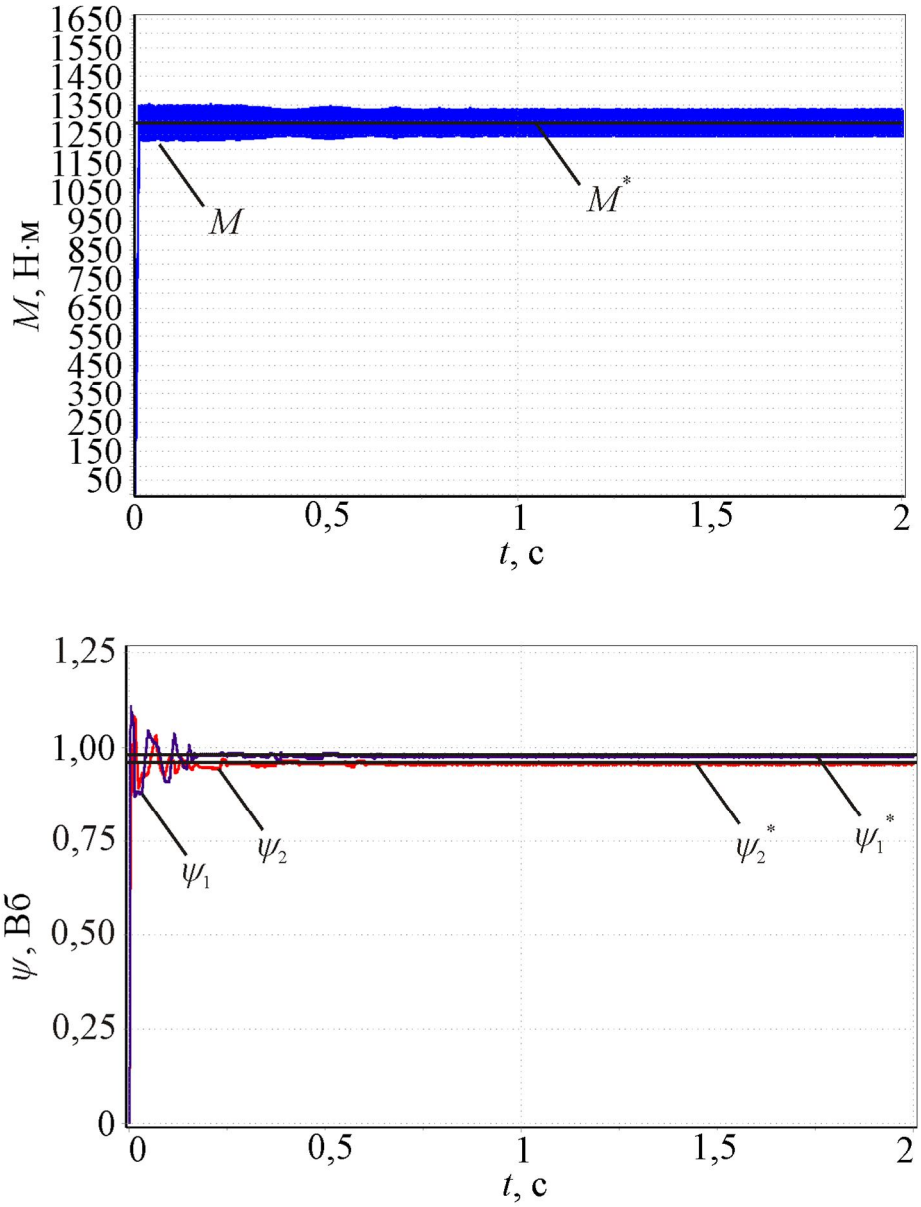


Рис. 1.3. Градиентное управление с использованием интегрального закона регулирования и вектор-функции совместно

точностью регулирования обладает градиентное управление по (2.3), для которого средневзвешенная ошибка регулирования момента составляет порядка 0,007 %, а потокосцеплений соответственно 0,018 %, т.е. пренебрежимо малы.

Другие рассмотренные варианты градиентного управления имеют меньшую точность, а худшие показатели демонстрирует градиентное управление по (2.6), для которого значение средневзвешенной ошибки регулирования момента достигает 2,89 %, а потокосцеплений 8,69 %. Однако одновременно со снижением точности данный вариант градиентного управления обеспечивает снижение колебательности переходных процессов, что играет существенное значение для вопросов как энерго- так и ресурсосбережения.

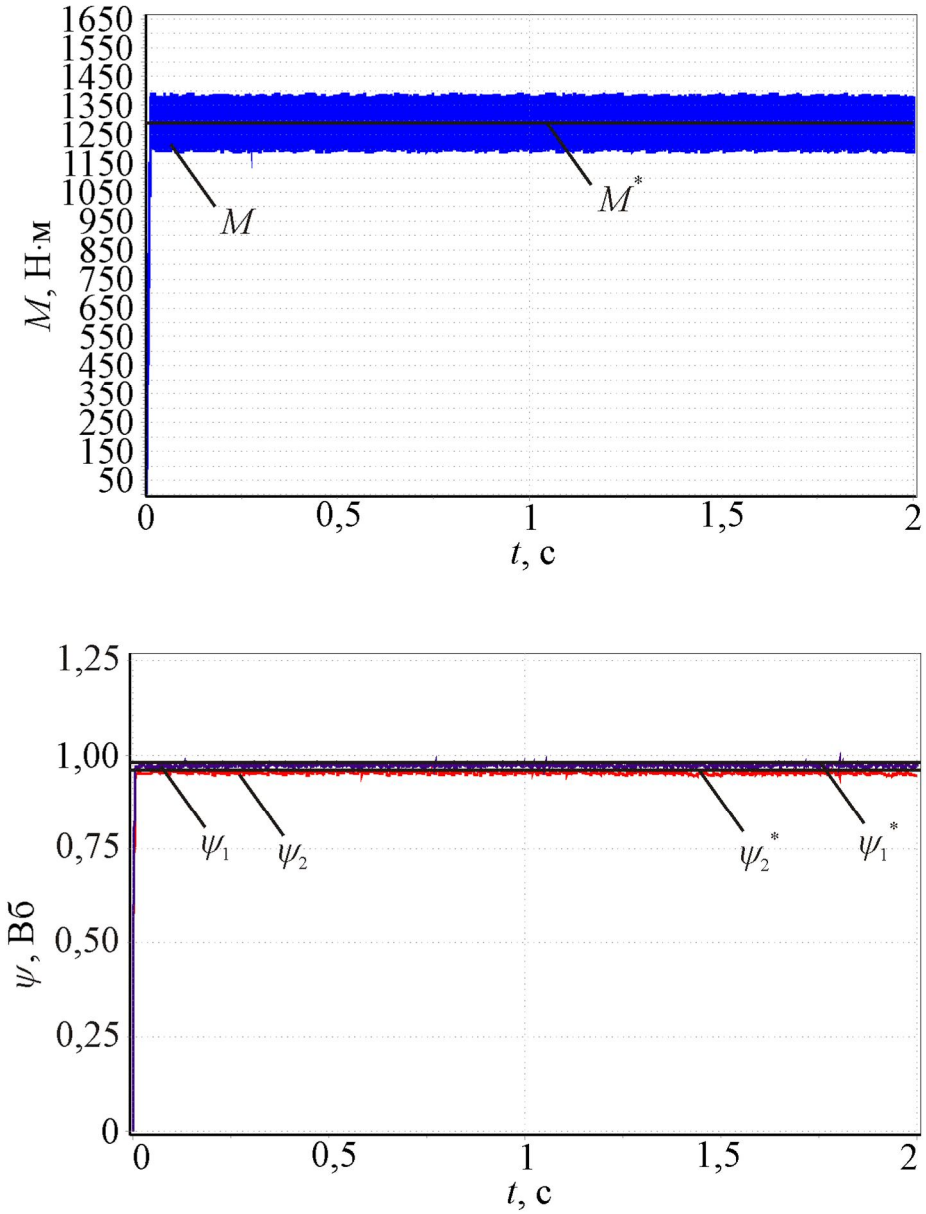


Рис. 1.4. Градиентное управление с использованием вектор-функции отличной от предыдущей

Это достоинство алгоритма с вектор-функцией, заданной в виде пропорциональной или знаковой зависимости от $\partial\omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)/\partial\mathbf{u}$ (1), сохраняется также при использовании его в комбинации с алгоритмом с интегральным законом регулирования (2), но в этом случае интегральная составляющая алгоритма существенно повышает точность регулирования, таким образом, что средневзвешенные ошибки регулирования не превышают значения 0,2 % для момента и 0,35 % для потокосцеплений. Данные результаты полностью согласуются с выводами, изложенными в предыдущих отчетах НИР и подтверждают их достоверность.

Отдельно следует отметить показатели регулирования для алгоритма с вектор-функцией, заданной в виде пропорциональной или знаковой зависимости от $sign(\partial\omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)/\partial\mathbf{u})$ (3), для которого средневзвешенные ошибки составляют 0,05 % по моменту и 0,12 % по потокосцеплениям. Данные показатели примечательны тем, что одновременно с высокой точностью достигается достаточно низкая коле-

бательность, вызванная в значительной степени разрывным характером приложения управляющего воздействия.

Сравнивая отдельно динамические свойства различных вариантов градиентного управления, анализируя рис. 1.1 – рис. 1.4 можно сделать вывод, что наихудшими показателями обладает алгоритм (2) с динамической ошибкой ε, под которой понимаем максимальное мгновенное отклонение от заданного значения, выраженное относительно задания в процентах, составляющей для электромагнитного момента 28,58 %, а для потокосцеплений статора и ротора 18,62 % и 49,85 % соответственно. Наилучшими показателями по этому критерию обладает совместное использование алгоритмов (2) и (1) для которого динамические ошибки составляют по моменту 6,76 %, а по потокосцеплениям статора и ротора 11,43 % и 12,59 %.

Описанные результаты, за исключением алгоритма (3), для которого данный вопрос решается естественным образом, получены без учета ограничений. В связи с этим вторая серия экспериментов проводилась для алгоритмов (2), (1) и их комбинации с учетом (2.36) и аппроксимации функции ограничения арктангенсом по (1.1).

$$\mathbf{u}=\frac{2}{\pi}U_{max}\operatorname{arctg}\left(\frac{\pi}{2}\frac{\mathbf{v}}{U_{max}}\right),\ \text{или}\ \mathbf{u}=U_{max}\operatorname{th}\left(\frac{\mathbf{v}}{U_{max}}\right). \qquad (1.11)$$

$$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0-\boldsymbol{\Gamma}\frac{\partial\omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)}{\partial\mathbf{u}}\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial\mathbf{v}}=\mathbf{v}_0-\mathbf{f}(\mathbf{x})\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial\mathbf{v}}, \qquad (1.22)$$

Для иллюстрации на рис. 1.5 на примере регулирования электромагнитного момента приведены результаты моделирования для комбинации алгоритмов (2) и (1) в тех же условиях, что и на рис. 1.3, но с учетом ограничений. Как можно видеть, наличие ограничений негативно сказывается на точности регулирования, так что средневзвешенная ошибка регулирования момента составила 0,94 %, а потокосцеплений 1,14 %.

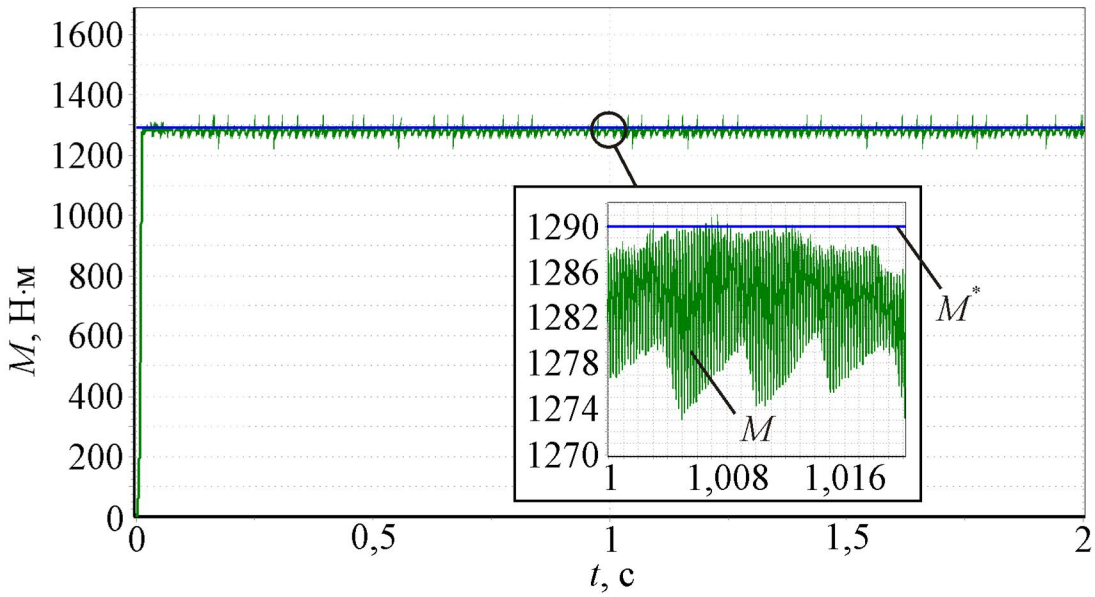


Рис. 1.5. Градиентное управление по (2) и (1) совместно с учетом ограничений

Для объяснения данного явления на рис. 1.6 и рис. 1.7 приведены составляющие вектора напряжения статора в неподвижной системе координат $\mathbf{v_1}$ и $\mathbf{u_1}$, рас-

считанные в соответствии с данным алгоритмом градиентного управления до и после наложения ограничения соответственно.

Как можно видеть, на определенном этапе, определяющемся разгоном двигателя и более детально показанном на рис. 2.12.а, значения составляющих векторов $\mathbf{v_1}$ и $\mathbf{u_1}$ практически совпадают. Но, при неизменных заданных значениях электромагнитного момента и амплитуд векторов потокосцеплений необходимо протекание по обмоткам токов практически неизменной величины, а подводимое напряжение расходуется не только на создание токов, но и на преодоление ЭДС вращения двигателя. В связи с этим при дальнейшей работе двигателя, в силу наличия ограничений между составляющими векторов $\mathbf{v_1}$ и $\mathbf{u_1}$ возникают различия, которые тем выше, чем выше угловая скорость. Так на рис. 2.12.б показано,

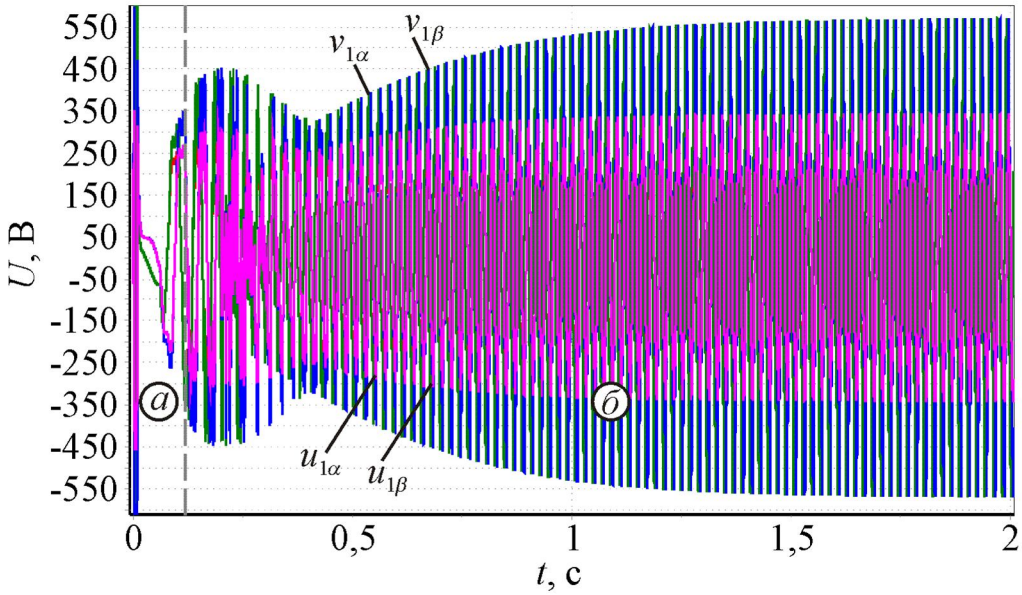
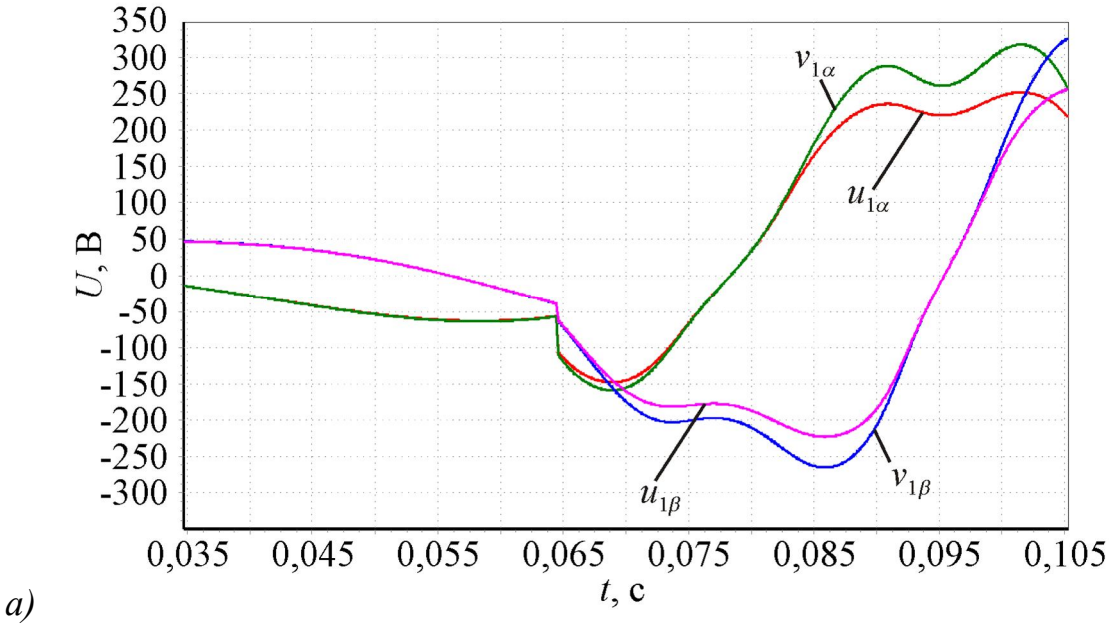
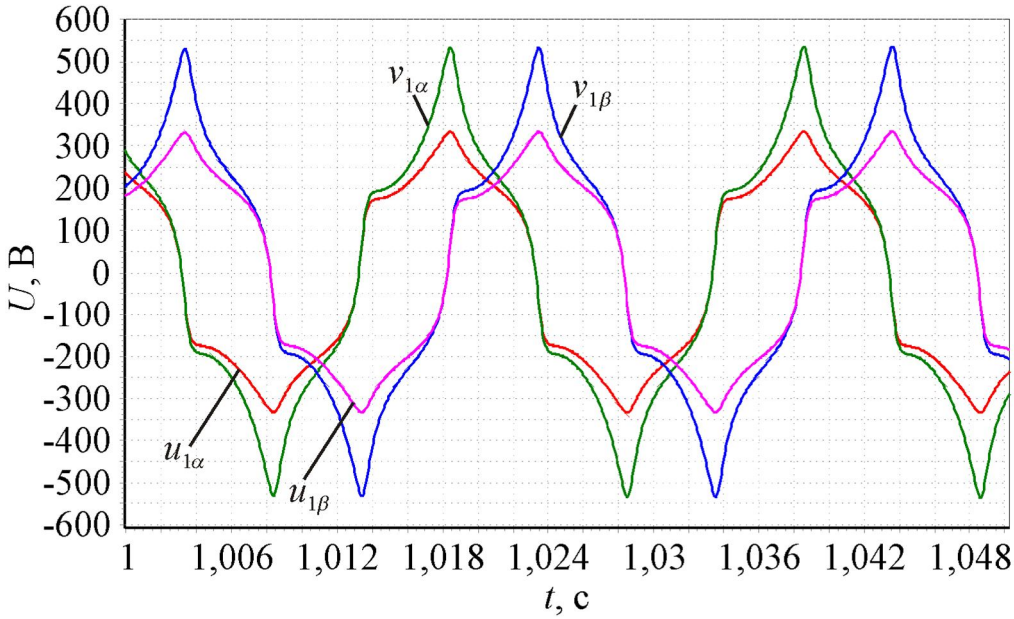


Рис. 1.6. Напряжение статора двигателя до и после наложения ограничения



а)



б)

Рис. 1.7. Зоны напряжения статора при градиентном управлении с ограничением в соответствии с рис. 2.11

что при угловой скорости двигателя, незначительно превышающей номинальное значение, в данном примере на 10 %, это расхождение составляет порядка 60 %. Обеспечение в этих условиях такой высокой точности регулирования электромагнитного момента объясняется влиянием модификации градиентного управления по 1.2 на форму подводимого к двигателю напряжения, что выражается в виде существенных нелинейных отклонений от синусоидальности, которые проявляются, в том числе, в виде дополнительных гармонических искажений момента, проиллюстрированных на рис. 1.5.

Несмотря на возможность обеспечения достаточно высокой точности регулирования с учетом ограничений, накладываемых на величину подводимого к двигателю напряжения, модификация градиентного управления по (2.36) имеет определенные границы применимости. Для иллюстрации данного утверждения на рис. 2.13 показан процесс регулирования электромагнитного момента для случая, когда

нагрузка на двигатель составляет номинальное значение, но задание установлено на уровне $5 \cdot M_н$. Под действием динамического момента двигатель разгоняется, а при угловой скорости превышающей номинальную на 23 % в силу насыщения функции ограничения электропривод теряет управляемость. Составляющие векторов $\mathbf{v_1}$ и $\mathbf{u_1}$, соответствующие данному режиму работы, представлены на рис. 1.9, а угловая скорость на

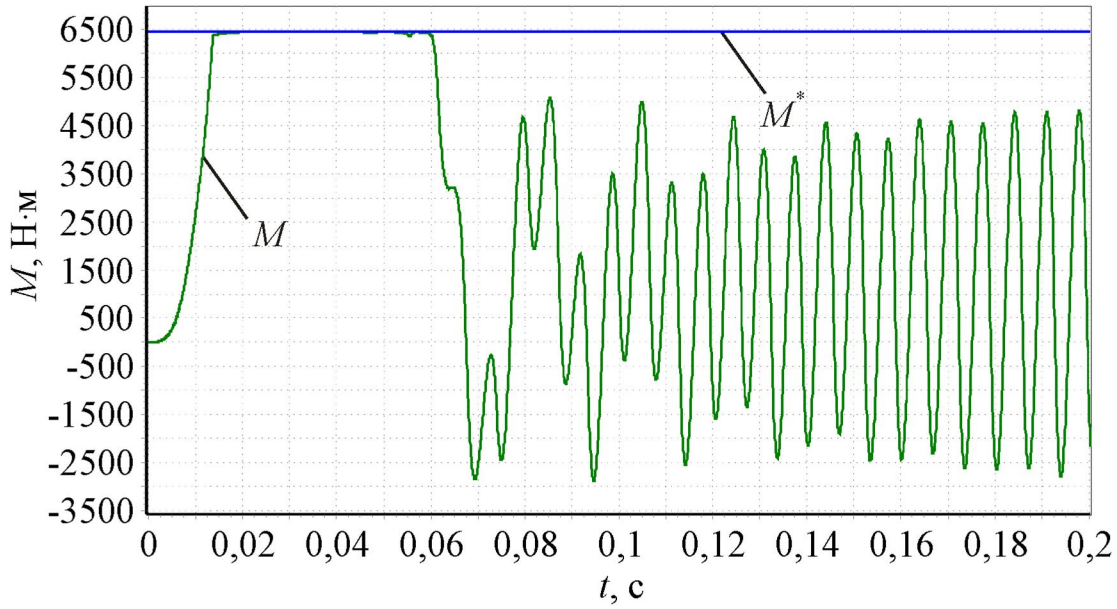


Рис. 1.8. Электромагнитный момент при $M^*=5 \cdot M_н$

рис. 1.10. Как можно видеть, в этом режиме составляющие векторов $\mathbf{v_1}$ и $\mathbf{u_1}$ отличаются более чем в 15 раз, а нелинейность подводимого к двигателю напряжения уже не может удерживать

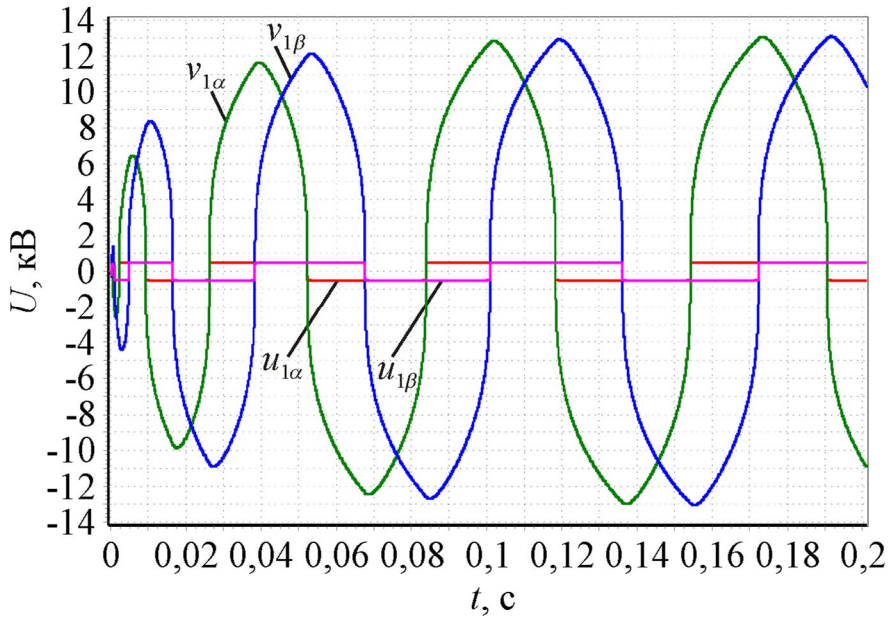


Рис. 1.9. Напряжение статора двигателя до и после наложения ограничения при $M^*=5 \cdot M_н$

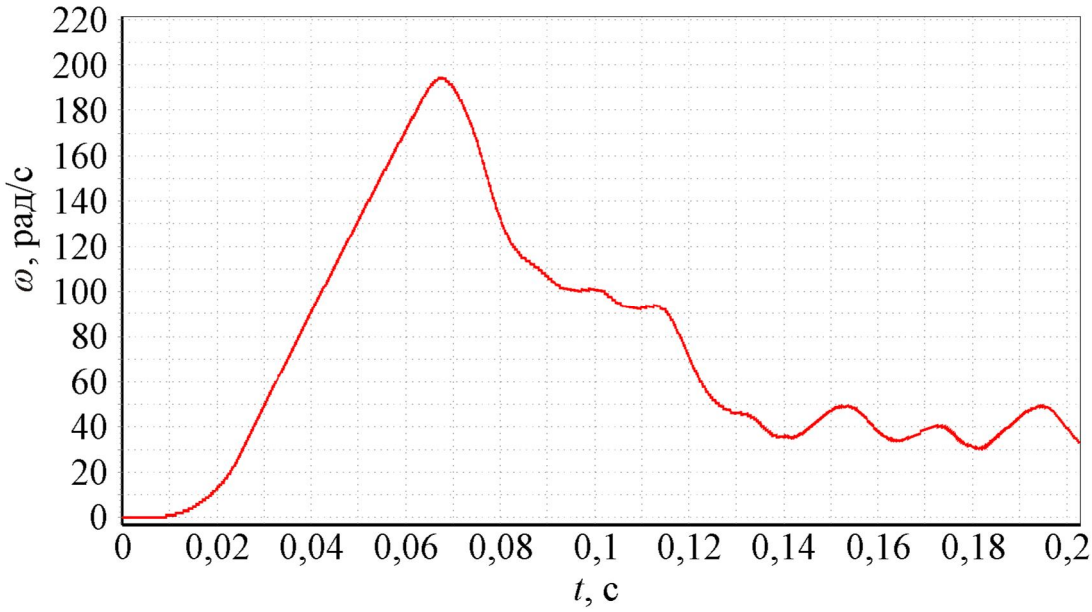


Рис. 1.10. Угловая скорость двигателя при $M^{*}=5\cdot M_{н}$

электромагнитный момент на заданном уровне. Составляющие подводимого напряжения принимают форму ступенчатых периодических сигналов, сдвинутых относительно друг друга на половину периода, основная гармоника которого соответствует частоте 14 Гц. Таким образом, двигатель начинает работать в режиме, подобном неуправляемой работе с пониженной частотой и номинальной амплитудой подводимого напряжения. В результате электромагнитный момент переходит в автоколебательный режим относительно момента сопротивления, а угловая скорость двигателя падает до 28,57 % от номинальной.

Следует также отметить, что качественно схожие результаты демонстрирует градиентное управление с использованием алгоритма (3). В такой системе наложение ограничений на величину подводимого напряжения происходит естественным образом, и в силу тех же физических причин при повышении угловой скорости двигателя электропривод теряет управляемость. Однако следует отметить, что потеря управляемости происходит при более высоких значениях ω, порядка 94 %, что свидетельствует о большей устойчивости этого алгоритма.

Таким образом, анализируя полученные результаты по совокупности показателей точности регулирования наилучшим вариантом градиентного управления можно считать алгоритм с применением знаковых регуляторов.

1.2 Сравнительная оценка энергоэффективности критериев минимизации потерь

Анализируя математическое описание потерь энергии в электроприводе, представленное в п. 1.1, можно сформулировать два основных критерия, минимизация которых обеспечит энергосбережение средствами управления электродвигателе.

Первым критерием энергооптимального управления двигателем является минимизация его электрических потерь:

$$\Delta P_{э} = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 \to \min . \qquad (1.33)$$

При этом следует иметь в виду, что реализация критерия (1.3) возможна только в режиме работы электропривода, когда одновременно достигается минимиза-

ция токов i_1 и i_2. Как следствие, при достижении данного критерия естественным образом будут минимизированы потери в управляющем преобразователе, а также в силовых кабельных линиях, поскольку их мощность однозначно зависит от величины протекающего тока.

Вторым критерием энергооптимального управления двигателем является минимизация его магнитных потерь:

$$\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} \to \min, \qquad (1.4)$$

$$\Delta P_{c2} = k_{c2}\left(\left(u_{2\beta}\psi_{2\alpha} - u_{2\alpha}\psi_{2\beta}\right) + \sigma R_2 L_{12}\left(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}\right)\right)^{\beta}\left(\psi_2\right)^{2(1-\beta)}. \quad (1.5)$$

$$\Delta P_c = k_{c1}\left(\left(u_{1\beta}\psi_{1\alpha} - u_{1\alpha}\psi_{1\beta}\right) + \sigma R_1 L_{12}\left(\psi_{2\beta}\psi_{1\alpha} - \psi_{2\alpha}\psi_{1\beta}\right)\right)^{\beta}\left(\psi_1\right)^{2(1-\beta)}. \qquad (1.64)$$

где ΔP_{c1} и ΔP_{c2} рассчитываются по (1.6) и (1.5) соответственно.

Необходимо отметить, что в силу физических различий процессов, протекающих при электрических преобразованиях с возникновением электрических потерь и электромагнитных преобразованиях с возникновением магнитных потерь, одновременное достижение (1.3) и (3.4) невозможно. Тем не менее, их совместное применение обеспечит оптимизацию по критерию минимума суммарных потери энергии электропривода, зависящих от внутреннего состояния электродвигателя.

Как было показано в предыдущих отчетах работы по НИР, наиболее эффективным способом создания энергооптимальной системы управления ЭП для ГМ является применение беспоисковых методов оптимизации по потерям, в частности аналитических регуляторов, реализующих критерии оптимальности.

С точки зрения системы управления электроприводом построение таких аналитических регуляторов может производиться двумя путями, схематически показанными на рис. 1.11 на примере АД. Первый заключается в учете критериев энергооптимального управления на этапе составления целевой функции при синтезе системы управления электродвигателем, а второй – в создании структуры внешнего уровня по отношению к системе управления электродвигателем. Оба данных подхода применимы в зависимости от метода синтеза системы управления электродвигателем и обеспечивают различное влияние на статические и динамические показатели качества регулирования координат электропривода. Покажем их использование на примере градиентного управления.

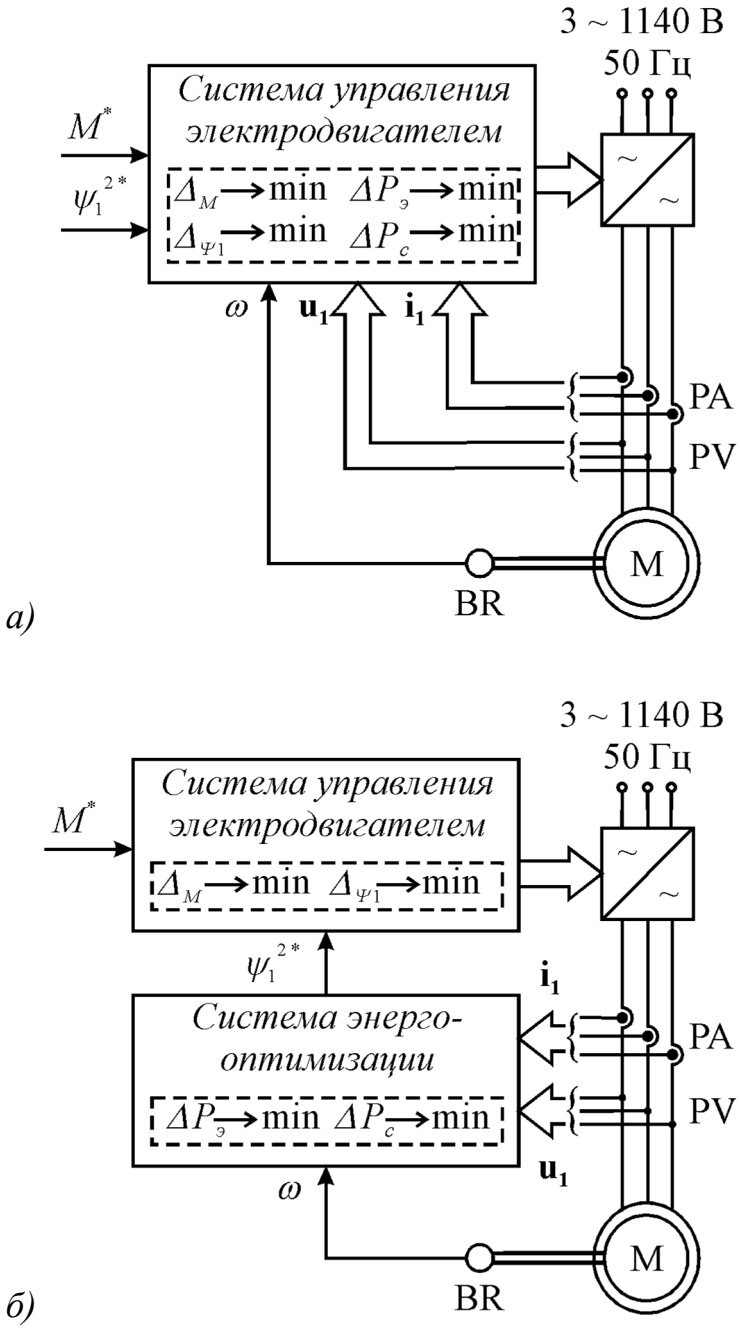


Рис. 1.11. Подходы к организации энергооптимального управления электродвигателем: а) при синтезе структуры СУ; б) при формировании задания для СУ

1.2.1 Оптимизация на этапе составления целевой функции

Для реализации энергооптимального управления электроприводом на этапе синтеза системы управления электродвигателем необходимо при составлении целевой функции учесть критерии оптимизации по потерям. Таким образом, в рамках данного подхода алгоритм градиентного управления (1.7) уже не отвечает поставленной задаче и нуждается в модернизации.

$$\frac{\partial \omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -h_1\psi_{2\beta}\Delta_M + h_2\psi_{1\alpha}\Delta_{\Psi 1} \\ h_1\psi_{2\alpha}\Delta_M + h_2\psi_{1\beta}\Delta_{\Psi 1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \qquad (1.7)$$

Следовательно, для синтеза энергооптимального градиентного управления электродвигателем необходимо в качестве желаемого состояния объекта управления задаться помимо требуемых значений M^*, $(\psi_1^2)^*$ и $(\psi_2^2)^*$ требуемыми значениями $\Delta P_э^*$ и ΔP_c^*, которые в пределе равны нулю. Таким образом, разница между текущим и желаемым состоянием при выборе неподвижной системы координат запишется в виде уравнения:

$$\mathbf{y} - \mathbf{y}^* = \begin{bmatrix} \Delta_M \\ \Delta_{\Psi 1} \\ \Delta_{\Psi 2} \\ \Delta P_э \\ \Delta P_c \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma L_{12} p(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}) - M^* \\ \psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2 - \left(\psi_1^2\right)^* \\ \psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2 - \left(\psi_2^2\right)^* \\ \begin{pmatrix} R_1\sigma^2\left(\left(L_2\psi_{1\alpha} - L_{12}\psi_{2\alpha}\right)^2 + \left(L_2\psi_{1\beta} - L_{12}\psi_{2\beta}\right)^2\right) + \\ + R_2\sigma^2\left(\left(L_1\psi_{2\alpha} - L_{12}\psi_{1\alpha}\right)^2 + \left(L_1\psi_{2\beta} - L_{12}\psi_{1\beta}\right)^2\right) \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} k_{c1}\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} + \sigma R_1 L_{12}\left(\psi_{2\beta}\psi_{1\alpha} - \psi_{2\alpha}\psi_{1\beta}\right)\right)^{\beta}\left(\psi_{1\alpha}^2 + \psi_{1\beta}^2\right)^{(1-\beta)} + \\ + k_{c2}\begin{pmatrix} \psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\left(\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2\right) + \\ + \sigma R_2 L_{12}\left(\psi_{1\beta}\psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha}\psi_{2\beta}\right) \end{pmatrix}^{\beta}\left(\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2\right)^{(1-\beta)} \end{pmatrix} \end{bmatrix},$$

а при выборе целевой функции, градиент $\omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)$ по $\mathbf{u}$ примет вид:

$$\frac{\partial \omega(\mathbf{x},\mathbf{u},t)}{\partial \mathbf{u}} = \left[\frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x},\mathbf{u},t)}{\partial \mathbf{u}}\right]^T \frac{\partial Q(\mathbf{x},t)}{\partial \mathbf{x}} =$$

$$= \begin{bmatrix} -h_1\psi_{2\beta}\Delta_M + h_2\psi_{1\alpha}\Delta_{\Psi 1} + h_4\Delta P_э \dfrac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{1\alpha}} + h_5\Delta P_c \dfrac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{1\alpha}} \\ h_1\psi_{2\alpha}\Delta_M + h_2\psi_{1\beta}\Delta_{\Psi 1} + h_4\Delta P_э \dfrac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{1\beta}} + h_5\Delta P_c \dfrac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{1\beta}} \\ h_1\psi_{1\beta}\Delta_M + h_3\psi_{2\alpha}\Delta_{\Psi 2} + h_4\Delta P_э \dfrac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{2\alpha}} + h_5\Delta P_c \dfrac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{2\alpha}} \\ -h_1\psi_{1\alpha}\Delta_M + h_3\psi_{2\beta}\Delta_{\Psi 2} + h_4\Delta P_э \dfrac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{2\beta}} + h_5\Delta P_c \dfrac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{2\beta}} \end{bmatrix}, \qquad (1.8)$$

где h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 – диагональные элементы матрицы **H**, частные производные мощности электрических потерь по переменным состояния рассчитываются по следующим формулам:

$$\frac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{1\alpha}} = 2\sigma\left(L_2R_1i_{1\alpha} - L_{12}R_2i_{2\alpha}\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{1\beta}} = 2\sigma\left(L_2R_1i_{1\beta} - L_{12}R_2i_{2\beta}\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{2\alpha}} = 2\sigma\left(L_1R_2i_{2\alpha} - L_{12}R_1i_{1\alpha}\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_э}{\partial \psi_{2\beta}} = 2\sigma\left(L_1R_2i_{2\beta} - L_{12}R_1i_{1\beta}\right),$$

а частные производные мощности магнитных потерь, соответственно, по формулам:

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{1\alpha}} = k_{c1}\left(\begin{array}{c}\beta\psi_1^{2(1-\beta)}\left(u_{1\beta} + \sigma R_1L_{12}\psi_{2\beta}\right)\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \dfrac{R_1}{p}M\right) + \\ +2(1-\beta)\psi_1^2\psi_{1\alpha}\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \dfrac{R_1}{p}M\right)^{\beta}\end{array}\right) -$$

$$-k_{c2}\beta\psi_2^{2(1-\beta)}\sigma R_2L_{12}\psi_{2\beta}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{1\beta}} = k_{c1}\left(\begin{array}{c}-\beta\psi_1^{2(1-\beta)}\left(u_{1\alpha} + \sigma R_1L_{12}\psi_{2\alpha}\right)\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \dfrac{R_1}{p}M\right) + \\ +2(1-\beta)\psi_1^2\psi_{1\beta}\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \dfrac{R_1}{p}M\right)^{\beta}\end{array}\right) +$$

$$+k_{c2}\beta\psi_2^{2(1-\beta)}\sigma R_2L_{12}\psi_{2\alpha}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{2\alpha}} = -k_{c1}\beta\psi_1^{2(1-\beta)}\sigma R_1 L_{12}\psi_{1\beta}\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \frac{R_1}{p}M\right) + k_{c2}\times$$

$$\times\left(\begin{array}{c}\beta\psi_2^{2(1-\beta)}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right)\left(u_{2\beta} + 2p\omega\psi_{2\alpha} + \sigma R_2 L_{12}\psi_{1\beta}\right) + \\ +2(1-\beta)\psi_2^2\psi_{2\alpha}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right)^{\beta}\end{array}\right);$$

$$\frac{\partial \Delta P_c}{\partial \psi_{2\beta}} = k_{c1}\beta\psi_1^{2(1-\beta)}\sigma R_1 L_{12}\psi_{1\alpha}\left(\psi_{1\alpha}u_{1\beta} - \psi_{1\beta}u_{1\alpha} - \frac{R_1}{p}M\right) + k_{c2}\times$$

$$\times\left(\begin{array}{c}-\beta\psi_2^{2(1-\beta)}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right)\left(u_{2\alpha} - 2p\omega\psi_{2\beta} + \sigma R_2 L_{12}\psi_{1\alpha}\right) + \\ +2(1-\beta)\psi_2^2\psi_{2\beta}\left(\psi_{2\alpha}u_{2\beta} - \psi_{2\beta}u_{2\alpha} + p\omega\psi_2^2 + \frac{R_2}{p}M\right)^{\beta}\end{array}\right).$$

Как можно видеть, уравнение (1.8) структурно существенно сложнее (1.7) и как следствие, требует большего вычислительного ресурса СУ для реализации. Помимо указанной особенности (1.8) обладает очевидной избыточностью, выражающейся в превышении числа управляемых величин над числом управляющих воздействий. Следствием такой избыточности является неполная управляемость системы управление – объект управления, когда усиление критерия минимизации потерь посредством весовых коэффициентов вызывает снижение точности регулирования состояния объекта управления.

Для примера рассмотрим вариант реализации такой энергооптмимальной системы управления применительно к асинхронному двигателю, где с учетом его исходной неполной управляемости исключена цель управления по минимизации ΔP_c^* путем выбора нулевого значения коэффициента h_5, а также редуцирована цель управления по минимизации $\Delta P_э^*$ за счет исключения составляющих $\Delta P_э$, возникающих вследствие протекания токов по роторной цепи электродвигателя. Вариант реализации градиентного управления с использованием интегрального регулятора для модификации уравнения (1.8) с учетом приведенных условий запишется в виде выражения:

$$u_{1\alpha} = -\gamma\int\left(\begin{array}{c}-h_1\psi_{2\beta}\Delta_M + h_2\psi_{1\alpha}\Delta_{\Psi 1} + h_4\left(\left(L_2\psi_{1\alpha} - L_{12}\psi_{2\alpha}\right)^2 + \right. \\ \left. +\left(L_2\psi_{1\beta} - L_{12}\psi_{2\beta}\right)^2\right)\left(L_2\psi_{1\alpha} - L_{12}\psi_{2\alpha}\right)2L_2\sigma^4 R_1^2\end{array}\right)dt;$$

$$u_{1\beta} = -\gamma\int\left(\begin{array}{c}h_1\psi_{2\alpha}\Delta_M + h_2\psi_{1\beta}\Delta_{\Psi 1} + h_4\left(\left(L_2\psi_{1\alpha} - L_{12}\psi_{2\alpha}\right)^2 + \right. \\ \left. +\left(L_2\psi_{1\beta} - L_{12}\psi_{2\beta}\right)^2\right)\left(L_2\psi_{1\beta} - L_{12}\psi_{2\beta}\right)2L_2\sigma^4 R_1^2\end{array}\right)dt. \qquad (1.9)$$

С учетом изложенного в предыдущих отчетах НИР допущения о незначительном влиянии на качество управления замены составляющих вектора $\boldsymbol{\psi_2}$ на соответствующие составляющие вектора $\boldsymbol{\psi_1}$, а также переопределив величину весового коэффициента:

$$h_4 \times 2L_2\sigma^4 R_1^2 = h_3',$$

уравнение (1.9) упрощается:

$$u_{1\alpha} = -\gamma \int \left(-h_1 \psi_{1\beta} \Delta_M + h_2 \psi_{1\alpha} \Delta_{\Psi 1} + h'_3 i_1^2 i_{1\alpha} \right) dt;$$
$$u_{1\beta} = -\gamma \int \left(h_1 \psi_{1\alpha} \Delta_M + h_2 \psi_{1\beta} \Delta_{\Psi 1} + h'_3 i_1^2 i_{1\beta} \right) dt. \qquad (1.10)$$

Для оценки работы полученного алгоритма управления были проведены вычислительные эксперименты методом компьютерного моделирования для асинхронного двигателя марки 4А80А4СУ3. В качестве объекта для моделирования использовался идеализированный двигатель, влияние управляющего преобразователя не учитывалось. Моделирование проводилось при ступенчатом приложении задающих воздействий, выбранных на уровне $M_н$ и $\psi_{1н}$. Для имитации резкопеременной нагрузки момент сопротивления формировался в виде несинусоидального периодического сигнала со средним значением, соответствующим номинальной нагрузке двигателя, и разбросом в пределах ±40 %. Коэффициент усиления γ принят равным 1000, а диагональные элементы матрицы весовых коэффициентов следующего значения: h_1=2000, h_2=250, h'_3=1,7.

Результаты моделирования представлены на рис. 1.12 – рис. 1.15, где для наглядности также показаны результаты моделирования без критерия оптимизации, при выборе значения коэффициента h'_3 равным нулю. Графики, приведенные на рис. 3.5, демонстрируют, что, введение критерия оптимизации снижает ток статора на 4,5 % в результате чего происходит снижение мощности электрических потерь.

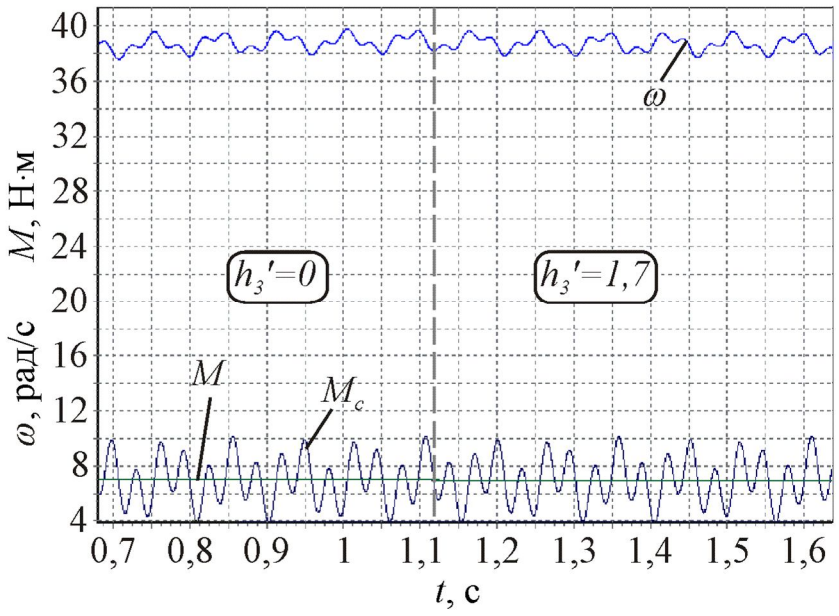


Рис. 1.12. Переходные процессы электромагнитного момента М, момента сопротивления M_c и угловой скорсоти ω

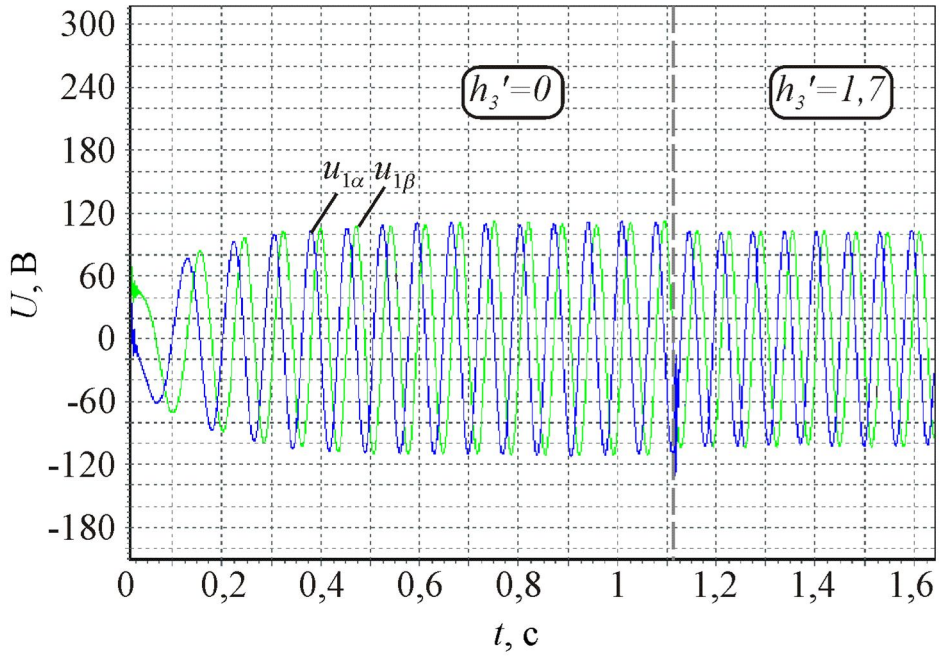


Рис. 1.13. Переходные процессы составляющих вектора напряжения статора $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$

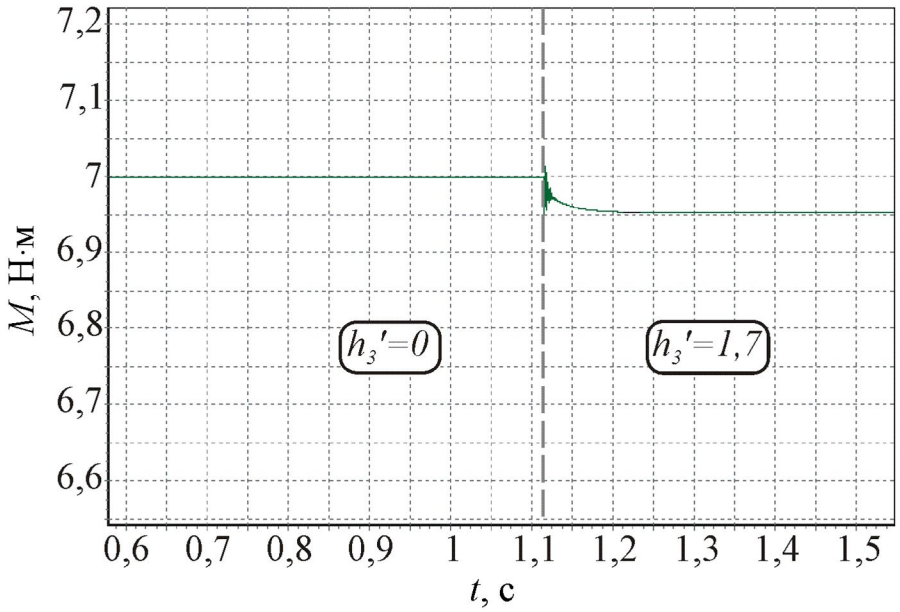


Рис.1.14. Переходные процессы электромагнитного момента М

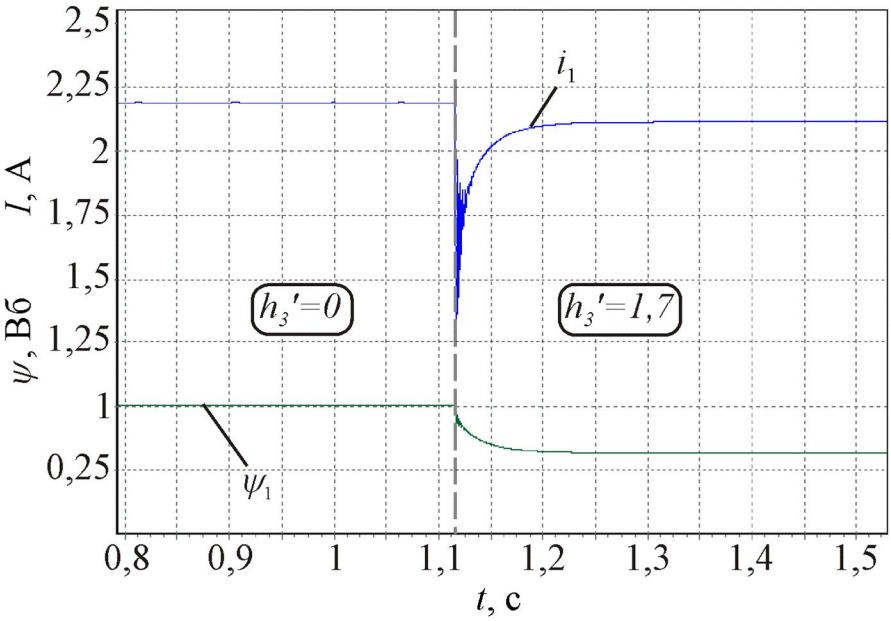


Рис. 1.15. Переходные процессы амплитуд векторов тока статора i_1 и вектора потокосцепления статора ψ_1

Оценивая полученные данные можно увидеть, что основная цель управления, а именно поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя, выполняется с достаточно хорошей точностью, а введение критерия оптимизации увеличивает отклонение электромагнитного момента с 0,05 % до 0,64 % относительно заданного значения, что является допустимым.

В то же время введение критерия оптимизации снижает величину амплитуды вектора потокосцепления статора на 21 %, что хоть и обеспечивает существенное снижение мощности магнитных потерь двигателя, но является недопустимым с точки зрения качества регулирования. Столь существенное снижение потокосцепления двигателя в условиях эксплуатации, отличающихся от идеализированных, в первую очередь при наличии ограничения на величину подводимого к двигателю напряжения, ведет к сокращению диапазона его устойчивой работы.

Рассмотренный пример энергооптимального градиентного управления асинхронным двигателем с оптимизацией на этапе составления целевой функции наглядно продемонстрировал невысокие результаты ввиду неполной управляемости системы управление – объект управления. Таким образом, данный подход оказывается эффективным только в условиях равенства или превышения числа управляющих воздействий над числом целей управления, и, следовательно, непригоден для создания энергооптимальной системы управления ЭП для ГМ.

1.2.2 Оптимизация на этапе формировании задания

Для реализации энергооптимального управления электроприводом не изменяя структуры системы управления, необходимо формировать заданные значения амплитуд векторов потокосцеплений в зависимости от заданного электромагнитного момента M^* таким образом, чтобы обеспечить минимум мощности электрических потерь, а также мощности магнитных потерь. Сформулируем эту задачу как отыскание таких векторов потокосцепления статора и ротора, при которых указанные

потери будут минимальны. При этом ввиду многокритериальности задачи, ее решение целесообразно производить поэтапно.

Изначально рассмотрим задачу отыскания минимума мощности электрических потерь, предполагая, что заданная величина амплитуды вектора потокосцепления статора ψ_1^*, уже известна, как и M^*. Для этого, на основе уравнения,

$$\Delta P_э = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 .$$

инвариантного относительно выбранной системы координат, запишем выражение для полеориентированной системы координат, направленной по потокосцеплению статора:

$$\Delta P_э = \left(i_{1d}^2 + i_{1q}^2\right) R_1 + \left(i_{2d}^2 + i_{2q}^2\right) R_2 , \qquad 1.10$$

для которой, в соответствии с (2.8), справедливо:

$$\psi_{1d} = L_1 i_{1d} + L_{12} i_{2d};$$
$$0 = L_1 i_{1q} + L_{12} i_{2q},$$

а $M = \sigma L_{12} p(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v})$, вырождается в зависимость:

$$M = p\psi_{1d} i_{1q} .$$

Таким образом, с учетом исходных допущений, уравнение мощности электрических потерь запишется в виде выражения:

$$\Delta P_э = \left(i_{1d}^2 + \left(\frac{M^*}{p\psi_1^*} \right)^2 \right) R_1 + \left(\left(\frac{\psi_1^* - L_1 i_{1d}}{L_{12}} \right)^2 + \left(-\frac{L_1}{L_{12}} \frac{M^*}{p\psi_1^*} \right)^2 \right) R_2 ,$$

представляющего собой квадратичную зависимость от составляющей вектора тока статора по оси *d*.

Зависимость $\Delta P_э(i_{1d})$ является однозначно положительной, не имеет вещественных корней и имеет экстремум в точке с координатами:

$$i_{1d} = \psi_1^* \frac{R_2 L_1}{L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2}, \qquad (1.51)$$

т.е. при векторе тока статора определяющемся составляющими:

$$i_{1d} = \psi_1^* \frac{R_2 L_1}{L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2};$$
$$i_{1q} = \frac{M^*}{p\psi_1^*},$$

что с учетом вышеизложенного позволяет определить составляющие вектора потокосцепления ротора, являющегося решением задачи минимизации электрических потерь:

$$\psi_{2d} = \psi_1^* \left(\frac{L_2}{L_{12}} - \frac{2R_2 L_1}{L_{12}\sigma\left(L_m^2 R_1 + L_1^2 R_2\right)} \right);$$
$$\psi_{2q} = \frac{M^*}{p\psi_1^* L_{12}\sigma}. \qquad (1.12)$$

На основе (3.17) расчетным образом определяется оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления ротора:

$$\psi_2^{опт} = \sqrt{\left(\psi_1^*\right)^2 \left(\frac{L_2}{L_{12}} - \frac{2R_2L_1}{L_{12}\sigma\left(L_{12}^2R_1 + L_1^2R_2\right)}\right)^2 + \left(\frac{M^*}{p\psi_1^* L_{12}\sigma}\right)^2}, \quad (1.13)$$

реализация которого обеспечит минимизацию электрических потерь для конкретного режима работы, а использование (3.16) совместно с уравнением мощности электрических потерь позволит произвести количественную оценку их оптимального значения:

$$\Delta P_э^{опт} = \left(\left(\psi_1^* \frac{R_2L_1}{L_{12}^2R_1 + L_1^2R_2}\right)^2 + \left(\frac{M^*}{p\psi_1^*}\right)^2\right)R_1 + \left(\left(\frac{\psi_1^* - L_1\left(\psi_1^* \frac{R_2L_1}{L_{12}^2R_1 + L_1^2R_2}\right)}{L_{12}}\right)^2 + \left(-\frac{L_1}{L_{12}}\frac{M^*}{p\psi_1^*}\right)^2\right)R_2. \quad (1.146)$$

Соответствие полученного результата поставленной задаче проверялось методом компьютерного моделирования, где в качестве объекта управления использовалась обобщенная электрическая машина с параметрами, соответствующими электродвигателю мощностью 200 кВт, а в качестве системы управления использовалось градиентное управление с пропорционально-интегральным регулятором. При моделировании также учитывалась явление насыщения магнитопровода двигателя посредством изменения величины взаимной индуктивности в зависимости от тока намагничивания при аппроксимации кривой намагничивания двигателя полиномом четвертого порядка.

Проверка показала, что при задании ψ_2^* на значении, отличающемся от рассчитанного по (1.13) для конкретного режима работы, установившееся значение мощности электрических потерь возрастает по квадратичной зависимости, как показано на рис. 1.16. При этом эффективность использования (1.13) при нормальном уровне намагничивания относительно номинальной амплитуды вектора потокосцепления статора не снижается, даже если при моделировании учитывалось явление насыщения магнитопровода двигателя (рис. 1.17), а фактическое увеличение электрических потерь с учетом насыщения происходит лишь при уровне намагничивания в полтора раза превышающем номинальное.

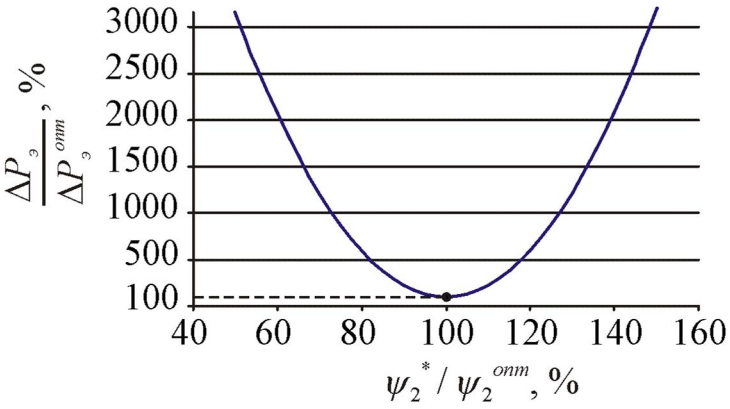


Рис. 1.16. Отклонение $\Delta P_э$ от оптимального значения в зависимости от отклонения ψ_2^* от оптимального значения

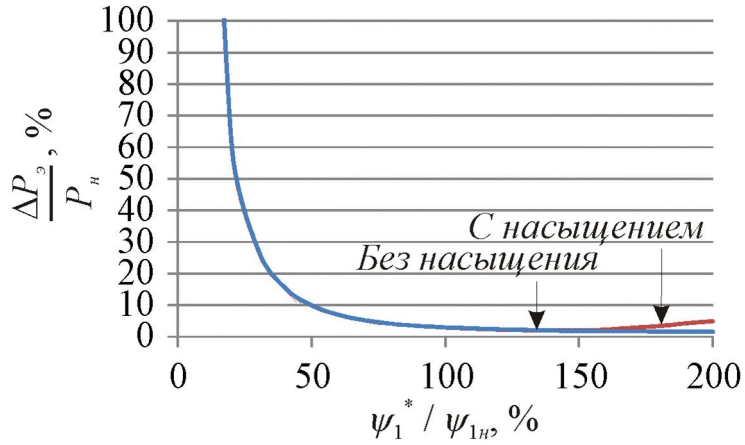


Рис. 1.17. Изменение $\Delta P_э$ в зависимости от изменения ψ_1^* при задании M^* на уровне $M_н$

Следует отметить, что характер зависимостей $\Delta P_э^{опт}$ и $\psi_2^{опт}$ от ψ_1^* меняется при различных значениях M^*. Для иллюстрации на рис. 1.18 и рис. 1.19 показано, что эти зависимости носят экстремальный характер, причем при изменении заданного электромагнитного момента координаты экстремума смещаются. При этом координаты экстремума $\Delta P_э^{опт}$ фактически являются решением задачи отыскания минимума мощности электрических потерь. Для их аналитического описания следует продифференцировать (3.19) по заданной амплитуде вектора потокосцепления статора и определить такое ψ_1^*, при котором $d\Delta P_э^{опт}/d\psi_1^*$ обращается в ноль.

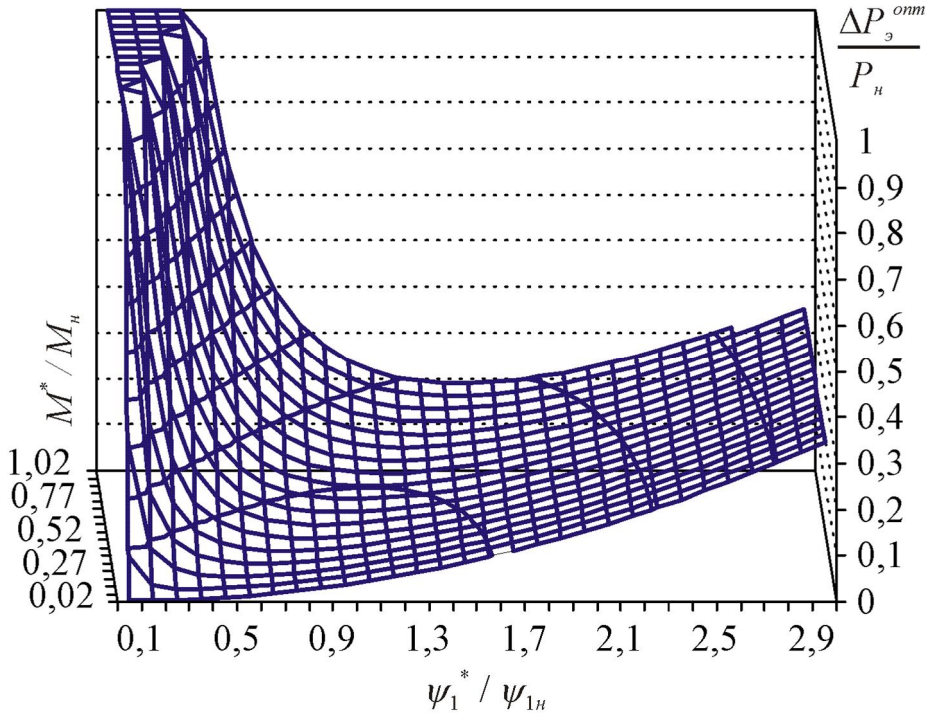


Рис. 1.18. Семейство зависимостей $\Delta P_э^{опт}$ от ψ_1^* и M^*

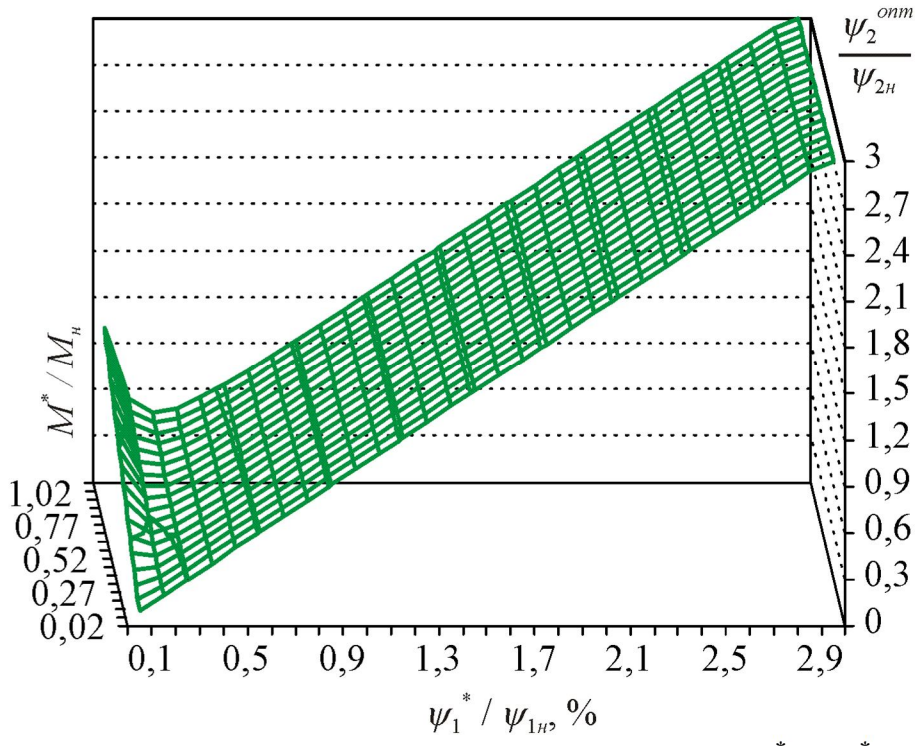


Рис. 1.19. Семейство зависимостей $\psi_2^{опт}$ от ψ_1^* и M^*

Таким образом, аналитически определяется оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления статора:

$$\psi_1^{опт_э} = \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{M^*}{p}\right)^2 \left(R_1 + \left(-\frac{L_1}{L_{12}}\right)^2 R_2\right)\left(L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2\right)^2}{\left(R_1 \left(R_2 L_1\right)^2 + R_2 \left(R_1 L_{12}\right)^2\right)}}, \qquad (1.157)$$

реализация которой в качестве заданного значения для системы управления обеспечит минимизацию электрических потерь для конкретного M^*.

Примечательно, что координаты экстремумов семейств зависимостей, показанных на рис. 1.18 и рис. 1.19 не совпадают. Это свидетельствует о том, что минимуму мощности электрических потерь не соответствует минимум мощности потерь в стали двигателя в данном режиме работы, что ставит для исследования следующую задачу отыскания минимума мощности потерь в стали.

Мгновенное значение мощности потерь в стали определяется совместным использованием (1.5) и (1.6) и с учетом $M = \sigma L_{12} p(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v})$,может быть представлено в виде выражения:

$$\begin{aligned} \Delta P_c = {} & k_{c1}\left(\left(u_{1\beta}\psi_{1\alpha} - u_{1\alpha}\psi_{1\beta}\right) - R_1\frac{M}{p}\right)^{\beta}\left(\psi_1\right)^{2(1-\beta)} + \\ & + k_{c2}\left(\left(u_{2\beta}\psi_{2\alpha} - u_{2\alpha}\psi_{2\beta}\right) + R_2\frac{M}{p}\right)^{\beta}\left(\psi_2\right)^{2(1-\beta)}, \end{aligned} \qquad (1.16)$$

анализируя которое можно прийти к выводу, что в динамических режимах между нагрузкой двигателя и мощностью потерь в стали существует зависимость. Тем не менее, в режиме работы, когда средствами СУ обеспечено приближение текущего состояния электропривода к заданным значениям M^*, ψ_1^*, и ψ_2^*, влияние электромагнитного момента компенсируется за счет относительного расположения векто-

ров потокосцепления статора и ротора, а также векторов подводимого к двигателю напряжения, формирующих установившуюся частоту вращения поля статора и ротора двигателя относительно магнитопровода.

Другим важным выводом из анализа (1.16) является обоснование невозможности получить универсальную аналитическую зависимость от состояния электродвигателя, обеспечивающую оптимизацию любого электропривода по критерию минимума потерь в стали, поскольку значение мощности потерь в стали зависит от составляющих векторов напряжения, подводимого к двигателю, величина которых, а также интенсивность их изменения существенно зависят от особенностей системы управления конкретного электропривода.

Даже рассматривая частные случаи построения систем управления электроприводом, задача минимизации потерь в стали с использованием (1.16) может оказаться неразрешимой аналитически. Так, при использовании градиентного управления электроприводом с применением интегрального регулятора влияние системы управления будет учитываться в (3.21) следующим образом:

$$\Delta P_c = k_{c1}\left(\begin{pmatrix}\psi_{1\beta}\gamma\int\left(-h_1\psi_{2v}\Delta_M + h_2\psi_{1u}\Delta_{\Psi 1}\right)dt - \\ -\psi_{1\alpha}\gamma\int\left(h_1\psi_{2a}\Delta_M + h_2\psi_{1\beta}\Delta_{\Psi 1}\right)dt\end{pmatrix} - R_1\frac{M}{p}\right)^{\beta}\left(\psi_1\right)^{2(1-\beta)} +$$

$$+k_{c2}\left(\begin{pmatrix}\psi_{2\beta}\gamma\int\left(h_1\psi_{1v}\Delta_M + h_3\psi_{2u}\Delta_{\Psi 2}\right)dt - \\ -\psi_{2\alpha}\gamma\int\left(-h_1\psi_{1u}\Delta_M + h_3\psi_{2v}\Delta_{\Psi 2}\right)dt\end{pmatrix} + R_2\frac{M}{p}\right)^{\beta}\left(\psi_2\right)^{2(1-\beta)},$$

откуда очевидно, что виду существенной нелинейности функциональной зависимости результат оптимизации не может быть получен аналитически.

Тем не менее, при приближении текущего состояния электродвигателя к заданному возможно отыскание аналитического решения задачи оптимизации по потерям в стали при допущении, что в этом режиме мощность потерь в стали описывается выражением:

$$\Delta P_c = k_{c1}\left(\omega_\psi\right)^{\beta}\psi_1^{2} + k_{c2}\left(\omega_\psi - p\omega\right)^{\beta}\psi_2^{2},$$

где ω и ω_ψ рассматриваются как внешние возмущения. При этом в случае идентичного движения механической подсистемы электропривода при использовании различных СУ ω будет отличаться на пренебрежимо малые значения, а ω_ψ будет определяться индивидуальными особенностями совместной работы алгоритма управления и управляющего преобразователя и при допущении идеальности последнего также может быть принятой независимой от магнитного состояния двигателя.

Таким образом, мощность потерь в стали минимизируется при минимальной величине квадратов амплитуд векторов потокосцеплений статора и ротора и с учетом найденного решения задачи минимизации электрических потерь, отыскание минимума мощности потерь в стали может быть выполнено по координатам экстремумов зависимостей ψ_2^{onm} от ψ_1^{*} и M^{*}, показанных на рис. 1.19. Для аналитического описания состояния электродвигателя, обеспечивающего минимум мощности потерь в стали необходимо продифференцировать (1.13) по заданной амплитуде вектора потокосцепления статора и определить такое ψ_1^{*}, при котором $d\psi_2^{onm}/d\psi_1^{*}$ обращается в ноль.

Таким образом, получается выражение для вычисления оптимальной заданной амплитуды вектора потокосцепления статора:

$$\psi_1^{опт_м} = \sqrt{\frac{M^*}{p\left(L_2\sigma - 2\frac{R_2 L_1}{\left(L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2\right)}\right)}}, \qquad (1.17)$$

реализация которой в качестве заданного значения для системы управления обеспечит минимизацию магнитных потерь для конкретного M^*.

1.2.3 Результаты вычислительных экспериментов

Для анализа эффективности оптимизирующих выражений (1.13), (1.15) и (1.17) были проведены вычислительные эксперименты методом компьютерного моделирования, для чего в среде Delphi было разработано специальное программное средство. В качестве объекта для моделирования выступала обобщенная электрическая машина с параметрами, соответствующими электродвигателю мощностью 200 кВт как без учета насыщения магнитопровода, так и с аппроксимацией кривой намагничивания двигателя полиномом четвертого порядка. Эксперименты проводились при варьировании нагрузки двигателя и скорости двигателя и ступенчатом приложении задающих воздействий. В качестве системы управления использовалось градиентное управление электроприводом с регуляторами различных типов. Отдельно следует отметить, что эксперименты проводились как для идеализированного управляющего преобразователя, так и при учете коммутации силовых полупроводниковых ключей и ограничении максимального значения подводимого к двигателю напряжения.

В ходе экспериментов методом моделирования определялась величина мощности электрических потерь в соответствии с (1.3) и мощности потерь в стали по (1.5) и (1.6). Значение использовавшихся при этом коэффициентов потерь в стали статора k_{c1} и ротора k_{c2} определялось аналогично номинальным потерям в стали статора в соответствии с методикой, изложенной в [О1 162] таким образом, чтобы при номинальном режиме работы двигателя расчетное значение потерь в стали по (1.5) и (3.6) суммарно составило 20 % от значения общих потерь двигателя $\Delta P_н$, рассчитанных на основании каталожного КПД при номинальной нагрузке.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние величины заданного момента и установившейся угловой скорости двигателя на величину установившейся мощности электрических потерь и потерь в стали при оптимизации по электрическим потерям, т.е. по (1.13) и (1.15) совместно и по потерям в стали, т.е. по (1.13) и (1.17) соответственно. Управляющий преобразователь принимался идеализированным, а в качестве системы управления использовалось градиентное управление с пропорционально-интегральным регулятором. Результаты моделирования для случая, когда угловая скорость двигателя равна номинальному значению, представлены на рис. 1.20 и рис. 1.21, где цифрами обозначена мощность потерь: 1) в стали без учета насыщения; 2) в стали с учетом насыщения; 3) электрических без учета насыщения; 4) электрических с учетом насыщения. Для удобства сопоставления, мощность потерь выражена в процентах относительно $\Delta P_н$.

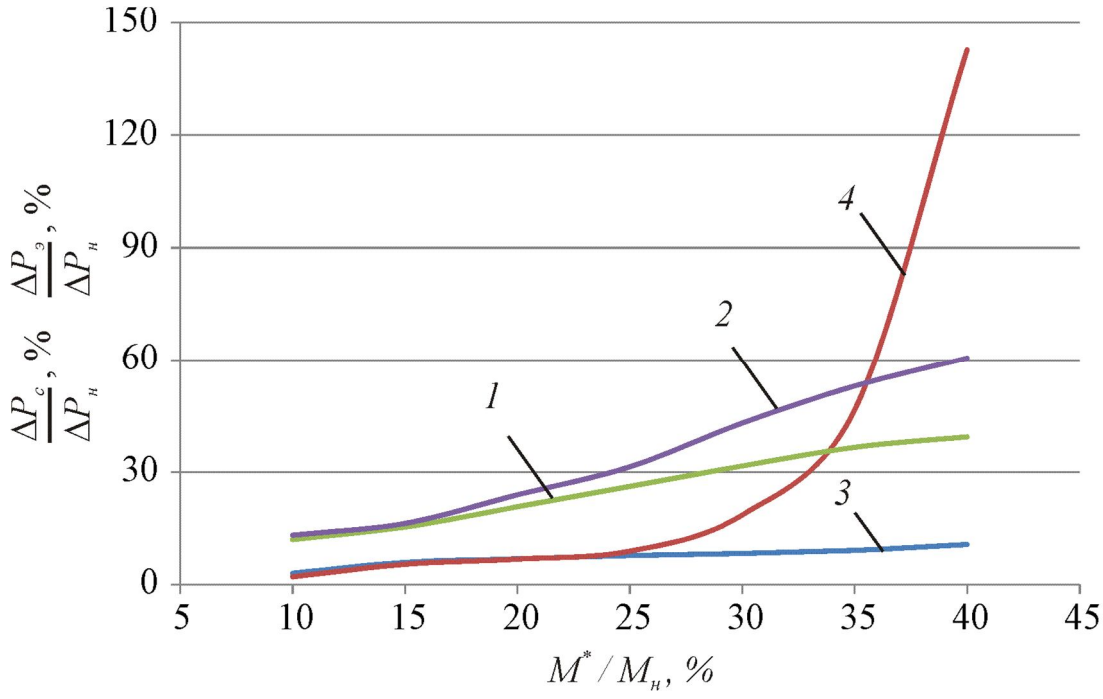


Рис. 1.10. Относительная мощность потерь при оптимизации по (1.13) и (1.15)

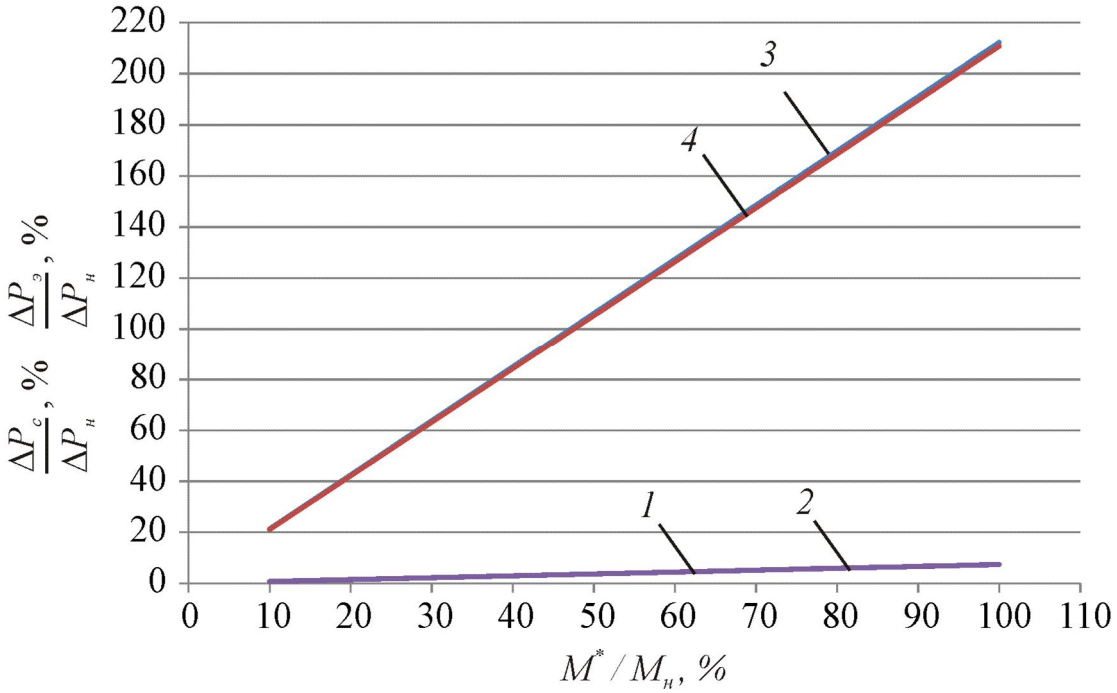


Рис. 1.11. Относительная мощность потерь при оптимизации по (1.13) и (1.17)

Как можно видеть на рис. 1.20 и рис. 1.21, во всех опытах как $\Delta P_э$, так и ΔP_c возрастают с увеличением M^*. Рассматривая систему без учета насыщения двигателя (кривые 1 и 3), следует отметить, что в случае оптимизации по электрическим потерям значение $\Delta P_э$ невелико, однако ΔP_c имеет завышенное значение. В случае оптимизации по потерям в стали, напротив, величина $\Delta P_э$ существенно завышена при приемлемом уровне ΔP_c.

Данное явление объясняется несовпадением координат, характеризующих состояние двигателя при оптимизации по (1.13) и (1.15) и по (1.13) и (1.17) и подтверждает, что при создании энергооптимальных систем управления электропри-

водом недопустимо проводить оптимизацию только по конкретной составляющей общих потерь двигателя.

Отдельное внимание следует уделить результатам моделирования, полученным с учетом насыщения двигателя (кривые 2 и 4). При оптимизации по потерям в стали (рис. 1.3) разница в количественной оценке мощности потерь, как в стали, так и электрических, пренебрежимо мала. Однако при оптимизации по электрическим потерям (рис. 1.21) значения $\Delta P_э$ и ΔP_c значительно превышают результаты, полученные для линейной кривой намагничивания. Столь существенные различия объясняются тем, что даже в пределах номинального значения заданного электромагнитного момента состояние двигателя, рассчитанное по (1.13) и (3.15), характеризуется завышенным уровнем намагниченности, например заданному значению $M_н$ соответствует $\psi_1^{опт_э}$ составляющее более чем 2,5 от $\psi_{1н}$.

Такая амплитуда вектора потокосцепления соответствует глубокому насыщению двигателя, работа в котором является, по сути, аварийным режимом. Таким образом, при формировании задания для амплитуды вектора потокосцепления ротора необходимо ограничивать его величину допустимым значением, в качестве которого целесообразно принять $\psi_{1н}$.

В качестве дополнительного вывода из полученных результатов можно заключить, что количественная оценка мощности потерь двигателя, полученная в рамках допустимого уровня его намагниченности не нуждается в корректировке с учетом явления насыщения, в связи с чем, в дальнейшем нецелесообразно отдельно рассматривать результаты моделирования с учетом нелинейности кривой намагничивания.

Результаты моделирования, показанные на рис. 1.20 и рис. 1.21, получены для номинальной угловой скорости двигателя и иллюстрируют повышение общих потерь двигателя при оптимизации только по одной из их составляющих. Данное явление характерно и для значений ω, отличающихся от $\omega_н$. Для его анализа ни рис. 1.22 и рис. 1.23 приведены семейства зависимостей суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали при оптимизации по (1.13) и (1.15) и по (1.13) и (1.17).

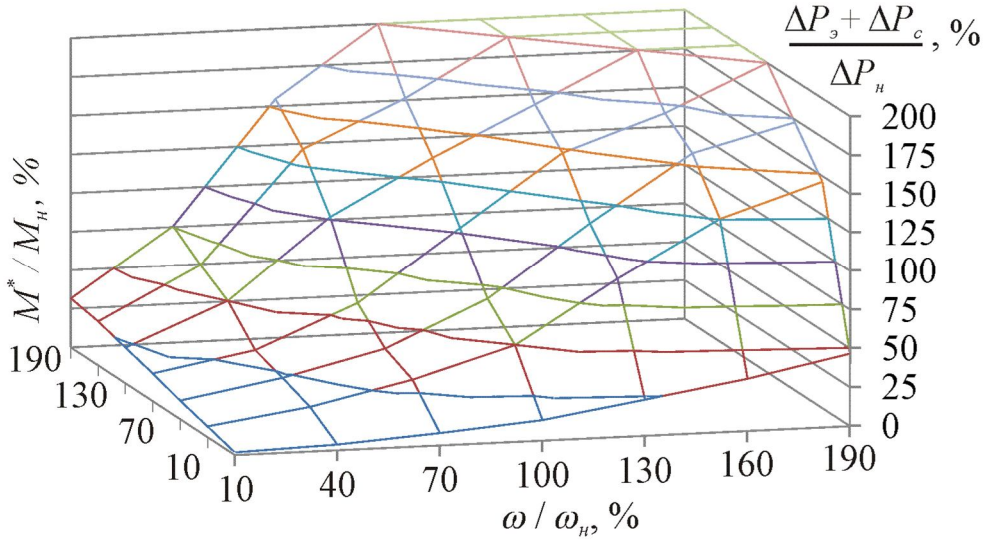


Рис. 1.12. Относительная мощность потерь при оптимизации по (1.13) и (1.15)

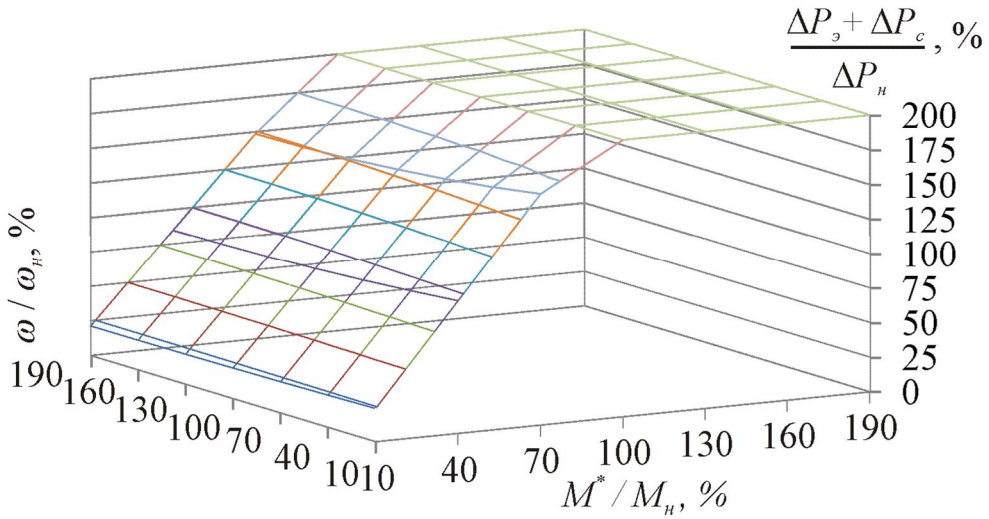


Рис. 1.13. Относительная мощность потерь при оптимизации по (1.13) и (1.17)

Характер полученных семейств зависимостей подчеркивает основную составляющую потерь, составляющую большую долю в сумме. Так, анализируя рис. 1.22 можно прийти к выводу, что при оптимизации по электрическим потерям преобладают потери в стали, поскольку суммарная мощность $\Delta P_э+\Delta P_c$ имеет ярко выраженную зависимость от угловой скорости, а при оптимизации по потерям в стали, как можно видеть на рис. 1.23, зависимость от скорости практически не прослеживается, а, следовательно, основную долю составляют электрические потери.

Приведенные семейства зависимостей дополнительно свидетельствуют о необходимости отыскания промежуточного состояния двигателя, для которого амплитуда вектора потокосцепления статора находимся между значениями $\psi_1^{опт_м}$ и $\psi_1^{опт_э}$ и обеспечивает минимизацию суммарной мощности потерь $\Delta P_э+\Delta P_c$.

Основной сложностью в решении поставленной задачи является особенность математического описания суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали, которое записывается в виде уравнения:

$$\begin{cases} \Delta P_э^{опт} = \left(\left(\psi_1^* \dfrac{R_2 L_1}{L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2} \right)^2 + \left(\dfrac{M^*}{p\psi_1^*} \right)^2 \right) R_1 + \\ \quad + \left(\left(\psi_1^* - L_1 \left(\psi_1^* \dfrac{R_2 L_1}{L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2} \right) \right)^2 + \left(-L_1 \dfrac{M^*}{p\psi_1^*} \right)^2 \right) \dfrac{R_2}{L_{12}^2}; \\ \Delta P_c^{опт} = \left(\psi_1^* \right)^2 k_{c1} \left(\omega_\psi \right)^\beta + \\ \quad + \left(\left(\psi_1^* \right)^2 \left(L_2 - \dfrac{2 R_2 L_1}{\sigma \left(L_m^2 R_1 + L_1^2 R_2 \right)} \right)^2 + \left(\dfrac{M^*}{p\psi_1^* \sigma} \right)^2 \right) \dfrac{k_{c2}}{L_{12}^2} \left(\omega_\psi - p\omega \right)^\beta, \end{cases} \quad (1.188)$$

где $\Delta P_c^{опт}$ – мощность потерь в стали, соответствующая оптимальной амплитуде вектора потокосцепления ротора, определяющейся по (1.13).

Анализируя уравнение (3.23) можно отметить, что оно содержит угловую скорость вектора потокосцепления ω_ψ, которая хоть и может быть отнесена к величинам, определяющимся внешними по отношению к двигателю факторами, с учетом

коммутационных процессов в управляющем преобразователе, протекание которых зависит от совместной работы алгоритма управления и обеспечивающей коммутацию аппаратной части управляющего преобразователя, в зависимости от режима работы непрерывно изменяется и содержит в себе переменную составляющую с частотой коммутации.

При этом ω_ψ оказывает существенное влияние на уровень мощности потерь в стали. Для иллюстрации на рис. 1.24 – рис. 1.26 показано изменение ΔP_c для одного и того же заданного состояния при идентичных настройках регулятора, используемого при градиентном управлении, в случае идеализированного управляющего преобразователя и с учетом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, подводимого к двигателю.

Все переменные, полученные в ходе опыта с учетом ШИМ, содержат высокочастотную составляющую, отсутствующую при идеализированном преобразователе. При этом средневзвешенное расхождение результатов моделирования, определяемое как среднее между максимальным и минимальным отклонением с учетом и без учета ШИМ, рассчитанное за период от начала установившихся автоколебаний до окончания наблюдений, за исключением величины ΔP_c не превышает 2 %.

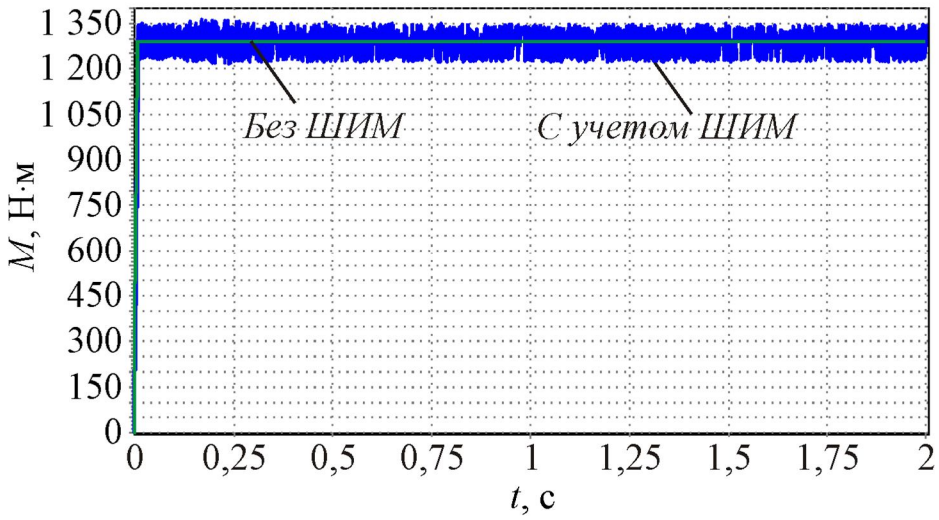


Рис. 1.24. Электромагнитный момент

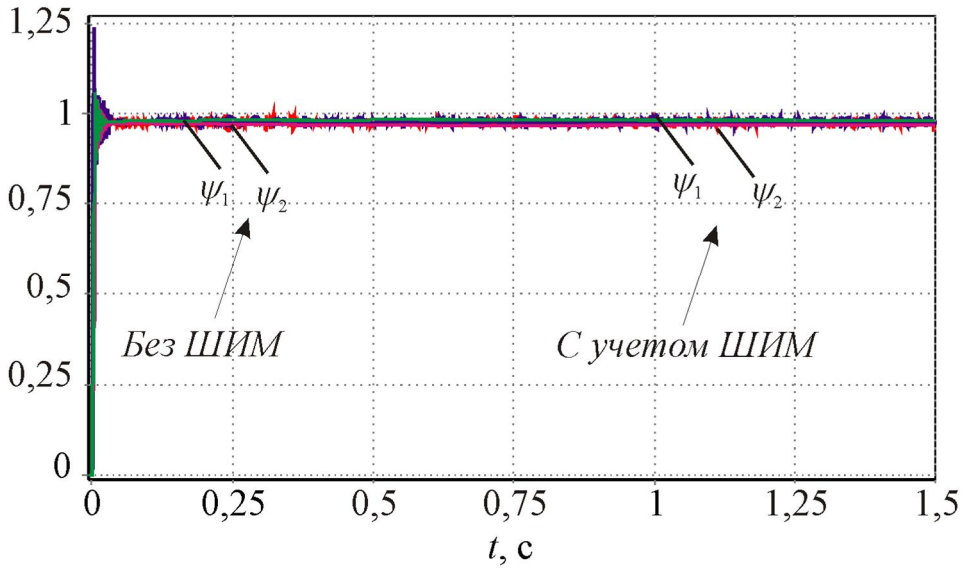


Рис. 1.14. Амплитуды векторов потокосцеплений

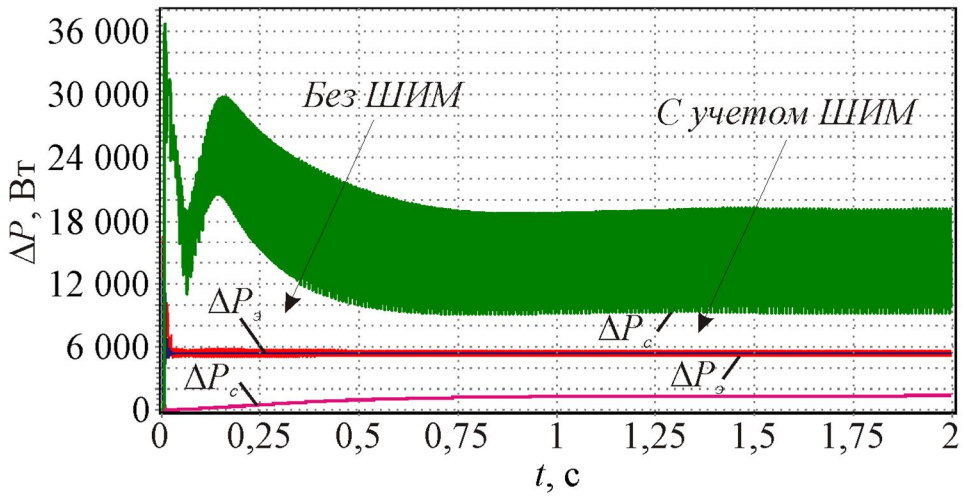


Рис. 1.15. Электрические потери и потери в стали

В то же время, средневзвешенное расхождение результатов моделирования по величине ΔP_c составляет 830 % относительно моделирования без ШИМ. Фактически, в проведенных опытах КПД двигателя, пренебрегая механическими и добавочными потерями, снизилось с 96,6 % до 90,3 %.

Данный результат подтверждает адекватность использованной математической модели вычисления потерь в стали по (1.5) и (1.6), поскольку увеличение магнитных потерь при использовании в качестве управляющего преобразователя полупроводниковых коммутационных устройств является общеизвестным фактом, подтвержденным многочисленными экспериментами, в ходе которых зафиксировано повышение уровня потерь в стали на величину от 2 % до 10 % в зависимости от исследуемого двигателя.

Несмотря на существенные отличия значений мощности потерь в стали, полученных при вычислительных экспериментах с учетом ШИМ, дополнительные исследования подтвердили, что использование в качестве заданного значения амплитуды вектора потокосцепления статора величины, рассчитанной по (1.17), обеспечивает минимизацию мощности потерь в стали для конкретных значений M^* и ω. Тем не менее, поскольку вклад $\Delta P_c^{опт}$ и $\Delta P_э^{опт}$ в их суммарное значение при ис-

пользовании различных СУ и различных способов коммутации полупроводниковых ключей управляющего преобразователя может существенно варьироваться, систему уравнений (1.18) невозможно использовать для аналитического отыскания координат минимума $\Delta P_c+\Delta P_э$, универсального для любого электропривода.

Исходя из этого, наиболее рациональным решением задачи отыскания минимума суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали является его численное определение по результатам вычислительных экспериментов проведенных с использованием полной математической модели электропривода учитывающей, коммутационный характер и наличие ограничений на величину подводимого к двигателю напряжения, а также нелинейность его кривой намагничивания.

Для численного определения указанного минимума необходимо с учетом особенностей эксплуатации электропривода разбить диапазон изменения угловой скорости двигателя и диапазон изменения нагрузки на интервалы, число которых не должно быть менее четырех, поскольку семейства зависимостей мощности потерь от указанных величин (рис. 1.22 и рис. 1.23) с достоверностью более 0,95 аппроксимируются полиномами четвертого порядка.

Далее для каждой узловой точки полученных интервалов следует провести серию вычислительных экспериментов, варьируя заданное значение амплитуды вектора потокосцепления статора от значения $\psi_1^{опт_м}$, рассчитанного по (1.17) до $\psi_{1н}$. Амплитуду вектора потокосцепления ротора при этом необходимо задавать на уровне $\psi_2^{опт}$, рассчитанном по (1.13). Интервал изменения ψ_1^* не должен превышать 20 % от $\psi_{1н}$, поскольку при этом невозможно обеспечить точность результата оптимизации в пределах инженерной погрешности, и рекомендуется принять равным 5 %.

Длительность времени моделирования в рамках каждого вычислительного эксперимента должна вдвое превышать время переходного процесса по угловой скорости вала двигателя, чтобы гарантировать наличие установившихся переходных процессов по $\Delta P_c+\Delta P_э$.

Поскольку полученная в результате моделирования зависимость $\Delta P_c+\Delta P_э$ от времени содержит высокочастотную составляющую, обусловленную коммутационным характером подводимого к двигателю напряжения, ее необходимо подвергнуть фильтрации, отсекая составляющие с частотой превышающей собственную частоту двигателя, определяемую его электрической постоянной времени.

В результате оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления статора $\psi_1^{опт_с}$, реализация которой в качестве заданного значения для системы управления обеспечит минимизацию электрических потери и потерь в стали суммарно, определяется прямым перебором установившихся значений отфильтрованной величины $\Delta P_c+\Delta P_э$, полученных для конкретных M^* и ω.

Для примера на рис. 1.27 приведены результаты численного определения минимума суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали для градиентного управления с релейным регулятором, а на рис. 1.28 соответствующее данному минимуму значение КПД, рассчитанного без учета механических и добавочных потерь.

Анализируя рис. 1.27 можно заключить, что для конкретной угловой скорости двигателя величина $\psi_1^{опт_с}$ в зависимости от M^* носит s-образный характер с достаточно интенсивным переходом уровней, определяющимся границей зоны преобладания ΔP_c и $\Delta P_э$ в сумме. При этом, поскольку диапазон допустимых значений ам-

плитуды вектора потокосцепления статора был принудительно ограничен величиной $\psi_{1н}$, при высоких заданиях электромагнитного момента в результатах оптимизации наблюдаются краевые эффекты.

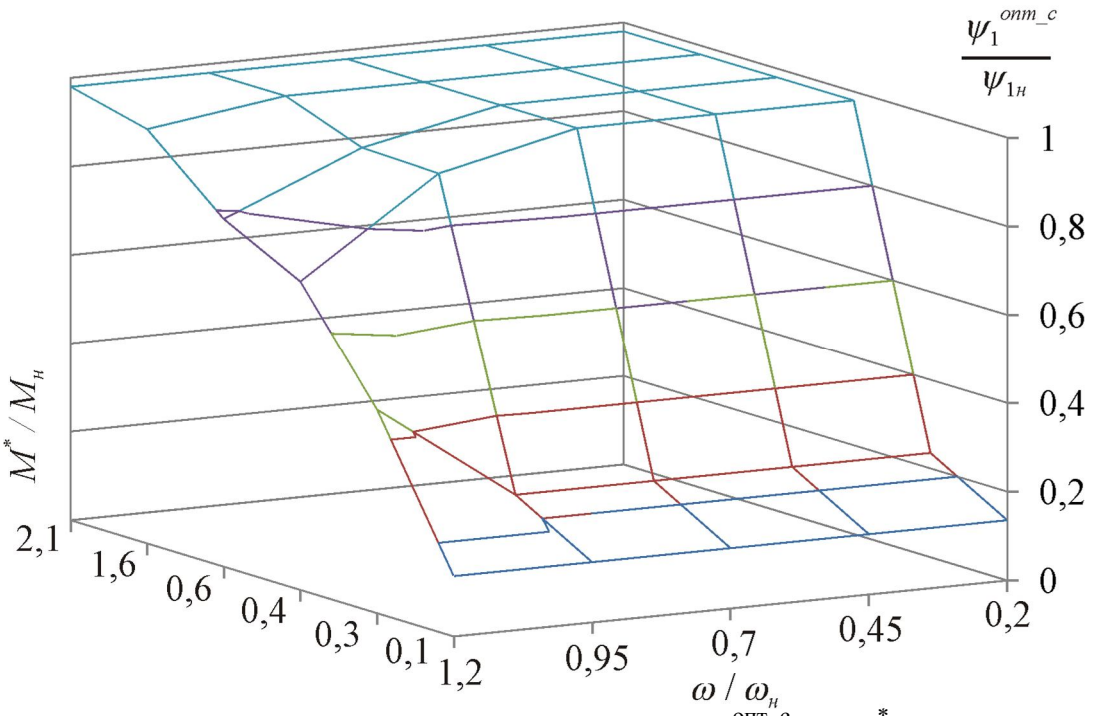


Рис. 1.16. Семейство зависимостей $\psi_1^{опт_с}$ от M^* и ω

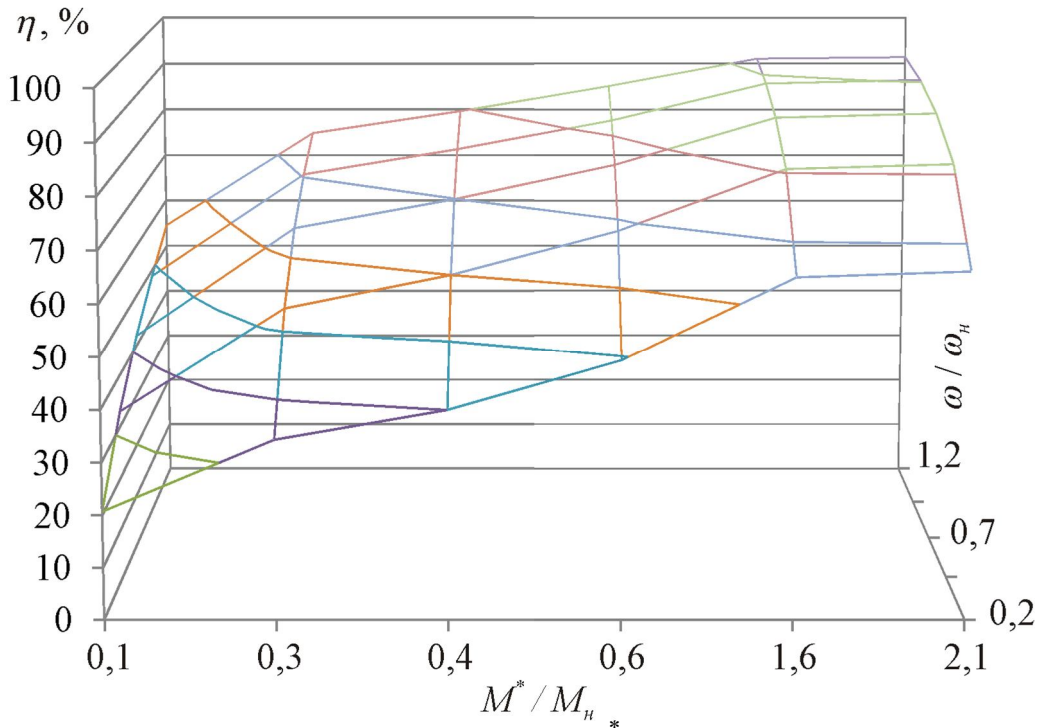


Рис. 1.17. Семейство зависимостей КПД от M^* и ω при оптимизации по $\Delta P_с+\Delta P_э$

В целом, для рассматриваемой системы электропривода оптимальное значение заданной амплитуды вектора потокосцепления статора практически не зависит от ω. Однако, следует отдельно отметить характер зависимости $\psi_1^{опт_с}$ от M^* при угловой скорости двигателя, превышающей номинальное значение, поскольку на его форму помимо ограничения диапазона исследования ψ_1^* значительное влияние

оказывает ограничение величины подводимого к двигателю напряжения. В силу факторов, рассмотренных ранее, данное ограничение приводит к повышению ошибки регулирования, в первую очередь амплитуды векторов потокосцепления статора и ротора. По этой причине для ψ_1^*, эффективных для других значений угловой скорости, фактическое значение ψ_1 и ψ_2 отличается от заданного настолько, что это провоцирует существенное возрастание мощности электрических потерь.

Что касается количественной оценки потерь, полученных в ходе вычислительных экспериментов для электропривода с градиентным управлением и релейным регулятором, их мощность оказывается выше, по сравнению с градиентным управлением с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором, где рассчитанное значение управляющего напряжения реализуется при помощи ШИМ. Так, при заданных значениях, идентичных опыту на рис. 1.24 – рис. 1.26, КПД двигателя составляет 87,7 %. Такие результаты объясняются более широким спектром гармонических составляющих всех переменных двигателя, вызванных отсутствием постоянной частоты коммутации полупроводниковых ключей управляющего преобразователя.

1.3 Сравнительная оценка динамических свойств энергоэффективных систем упрваления

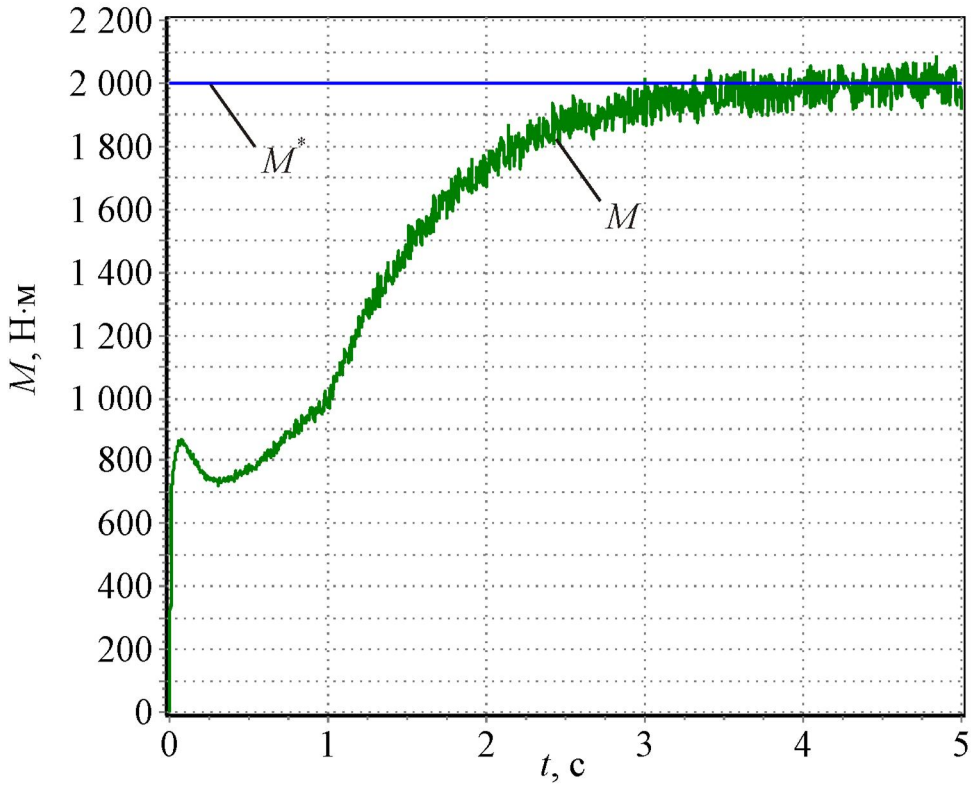
Сравнение динамических характеристик проводилось в нескольких режимах. Первым рассматривался вопрос виляния T_n на динамическую точность регулирования электромагнитного момента в том же режиме, в котором анализировалась энергоэффективность, а также на статическую точность регулирования амплитуды вектора потокосцепления. Далее оценивалось влияние на показатели регулирования электропривода динамики изменения потокосцепления. В силу нелинейного характера питающего напряжения для количественной оценки ошибок регулирования использовалась средневзвешенная ошибка.

Анализируя полученные результаты можно отметить, что во всех рассмотренных системах динамическая ошибка регулирования электромагнитного момента двигателя не зависит от интенсивности переходных процессов по угловой скорости и для прямого управления моментом и градиентного управления находится в пределах 20 %, а для векторного управления – 35%. Средневзвешенная ошибка регулирования потокосцепления во всех системах так же практически постоянна и составляет не более 0,07 % для градиентного управления со знаковым регулятором и прямого управления моментом, 0,1 % для градиентного управления с ПИ регулятором и 0,3 % для векторного управления.

Указанные исследования проводились при постоянстве заданной амплитуды вектора потокосцепления, однако в зависимости от режима работы при переменных нагрузках потокосцепление двигателя целесообразно изменять для обеспечения энергоэффективности работы электропривода. Исходя из этого, был проведен ряд вычислительных экспериментов, предусматривающих изменение формы заданного потокосцепления. Их суть заключалась в стабилизации электромагнитного момента при условии, что задание потокосцепления изменяется по линейной и синусоидальной зависимости с различной интенсивностью, а также в согласованном изменении электромагнитного момента и потокосцепления.

Для примера на рис. 1.29 – рис. 1.32 приведены результаты работы систем электропривода при линейно нарастающем потокосцеплении и задании электромагнитного момента на уровне номинального значения.

Как можно видеть, для векторного управления заниженное потокосцепление, особенно при низких темпах его нарастания, приводит к проявлению нелинейных эффектов, вызывающих резкое изменение уровня электромагнитного момента. Причина наблюдаемых переходных процессов заключается в том, что для достижения электромагнитным моментом заданного уровня источник тока, входящий в состав системы управления, стремиться увеличить активный ток, однако в силу ограничений, накладываемых питающей сетью на подводимое к двигателю напряжение, заданный уровень активного тока не достигается. При этом работа инвертора напряжения в режиме ограничения негативно отражается и на точности поддержания реактивного тока, что вызывает отклонение формы переходного процесса амплитуды вектора потокосцепления ротора от заданной. Ошибка регулирования потокосцепления вносит погрешности в канал формирования электромагнитного момента, чем дополнительно провоцирует его отклонение от задания.



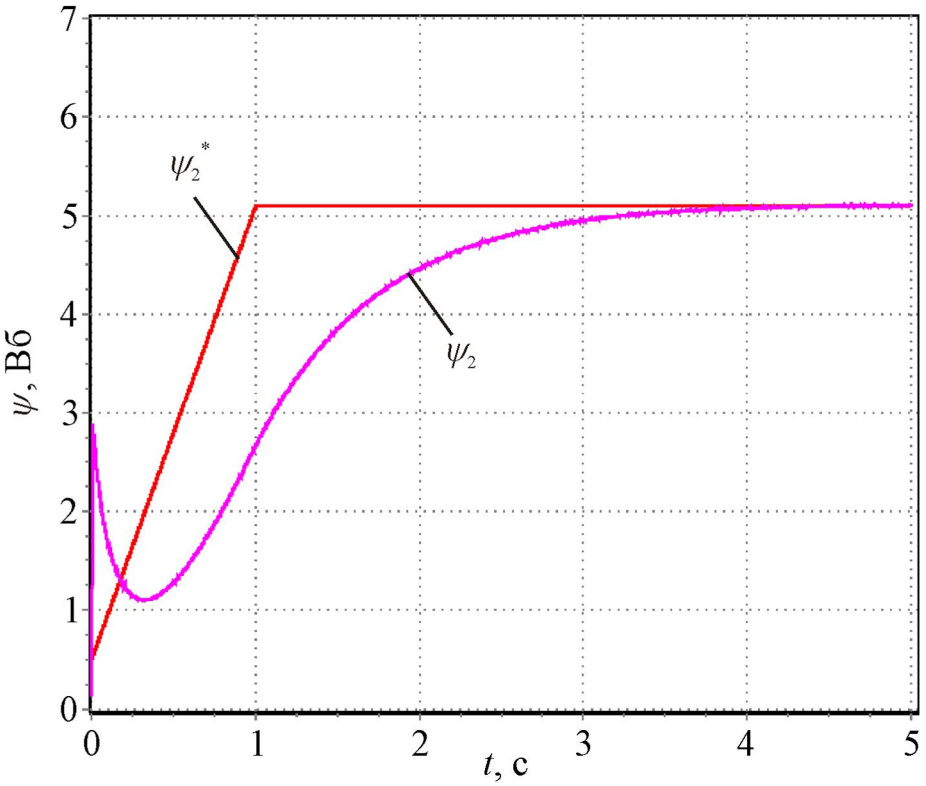
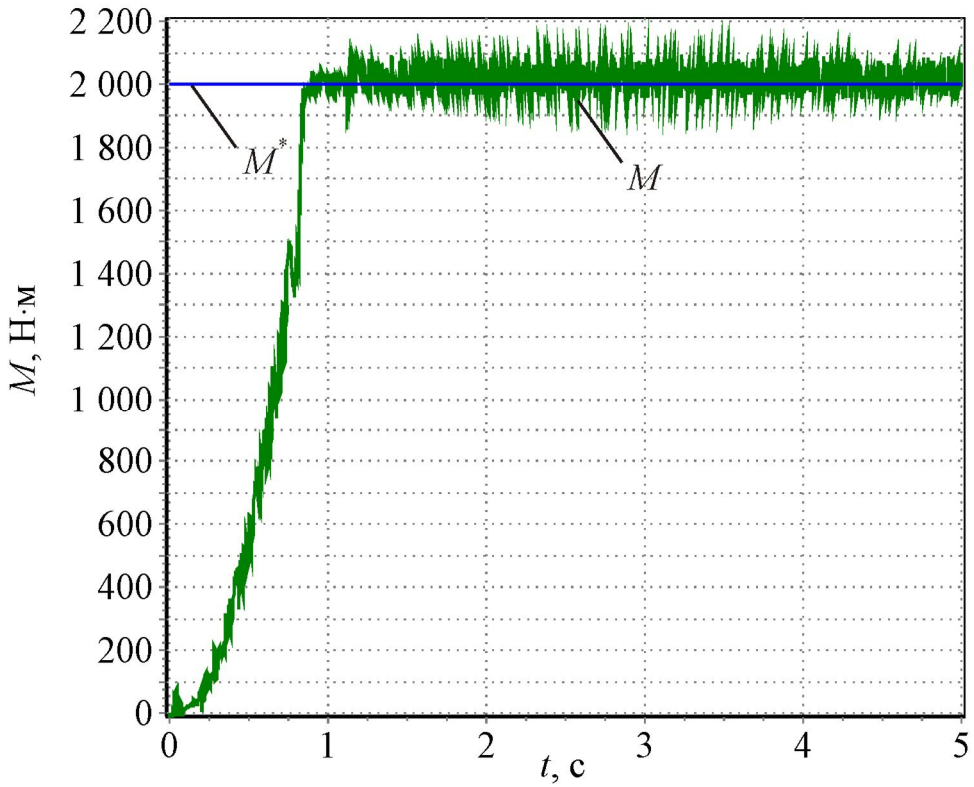


Рис. 1.189. Векторное управление
при линейно нарастающем ψ_2^* и M^* равном $M_н$



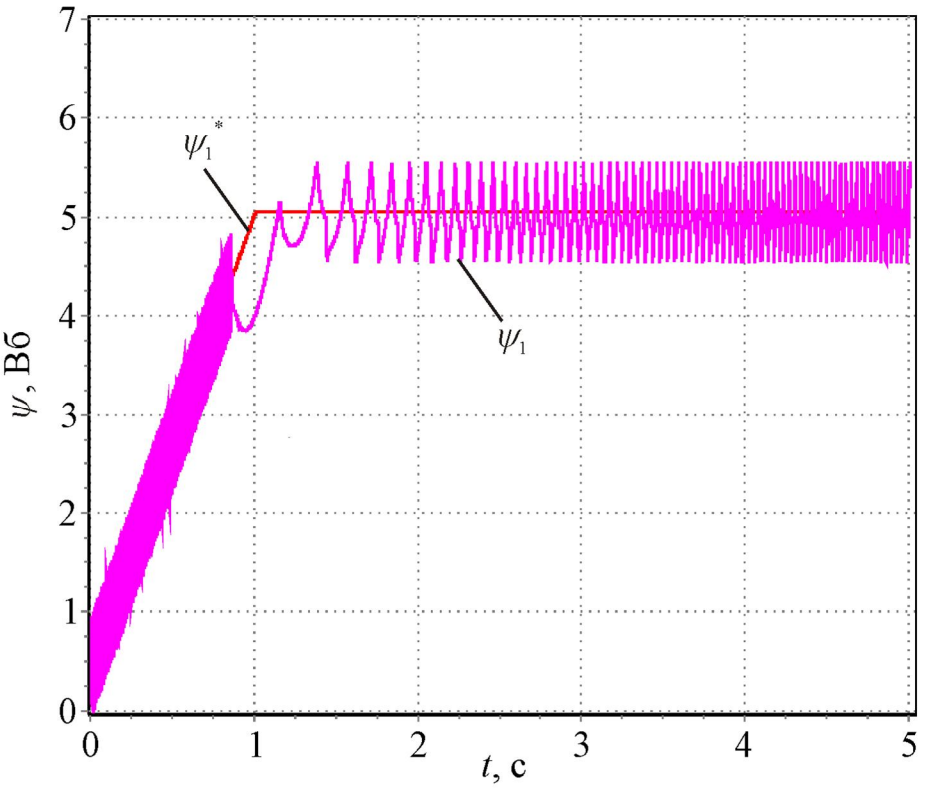
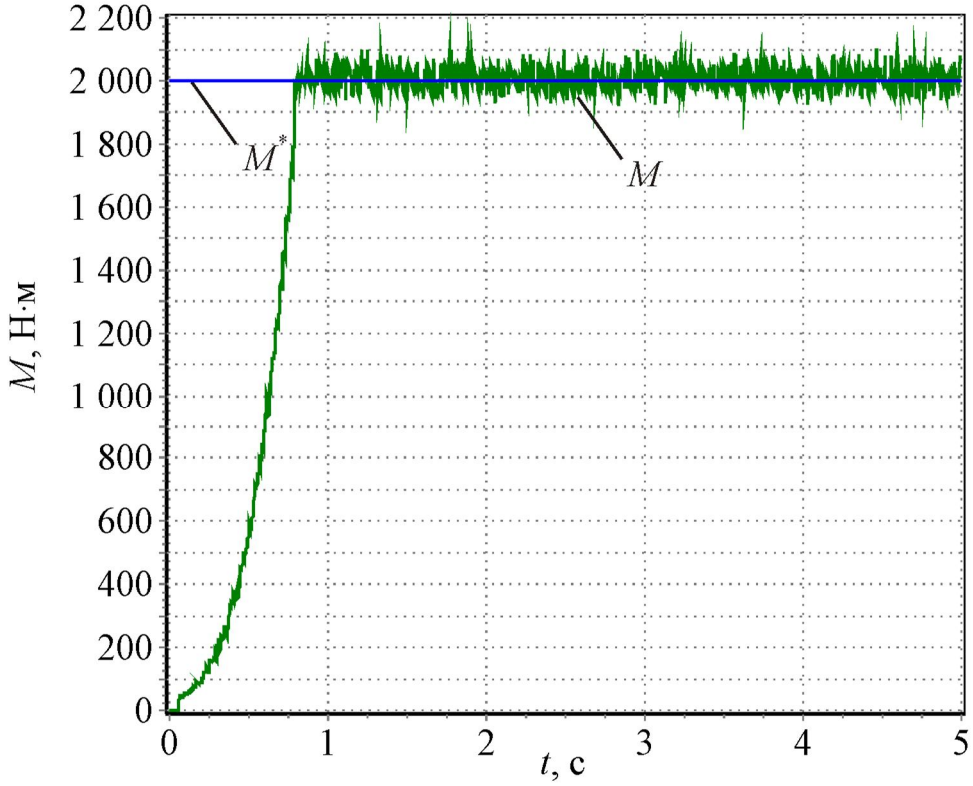


Рис. 1.30. Прямое управление моментом
при линейно нарастающем ψ_1^* и M^* равном $M_н$



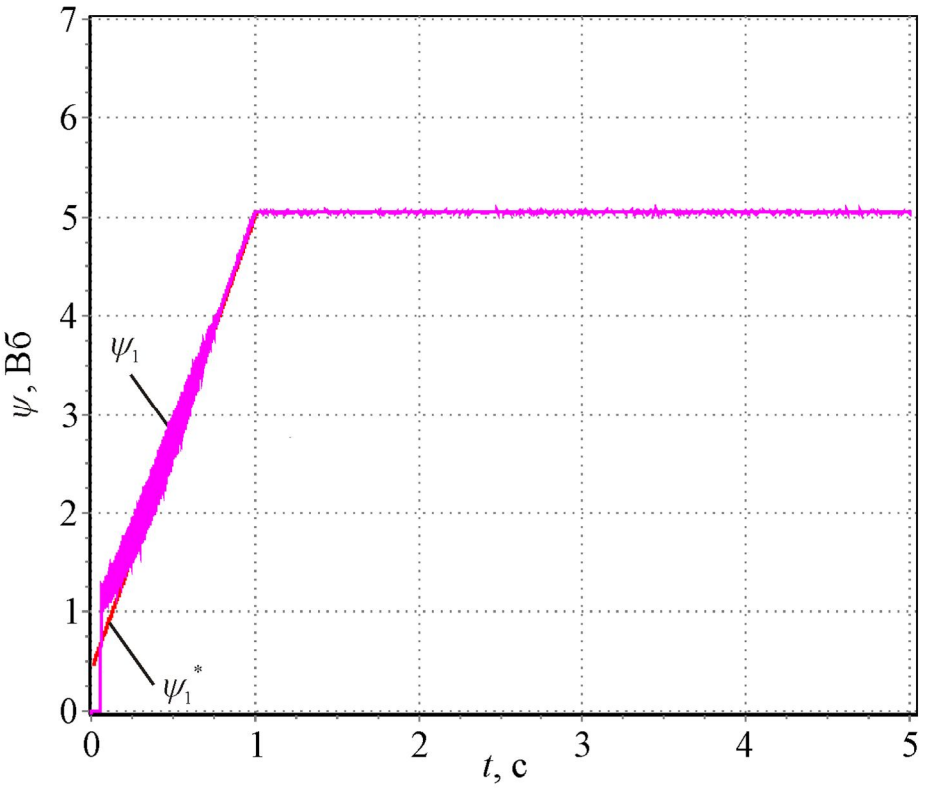
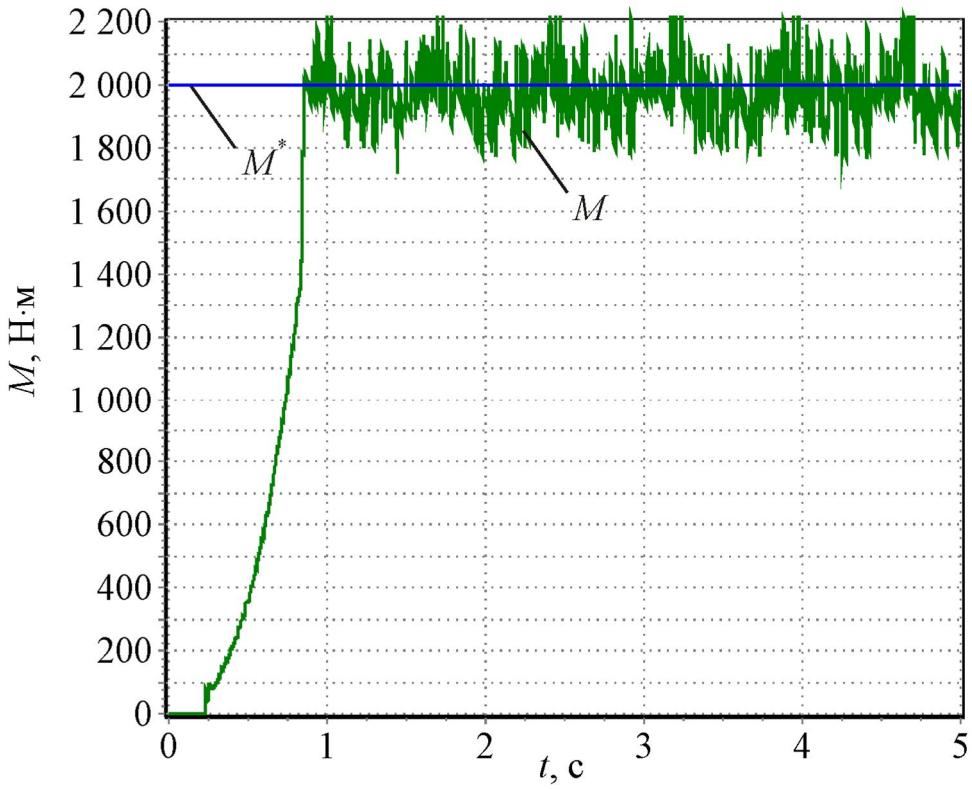


Рис. 1.3119. Градиентное управление с ПИ регулятором при линейно нарастающем ψ_1^* и M^* равном $M_н$



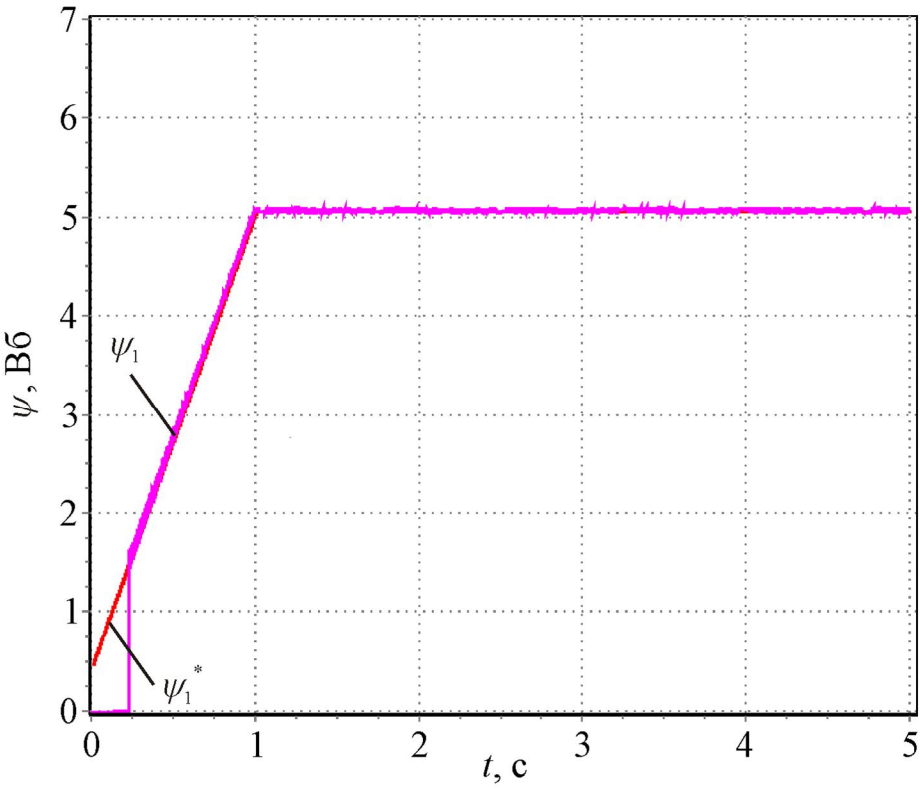


Рис. 1.3220. Градиентное управление со знаковым регулятором при линейно нарастающем ψ_1^* и M^* равном $M_н$

В отличие от векторного управления, градиентное управление как с пропорционально-интегральным, так и со знаковым регулятором при заниженном потокосцеплении не вызывает работу электропривода в режиме ограничения напряжения. Однако в силу особенностей настройки весовых коэффициентов h_1 и h_2, переходные процессы по амплитуде вектора потокосцепления статора потокосцеплению обладают инерционностью, а при заниженном задании (менее 15 % от $\psi_{1н}$) препятствуют развитию электромагнитного момента. Данный эффект легко ликвидируется введением дополнительной зависимости между h_2 и ψ_1^*.

Система электропривода с прямым управлением моментом в соответствии со своим принципом действия не демонстрирует ни нелинейных искажений, вызванных ограничением напряжения, ни проявлений инерционности собственно способа управления двигателем.

Схожие качественно результаты были продемонстрированы при формировании задания потокосцепления по синусоидальному закону относительно номинального значения. Для примера на рис. 1.33 – рис. 1.36 приведены результаты моделирования для задания электромагнитного момента на номинальном уровне и синусоидального изменения потокосцепления со средним значением гармонического сигнала равным 80 % и амплитудой соответственно 40 % от $\psi_{1н}$ ($\psi_{2н}$).

Основными критериями оценки в данных экспериментах выбраны отклонения потокосцепления от заданной траектории по амплитуде и фазе, а также максимальная ошибка регулирования электромагнитного момента, вызванная изменяющимся потокосцеплением.

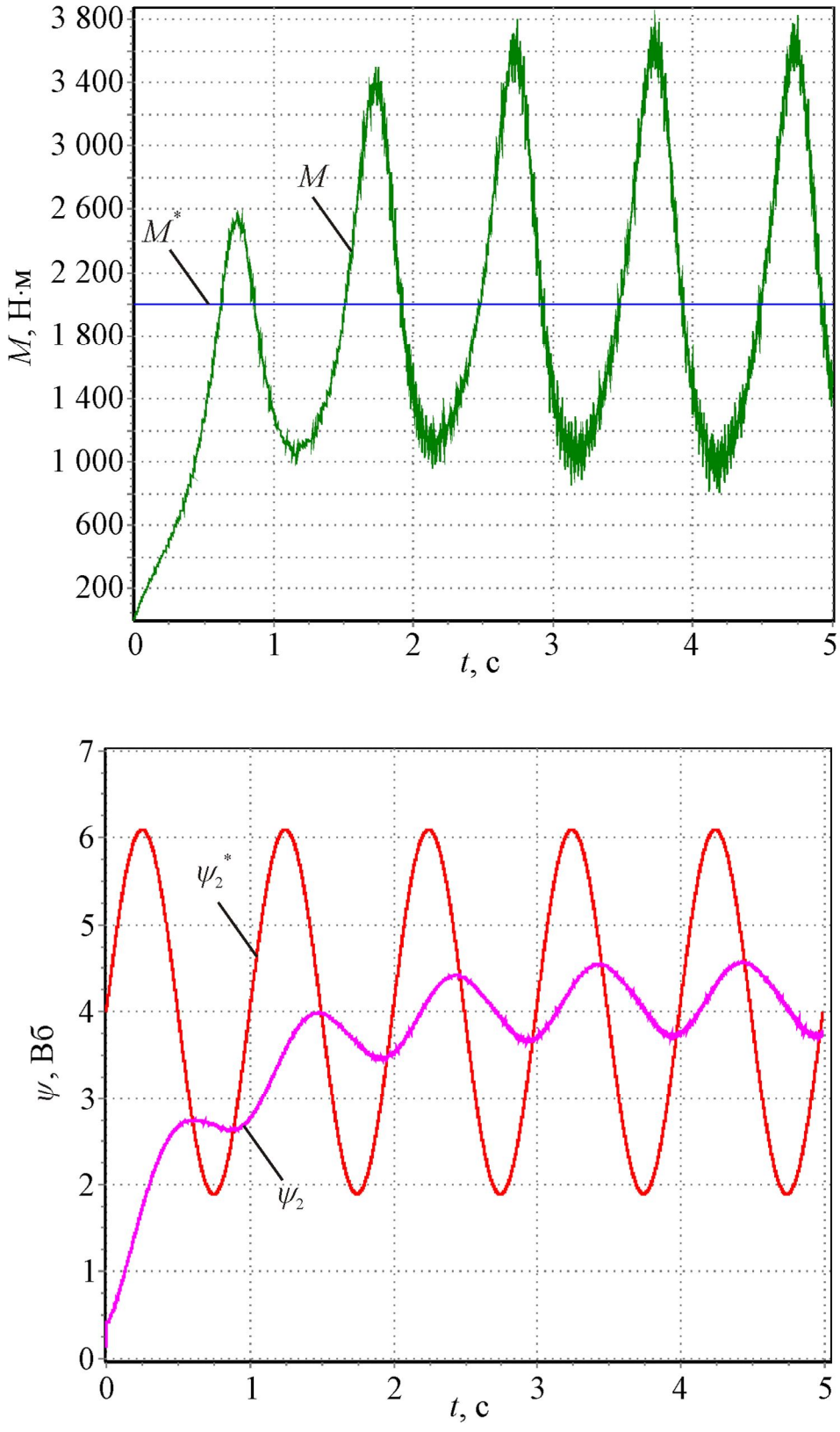


Рис. 1.3321. Векторное управление
при синусоидально изменяющемся ψ_2^* и M^* равном $M_н$

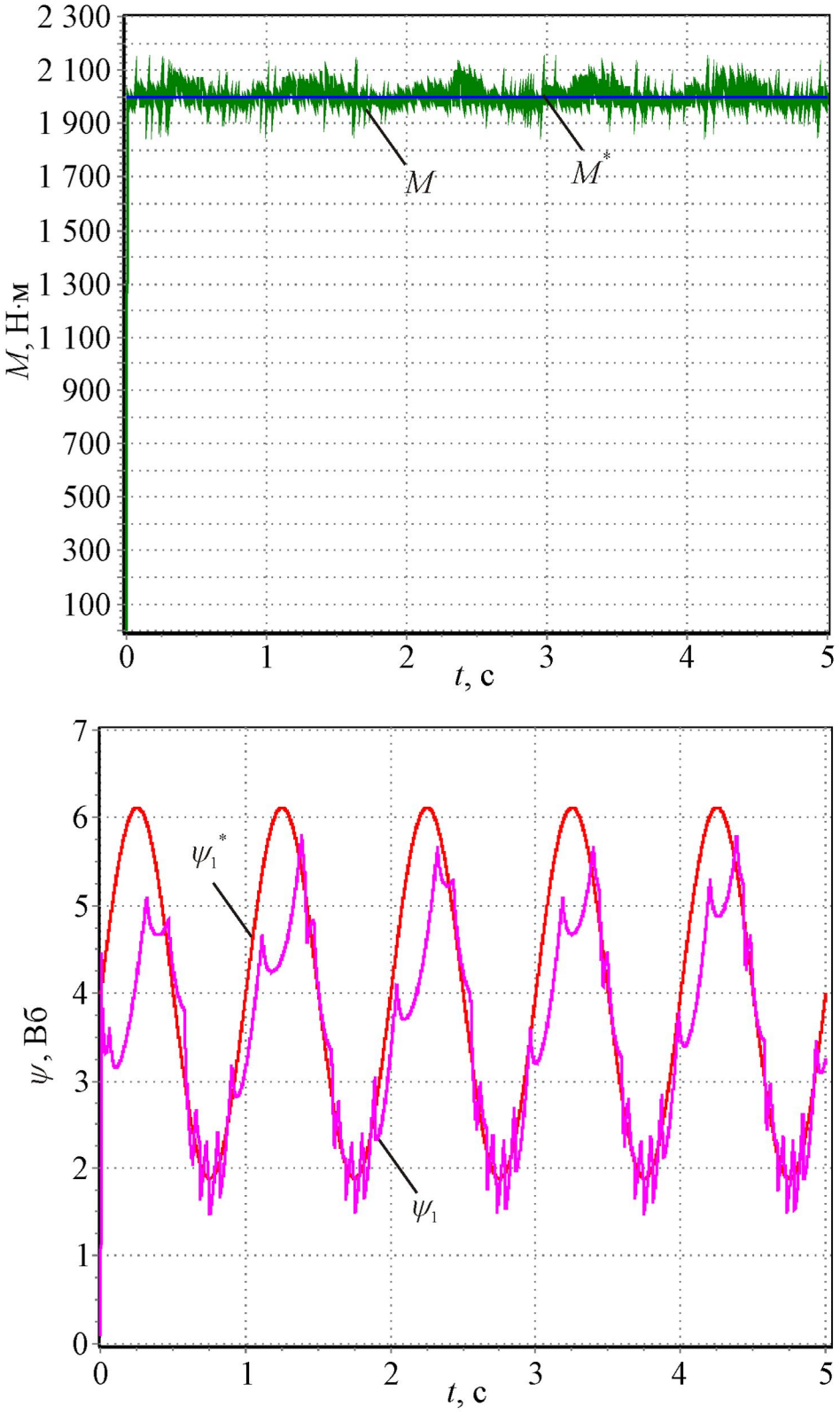


Рис. 1.34. Прямое управление моментом
при синусоидально изменяющемся ψ_1^* и M^* равном $M_н$

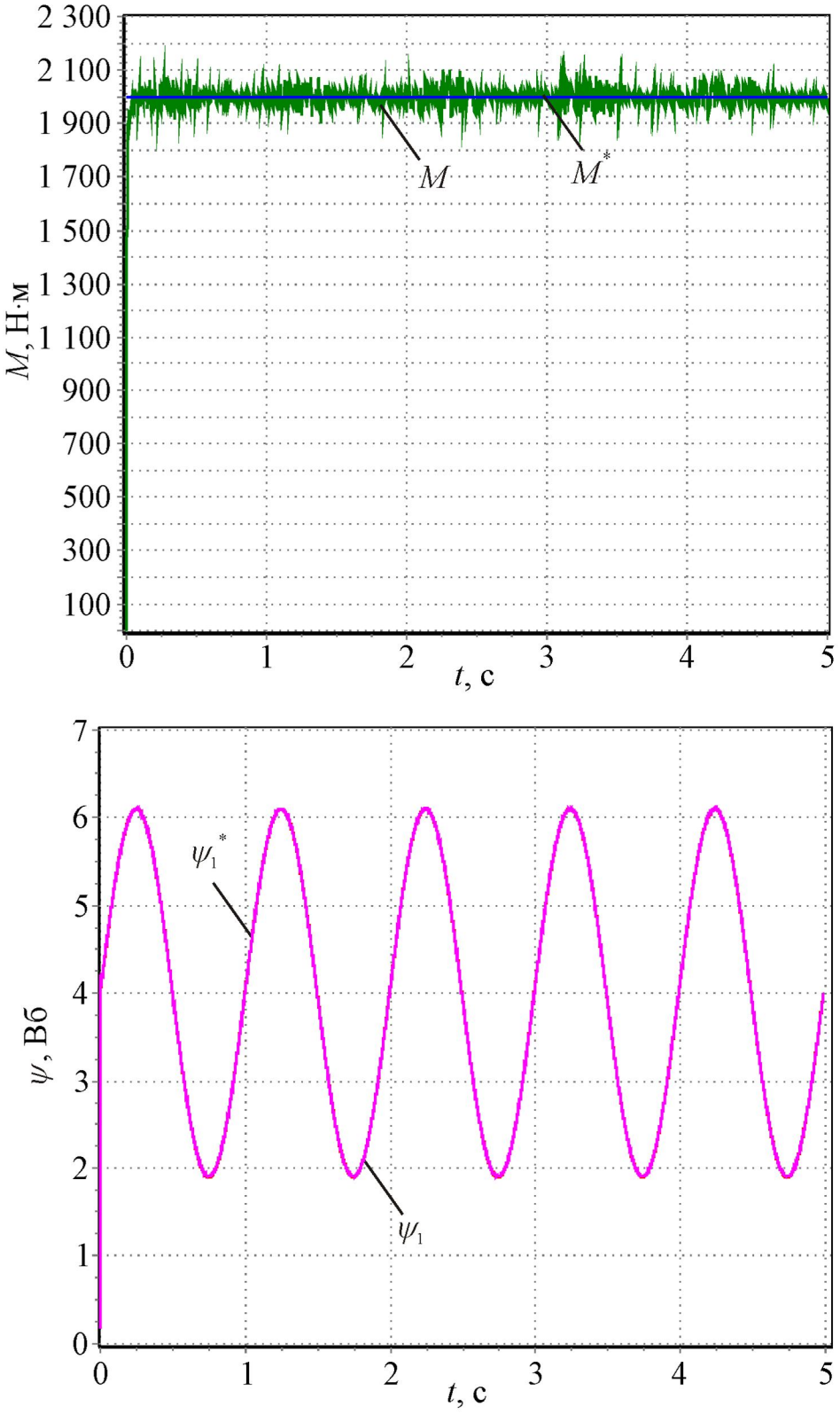


Рис. 1.35. Градиентное управление с ПИ регулятором при синусоидально изменяющемся ψ_1^* и M^* равном $M_н$

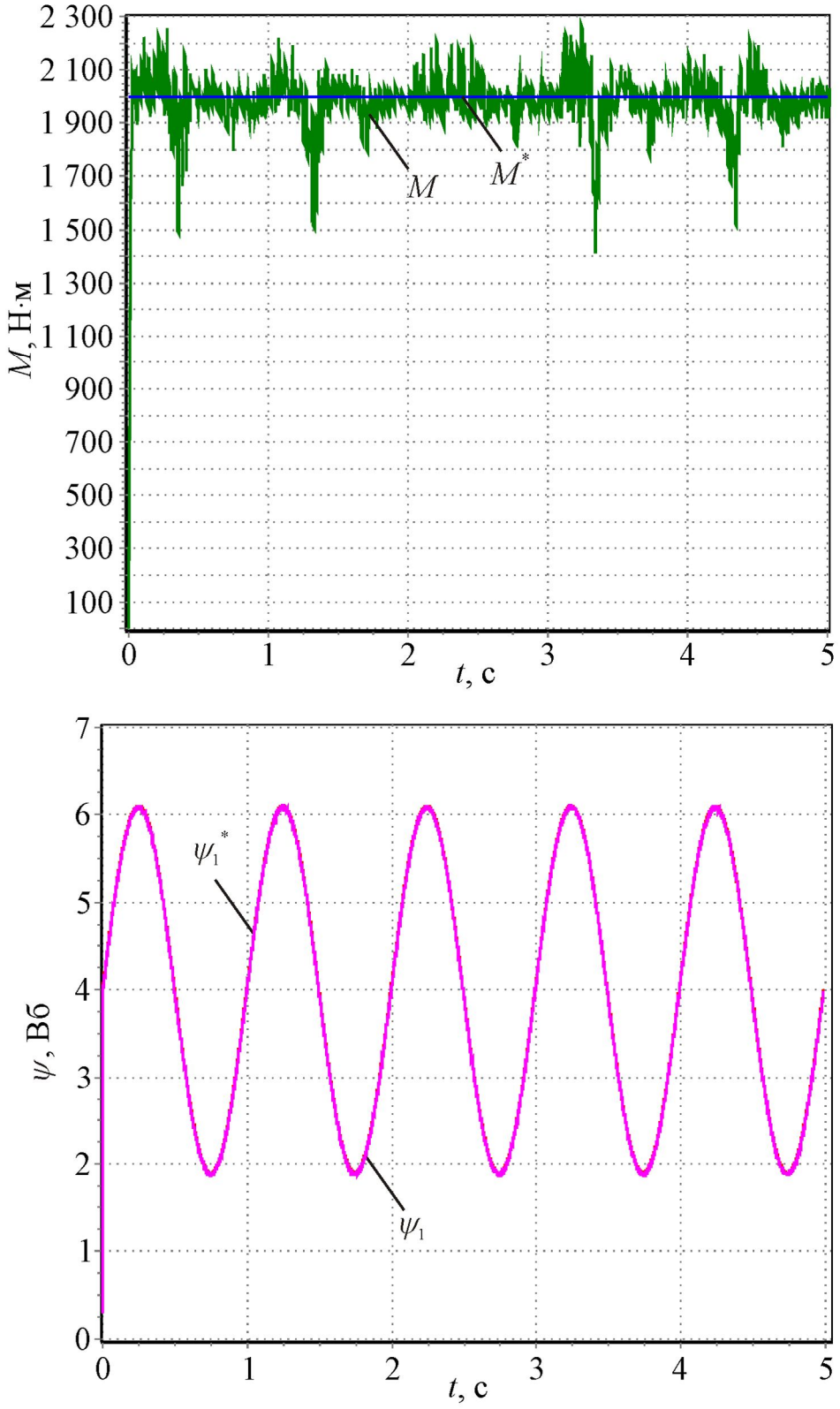


Рис. 1.3622. Градиентное управление со знаковым регулятором при синусоидально изменяющемся ψ_1^* и M^* равном $M_н$

При работе векторного управления с увеличением амплитуды синусоиды заданного потокосцепления отклонение по амплитуде существенно увеличивается, а отклонение по фазе, напротив, снижается, что объясняется, как и в предыдущих экспериментах, влиянием ограничений по напряжению. При этом максимальная ошибка регулирования электромагнитного момента в процентном выражении

близка к соотношению амплитуды синусоиды заданного потокосцепления к номинальному значению.

Несколько иное влияние на изменяющееся задание потокосцепления наблюдается при работе градиентного управления. При прохождении верхней полуволны синусоиды практически отсутствует как ошибка регулирования потокосцепления, так и влияние на точность регулирования электромагнитного момента. Однако существенным отличием обладает реакция электропривода при работе на нижней полуволне синусоиды. Как и в опыте с линейным нарастанием потокосцепления при заниженном задании наблюдается падение электромагнитного момента, а при значениях менее 15 % от $\psi_{1н}$ – резкое снижение его значения до нуля с последующим восстановлением на верхней полуволне (рис. 1.37).

Что характерно, в электроприводе с прямым управлением моментом до определенной степени их интенсивности колебания потокосцепления на точность регулирования электромагнитного момента влияния не оказывают. С уменьшением частоты изменения потокосцепления ниже 10 Гц, однако, проявляется тот же эффект, что и для градиентного управления (рис. 1.38). Помимо этого, сказываются ограничения на величину подводимого напряжения, которые выражаются в несоответствии заданной и отрабатываемой траектории потокосцепления.

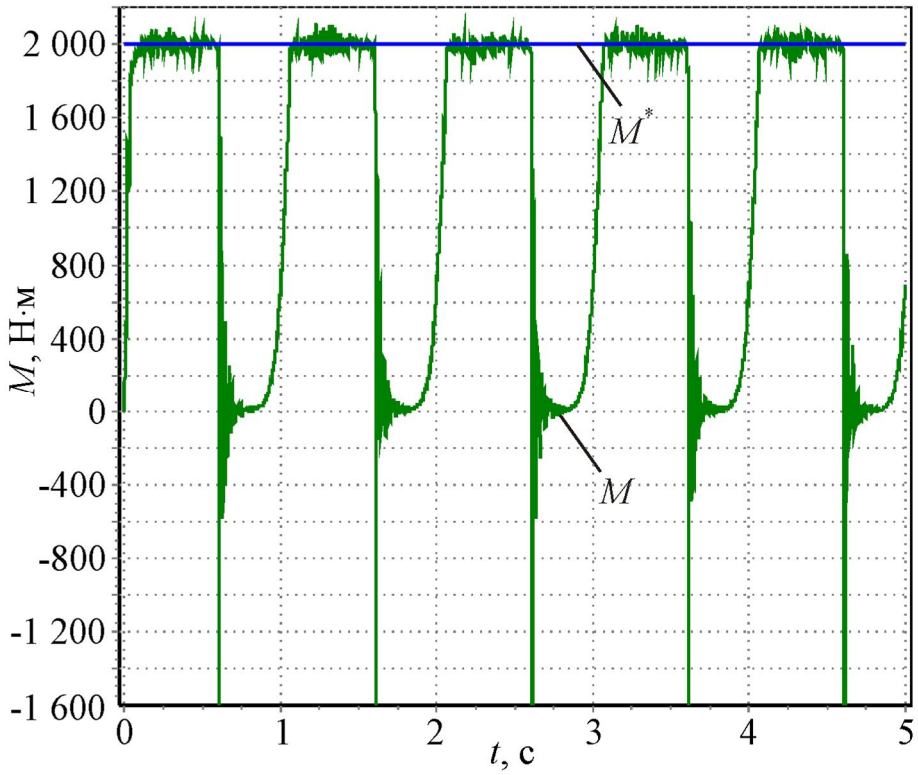


Рис. 1.37. Градиентное управление с ПИ регулятором при синусоидальном изменении ψ_1^* с амплитудой 60 % от $\psi_{1н}$, равной среднему значению, и M^* равном $M_н$

Прохождение нижней полуволны синусоиды выполняется без искажения, в то время как максимальное потокосцепление при прохождении верхней полуволны синусоиды ограничивается, начиная с заданной амплитуды синусоидальной составляющей, равной 20 % от $\psi_{1н}$.

Вычислительные эксперименты, оценивающие совместную динамику изменения M и потокосцепления, также подтвердили более высокие динамические характеристики градиентного управления и прямого управления моментом по сравнению с векторным управлением. Аналогичные результаты продемонстрировало моделирование с линейно нарастающим M^* и взаимосвязанным ψ_1^* или ψ_2^*, а также с синусоидально изменяющимся M^*. Для примера на рис. 1.39 – рис. 1.42 приведены результаты моделирования при синусоидальном задании электромагнитного момента.

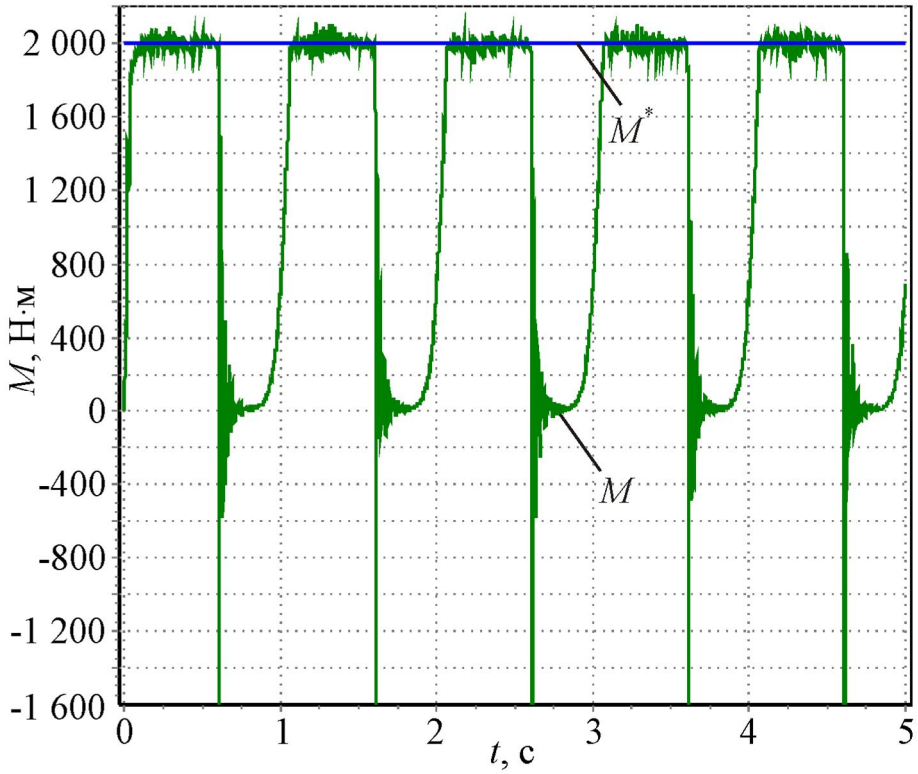


Рис. 1.38. Прямое управление моментом
при синусоидальном изменении ψ_1^* с амплитудой 60 % от $\psi_{1н}$, равной среднему значению, и M^* равном $M_н$

Как можно видеть, градиентное управление с ПИ регулятором и прямое управление моментом обеспечивают наилучшее соответствие M и M^*, с минимальным рассогласованием по амплитуде и минимальным фазовым сдвигом. Градиентное управление со знаковым регулятором уступает данным способам при низких значениях заданного электромагнитного момента, поскольку при этом снижается ψ_1^* и падает точность регулирования электромагнитного момента. При этом по сравнению с векторным управлением, динамические характеристики прямого управления моментом и градиентного управления с ПИ регулятотором практически не изменяются по отношению к аналогичному изменению M^* при постоянном задании амплитуды вектора потокосцепления.

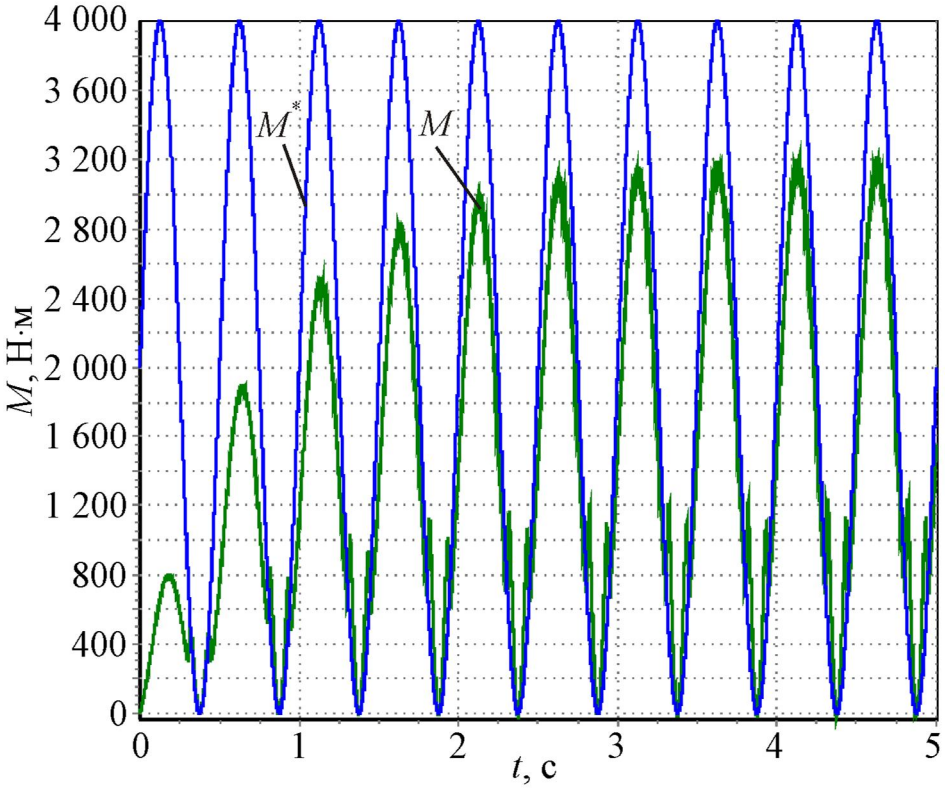


Рис. 1.239. Векторное управление при синусоидальном M^*

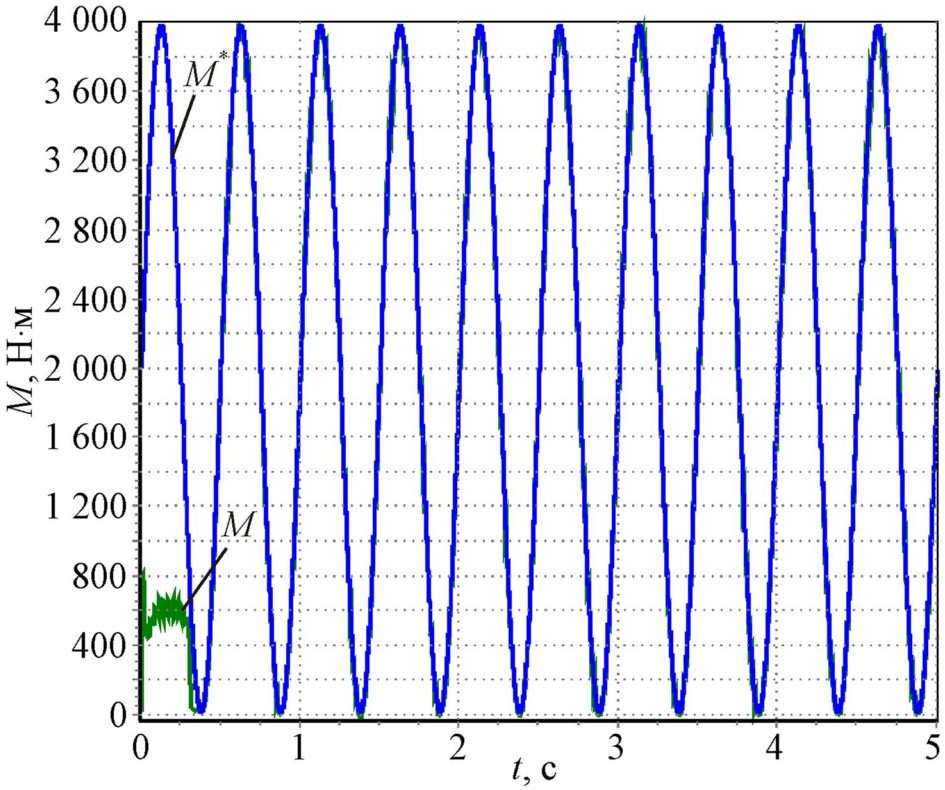


Рис. 1.4024. Прямое управление моментом при синусоидальном M^*

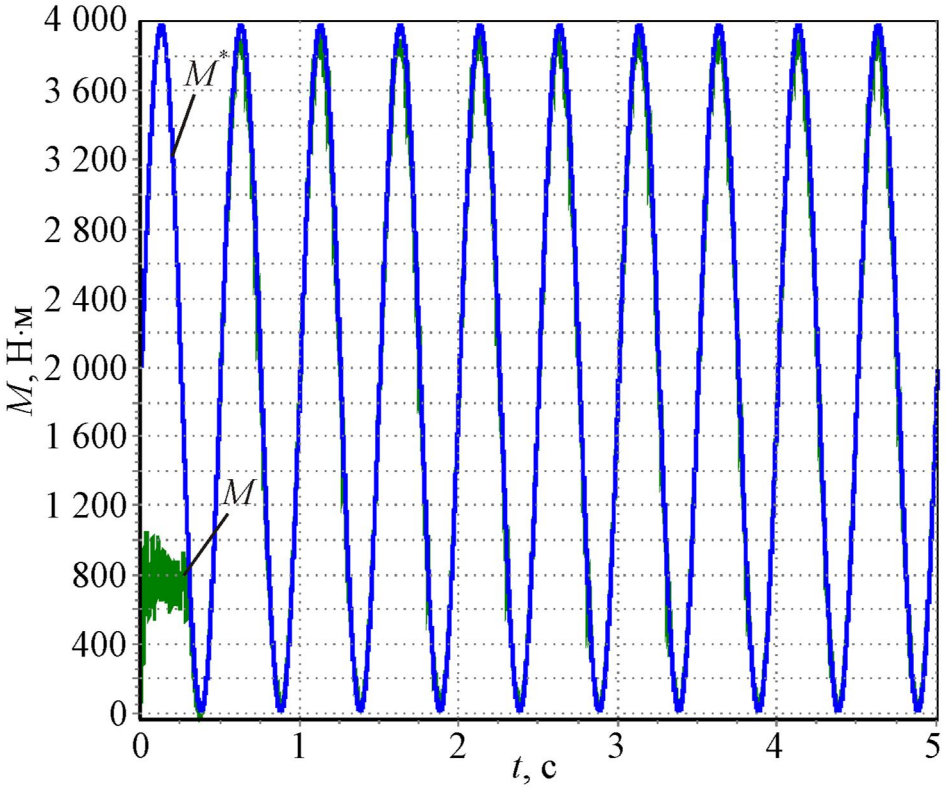


Рис. 1.4125. ГУ с ПИ регулятором при синусоидальном М*

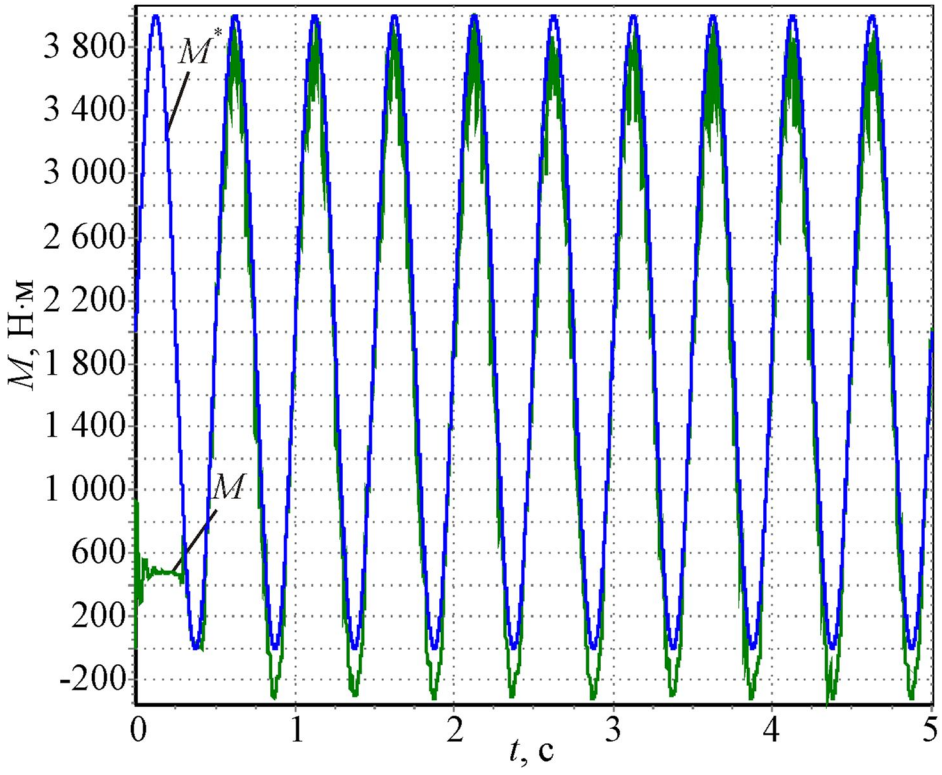


Рис. 1.42. ГУ со знаковым регулятором при синусоидальном М*

Таким образом, результаты сравнительного анализа позволяют заключить. Что из рассматриваемых систем электропривода наилучшими динамическими характеристиками обладает прямое управление моментом и градиентное управление

с ПИ регулятором, а наилучшим сочетанием динамических и энергетических характеристик – градиентное управление с ПИ регулятором.

Исходя из этого, данный способ управления является наилучшим решением для создания энергооптимальных электроприводов горных машин. Также высоким уровнем эффективности для решения данной задачи обладает прямое управление моментом, при этом в силу наличия серийного производства управляющих преобразователей, реализующих эту систему управления, она обладает более высоким потенциалом для внедрения.

2 Разработка рекомендаций по возможности использования результатов в реальном секторе экономики

В производственной практике применение электроприводов ГМ до сих пор не приняло массовый характер. Тем не менее, существуют производители горно-шахтного электрооборудования, специализирующиеся именно на такой технике. Так, ООО «Электромашина» (г. Кемерово) среди своей продукции выпускает устройства частотно-преобразовательная станция шахтная типа ЧПСШ и частотный преобразователь лебедки конвейера типа ЧПЛК, последний из которых является совместной разработкой с Кузбасским государственным техническим университетом им. Т.Ф. Горбачева

Станция ЧПСШ предназначена для бесступенчатого электрического регулирования привода магистрального ленточного конвейера мощностью до 2х500 кВт, и позволяет обеспечить выравнивание нагрузок между отдельными приводами конвейера, а преобразователь ЧПЛК предназначен для управления электроприводами лебедки натяжения ленточного конвейера мощностью от 55 до 90 кВт. Основу данных устройств составляют преобразователи частоты ACS800 производства компании ABB, отличающиеся широкими возможностями управления, в первую очередь за счет использованием прямого управления моментом с обширным перечнем переменных для параметрирования, а также широкой номенклатуры встроенных элементов, таких как программируемые регуляторы, обработчики аналоговых и дискретных сигналов и т.д.

Комплекс устройств ЧПСШ и ЧПЛК был установлен на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий) на магистральном ленточном конвейере с мощностью двигателей 2х400 кВт головного привода и 2х400 кВт промежуточного привода и подключен в общую систему автоматизации, позволяющую архивировать информацию о текущих параметрах работы ЭП. Благодаря этому были получены и проанализированы данные, собранные за несколько смен работы конвейера. Следует отметить, что часть информации, использованной при анализе, получена непосредственно от датчиков технологических параметров (например, грузопоток, натяжение ленты), а часть, касающаяся состояния электродвигателей, получена от средств измерения, встроенных в преобразователь частоты ACS800.

Отличительной особенностью организации автоматизированной системы управления данного магистрального ленточного конвейера является предъявляемое к его электроприводам требование строгого выравнивания нагрузки отдельных приводов, вызванное его высокой протяженностью и устанавливаемое для предотвращения повышенного натяжения на участках ленты, возникающего в результате колебательных переходных процессов в упругой среде, а также для максимального снижения связанной с этим вероятности аварийного останова конвейера по причине порыва ленты. Исходя из этого, общий уровень натяжения ленты формируется ЧПЛК, а преобразователи частоты в составе ЧПСШ работают таким образом, чтобы электромагнитный момент, формируемый на валу промежуточного привода, с учетом транспортной задержки и грузопотока соответствовал электромагнитному моменту головного привода. Зависимость между электромагнитными моментами первого и второго двигателей головного привода $M_{Г1}$, $M_{Г2}$, электромагнитными моментами первого второго двигателей промежуточного привода $M_{П1}$, $M_{П2}$ и грузопотоком приведена на рис. 2.1.

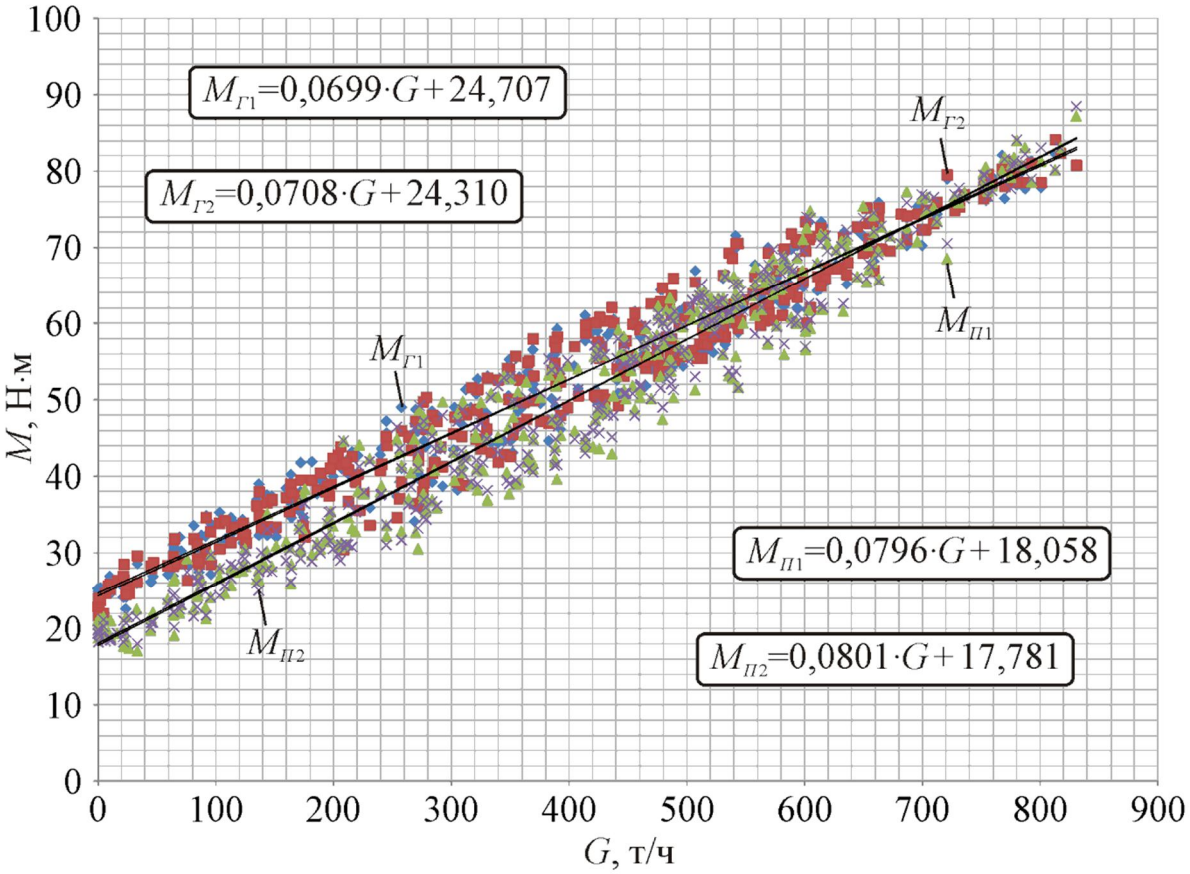


Рис. 2.1. Электромагнитные моменты двигателей
в зависимости от грузопотока

Ввиду акцента на ресурсосбережении, поставленного при организации автоматизированной системы управления комплексом ЧПСШ и ЧПЛК, для данного магистрального ленточного конвейера задачи энергосбережения не поднимались ни на технологическом уровне, ни на уровне электродвигателя. Таким образом, электродвигатели головного и промежуточного приводов работают с постоянной угловой скорость, отклонения которой обусловлены лишь изменением грузопотока, а также с неизменным заданием потокосцепления статора двигателя для системы прямого управления моментом.

Типичные переходные процессы, протекающие за период наблюдения, показаны на рис. 2.2 и рис. 2.3, где обозначено $\omega_{Г1}$, $\omega_{Г2}$, $\omega_{П1}$, $\omega_{П2}$ – угловые скорости первого и второго двигателей головного и промежуточного приводов конвейера соответственно.

Анализируя рис. 2.2 видна четкая корреляция между величиной электромагнитных моментов двигателей головного и промежуточного привода и грузопотоком, а также наличие расхождения по их уровню, что, в том числе, объясняет разницу среднего значения угловых скоростей $\omega_{Г1}$, $\omega_{Г2}$ и $\omega_{П1}$, $\omega_{П2}$, наблюдаемую на рис. 2.3, поскольку она вызвана смещением рабочей точки по естественной механической характеристике двигателя.

Отдельно следует отметить, что в течение всего анализируемого периода ввиду особенностей технологического процесса конвейер имел невысокий коэффициент загрузки.

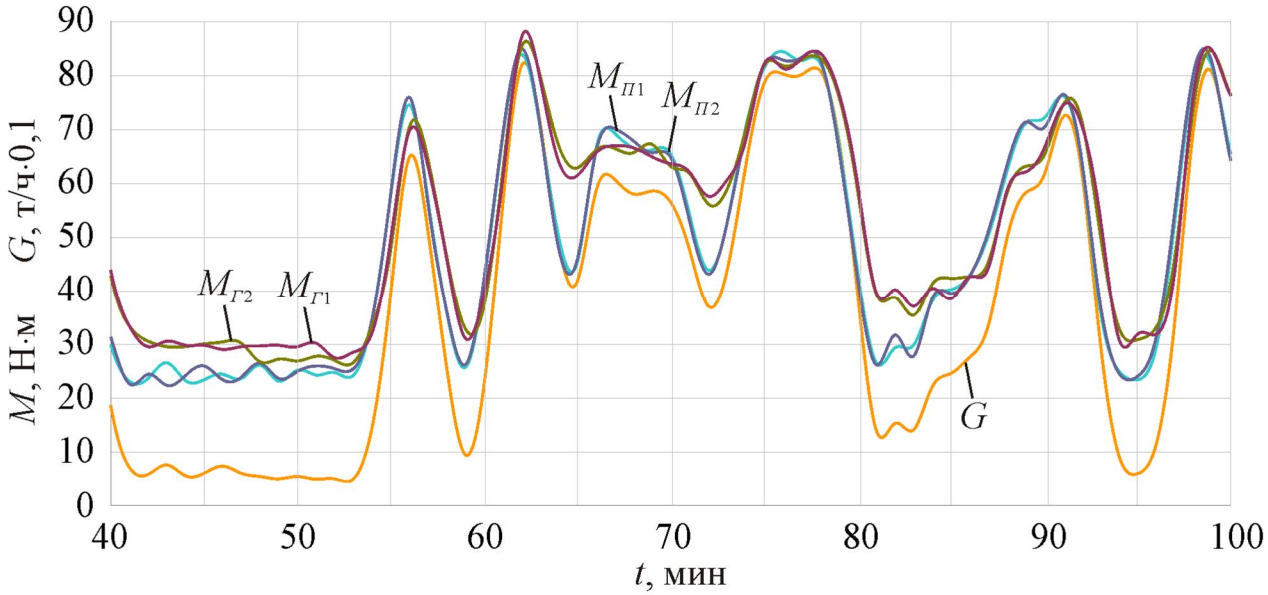


Рис. 2.2. Грузопоток и электромагнитные моменты двигателей головного и промежуточного привода

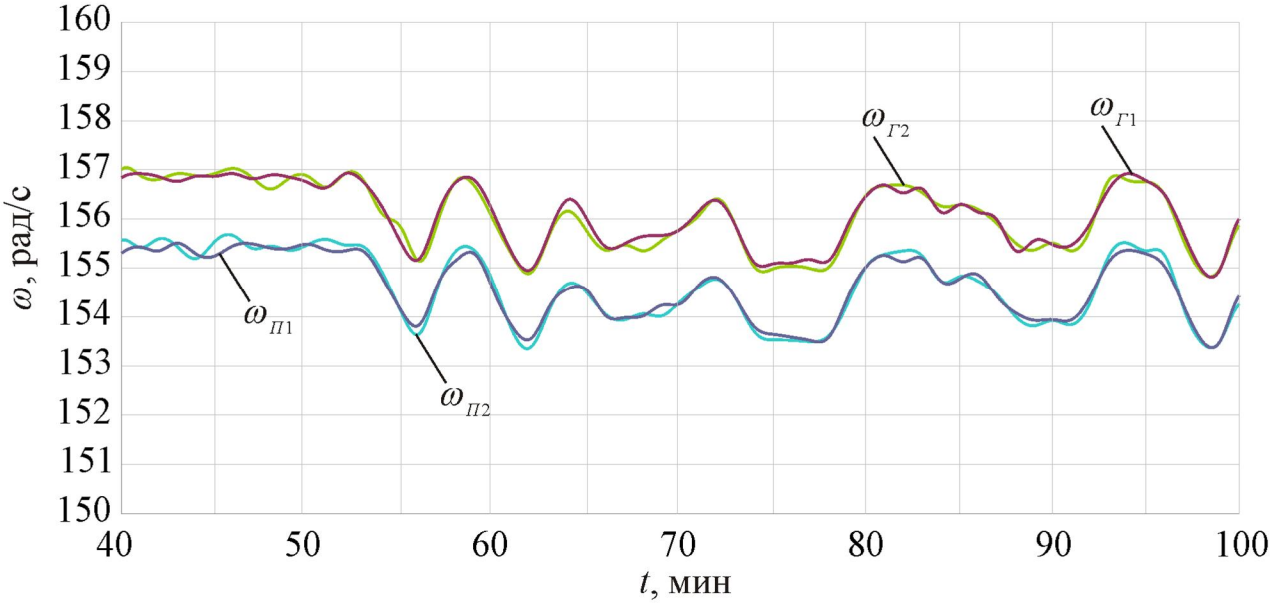


Рис. 2.3. Угловые скорости двигателей головного и промежуточного привода

По этой причине потребляемая мощность электродвигателей составила не более 30 % от номинальной и, как следствие, электроприводы имели существенно заниженный КПД.

Мощность потерь двигателей для интервала работы, показанного на рис. 2.2 и рис. 2.3, приведена на рис. 2.4, где обозначено $\Delta P_{Г1}$, $\Delta P_{Г2}$, $\Delta P_{П1}$, $\Delta P_{П2}$ – мощность потерь первого и второго двигателей головного и промежуточного приводов конвейера соответственно. Как можно видеть, мощность потерь для каждого из двигателей лежит в диапазоне от 5 до 40 кВт, при условии, что номинальное значение мощности потерь каждого электропривода составляет порядка 25 кВт на один двигатель, а коэффициент загрузки в пределах данного временного интервала не превышает 15 %. В среднем за весь период наблюдения потери составили от 15 до 60

кВт на двигатель за смену, что сопоставимо или превышает потери ЭП при номинальном режиме эксплуатации.

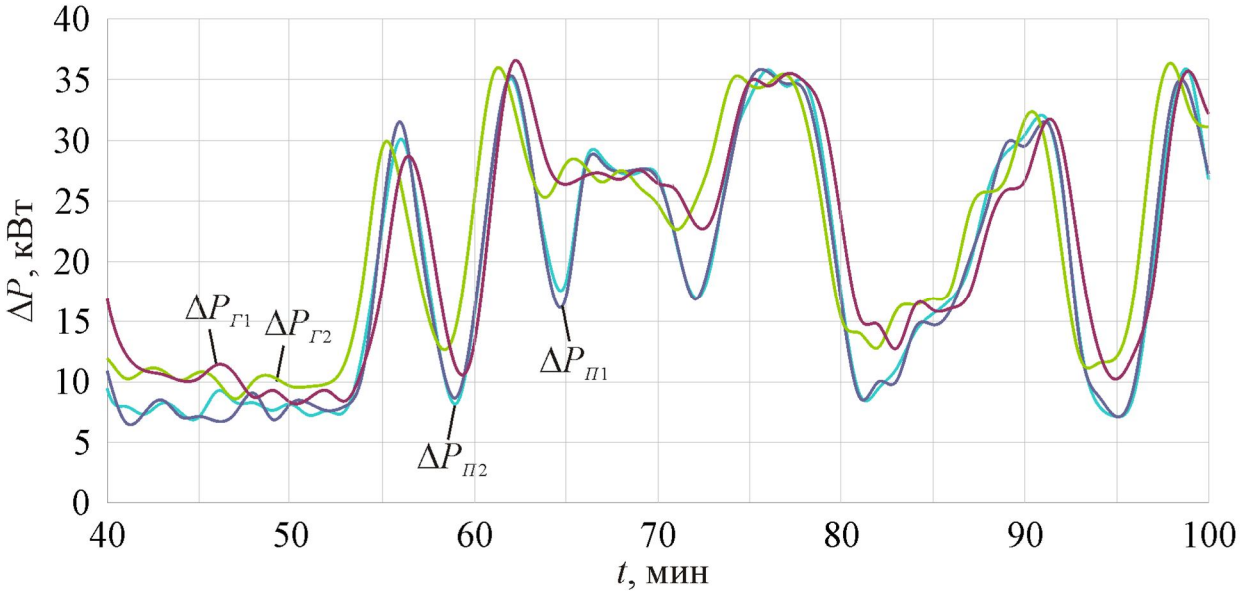


Рис. 2.4. Мощность потерь двигателей головного и промежуточного привода

Таким образом, поскольку оборудование проектируется на определенную мощность тепловыделения, эксплуатация электроприводов магистрального ленточного конвейера в таком режиме сопровождается перегревом, что в итоге сокращает срок их работы.

Эффективным выходом из данной ситуации, учитывая, что регулирование электродвигателей с целью изменения скорости движения ленты не заложено в функционал автоматизированной системы управления ленточным конвейером, является одновременное регулирование электромагнитного момента и амплитуды вектора потокосцепления статора двигателя, что технически реализуемо в преобразователях частоты ACS800 и доступно предприятию – изготовителю устройств ЧПСШ и ЧПЛК не вмешиваясь в технологический режим работы конвейера.

Для определения соотношения между электромагнитным моментом и амплитудой вектора потокосцепления, обеспечивающим минимизацию суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали, использовалась методика, предложенная в п. 1, для реализации которой проведен ряд вычислительных экспериментов с использованием специально разработанного среде Delphi программного средства.

В первой серии экспериментов устанавливалась адекватность использования математической модели суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали, предложенная в п. 1. Для выполнения этой задачи в качестве представительного объекта рассматривался первый двигатель головного привода магистрального ленточного конвейера, для которого на основании данных, приведенных в паспортной табличке, в соответствии с методикой [14] определены параметры схемы замещения, использованные при моделировании. Указанные параметры приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры двигателя головного привода

R_1, Ом	R_2, Ом	L_{12}, Гн	$L_{1\sigma}$, мГн	$L_{2\sigma}$, мГн	p	J, кг/м^2
0,1217	0,1213	0,1126	1,0225	1,0225	2	7,6

Поскольку информация о параметрах магнитной системы данного двигателя, необходимых для расчета модели магнитных потерь, отсутствовала, количественное значение параметров модели определялось экспериментально по опыту холостого хода в неуправляемом режиме работы двигателя, опираясь на расчетное значение ΔP_c=5,0773 кВт, полученное в ходе вычисления параметров двигателя. При этом показатель степени, зависящий от марки стали, основываясь на [15], принят β=1,3 как среднее значение возможного диапазона данной величины, а коэффициенты потерь в стали $k_{c1}=k_{c2}= 0{,}9613\cdot10^{-3}$ определены по результатам моделирования.

Для проверки адекватности модели с учетом полученных параметров, программное средство было сконфигурировано следующим образом. Для обеспечения идентичности энергетического режима двигатель должен работать с теми же значениями угловой скорости и электромагнитного момента, что и двигатель электропривода конвейера. Исходя из этого, в качестве основы использовалась модель асинхронного электропривода с прямым управлением моментом замкнутая обратной связью по скорости, идентичная описанной ранее, в которой в качестве ω^* вводились значения угловой скорости, снятые при наблюдении за работой конвейера, а в качестве M_c, аналогичным образом задавался электромагнитный момент двигателя. При этом очевидно, что данная модель не отражает особенности механической подсистемы электроприводов ленточного конвейера и не может адекватно описывать его работу в рамках полного технологического цикла, используясь автономно, однако она позволяет решить поставленную задачу оценки энергетического режима работы каждого из двигателей его приводов.

Суммарная мощность электрических и магнитных потерь $\Delta P_c+\Delta P_э$, полученная в результате моделирования, сравнивалась с мощностью потерь $\Delta P_{Г1}$ первого двигателя головного привода конвейера, полученной в ходе наблюдения. Так, на рис. 2.5 приведены результаты наложения данных величин для режима работы, в котором средняя потребляемая мощность составила порядка 15 % от номинальной, а грузопоток изменяется случайным образом относительно среднего значения 1050 т/ч (малая загрузка), а на рис. 2.6 – для режима работы, в котором средняя потребляемая мощность составила порядка 5 % от номинальной, а грузопоток снижается с 300 т/ч до 20 т/ч (порожняя работа).

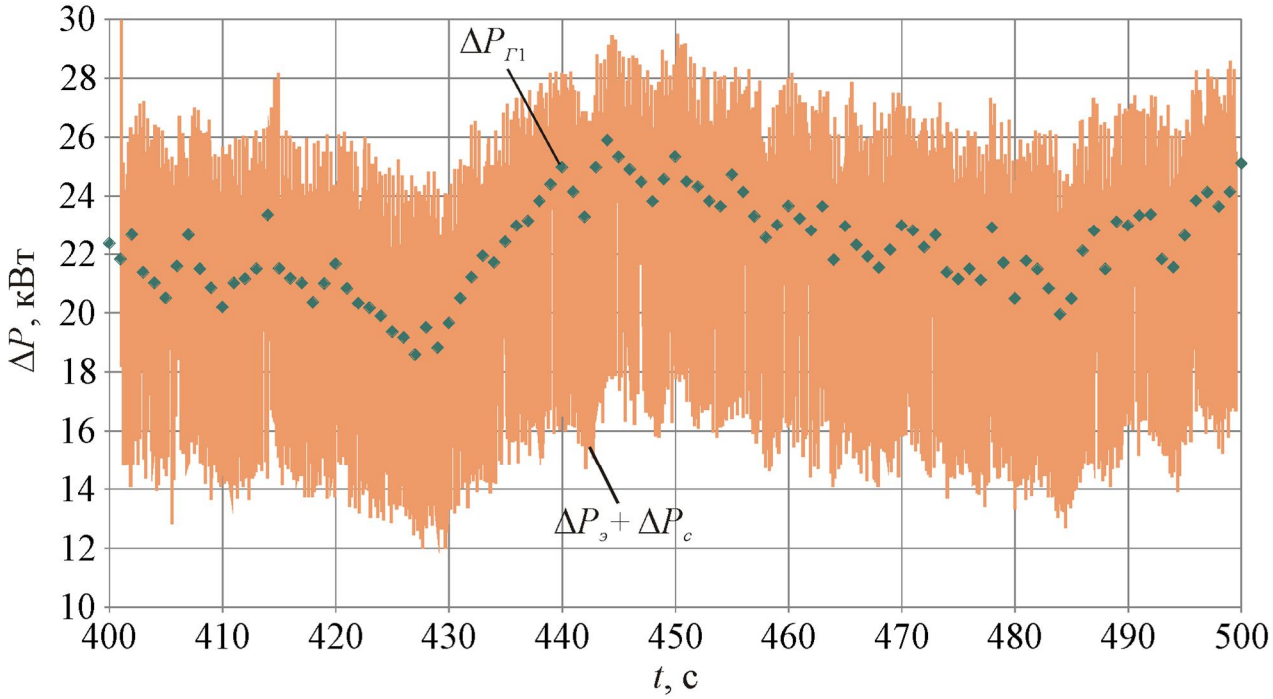


Рис. 2.5. Мощность потерь в режиме малой загрузки

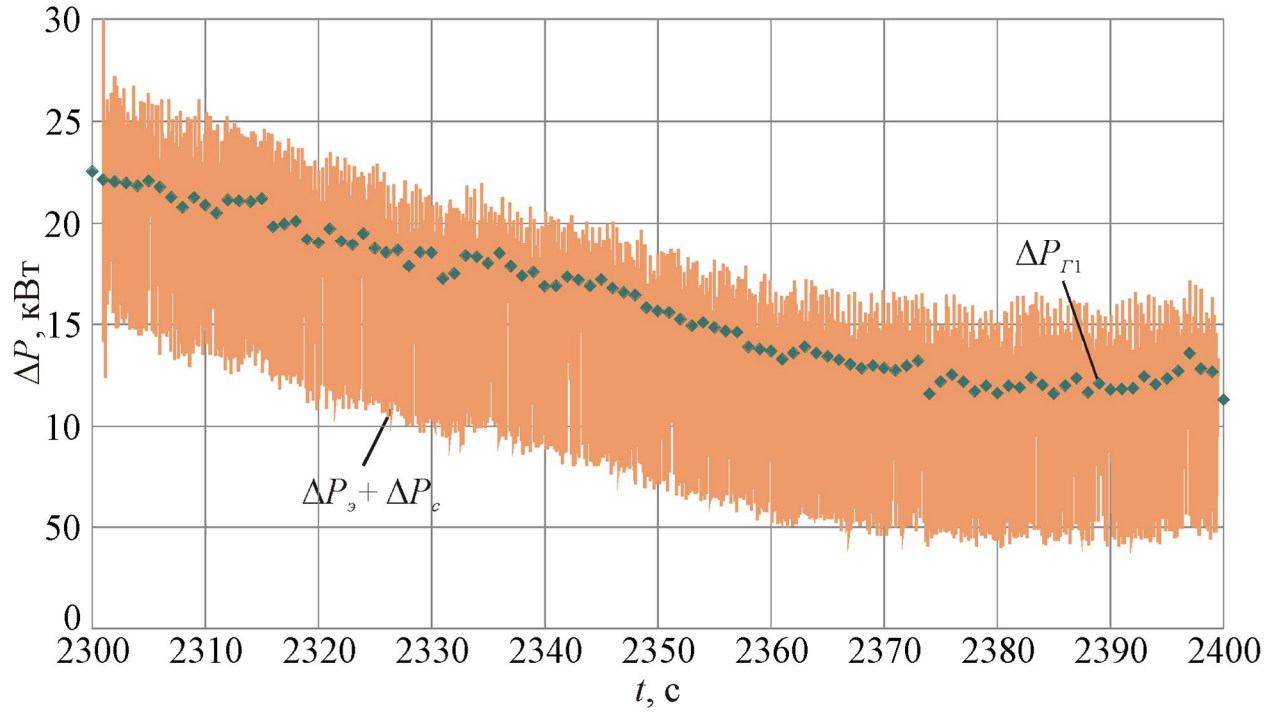


Рис. 2.6. Мощность потерь в режиме порожней работы

Приведенные результаты моделирования содержат высокочастотную составляющую, обусловленную коммутационными процессами силовых полупроводниковых ключей управляющего преобразователя, возникающими при реализации прямого управления моментом, наличие которой согласуется с результатами полученными ранее. Следует отметить, что отсутствие подобной высокочастотной составляющей в результатах, снятых для двигателя при его эксплуатации, обусловлено тем, что сравниваемые данные получены на основании информации преобразователя частоты ACS800, которые подвергаются выходной фильтрации.

При этом графики на рис. 2.5 и рис. 2.6 демонстрируют высокую степень сходимости данных и полученных экспериментально и в результате моделирования.

Средневзвешенное расхождение результатов, определяемое как среднее между максимальным и минимальным их отклонением, рассчитанное за рассматриваемый период длительностью 100 с, не превышает 0,85 кВт, что составляет 0,21 % от номинальной мощности двигателя. Таким образом, можно утверждать, что полученные результаты моделирования обеспечивают адекватность вычислительных экспериментов с позиции энергетического состояния асинхронного двигателя.

Следующая серия вычислительных экспериментов проводилась с целью количественной оценки эффекта энергосбережения, который может быть получен от внедрения методики минимизации суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали, предложенной в п. 1.

Предварительно для данной системы электропривода численными методами было получено семейство зависимостей задания амплитуды вектора потокосцепления статора от угловой скорости и электромагнитного момента двигателя, минимизирующее суммарную мощность указанных потерь. Учитывая, что угловая скорость двигателя в рассматриваемых режимах работы близка к угловой скорости холостого хода, при моделировании непосредственно использовалась только одна характеристика данного семейства, соответствующая угловой скорости 160 рад/с и диапазону изменения электромагнитного момента двигателя от 10 Нм до 120 Нм.

Следующим этапом были проведены вычислительные эксперименты при идентичных внешних условиях, что и показанные на рис. 2.5 и рис. 2.6, но в одном случае соответствующие постоянному заданию потокосцепления статора двигателя, а в другом – заданию потокосцепления, изменяющемуся в соответствии с электромагнитным моментом двигателя. При этом для упрощения сравнительного анализа на выбранном временном интервале, с учетом, что время дискретизации входных экспериментальных данных составляет 1 с, результаты моделирования представлены после наложения линейного фильтра, отсекающего гармонические составляющие с частотой выше 0,2 Гц.

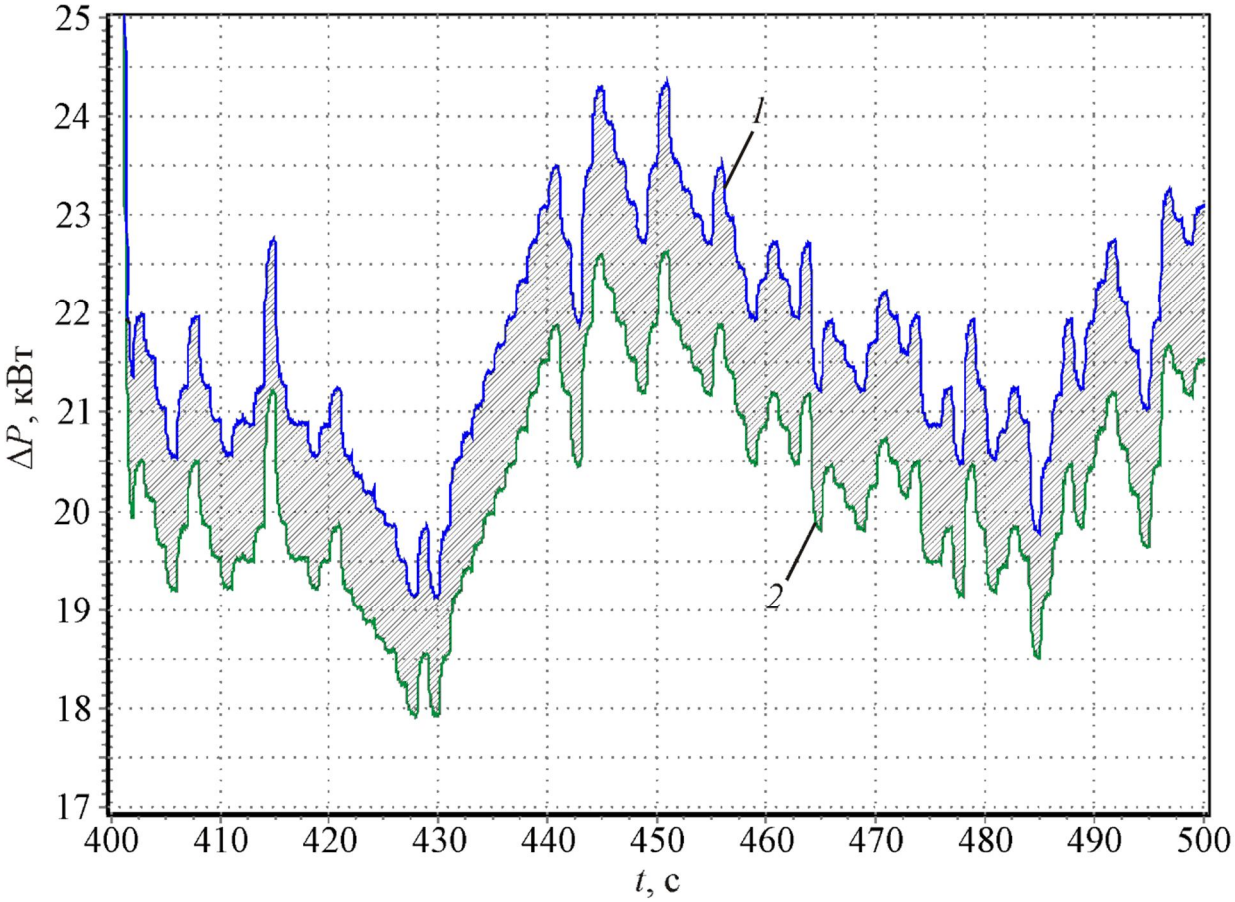


Рис. 2.7. Мощность потерь в режиме малой загрузки

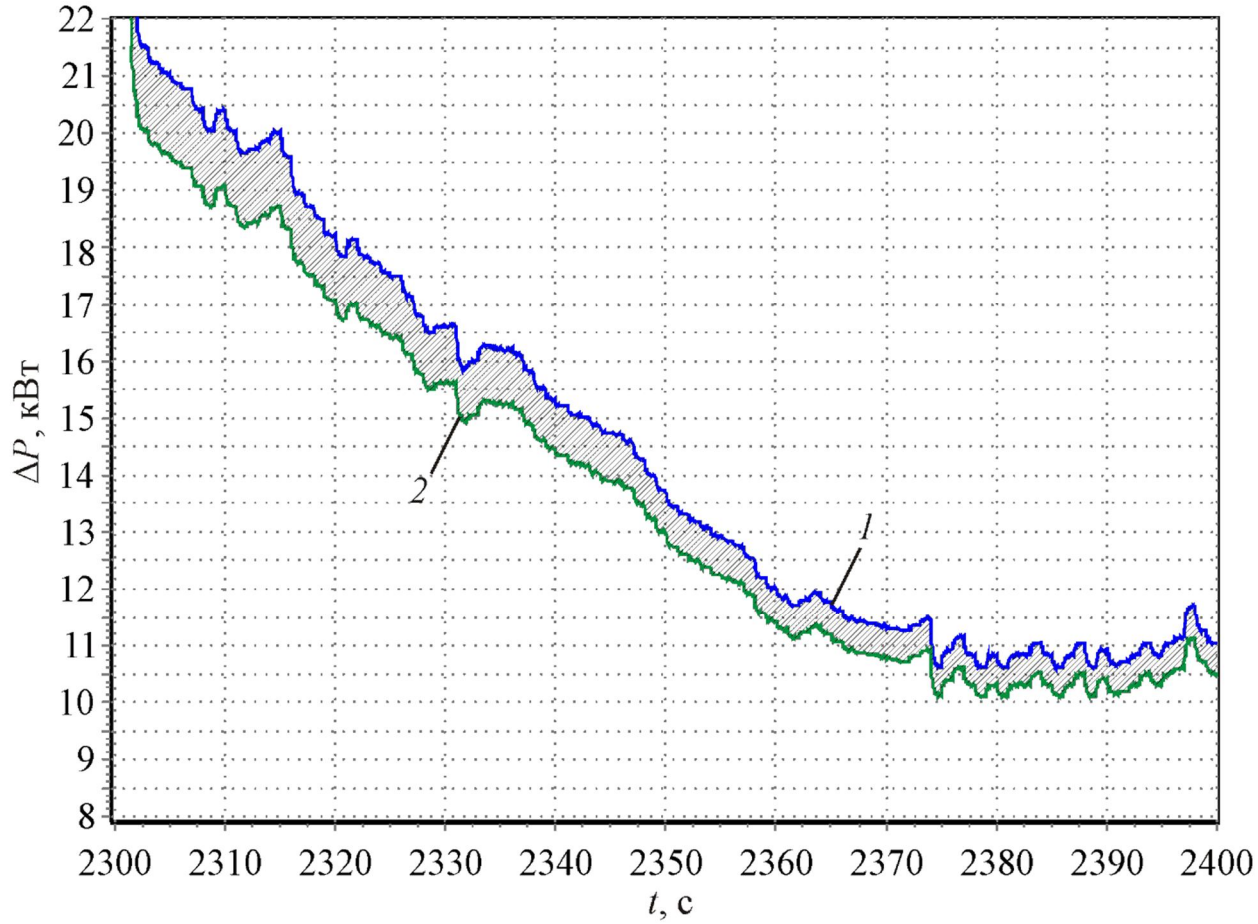


Рис. 2.8. Мощность потерь в режиме порожней работы

Совмещенные графики для обоих случаев, как для режима малой загрузки, так и для режима порожней работы показаны на рис. 2.7 и 2.8 соответственно, где обозначено 1 – постоянное задание потокосцепления статора двигателя, 2 – задание потокосцепления зависит от электромагнитного момента. Заштрихованная область между графиками показывает эффект энергосбережения, полученный от зависимого регулирования потокосцепления статора. При этом следует отметить, что в режиме порожней нагрузки полученный эффект от энергосбережения оказался ниже, что объясняется высокой долей потерь в стали, мощность которых содержит постоянную составляющую, зависящую от среднего значения частоты коммутации полупроводниковых ключей управляющего преобразователя. Также следует уточнить, что при проведении дополнительных вычислительных экспериментов установлено, что эффект энергосбережения, снижается по мере повышения нагрузки двигателя, что вызвано влиянием насыщения магнитопровода двигателя и ограничением величины прикладываемого напряжения. Тем не менее, количественная оценка показывает, что средний эффект энергосбережения составляет от 0,7 кВт в режиме порожней работы до 6,8 кВт при потребляемой мощности порядка 70 % от ее номинального значения. Таким образом эффект энергосбережения по всем двигателям головного и промежуточного приводов магистрального ленточного конвейера только от внедрения предложенных мероприятий по регулированию потокосцепления статора составляет порядка 180 000 кВт·ч в год, что с учетом средней рыночной цены на электроэнергию составляет приблизительно 0,35..0,41 миллиона рублей в год при отсутствии необходимости в капитальных затратах.

3 Разработка рекомендаций по возможности использования результатов при создании научно-образовательных курсов

Исследования, проводимые в ходе НИР, могут быть использованы в процессе обучения студентов по специальности « Электропривод и автоматика» по следующим направлениям «Автоматизированный электропривод», «Системы управления электроприводов», «Теория электропривода» рабочие программы которых с учетом использованных результатов работы НИР приведены ниже

3.1 Рабочая программа по дисциплине «Автоматизированный электропривод»

1. Цели освоения дисциплины.

Учебная дисциплина «Автоматизированный электропривод» (АЭП) относится к специальным дисциплинам. Она имеет существенную практическую направленность, поскольку ее предметом является изучение типовых производственных механизмов: их конструкции, технологии и систем электрооборудования.

Дисциплина АЭП имеет целью:

1. Детальное изучение схем электроприводов основных производственных машин и механизмов. При этом у студента должно появиться представление о конструкции и технологии работы различного оборудования промышленных предприятий и сформироваться понимание взаимосвязи между принципиальной схемой электропривода, структурной схемой системы управления и математической моделью, характеризующей процесс функционирования автоматизированного электропривода.
2. Формирование инженерного подхода к проблеме разработки автоматизированных электроприводов технологических машин и комплексов и изучение порядка проектирования автоматизированных электроприводов.

2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Данная дисциплина относится к специальному циклу дисциплин, для освоения которой студенты должны:

- знать структуру электропривода, взаимосвязь элементов электропривода (дисциплина «Электрический привод»);
- знать основные способы управления электроприводами (дисциплина «Системы управления электроприводов»);
- динамические свойства электромеханических преобразователей энергии (дисциплина «Теория электропривода»);
- динамические свойства механической части электропривода (дисциплина «Теория электропривода»);
- правила выполнения схем и чертежей по ГОСТ ЕСКД (дисциплина «Начертательная геометрия»);
- основы регулирования сложных технических систем (дисциплина «Теория автоматического управления»);
- методы моделирования сложных электромеханических систем (дисциплина «Моделирование электромеханических систем»);
- основные узлы электрических схем устройств управления (дисциплины «Физические основы электроники» и «Микропроцессорная техника»).

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Освоение дисциплины направлено на формирование у обучающихся следующей общекультурной компетенции: готовности к самостоятельной, индивидуальной работе, принятию решений в рамках своей профессиональной компетенции (ОК-7).

Кроме того, в ходе изучения данной дисциплины, обучающийся приобретает следующие профессиональные компетенции:

- способность формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде отчета с его публикацией (публичной защитой) (ПК-7);
- готовность участвовать в работе над проектами электроэнергетических и электротехнических систем и отдельных их компонентов (ПК-8);
- готовность обосновать принятие конкретного технического решения при создании электроэнергетического и электротехнического оборудования (ПК-14);
- готовность определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса по заданной методике (ПК-23);
- способность анализировать технологический процесс как объект управления (ПК-28);
- готовность участвовать в исследовании объектов и систем электроэнергетики и электротехники (ПК-38);
- готовность планировать экспериментальные исследования (ПК-40);
- способность к монтажу, регулировке, испытаниям и сдаче в эксплуатацию электроэнергетического и электротехнического оборудования (ПК-46);
- готовность к приемке и освоению вводимого оборудования (ПК-49).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать

ОК-7: последовательность разработки, проектирования и сдачи объекта, относящегося к автоматизированному электроприводу.

ПК-7: требования государственных стандартов в области автоматизированного электропривода.

ПК-8: меры безопасности при работе с электрическим оборудованием.

ПК-14: достоинства и недостатки различных датчиков, устройств регулирования и систем управления.

ПК-23: критерии оптимальности систем автоматизированного электропривода.

ПК-28: модели типовых производственных механизмов и машин.

ПК-38: влияние типовых производственных факторов на качество экспериментальных исследований.

ПК-40: типовую последовательность исследовательских производственных мероприятий.

ПК-46: графические и текстовые обозначения элементов типовых схем систем автоматизированного электропривода.

ПК-49: номенклатуру современного типового оборудования для систем автоматизированного электропривода.

Уметь

ОК-7: самостоятельно проектировать и монтировать узлы и систему автоматизированного электропривода в целом.

ПК-7: применять средства графического и текстового редактирования для составления отчетов, проектов, схем, поясняющих принцип работы проектируемого автоматизированного электропривода.

ПК-8: проектировать и монтировать узлы и электротехнические системы в целом.

ПК-14: обосновывать целесообразность применения определенных деталей, узлов и систем управления в проектируемом автоматизируемом электроприводе.

ПК-23: определять эффективные режимы работы автоматизированного электропривода.

ПК-28: составлять расчетные схемы и схемы замещения автоматизированных электроприводов.

ПК-38: проводить экспериментальные исследования объектов электроэнергетики.

ПК-40: планировать экспериментальные исследования объектов электроэнергетики.

ПК-46: монтировать и налаживать автоматизированные электроприводы.

ПК-49: работать с документацией на вводимое оборудование.

Владеть

ОК-7: навыками руководства проектированием и вводом в эксплуатацию объектов электроэнергетики.

ПК-7: навыками составления отчетов, проектов и схем на проектируемый автоматизированный электропривод.

ПК-8: навыками работы со слаботочным и силовым электрооборудованием.

ПК-14: навыками обоснования наиболее оптимальных решений.

ПК-23: навыками оценки эффективности электрооборудования.

ПК-28: навыками расчета узлов автоматизированного электропривода, режимов работы и переходных режимов.

ПК-38: навыками исследования объектов электроэнергетики.

ПК-40: навыками планирования экспериментальных исследований.

ПК-46: навыками чтения принципиальных электрических и монтажных схем.

ПК-49: навыками приемки вводимого автоматизированного электропривода.

3.1. Матрица соотнесения тем/разделов учебной дисциплины и формируемых в них профессиональных и общекультурных компетенций

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Общ. кол-во комп.
Раздел 1: Введение	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 1.1:	1	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 1.2:	1	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Раздел 2: Электропривод подъемных кранов	4	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 2.1:	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 2.2:	2					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 3: Электропривод экскаваторов	4	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 3.1.	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 3.2.	2					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 4: Электропривод лифтов и шахтных	4	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10

подъемных машин												
Тема 4.1.	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 4.2.	2					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 5: Электропривод транспортных машин	4	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 5.1.	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 5.2.	2					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 6: Электропривод турбомеханизмов	5	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 6.1.	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 6.2.	3					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 7: Электропривод металлорежущих станков	5	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 7.1:	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 7.2:	3					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Раздел 8: Электропривод металлургического производства	5	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14	ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	10
Тема 8.1:	2	ОК-7	ПК-7	ПК-8	ПК-14							4
Тема 8.2:	3					ПК-23	ПК-28	ПК-38	ПК-40	ПК-46	ПК-49	6
Итого	33											

4. Структура и содержание дисциплины «Автоматизированный электропривод»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц (1 ЗЕ на экзамен), 216 часов.

4.1. Лекционные занятия

Нед. сем.	Раздел дисциплины, темы лекций и их содержание	Объем в часах
1	Раздел 1: Введение Тема 1.1: Основные задачи курса. Автоматизированный электропривод как основа механизации и комплексной автоматизации. Этапы проектирования автоматизированных электроприводов: от знакомства с механической частью оборудования до вопросов автоматизации. Понятие рабочей машины и механизма. Классификационные признаки. Тема 1.2: Понятийный аппарат, используемый в автоматизированном электроприводе, термины и определения.	2

	Основные структуры электроприводов, используемых в промышленности. Проблемы разработки автоматизированных электроприводов.	
1, 2	Раздел 2: Электропривод подъемных кранов Тема 2.1. Характеристика подъемных механизмов. Особенности работы мостовых кранов. Классификация кранов по конструкции: мостовые, портальные, башенные, козловые; по назначению: универсальные, специализированные. Режимы работы кранов по продолжительности включения и числу включений в час: легкий, средний, тяжелый, весьма тяжелый. Конструкция мостового крана. Виды приводов, установленные на мостовом кране: приводы горизонтального перемещения тележки и моста и привод вертикального перемещения (привод подъема). Требования, предъявляемые к электроприводу мостовых кранов. Виды спуска в грузоподъемных установках: силовой и тормозной. Основные защиты и блокировки, предусматриваемые в электроприводах подъемных механизмов. Нагрузочные диаграммы электроприводов типовых подъемных механизмов. Основные виды схем автоматизированных электроприводов подъемных механизмов. Расчет мощности и выбор двигателя по нагрузочной диаграмме. Тема 2.2. Современные средства организации автоматизированных электроприводов подъемных механизмов. Структурные схемы подъемных механизмов с применением управляемых электрических преобразователей и промышленных логических контроллеров. Построение нагрузочных диаграмм привода подъема и привода передвижения моста или тележки крана. Особенности краново-металлургических двигателей постоянного и переменного тока. Разновидности систем управления, используемых в крановых механизмах. Использование несимметричного включения асинхронного двигателя (не симметрия в цепи статора и в цепи ротора). Схема управления крановыми механизмами с двигателями постоянного тока.	4
2, 3	Раздел 3: Электропривод экскаваторов Тема 3.1. Назначение выемочно-погрузочных машин. Классификация экскаваторов. Классификация экскаваторов на машины периодического действия (одноковшовые экскаваторы) и непрерывного действия (многоковшовые экскаваторы). Конструкция одноковшовых экскаваторов с различными способами сочленения ковша: с жестким сочленением и гибким (драглайны, грейфер, лопата). Характеристика механизмов экскаваторов. Основные защиты	4

	и блокировки, используемые в электроприводах экскаваторов. Нагрузочные диаграммы. Тема 3.2. Современные средства организации электроприводов экскаваторов. Типовые структурные схемы современных автоматизированных электроприводов. Конструкции многоковшовых экскаваторов по способу копания: верхнего, нижнего, верхнего и нижнего копания. Характеристика условий работы экскаваторов. Требования, предъявляемые к главным приводам экскаватора. Характеристика работы главных приводов: напора, подъема поворота и хода. Режимы работы электрических приводов. Расчет мощности и выбор двигателей главных приводов одноковшового экскаватора. Экскаваторные электрические машины (двигатели и генераторы постоянного тока, синхронные двигатели). Экскаваторная механическая характеристика. Получение экскаваторной механической характеристики в различных схемах. Получение экскаваторной механической характеристики в системе Г-Д с электромашинным усилителем. Получение экскаваторной механической характеристики в системе Г-Д с силовым магнитным усилителем. Получение экскаваторной механической характеристики в системе с тиристорным возбуждением генератора. Влияние упругих связей и зазоров в элементах кинематической цепи экскаватора на показатели работы электропривода. Устройства выбора зазоров.	
3, 4	Раздел 4: Электропривод лифтов и шахтных подъемных машин Тема 4.1. Электропривод лифтов. Основные защиты и блокировки. Типовые структурные схемы автоматизированных электроприводов лифтов. Тема 4.2. Электропривод шахтных подъемных машин. Основные защиты и блокировки. Нагрузочные диаграммы. Современные средства организации автоматизированных электроприводов лифтов и шахтных подъемных машин. Классификация лифтов по назначению (пассажирские, грузопассажирские с проводником и без проводника, больничные, малые грузовые) и скорости: тихоходные, быстроходные, скоростные, высокоскоростные. Требования к электроприводу лифта. Особенности и конструкции многоскоростных асинхронных двигателей для лифтов. Аппаратура управления лифтами: кнопки управления, этажные переключатели, дверные контакты, контакты ловителей и т.д. Принцип действия клещевых ловителей. Разновидности шахтных подъемных машин: скиповые,	4

	клетьевые; грузовые, людские и грузолюдские. Требования к электроприводу шахтных подъемных машин. Расчет кинематики подъемных установок. Расчет статических нагрузок подъемной машины. Определение количества двигателей. Двигатели, используемые в подъемных машин. Способы размещения электрооборудования подъемных машин. Системы электропривода подъемных машин. Схема подъемной машины с асинхронным двигателем. Обеспечение реверса в схемах подъемных машин постоянного тока. Схема с реверсом поля двигателя постоянного тока. Точная остановка лифтов и шахтных подъемных машин. Способы повышения точности останова.	
4, 5	Раздел 5: Электропривод транспортных машин Тема 5.1. Применение защит и блокировок в электроприводах транспортных машин. Нагрузочные диаграммы. Особенности работы протяженных скребковых и ленточных конвейеров. Обеспечение благоприятных условий работы транспортных машин. Тема 5.2. Типовые структурные схемы автоматизированных электроприводов транспортных машин. Современные средства автоматизированного электропривода транспортных машин. Классификация конвейер: ленточные, скребковые, пластинчатые, цепные, вибрационные. Рольганги – устройства для перемещения горячих заготовок. Групповой и индивидуальный привод рольгангов. Требования, предъявляемые к электроприводу конвейеров. Расчет статической мощности ленточного конвейера. Выбор количества двигателей и определение места их расположения. Разновидности систем электропривода, используемые для привода машин непрерывного транспорта. Схема многодвигательного конвейера с асинхронными двигателями. Режим двойного питания в асинхронном двигателе. Датчики и устройства автоматики машин непрерывного транспорта: датчики заштыбовки, схода и натяжения ленты, контроля скорости, контроля наличия и целостности цепи, датчики температуры и т.д. Принципы построения разветвленных транспортных систем. Алгоритмизация управления поточно-транспортными системами. Тема 5.3. Энергоэффектиное управление электроприводом ЧПЛК сравнение характеристик электропривода ЧПЛК с градиентным управлением и векторным управлением приводами.	4
5, 6, 7	Раздел 6: Электропривод турбомеханизмов Тема 6.1. Электропривод общепромышленных вентиляторов. Электропривод вентиляторов главного проветривания вырабо-	5

	ток шахт. Нагрузочные диаграммы. Типовые схемы и защиты электроприводов вентиляторов. Основные принципы регулирования и организации системы управления электроприводами вентиляторов. Тема 6.2. Электроприводы насосных станций. Нагрузочные диаграммы. Характеристики сети и насосов. Защиты и блокировки электроприводов насосных станций. Вспомогательные приводы насосных станций. Современные средства организации автоматизированных электроприводов насосных станций. Классификация турбомеханизмов по назначению: насосы, вентиляторы, компрессоры, нагнетатели, воздуходувки; по конструкции: лопастные (центробежные, вихревые, лопастные), вытеснения (поршневые, ротационные), струйные. Механическая и напорная характеристики турбомеханизмов. Связь между моментом, мощностью и скоростью в турбомеханизмах. Характеристика сети. Определение рабочей точки по напорным характеристикам сети и турбомеханизма. Особенности работы центробежных насосов. Определение мощности центробежного насоса. Методы регулирования производительности центробежных насосов – дросселированием, регулированием скорости и приводного двигателя. Необходимость и способы заливки центробежных насосов: заглубление, погружение, сифонный способ, от бакового аккумулятора, из нагнетательного трубопровода, заливка бустерным насосом. Автоматизация работы насосной установки. Технологические датчики систем автоматики, используемые в насосных установках. Работа двух насосов на одну общую сеть. Особенности работы центробежных и осевых вентиляторов. Регулирование производительности в них. Напорные характеристики. Датчики вентиляционных установок. Особенности работы компрессоров. Расчет мощности компрессора изотермической и адиабатической работы сжатия. Причины явления помпажа и методы борьбы с ним. Пуск компрессора при помощи гидравлической муфты. Автоматизация управлением электроприводам компрессорной установки.	
7, 8	Раздел 7: Электропривод металлорежущих станков Тема 7.1. Электропривод станков с ЧПУ. Способы организации следящих электроприводов. Организация программной системы управления автоматизированного электропривода. Защиты и блокировки, используемые в электроприводах металлорежущих станков. Нагрузочные диаграммы. Тема 7.2. Современные средства организации автоматизированных электроприводов металлообрабатывающих станков. Классификация металлорежущих станков в зависимости от выполняемых операций. Основные и вспомогательные дви-	5

	жения в станках. Характеристика основных видов обработки на металлорежущих станках: точение, строгание, сверление, фрезерование, шлифование. Режимы работы электроприводов в металлорежущих станках. Энергетика электропривода станков. Построение нагрузочной диаграммы для токарного станка. Построение нагрузочной диаграммы для продольно-строгального станка. Конструктивные особенности двигателей для главных приводов станков – постоянного и переменного тока. Электрошпиндели. Двигатели для приводов подач металлорежущих станков: высокомоментные, малоинерционные с печатной обмоткой. Определение оптимального передаточного числа. Требования, предъявляемые к главному электроприводу и приводу подачи станков токарной группы, продольно-строгальных станков, сверлильных, фрезерных и шлифовальных станков. Классификация способов регулирования скорости в металлорежущих станках: механическое ступенчатое, электромеханическое ступенчатое и электрическое бесступенчатое регулирование. Комплектный тиристорный привод переменного тока для привода подачи на базе непосредственного преобразователя частоты. Комплектные транзисторные приводы переменного тока для механизмов подачи.	

9, 10, 11	Раздел 8: Электропривод металлургического производства Тема 8.1. Электропривод прокатного стана. Нагрузочные диаграммы. Способы улучшения условий работы механизмов металлургического производства. Снижение динамических нагрузок электроприводов. Тема 8.2. Современные средства организации автоматизированных электроприводов металлургического производства. Электропривод и автоматизация доменного производства. Технологический процесс. Общие сведения. Механизмы системы загрузки доменной печи. Последовательность работы механизмов загрузки доменной печи. Электроприводы: вагонвесов, коксозагрузочного устройства, скипового подъемника, вращающегося распределителя, малого и большого конусов, зондовой лебедки, уравнительных клапанов. Электропривод и автоматизация сталеплавильного производства. Электропривод конверторов. Электропривод дуговой печи. Электропривод и автоматизация прокатного производства. Теория прокатки. Конструкции станов и их классификация. Электропривод станов горячей и холодной прокатки. Требования к электроприводу. Расчет мощности главного привода	5

	стана холодной прокатки. Принцип построения схем автоматизированного электропривода прокатных станов.	
Итого		33

4.2. Лабораторные занятия

Неделя семестра	№ раздела	Наименование работы	Объем в часах
1-3	2	1. Изучение работы мостового крана с приводом переменного тока по системе ПЧ-АД с управлением от программируемого логического контроллера	16
4-5	3, 4	2. Изучение схем управления электроприводами экскаваторов по системе Г-Д с тиристорным управлением	14
6-7	5	3. Изучение схем управления электроприводами большегрузных автосамосвалов	14
8-9	2	4. Исследование статических и динамических характеристик автоматизированного электропривода постоянного тока по системе ТП-Д	14
10-11	6	5. Изучение схемы управления электроприводами моталок и разматывателей непрерывных станов холодной прокатки	8
Итого			66

4.3. Самостоятельная работа студента

Раздел дисциплины	№ недели	Вид СРС	Трудоемкость, ЗЕ
Раздел 1	1	Конспект по теме классификация электроприводов (Дз).	0.22
Раздел 2	2	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод подъемных кранов», а также подготовка к лабораторной работе №1 (Дз). Подготовка отчета по лабораторной работе №1 (Лзп).	0.22 0.2
Раздел 3	3	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод экскаваторов», а также подготовка к лабораторной работе №2 (Дз). Подготовка отчета по лабораторной работе №2 (Лзп).	0.22 0.21
Раздел 4	4	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод экскаваторов». Изучение основных схем экскаваторных электроприводов, их достоинств и недостатков (Дз).	0.22
Раздел 5	5	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод транспортных машин», а также подготовка к лабораторной работе №3 (Дз). Подготовка отчета по лабораторной работе №3 (Лзп).	0.22 0.2

Раздел 6	6, 7	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод турбомеханизмов» (Дз). Изучение схем регулирования давления и расхода в трубопроводе средствами автоматизированного электропривода (Дз).	0.22 0.22
Раздел 7	8, 9	Конспект по теме «Автоматизированный электропривод металлорежущих станков», а также подготовка к лабораторной работе № 4 (Дз). Подготовка отчета по лабораторной работе №4 (Лзп). Конспект по теме «Автоматизированный электропривод металлургических производств», а также подготовка к лабораторной работе №5 (Дз).	0.21 0.27 0.27
Раздел 8	10	Подготовка отчета по лабораторной работе №5 (Лзп).	0.4
		Итого:	3.25

4.4. Распределение трудоемкости изучения дисциплин по видам учебной аудиторной и самостоятельной работы студента (Трудоемкость освоения дисциплины - 6 ЗЕ + 1 ЗЕ на экзамен)

Недели семестра	Виды учебной работы					
	аудиторная (2.75 ЗЕ)				самостоятельная (3.25 ЗЕ)	
	Лк		Лз		Дз	Лз
	Посещ.	ТК	Посещ.	ТК	Выполн.	Выполн.
1					Дз	
2		Кол		От	Дз	Лзп
3		Кол		От	Дз	Лзп
4		К		От	Дз	
Текущий контроль		0.3		0.61	0.88	0.41
5		Кол		От	Дз	Лзп
6		Кол		От	Дз	
7		Кол		От	Дз	
8		К		От	Дз	Лзп
Текущий контроль		0.3		0.61	0.88	0.41
9		Кол		От	Дз	
10		Кол		От		Лзп
11		К		От		
Текущий кон-		0.317		0.613	0.27	0.4

троль						
Итого		0.917		1.833	2.03	1.22
12						
Промежуточный контроль		Экз.				

Обозначения: Кол – коллоквиум (устный опрос); К – контрольная; От – сдача отчета по лабораторной работе; Лзп – подготовка отчета по лабораторной работе; Дз – домашнее задание.

5. Образовательные технологии

В образовательном процессе преподаватель должен широко использовать интерактивные методы. Основным подходом в дисциплине «Автоматизированный электропривод» является практическое освоение инструментов и средств, необходимых для проектирования, монтажа, наладки и ввода в эксплуатацию автоматизированного электропривода. Преподаватель должен обеспечить студентов материалами, относящимися к современным автоматизированным электроприводам.

Также рекомендуется давать коллективные проекты. В этом случае студенты разбиваются преподавателем на группы по 5 человек и работают группой над одним проектом, при этом каждый студент выполняет определенную часть работы (например, проектирование преобразователя). Главная цель коллективных проектов – научиться работать командой. После выполнения лабораторной работы, студенты делают отчет в письменной и электронной формах, а затем защищают отчет в ходе устного опроса.

Лекционные занятия носят теоретический характер и посвящены обзору решений и методов, используемых в автоматизированном электроприводе. Преподавателю рекомендуется выдавать в конце лекции задание по прочитанному материалу. Перед началом лекционного занятия проводится устный опрос по теме прошлого занятия.

6. Курсовая работа

Целью курсовой работы является закрепление теоретических сведений, полученных в ходе изучения дисциплины «Автоматизированный электропривод», а также подготовка к дипломному проектированию. Курсовая работа выполняется в течении семестра совместно с изучением теоретического материала.

Тема курсовой работы: «Разработка автоматизированного тягового электропривода автосамосвала БЕЛАЗ-75131».

Исходные данные и последовательность выполнения изложены в соответствующих методических указаниях.

7. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Для текущего контроля освоения материала дисциплины «Автоматизированный электропривод» студентам рекомендуется использовать следующие оценоч-

ные средства: контрольные вопросы и типовые задания для лабораторных работ и коллоквиума, примерные задания для контрольных работ, вопросы к экзамену.

Контрольные вопросы для лабораторных работ:

Лабораторная работа №1

1. Перечислить состав и назначение элементов обобщенной структуры мостового крана.
2. Общие сведения о режимах работы электроприводов.
3. Назвать режимы и особенности работы крановых электроприводов.
4. Перечислить состав и назначение элементов стенда для исследования крановых электроприводов.
5. Расскажите принцип работы принципиальной электрической схемы стенда.
6. Какие основные проблемы возникают в электроприводах при использовании концевых выключателей в качестве флагов изменения режима движения.
7. Расскажите о возможных решениях проблемы «дребезга контактов» концевых выключателей.
8. Расскажите общие сведения о языках программирования, используемых в среде CoDeSys.
9. Последовательность работ при интегрировании ПЛК в SCADA-систему.
10. Переходные процессы, возникающие в крановых электроприводах при обрыве груза.
11. Для чего применяется изменение формы кривой задания частоты вращения.
12. Энергосбережение средствами электропривода в крановых установках и подъемных машинах.
13. Требования, предъявляемые к крановым электроприводам.

Лабораторная работа №2

1. Нагрузочные диаграммы приводов подъема экскаваторов-лопат и экскаваторов-драглайнов.
2. Нагрузочная диаграмма АЭП тяги экскаватора-драглайна.
3. Нагрузочная диаграмма АЭП напора экскаватора-лопаты.
4. Цикл работы АЭП экскаваторов-драглайнов.
5. Цикл работы АЭП экскаваторов-лопат.
6. Узел жесткой отрицательной обратной связи по напряжению.
7. Узел жесткой отрицательной обратной связи по току.
8. Гибкие связи в электроприводах постоянного тока.
9. Структурная схема АЭП с общим сумматором.
10. Структура АЭП, выполненного по подчиненному принципу.
11. Формирование экскаваторной характеристики.
12. Структура АЭП с векторным управлением электромагнитным моментом.
13. Структура АЭП с прямым управлением моментом.
14. Применение обратных связей в АЭП переменного тока.
15. Основные узлы принципиальной электрической схемы (ПЭС) главных АЭП экскаватора ЭКГ-10.
16. Плата регуляторов ПР1 экскаватора ЭКГ-10. Назначение, функциональные блоки, формирование механической характеристики.
17. Плата регуляторов ПР2 экскаватора ЭКГ-10. Назначение, функциональные блоки, формирование механической характеристики.
18. Плата регуляторов ПР3 экскаватора ЭКГ-10. Назначение, функциональные блоки, формирование механической характеристики.
19. Тиристорный возбудитель. Схемы силовой части. Структура системы импульсно-фазового управления. Особенности работы на индуктивную нагрузку.
20. Реализации гибких обратных связей по току якоря. Достоинства, недостатки, применение.
21. Реализация гибких обратных связей по напряжению в АЭП постоянного тока. Применение. Необходимость.
22. Особенности ПЭС АЭП переменного тока экскаватора-драглайна (на примере из методических указаний).
23. Расскажите об особенностях ПЭС главных АЭП экскаватора P&H 4100C BOSS.

Лабораторная работа №3

1. Расскажите о типовых схемах АЭП большегрузных автосамосвалов.
2. При помощи чего производится регулирование скорости двигателей автосамосвала.
3. Реализация электрического дифференциала в электроприводах АТС.
4. Распределение нагрузок между электродвигателями электропривода автосамосвала при прохождении криволинейной траектории.
5. Расскажите, каким образом влияет неравномерность загрузки автосамосвала на тяговые характеристики электропривода.
6. Расскажите принцип работы переменно-постоянной схемы гибридного электропривода автосамосвала.
7. Расскажите принцип работы постоянно-постоянной схемы гибридного электропривода автосамосвала.
8. Расскажите о переменно-переменной схеме электропривода большегрузного автосамосвала.
9. Опишите двигательный режим автосамосвала БЕЛАЗ-75131, используя принципиальную электрическую схему тягового электропривода.
10. Расскажите об аварийном режиме работы электроприводов автосамосвалов.
11. Опишите режимы торможения автосамосвала БЕЛАЗ-75131, используя принципиальную электрическую схему тягового электропривода в режиме торможения.
12. Покажите механические характеристики тягового электропривода автосамосвала в двигательном режиме работы.
13. Покажите механические характеристики тягового электропривода автосамосвала в режиме торможения.
14. Как вы думаете, влияет или нет и почему загрузка автосамосвала на распределение нагрузок между колесами при движении автосамосвала по криволинейной траектории?
15. Какими должны быть внешние характеристики генератора в гибридном приводе большегрузных автосамосвалов?
16. Какими должны быть механические характеристики двигателей в гибридном приводе большегрузных автосамосвалов?

Лабораторная работа №5

1. Назначение моталок и разматывателей в станах холодной прокатки.
2. Расскажите об устройстве и принципах регулирования АЭП моталок (разматывателей).
3. Каким образом и для чего производится компенсация динамической составляющей тока двигателя АЭП моталок.
4. Расскажите о режиме работы разматывателя стана хоодной прокатки.
5. Приведите способы регулирования натяжения ленты в стане холодной прокатки при помощи моталки.
6. Расскажите о режиме разматывания разматывателей станов холодной прокатки.
7. Поясните принцип регулирования натяжения моталок станов холодной прокатки при помощи поддержания ЭДС и тока двигателя на заданном уровне.
8. Поясните принцип работы системы однозонного регулирования скорости электроприводов моталок.
9. Приведите принципиальную электрическую схему АЭП регулятора ЭДС.
10. Поясните принцип работы системы двухзонного регулирования скорости электроприводов моталок.
11. Приведите принципиальную электрическую схему блоков 1УО и 2УО.
12. Приведите принципиальную электрическую схему блока 1НП.
13. Приведите принципиальную электрическую схему блока 2НП.
14. Приведите принципиальную электрическую схему блока 3НП.
15. Приведите структурную схему системы импульсно-фазового управления и расскажите принцип ее работы.

Типовые задания для лабораторных работ:

Лабораторная работа №2

1. Составьте схему и рассчитайте элементы фазовыпрямительного устройства (ФВУ).
2. Составьте схему и рассчитайте элементы регулятора напряжения генератора в системе Г-Д.

3. Составьте схему и рассчитайте элементы регулятора тока генератора в системе Г-Д при работе в режиме отсечки.
4. Выполните синтез гибкой корректирующей связи по напряжению генератора в системе Г-Д.
5. Выполните синтез гибкой корректирующей связи по току якоря в системе Г-Д.
6. Рассчитайте параметры моделей генератора и двигателя постоянного тока экскаватора ЭКГ и синтезируйте систему подчиненного регулирования частоты вращения.
7. Рассчитайте параметры моделей генератора и двигателя постоянного тока экскаватора ЭКГ и синтезируйте систему регулирования частоты вращения с суммирующим усилителем.
8. Рассчитайте параметры тиристорного выпрямителя, который может заменить генератор в одном из главных АЭП экскаватора ЭКГ.

Лабораторная работа №3

1. Рассчитать нагрузку тягового электропривода автосамосвала БЕЛАЗ-75131 при 100% загрузке кузова углем. Плотность угля принять на уровне 3500 кг/м^3.
2. Рассчитать отношение нагрузок двигателей тягового электропривода автосамосвала при прохождении поворота со скоростью 30 км/ч, если известно, что угол поворота руля равен 10^0.
3. Рассчитать тормозное сопротивление электропривода автосамосвала БЕЛАЗ-75131, обеспечивающее равномерный спуск со скоростью 20 км/ч по дороге с уклоном 10^0.
4. Рассчитать токи и напряжения двигателей АЭП автосамосвала при работе в двигательном режиме, полной загрузке и уклоном дорожного полотна 5^0. На основании данного расчета выбрать диоды для силовой схемы электропривода.
5. Рассчитать экономическую эффективность внедрения регулируемого электропривода автосамосвала БЕЛАЗ-75131, если известно, что стоимость шин составляет – 5000000 руб., время полного износа шин при работе без электрического дифференциала составляет – 6 мес. (при расчете необходимо опираться на расчет параметров регулируемого электропривода, стоимость модернизации и убытки, вызванные простоем автосамосвала).

Лабораторная работа №5

1. Рассчитайте регулятор ЭДС для двигателя постоянного тока (исходные данные выдает преподаватель) в составе электропривода моталки стана холодной прокатки, если диаметр барабана принят на уровне 0,5 м, конечный диаметр рулона листовой стали шириной 0,5 мм – на уровне 1 м, марка стали – Сталь3.
2. Рассчитайте регулятор тока для двигателя постоянного тока (исходные данные выдает преподаватель) в составе электропривода моталки стана холодной прокатки, если диаметр барабана принят на уровне 0,2 м, конечный диаметр рулона листовой стали толщиной 1 мм – на уровне 0,7 м, марка стали – Сталь3.
3. Рассчитайте параметры принципиальной электрической схемы нелинейного элемента 1НП для двигателя постоянного тока (исходные данные выдает преподаватель), если скорость стана принимается на уровне 1 м/с передаточное число редуктора – 10, диаметр барабана – 1 м, конечный диаметр рулона – 4м.

Примерные задания для контрольных работ и экзамена:

1. Рассчитайте и постройте механическую характеристику $M_c(\omega)$ вентилятора с учетом моментов потерь $\Delta M_{дв}$ в двигателе и механизме $\Delta M_м$. Дано: мощность двигателя $P_{вн} = 10$ *кВт*; частота вращения ротора двигателя в установившемся режиме $\omega_в = 105$ *рад/с*; $\Delta M_{дв} = 10$*Нм*, $\Delta M_м = 30$*Нм*; момент сопротивления рабочего органа $M_{р.о.} = 3\omega^2$ *о.е.*
2. Рассчитайте и постройте механическую характеристику тележки с $M_c(\omega)$ с учетом моментов потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_м$ на интервале изменения частоты вращения от $+\omega_н$ до $-\omega_н$. Дано: частота вращения ротора двигателя в установившемся режиме $\omega_в = 105$ *рад/с*; $\Delta M_{дв} = 0.5$*Нм*, $\Delta M_м = 2.5$*Нм*; момент сопротивления рабочего органа $M_{р.о.} = 0.2\omega$ *о.е.*
3. Рассчитайте и постройте механическую характеристику $M_c(\omega)$ подъемника с учетом моментов потерь в двигателе $\Delta M_{дв}$ и механизме $\Delta M_м$ на интервале изменения частоты вращения от $+\omega_н$ до $-\omega_н$. Дано: частота вращения ротора двигателя в установившемся режиме $\omega_н = 105$ *рад/с*; $\Delta M_{дв} = 6$ *Нм*, $\Delta M_м = 5$ *Нм*; момент сопротивления рабочего органа $M_{р.о.} = 30$ *Нм*.

4. Вычислите суммарный приведенный к валу двигателя подъемного механизма момент статической нагрузки M_c' и момент инерции J_1'. При этом известны: частоты вращения двигателя ω_1 и барабана $\omega_н$; линейная скорость подъема груза $V_м$; моменты инерции двигателя J_1 и барабана $J_м$; масса линейного перемещающегося груза m; момент, созданный грузом на барабане M_c и к.п.д. механизма η. Изобразите расчетную механическую схему. Дано: $\omega_1 = 157$ *рад/с*; $\omega_м = 10.5$ *рад/с*; $V_м = 0.5$ *м/с*; $J_1 = 0.5$ *кг*м*^{2}; $J_м = 0.4$ *кг*м*^{2}; $m = 100$ *кг*; $M_c = 30$ *Нм*; $\eta = 0.85$.

5. Определите ускорение ε_u и время разгона привода $t_п$ до номинальной частоты вращения $\omega_н$ при постоянном электромагнитном моменте М и моменте статической нагрузки M_c. Постройте график переходного процесса. Дано: номинальная частота вращения двигателя $\omega_н = 305$ *рад/с*; $J = 0.012$ *кг*м*^{2}; $M = 1.4$ *Нм*; $M_c = 0.8$ *Нм*.

6. Определите конструктивный коэффициент $к$ и номинальный поток $Ф$ двигателя постоянного тока независимого возбуждения по номинальным данным. Дано: номинальное напряжение якоря $U_н = 220$ *В*; номинальная частота вращения якоря $\omega_н = 150$ *рад/с*; номинальный ток якоря $I_{ян} = 50$ *А*; полное сопротивление якорной цепи $R_{яΣ} = 0.5$ *Ом*; число пар полюсов двигателя $p_п = 2$; число активных проводников в пазах якоря $N = 400$; число параллельных ветвей обмотки якоря $a = 2$.

7. По каталожным данным определите частоту вращения идеального холостого хода ω_0. Постройте электромеханическую характеристику. Дано: $U_{ян} = 110$ *В*; $I_{ян} = 20$ *А*; $\omega_н = 100$ *рад/с*; $R_{яΣ} = 0.5$ *Ом*.

8. По заданным точкам механической характеристик и определите сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Постройте графики этих характеристик. Дано: $U_{ян} = 220$ *В*; $M_1 = 5$ *Нм*; $\omega_1 = 100$ *рад/с*; $M_2 = 15$ *Нм*; $\omega_2 = 95$ *рад/с*.

9. Используя номинальные и каталожные данные, определите постоянную времени якорной цепи и коэффициент статической жесткости механической характеристики. Запишите передаточную функцию электропривода. Дано: $U_{ян} = 110$; $\omega_н = 100$ *рад/с*; $I_{ян} = 20$ *А*; $R_{яΣ} = 0.5$ *Ом*; $p_п = 2$; коэффициент пропорциональности в эмпирической формуле индуктивности якорной цепи $\gamma = 0.6$.

10. Используя каталожные данные, определите постоянную времени цепи возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Дано: $Ф_н = 4$ *мВб*; $I_{вн} = 0.2$ *А*; $w_в = 6000$; $p_п = 1$; $R_{вΣ} = 700$ *Ом*.

11. Используя данные каталога, рассчитайте и постройте электромеханическую характеристику асинхронного электродвигателя $I_2'(\omega)$. Дано: $U_{1ф} = 380$ *В*; $R_1 = 0.3$ *Ом*; $X_1 = 0.4$ *Ом*; $X_2' = 0.3$ *Ом*; $R_2' = 0.4$ *Ом*; $p_п = 1$.

12. Используя каталожные данные, рассчитайте и определите на механической характеристике асинхронного двигателя точки холостого хода, короткого замыкания, критическую. Постройте механическую характеристику. Дано: $U_{1ф} = 380$ *В*; $R_1 = 0.3$ *Ом*; $X_1 = 0.4$ *Ом*; $X_2' = 0.3$ *Ом*; $R_2' = 0.4$ *Ом*; $p_п = 1$.

13. Используя каталожные данные, определите параметры динамической механической характеристики асинхронного двигателя. Дано: $U_{1ф} = 380$ *В*; $R_1 = 0.3$ *Ом*; $X_1 = 0.4$ *Ом*; $X_2' = 0.3$ *Ом*; $R_2' = 0.4$ *Ом*; $p_п = 1$.

14. Используя номинальные и каталожные данные, рассчитайте и постройте угловую характеристику синхронного двигателя. Считайте $E_н = U_н$. Определите параметры и изобразите передаточную функцию синхронного двигателя. $U_н = 6000$ *В*; $p_п = 3$; $x_{1d}* = 1$ *о.е.*; $x_{1q}* = 0.6$ *о.е.*; $I_н = 120$ *А*.

15. Используя данные из каталога, определите частоту свободных колебаний $\Omega_{ЭМ}$ и коэффициент затухания α для привода постоянного тока. Напишите выражение передаточной функции и изобразите структурную схему с численными значениями коэффициентов. $L_{яΣ} = 0.05$ *Гн*; $R_{яΣ} = 0.075$ *Ом*; $J_Σ = 7$ *кг*м*^{2}; $\beta = 100$ *Нмс*.

16. Используя данные из каталога, определите частоту свободных колебаний и коэффициент затухания α для асинхронной машины. Напишите выражение передаточной функции и изобразите структурную схему в общем виде и с численными значениями коэффициентов. Дано: $p_п = 1$; $M_к = 1400$ *Нм*; $s_k = 0.1$ *о.е.*; $J_Σ = 7$ *кг*м*^{2}.

17. Используя табличные данные, постройте ЛАЧХ электропривода. Напишите выражение для передаточной функции и изобразите структурную схему в общем виде и с численными значениями коэффициентов. $T_м = 0.05$ *с*; $T_э = 0.07$ *с*.

18. Используя табличные данные, с помощью ЛАЧХ разомкнутой системы управляемый преобразователь-двигатель определите характер переходных процессов. Дано: коэффициент передачи по амплитуде $k = 30$ *о.е.*; $T_м = 0.3$ *с*; $T_э = 0.2$ *с*; $T_п = 0.01$ *с*.

19. Выберите двигатель, работающий в продолжительном режиме в соответствии с нагрузочной диаграммой со следующими параметрами: пусковой момент $M_п = 1.5$ *Нм*; момент сопротивления $M_с = 0.5$ *Нм*; тормозной момент $M_т = 1.5$ *Нм*; время пуска $t_п = 0.5$ *с*; время работы $t_с = 0.3$ *с*; время торможения $t_т = 0.5$ *с*; время останова $t_о = 2$ *с*; интенсивность охлаждения в режимах пуска и торможения $\beta_т = 0.5$.

20. Используя данные, определите точность регулирования скорости при абсолютно мягкой нагрузочной характеристике механизма. Изобразите график механической характеристики. Дано: $\beta = 180$; $M_{макс} = 13$ *Нм*; $M_{мин} = 7$ *Нм*; $\omega_0 = 105$ *рад/с*.

21. Используя данные, определите диапазон регулирования скорости при абсолютно мягкой нагрузочной характеристике. Постройте механические характеристики. Дано: $\omega_{ср} = 80$ *рад/с*; $\beta = 250$ *Нмс*; $\omega_{0н} = 3$ *рад/с*; $M_{макс} = 12$ *Нм*; $M_{мин} = 0$ *Нм*.

Тиристорный преобразователь выполнен по трехфазной нулевой реверсивной схеме с согласованным управлением. Пользуясь данными, выберите тиристоры, трансформатор, уравнительные реакторы. Дано: $U_{2ф} = 127$ *В*; $I_{dн} = 10$ *А*; $U_{1ф} = 220$ *В*; $I_{ур} = 1$ *А*.

Вопросы на экзамен:

1. Основные понятия и определения. Типовая структурная схема автоматизированных технологических комплексов.
2. Автоматизированный электропривод подъемных кранов. Общие сведения. Классификация.
3. Типы электроприводов подъемных машин.
4. Коэффициент нагрузки крановых механизмов. Выбор типа электропривода.
5. Режимы работы подъемных машин. Циклограмма работы.
6. Выбор крановых электродвигателей по условиям работы.
7. Схема мостового крана. Особенности работы оборудования.
8. Учет динамических нагрузок при выборе электродвигателей.
9. Рекуперативный крановый электропривод.
10. Автоматизированный электропривод горнодобывающего оборудования. Нагрузки электроприводов.
11. Электропривод экскаватора. Структурная схема.
12. Основные параметры электроприводов экскаваторов.
13. Привод поворота экскаватора. Особенности работы.
14. Привод поворота экскаватора. Динамические характеристики.
15. Привод поворота экскаватора. Применение многодвигательного электропривода.
16. Механические перегрузки электроприводов экскавторов и способы их устранения.
17. Работа привода подъема при стопорении.
18. Особенности выбора экскаваторных характеристик.
19. Общие требования к экскаваторным электроприводам.
20. Применение системы ТП-Д в автоматизированном электроприводе.
21. Электропривод машин непрерывного транспорта. Особенности работы конвейеров.
22. Статические и динамические нагрузки электроприводов конвейеров.
23. Определение мощности конвейерных электроприводов.
24. Особенности статики и динамики электроприводов конвейеров.
25. Способы управления электроприводами конвейеров.
26. Требования к автоматизированным механизмам непрерывного транспорта.
27. Автоматизированный электропривод турбомеханизмов. Момент сопротивления и мощность.
28. Q-H характеристики центробежных насосов.
29. Регулирование подачи механизмов центробежного типа.
30. Электропривод вентиляторов и компрессоров. Особенности работы.

31. Электропривод и автоматизация технологических комплексов. Роторный экскаватор.
32. Электропривод и автоматизация технологических комплексов. Землеройные машины.
33. Автоматическое управление электроприводом резания выемочного комбайна.
34. Моменты нагрузки горных машин и механизмов.
35. Уравнение движения. Пуск и торможение электропривода.
36. Особенности выбора мощности электропривода.
37. Пути повышения эффективности электроприводов.
38. Особенности современных полупроводниковых преобразователей. Преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения.
39. Особенности современных полупроводниковых преобразователей. Широтно-импульсная модуляция.
40. Влияние длины монтажного кабеля на перенапряжения на зажимах двигателя при использовании широтно-импульсной модуляции.
41. Частотный преобразователь с автономным инвертором и управляемым выпрямителем. Особенности работы.
42. Частотный преобразователь с автономным инвертором и широтно-импульсной модуляцией. Особенности работы.
43. Аварийные режимы в автоматизированных электроприводах с частотными преобразователями.
44. Особенности современных полупроводниковых преобразователей. Транзисторные преобразователи напряжения.
45. Виды защиты электроприводов.
46. Основные требования, предъявляемые к системам управления электроприводами.
47. Энергоэффективное управление автоматизированным электроприводом

3.2 Рабочая программа по дисциплине «Системы управления электроприводов»

1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Системы управления электроприводов» (СУЭП) имеет целью:

- изучение принципов построения систем управления и способов реализации законов управления движением электроприводов постоянного и переменного тока;
- формирование навыков исследования, расчета и проектирования СУЭП с учетом влияния специфических особенностей применяемых элементов систем автоматики и характеристик объектов управления.

2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина СУЭП относится к циклу Б3 «Профессиональный цикл» и является логическим продолжением дисциплин «Электрический привод» и «Теория автоматического управления».

Полученные в ходе освоения дисциплины СУЭП знания и умения необходимы для приобретения студентами общих навыков анализа, расчета и проектирования регулируемого электропривода и будут использоваться при изучении таких дисциплин, как «Автоматизированный электропривод», «Монтаж и наладка электроприводов и систем автоматизации», а также при выполнении дипломных проектов.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины «Системы управления электроприводов»

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих общепрофессиональных компетенций:

ПК-6 – способностью и готовностью анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;

ПК-39 – готовностью изучать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;

ПК-47 – готовностью к наладке и опытной проверке электроэнергетического и электротехнического оборудования.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

По ПК-6

Знать:

- виды и типы систем управления электроприводов;
- способы управления и виды структур систем управления, используемых в электроприводе;
- методы настройки аппаратуры управления.

Уметь:

- правильно выбирать структуру системы управления в зависимости от задач, решаемых электроприводом;
- рассчитывать значения уставок и настроечных коэффициентов системы управления.

Владеть:

- основными навыками анализа технических требований к регулируемому электроприводу;
- программными средствами, применяемыми для исследования качества регулирования координат электропривода.

По ПК-39

Знать:

- основные мировые тенденции развития регулируемого электропривода;
- классификацию современных методов управления, применяемых в электроприводе.

Уметь:

- пользоваться научно-технической документацией для определения структуры системы управления;
- проводить поиск научно-технической информации в учебной литературе и научных периодических изданиях;
- выполнять со словарем перевод иностранных литературных источников.

Владеть:

- общепринятой терминологией в области систем управления электроприводов;
- навыками обобщения информации из различных источников.

По ПК-47

Знать:

- принцип действия, схемы включения и условия применения основных типов управляющих устройств в электроприводе;
- основные настроечные параметры управляющих устройств в элек-

троприводе;
- виды возможных аварийных ситуаций в электроприводе и основные средства защиты от них.

Уметь:
- анализировать инструкции по эксплуатации и иную эксплуатационную техническую документацию на управляющие устройства электропривода;
- самостоятельно разбираться в процедуре ввода настроек в управляющие устройства электропривода.

Владеть:
- методами анализа режимов работы регулируемого электропривода;
- минимальными навыками проведения наладки регулируемого электропривода.

3.1. Матрица соотнесения тем/разделов учебной дисциплины и формируемых в них профессиональных компетенций

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции			
		ПК-6	ПК-39	ПК-47	Σ кол-во
Раздел 1	*4*	+			*1*
Тема 1.1	2	+			1
Тема 1.2	1	+			1
Тема 1.3	1	+			1
Раздел 2	*26*	+		+	*2*
Тема 2.1	2	+		+	2
Тема 2.2	20	+		+	2
Тема 2.3	2	+		+	2
Тема 2.4	2	+		+	2
Раздел 3	*73*	+		+	*2*
Тема 3.1	24	+		+	2
Тема 3.2	35	+		+	2
Тема 3.3	14	+		+	2
Раздел 4	*65*	+	+	+	*3*
Тема 4.1	2	+	+	+	3
Тема 4.2	2	+	+	+	3
Тема 4.3	14	+	+	+	3
Тема 4.4	6	+	+	+	3
Тема 4.5	12	+	+	+	3
Тема 4.6	29	+	+	+	3
Раздел 5	*18*	+		+	*2*
Тема 5.1	16	+		+	2
Тема 5.2	2	+		+	2
Раздел 6	*18*	+			*1*

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции			
		ПК-6	ПК-39	ПК-47	Σ кол-во
Тема 6.1	14	+			1
Тема 6.2	2	+			1
Тема 6.3	2	+			1
Раздел 7	*12*	+			*1*
Тема 7.1	2	+			1
Тема 7.2	10	+			1
Итого	216	+	+	+	3

4. Структура и содержание дисциплины «Системы управления электроприводов»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц (ЗЕ), 216 часов.

4.1. Лекционные занятия

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
1	1. Общие сведения о СУЭП	1.1. Назначение и функции СУЭП: задачи и принципы автоматического управления электроприводами; требования к диапазону регулирования координат, точности и характеру динамических процессов СУЭП; влияние нагрузки; оптимальное движение, критерии оптимизации, ограничение координат	1
		1.2. Классификация и способы описания СУЭП: общая структура и основные элементы СУЭП; принципиальные электрические, функциональные и структурные схемы СУЭП; математические модели СУЭП, линеаризация и упрощение моделей	0,5
		1.3. Принципы построения СУЭП: методы синтеза СУЭП и область их применения; типовые структуры СУЭП	0,5

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
2, 3	2. Разомкнутые СУЭП	2.1. Общие сведения об электроприводах с управлением по жесткой программе: элементная база и область применения логических СУЭП; использование циклограмм и структурных формул булевой логики для анализа логических СУЭП; синтез логических схем	1
		2.2. Релейно-контакторные СУЭП: функции релейно-контакторных систем управления; принципы построения СУЭП на релейно-контактной аппаратуре; сравнительная оценка принципов	1
		2.3. Дискретно-логические СУЭП: математическое описание; методы синтеза СУЭП; построение дискретно-логических СУЭП на основе цифровых узлов	1
		2.4. Защиты электроприводов: аварийные режимы, причины возникновения, последствия; виды защит электроприводов; выбор, расчет и настройка типовых защитных устройств	1
4-6	3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	3.1. Регулирование скорости электропривода постоянного тока: регулирование по возмущению и по отклонению при помощи управляемых преобразователей постоянного тока; техническая реализация регуляторов; области применения и рекомендации по выбору структуры СУЭП для регулирования нескольких координат	2
		3.2. Системы подчиненного регулирования координат: настройка внутреннего контура, оптимизация динамики, требования к желаемой ЛАХ; стандартные настройки регуляторов на технический и симметричный оптимум; настройка внешнего контура; принцип упреждающего токоограничения, влияние на динамические характеристики	2
		3.3.Системы с суммирующим усилителем: реализация процесса суммирования нескольких входных сигналов; типовые обратные связи по скорости, ЭДС, току, напряжению, особенности их реализации; форсировки и отсечки; применение и настройка модальных регуляторов	2

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
7-12	4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	4.1. Особенности асинхронных электроприводов: особенности асинхронного двигателя как объекта управления; классификация способов регулирования координат асинхронного электродвигателя; допущения, принимаемые при построении СУЭП на базе асинхронного двигателя	1
		4.2. Регулирование координат изменением напряжения: управление асинхронными двигателями регулированием напряжения статора; управление асинхронными двигателями регулированием напряжения ротора	1
		4.3. Скалярное частотное управление: разомкнутые системы управления, законы частотного регулирования; замкнутые системы управления с обратными связями по скорости, по току, по скольжению; оптимальные системы частотного управления	2
		4.4. Частотно-токовое управление: особенности систем частотно токового управления, основные способы коррекции; способы реализации источника тока; типовые структуры систем частотно-токового управления	3
		4.5. Прямое управление моментом: физические основы прямого управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя; структура системы управления, таблица оптимальных переключений	1

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
		4.6. Векторное (полеориентированное) и градиентное управление: основные понятия полеориентированного и градиентного управления, ориентирование по различным векторам потокосцеплений; методы полеориентирования; обобщенная структура системы векторного и градиентного управления; понятие наблюдателей состояния; структуры полеориентированного управления на базе моделей асинхронного двигателя, питающегося от различных источников; структуры полеориентированного управления с использованием типовых регуляторов, порядок настройки регуляторов, сравнение векторного и градиентного управления в задачах энергоэффективного управления приводами	4
13, 14	5. Замкнутые СУЭП на базе синхронного двигателя	5.1. Синхронные электроприводы: регулирование возбуждения; частотно-токовое регулирование момента синхронного электродвигателя; управление синхронным электроприводом с регулированием продольной и поперечной составляющих тока статора	3
		5.2. Электроприводы на базе вентильного двигателя: особенности конструкции вентильных двигателей; структура системы управления и настройки регуляторов для электроприводов на базе вентильных двигателей	1
15, 16	6. СУЭП специального назначения	6.1. Управление положением и следящие электроприводы: задачи позиционирования и слежения, требования к электроприводам; типовые узлы систем управления позиционным электроприводом постоянного и переменного тока; структурные схемы и основные элементы следящего электропривода; статические и динамические характеристики; способы повышения точности	2

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
		6.2. Программное управление: классификация систем программного управления; общая структура систем числового программного управления; особенности сопряжения устройств числового программного управления с электроприводом; алгоритмы работы электроприводов с числовым программным управлением	1
		6.3. Управление взаимосвязанными электроприводами: системы управления скоростью электроприводов, работающих на один вал; системы управлением соотношением скоростей электроприводов	1
17	7. Цифровые СУЭП	7.1. Основные понятия цифровых СУЭП: основные понятия и определения цифровых систем управления, классификация цифровых СУЭП; общая структура цифровой системы управления координатами электропривода; модели цифровых систем с учетом дискретности по уровню и по времени; дискретные передаточные функции электропривода	1
		7.2. Организация цифровых регуляторов: синтез цифровых регуляторов с помощью разностных уравнений; методики непосредственного синтеза цифрового регулятора	1
		Итого:	34

4.2. Лабораторные занятия

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Наименование работы	Объем в часах
1, 2	2. Разомкнутые СУЭП	1. Типовые узлы релейно-контакторных систем управления двигателями постоянного тока независимого возбуждения	6
2, 3		2. Типовые узлы релейно-контакторных систем управления двигателями переменного тока	4
3, 4	3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	3. Применение обратных связей для построения систем управления электроприводов постоянного тока	6
5, 6		4. Характеристики регуляторов в системах электроприводов	6

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Наименование работы	Объем в часах
6, 7		5. Настройка регуляторов системы подчиненного регулирования	6
8, 9		6. Настройка модальных регуляторов	6
9, 10	4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	7. Исследование способов скалярного частотного управления асинхронным двигателем	6
11, 12		8. Исследование способов прямого управления моментом асинхронным двигателем	6
12, 13		9. Исследование способов векторного управления асинхронным двигателем	6
14, 15	5. Замкнутые СУЭП на базе синхронного двигателя	10. Исследование способов управления электроприводом на базе синхронного электродвигателя	6
15, 16	6. СУЭП специального назначения	11. Системы управления следящим электроприводом	6
17	7. Цифровые СУЭП	12. Синтез цифровых регуляторов	4
		Итого:	68

4.3. Самостоятельная работа студента

Раздел дисциплины	№ недели	Вид СРС	Объем в часах	Трудоемкость, ЗЕ
1. Общие сведения о СУЭП	1	Составление конспекта по лекции 1.1 – 1.3	2	0,055555
2. Разомкнутые СУЭП	1	Домашнее задание по лабораторной работе 1	2	0,055556
	2	Подготовка отчета по лабораторной работе 1	2	0,055555
	2	Составление конспекта по лекции 2.1 и 2.2	2	0,055556
	2	Домашнее задание по лабораторной работе 2	2	0,055555
	3	Подготовка отчета по лабораторной работе 2	2	0,055556
	3	Составление конспекта по лекции 2.3 и 2.4	2	0,055555
3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	3	Домашнее задание по лабораторной работе 3	2	0,055556
	4	Подготовка отчета по лабораторной работе 3	2	0,055555
	4	Составление конспекта по лекции 3.1	2	0,055556

	5	Составление конспекта по лекции 3.2	2	0,055555
	5	Домашнее задание по лабораторной работе 4	2	0,055556
	5	Выполнение курсовой работы	4	0,111111
	6	Подготовка отчета по лабораторной работе 4	2	0,055556
	6	Составление конспекта по лекции 3.3	2	0,055555
	6	Домашнее задание по лабораторной работе 5	2	0,055556
	6	Выполнение курсовой работы	2	0,055555
	7	Выполнение курсовой работы	2	0,055556
	7	Подготовка отчета по лабораторной работе 5	2	0,055555
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	7	Составление конспекта по лекции 4.1 и 4.2	2	0,055556
	8	Составление конспекта по лекции 4.3	2	0,055555
3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	8	Домашнее задание по лабораторной работе 6	2	0,055556
	8	Выполнение курсовой работы	2	0,055555
	9	Подготовка отчета по лабораторной работе 6	2	0,055556
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	9	Составление конспекта по лекции 4.4	2	0,055555
	9	Домашнее задание по лабораторной работе 7	2	0,055556
3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	9	Выполнение курсовой работы	4	0,111111
	10	Выполнение курсовой работы	2	0,055556
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	10	Подготовка отчета по лабораторной работе 7	2	0,055555
	10	Составление конспекта по лекции 4.4 и 4.5	2	0,055556
	11	Составление конспекта по лекции 4.6	2	0,055555
	11	Домашнее задание по лабораторной работе 8	2	0,055556
3. Замкнутые СУЭП постоянного тока	11	Выполнение курсовой работы	2	0,055555
	12	Выполнение курсовой работы	2	0,055556
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	12	Подготовка отчета по лабораторной работе 8	2	0,055555
	12	Составление конспекта по лекции 4.6	2	0,055556
	12	Домашнее задание по лабораторной работе 9	2	0,055555

	13	Подготовка отчета по лабораторной работе 9	2	0,055556
	13	Выполнение курсовой работы	4	0,111111
5. Замкнутые СУЭП на базе синхронного двигателя	13	Составление конспекта по лекции 5.1	2	0,055556
	14	Составление конспекта по лекции 5.1 и 5.2	2	0,055555
	14	Домашнее задание по лабораторной работе 10	2	0,055556
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	14	Выполнение курсовой работы	2	0,055555
5. Замкнутые СУЭП на базе синхронного двигателя	15	Подготовка отчета по лабораторной работе 10	2	0,055556
6. СУЭП специального назначения	15	Составление конспекта по лекции 6.1	2	0,055555
	15	Домашнее задание по лабораторной работе 11	2	0,055556
4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	15	Выполнение курсовой работы	2	0,055555
	16	Выполнение курсовой работы	2	0,055556
6. СУЭП специального назначения	16	Подготовка отчета по лабораторной работе 11	2	0,055555
	16	Составление конспекта по лекции 6.2 и 6.3	2	0,055556
7. Цифровые СУЭП	17	Составление конспекта по лекции 7.1 и 7.2	2	0,055555
	17	Домашнее задание по лабораторной работе 12	2	0,055556
	17	Подготовка отчета по лабораторной работе 12	2	0,055555
3. Замкнутые СУЭП постоянного тока 4. Замкнутые СУЭП на базе асинхронного двигателя	17	Подготовка к защите курсовой работы	2	0,055556
		Итого:	114	3,166667

4.4. Распределение трудоемкости изучения дисциплин по видам учебной аудиторной и самостоятельной работы студента

Трудоемкость освоения дисциплины – 7 ЗЕ
Промежуточный контроль (экзамен) – 1 ЗЕ
Трудоемкость учебной работы – 6 ЗЕ

Недели семестра	Виды учебной работы, ЗЕ							
	Аудиторная (2,833333)				Самостоятельная (3,166667)			
	ЛК		ЛЗ		КЛ	ДЗ	ПО	КР
	П	ТК	П	В	В	В	В	В
1		КС		УО	КЛ	ДЗ	–	–
2		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	–
3		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	–
4		КС		ЗО	КЛ	–	ПО	–
ТК	–	0,285712	–	0,380952	0,222222	0,166667	0,166666	–
5		КС		УО	КЛ	ДЗ	–	КР
6		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	КР
7		КС		ЗО	КЛ	–	ПО	КР
8		КС		УО	КЛ	ДЗ	–	КР
ТК	–	0,285712	–	0,380952	0,222222	0,166667	0,111112	0,277777
9		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	КР
10		КС		ЗО	КЛ	–	ПО	КР
11		КС		УО	КЛ	ДЗ	–	КР
12		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	КР
ТК	–	0,285712	–	0,380952	0,222222	0,166667	0,166666	0,277777
13		КС		ЗО	КЛ	–	ПО	КР
14		КС		УО	КЛ	ДЗ	–	КР
15		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	КР
16		КС		ЗО	КЛ	–	ПО	КР
ТК	–	0,285712	–	0,380952	0,222222	0,111113	0,166666	0,277777
17		КС		ЗО	КЛ	ДЗ	ПО	КР
Итого	1,214286		1,619047		0,944443	0,666671	0,666665	0,888888

ЛК – лекции
ЛЗ – лабораторные занятия
ТК – текущий контроль
П – посещение занятия
В – выполнение задания
КЛ – составление конспекта лекций
ДЗ – домашнее задание
ПО – подготовка отчета по
лабораторной работе
КР – курсовая работа
ЗО – защита отчета
УО – устный опрос студента
КС – контрольный срез

Трудоемкость 1 ЗЕ присваивается за экзамен при оценке отлично. При оценке хорошо присваивается 0,7 ЗЕ, удовлетворительно – 0,4 ЗЕ, неудовлетворительно – 0,1 ЗЕ.

Если студент выполнил учебную работу по дисциплине трудоемкостью 3,75 ЗЕ, что составляет 75% от 5 ЗЕ, то он может быть аттестован по рейтингу.

5. Образовательные технологии

Лекционные занятия по всем темам проводятся с использованием мультимедийных презентаций и элементов дискуссии со студентами.

Лабораторные занятия проводятся в компьютерном классе и более чем на 90 % заключаются в выполнении студентами самостоятельных заданий с использованием специального программного обеспечения.

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Текущий контроль

Составление конспекта лекций проводится студентом самостоятельно на основании материала, изложенного на лекционном занятии, в объеме, достаточном для ответа на экзаменационные вопросы.

Домашние задания по лабораторным работам заключаются в самостоятельном выполнении с использованием знаний, полученных в ходе лабораторного занятия, основного объема лабораторного задания:

- по лабораторной работе 1 – расчет сопротивления пусковых и тормозных реостатов, уставок реле типовых узлов пуска и торможения;
- по лабораторной работе 2 – построение циклограмм пуска, торможения и аварийного режима работы релейно-контакторных систем управления асинхронным и синхронным электродвигателями;
- по лабораторной работе 3 – расчет коэффициентов обратных связей, компьютерное моделирование;
- по лабораторной работе 4 – настройка регуляторов, компьютерное моделирование;
- по лабораторной работе 5 – расчет системы подчиненного регулирования, определение корректировок, компьютерное моделирование;
- по лабораторной работе 6 – расчет коэффициентов модального регулятора, определение корректировок, компьютерное моделирование;
- по лабораторной работе 7 – определение настроек системы скалярного частотного управления;
- по лабораторной работе 8 – определение настроек системы прямого управления моментом;
- по лабораторной работе 9 – определение настроек системы векторного управления;
- по лабораторной работе 10 – настройка регуляторов синхронного электропривода;

- по лабораторной работе 11 – настройка регуляторов следящего электропривода, определение добротности регулирования;
- по лабораторной работе 12 – настройка цифровых регуляторов, компьютерное моделирование.

Защита отчетов по лабораторным работам включает в себя устный опрос студента. При опросе преподаватель вправе задать любой вопрос, касающийся материала лабораторной работы, при этом знание ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях к работе, является обязательным. По результатам защиты отчетов студент получает оценку полученных знаний.

Устный опрос студента в ходе лабораторного занятия предусматривает выявление степени самостоятельности выполнения лабораторного задания и понимания механизмов его решения. По его результатам определяется уровень овладения студентом навыков.

Контрольный срез проводится в конце каждой лекции и состоит из трех вопросов, два из которых охватывают материал текущей лекции, а один – предыдущей лекции. На первой лекции контрольный срез включает вопросы по дисциплинам «Электрический привод» и «Теория автоматического управления».

Список примерных контрольных вопросов:

КС с 1 по 4 неделю

1. Перечислите для двигателя постоянного тока независимого возбуждения способы торможения при реактивной нагрузке.
2. Приведите известные вам временные и частотные характеристики шести типовых динамических звеньев.
3. Расшифруйте понятие «устойчивая работа электропривода».
4. Приведите пример оптимизации работы электропривода.
5. Перечислите составные части СУЭП.
6. Перечислите динамические критерии качества СУЭП.
7. Запишите уравнения для закона инверсии логических переменных.
8. Перечислите основные составные части логических СУЭП и их назначение.
9. Что такое «реализуемая циклограмма»?
10. Какие типовые задачи решают логические СУЭП?

КС с 5 по 8 неделю

11. Перечислите известные вам разновидности датчиков тока и напряжения.
12. Поясните причину, по которой СУЭП с обратной связью по скорости или с обратной связью по току якоря может работать неустойчиво.
13. Какие принципы управления для нескольких координат вы знаете?
14. Как получить логарифмическую амплитудно-частотную характеристику последовательно соединенных звеньев, если известна логарифмическая амплитудно-частотная характеристика каждого звена?
15. Для последовательной коррекции выбирают между ПИ- и ПИД-регулятором. В каком случае будет больший запас устойчивости, если одноименные коэффициенты равны?
16. Что такое некомпенсируемая постоянная времени?
17. Почему при настройке контура на симметричный оптимум колебательность выше, чем при настройке на технический оптимум?
18. Докажите, что при настройке на технический оптимум регулятор скорости электропривода это П-регулятор.

19. В чем преимущества СУЭП с модальным регулятором перед СУЭП с системой подчиненного регулирования?
20. Какие переменные состояния можно выбрать в электроприводе постоянного тока?

КС с 9 по 12 неделю

21. Почему жесткость искусственных механических характеристик в асинхронно-вентильном каскаде с увеличением выпрямленной ЭДС падает?
22. Что означают термины «подсинхронный» и «надсинхронный» режимы работы?
23. Перечислите известные вам законы частотного регулирования Костенко.
24. Поясните назначение токовой отсечки.
25. Чем отличается скольжение s от частоты скольжения ω_2?
26. В чем заключается принцип прямого управления моментом?
27. Почему в автономном инверторе напряжения существует только 8 возможных положений?
28. Вдоль каких векторов переменных асинхронного двигателя может быть направлена система координат при векторном управлении?
29. Как реализуются известные вам способы полеориентирования?
30. Почему точность полеориентирования классических систем векторного управления зависит от сопротивления ротора?

КС с 13 по 16 неделю

31. Что понимается под выражением «двигатель вышел из синхронизма»?
32. Почему источник тока для синхронного двигателя целесообразно делать для каждой фазы в отдельности?
33. Почему угол полеориентирования при векторном управлении определяется датчиком положения ротора синхронного вигателя?
34. Чем регулирование скорости вентильного двигателя отличается от частотно-токового регулирования скорости синхронного вигателя?
35. Чем релейный регулятор тока удобнее ПИ-регулятора для управления бесколлекторной машиной постоянного тока?
36. При каком типе регуляторе скорости системы регулирования положения добротность максимальна?
37. Что такое сельсин?
38. Зачем нужны интерполяторы?
39. Покажите графически, в какой момент времени формируется строб-импульс при сопряжении электропривода с системой числового программного управления в амплитудном режиме работы.
40. Можно ли выровнять нагрузки при групповом регулировании и цепей якоря и цепей намагничивания?

Курсовая работа

Целью курсовой работы является закрепление материала теоретических разделов дисциплины, а также приобретение дополнительных навыков моделирования сложных динамических систем и изучения отечественной и зарубежной научно-технической информации. Курсовая работа включает в себя выполнение двух различных по своей сути заданий.

Первое задание заключается в решении задачи разработки системы управления для электропривода постоянного тока на базе двигателя с независимым возбуждением и предусматривает анализ предложенного электропривода, синтез системы его управления на основе предъявленных требований и исследование качества переходных процессов.

Второе задание носит реферативно-аналитический характер. Работа предполагает проведение литературного обзора и патентного поиска в области систем векторного управления асинхронными электродвигателями и их сравнительный анализ. Конкретная область исследования определяется выполняемым вариантом. Критерием оценки качества выполнения задания случит полнота обзора и корректность проведенного анализа. Исследование признается выполненным в достаточной полноте, если обзор включает в себя не менее четырех статей из отечественных научных периодических изданий, не менее двух патентов и не менее одной научной статьи на иностранном языке.

Промежуточный контроль

Экзамен проводится в комбинированной форме, включающей в себя письменный ответ на теоретические вопросы, практическое задание и собеседование.

Экзаменационный билет включает в себя два теоретических вопроса из приведенного ниже списка и практическое задание, рассчитанное на выполнение в течении 30 минут и эквивалентное по сложности заданиям, рассмотренным при выполнении лабораторных работ. Во время выполнения практического задания проводится проверка письменных ответов, а по окончанию работы студента над билетом поводится собеседование.

При работе над билетом студент вправе воспользоваться собственноручно составленным конспектом лекций и собственными отчетами по лабораторным работам.

Список примерных экзаменационных вопросов:

1. Общие сведения о СУЭП, их классификация и их сравнительный анализ.
2. Основные понятия и область применения логических схем управления электроприводом. Синтез логических схем СУЭП.
3. Типовые узлы релейно-контакторных систем управления.
4. Одноконтурные СУЭП постоянного тока. Типовые обратные связи.
5. Настройка регуляторов электропривода постоянного тока методом последовательной коррекции. Реализация регуляторов на базе операционных усилителей.
6. Подчиненное регулирование координат. Требования к объекту управления. Настройка контуров на технический оптимум, требования к желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ).

7. Подчиненное регулирование координат. Настройка контура на симметричный оптимум, требования к желаемой ЛАЧХ. Сравнение настроек на симметричный и технический оптимумы.
8. Принцип модального управления. Особенности процедуры расчета модального регулятора.
9. Настройка модального регулятора. Пример для двигателя постоянного тока.
10. Замкнутые СУЭП на базе асинхронных двигателей. Классификация, область применения. Допущения при регулировании асинхронного двигателя (АД).
11. Регулирование напряжения статора АД.
12. Регулирование напряжения ротора АД.
13. Машины двойного питания.
14. Скалярное частотное управление АД. Разомкнутое управление, типовые схемы с одной главной обратной связью.
15. Варианты реализации источника тока.
16. Системы частотно-токового управления АД с инвертором тока.
17. Системы частотно-токового управления АД с инвертором напряжения.
18. Прямое управление моментом АД.
19. Классическое токовое векторное управление АД.
20. Классическое векторное управление по напряжению АД.
21. Общая структура системы векторного управления АД. Особенности выбора вектора полеориентирования. Показатели регулирования.
22. Полеориентирование АД по потокосцеплению ротора. Настройка канала потока.
23. Полеориентирование АД по потокосцеплению ротора. Настройка канала момента и скорости.
24. Полеориентирование АД по потокосцеплению статора. Настройка канала потока.
25. Полеориентирование АД по потокосцеплению статора. Настройка канала момента и скорости.
26. Особенности синхронного электропривода. Принцип регулирования возбуждения синхронного двигателя (СД).
27. Частотно-токовое регулирование момента СД.
28. Векторное регулирование момента СД.
29. Регулирование СД по схеме вентильного двигателя.
30. Система управления СД с постоянными магнитами.
31. Система управления бесколлекторным двигателем постоянного тока.
32. СУЭП регулирования положения. Функциональные схемы для электроприводов постоянного и переменного тока, основные узлы.
33. Режимы работы СУЭП регулирования положения. Настройка регуляторов.
34. Оценка точности СУЭП регулирования положения. Количественные значения показателей.
35. Электроприводы с числовым программным управлением (ЧПУ). Позиционный электропривод с ЧПУ. Следящий электропривод с ЧПУ.
36. Сопряжение системы ЧПУ с электроприводом.

37. Управление многодвигательным электроприводом, работающим на один вал.
38. Управление многодвигательным электроприводом соотношения скоростей.
39. Цифровое управление в электроприводах. Особенности, вносимые в работу цифровой СУЭП квантованностью по уровню и дискретностью по времени.
40. Анализ и синтез цифровых СУЭП. Методы настройки цифрового регулятора. Условия его реализуемости.
41. Оценка влияния различных факторов на ошибку градиентного управления

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Для контроля самостоятельной работы студента по выполнению домашних заданий по лабораторным работам служат разделы «Порядок выполнения работы» и «Контрольные вопросы», приведенные в методических указаниях к работе. Прочие виды самостоятельной работы контролируются в рамках текущего контроля.

3.3 Рабочая программа по дисциплине «Теория электропривода»

1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Теория электропривода» имеет целью:

- изучение физических процессов протекающих в элементах электропривода и соответствующих им математических моделей, а также, методам анализа динамического состояния электроприводов.
- формирование навыков расчетов параметров математических моделей электроприводов, и расчета протекающих в них переходных процессов.

2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина теория электропривода относится к циклу Б3 «Профессиональный цикл». Для ее изучения необходимо обладать базовыми знаниями по дисциплинам «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины», «Электрический привод», «Теория автоматического управления», «Силовая электроника», «Микропроцессорная техника».

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих общепрофессиональных компетенций:

ПК-2 – способностью демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин и готовностью использовать основные законы в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;

ПК-3 – готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и способностью привлечения для их решения соответствующий физико-математический аппарат;

ПК-41 – готовностью понимать существо задач анализа и синтеза объектов в технической среде.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

По ПК-2

Знать:

- основные законы электротехники и механики, использующиеся при описании динамического состояния электроприводов.

Уметь:

- использовать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин применительно к электроприводу.

Владеть:

- методами математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.

По ПК-3

Знать:

- методы и средства математического анализа, использующиеся при исследовании динамического поведения электроприводов.

Уметь:

- выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе эксплуатации электропривода.

Владеть:

- способностью привлечения для решения задач динамики электропривода соответствующего физико-математического аппарата.

По ПК-41

Знать:

- математические модели элементов электропривода.

Уметь:

- понимать существо и решать задачи анализа и синтеза электропривода.

Владеть:

- средствами компьютерного моделирования, используемыми для анализа динамических процессов в электроприводе.
-

3.1. Матрица соотнесения тем/разделов учебной дисциплины и формируемых в них профессиональных компетенций

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции			
		ПК-2	ПК-3	ПК-41	Σ кол-во
Раздел 1	*2,5*				
Тема 1.1	0,5		+	+	2
Тема 1.2	1,5		+	+	2
Тема 1.3	0,5		+	+	2
Раздел 2	*24*				
Тема 2.1	9	+	+	+	3
Тема 2.2	7,5	+	+	+	3
Тема 2.3	7,5	+	+	+	3
Раздел 3	*17*				

Темы, разделы дисциплины	Кол-во часов	Компетенции			
		ПК-2	ПК-3	ПК-41	Σ кол-во
Тема 3.1	8	+	+	+	3
Тема 3.2	9	+	+	+	3
Раздел 4	*59*				
Тема 4.1	14,5	+	+	+	3
Тема 4.2	0,5		+	+	2
Тема 4.3	21	+	+	+	3
Тема 4.4	2		+	+	2
Тема 4.5	21	+	+	+	3
Раздел 5	*2*				
Тема 5.1	1		+	+	2
Тема 5.2	1		+	+	2
Раздел 6	*30*				
Тема 6.1	0,5		+	+	2
Тема 6.2	13,5	+	+	+	3
Тема 6.3	14	+	+	+	3
Тема 6.4	1		+	+	2
Тема 6.5	1		+	+	2
Раздел 7	*4*				
Тема 7.1	1		+	+	2
Тема 7.2	1		+	+	2
Тема 7.3	2		+	+	2
Раздел 8	6				
Тема 8.1	1		+		1
Тема 8.2	0,5		+		1
Тема 8.3	1		+		1
Тема 8.4	1		+		1
Тема 8.5	0,5		+		1
Тема 8.6	0,5		+		1
Тема 8.7	1		+		1
Итого	144				

4. Структура и содержание дисциплины «Теория электропривода»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц (ЗЕ), 180 часов, из них трудоемкость учебной работы составляет 4 ЗЕ, 144 часа.

4.1. Лекционные занятия

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
1	1. Общие вопросы	1.1. История развития электропривода	0,5

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
	электропривода	1.2. Структура электропривода, типовые элементы электропривода, классификация электроприводов	1,5
		1.3. Ограничения, накладываемые на электромеханическое преобразование энергии	0,5
2, 3	2. Механика электропривода	2.1. Кинематические схемы механических передач, упрощение расчетных схем, приведение к одному элементу, определение параметров расчетных схем.	2
		2.2. Динамические модели механических передач, уравнение Лагранжа, одно-, двух- и трехмассовые расчетные схемы и их модели, анализ динамики двухмассовой системы.	1,5
		2.3. Динамические нагрузки электропривода, разгон и торможение механических систем, упругие колебания, динамический удар при выборе зазора.	0,5
4,5	3. Обобщенная электрическая машина	3.1. Общие черты машин постоянного тока, синхронных и асинхронных машин. Формирование их электромагнитного состояния.	1
		3.2. Математическое описание двухфазной электрической машины. Уравнения электрического равновесия, уравнения потокосцеплений, уравнение электромагнитного момента. Электромеханическая связь в электрических машинах.	1
		3.3. Приведение уравнений обобщенной электрической машины к одному базису. Линейные координатные преобразования, модель обобщенной электрической машины в системе координат вращающейся с произвольной скоростью, наиболее распространенные системы координат.	1,5
		3.4. Фазные координатные преобразования, условие инвариантности мощностей, фазные преобразования для несимметричной машины.	0,5
6-9	4. Динамические модели электромеханических преобразователей энергии	4.1. Электрические машины постоянного тока с независимым возбуждением	1,5
		4.2. Электрические машины постоянного тока с последовательным возбуждением	0,5

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
		4.3. Математическое описание асинхронного электродвигателя при питании от источника напряжения, векторные диаграммы, схема замещения	2
		4.4. Особенности описания и процессы преобразования энергии в асинхронном двигателе при питании от источника тока	2
		4.5. Динамическая модель и динамические свойства синхронных двигателей	2
10	5. Математическое описание электрических преобразователей энергии	5.1. Динамические модели управляемых выпрямителей	1
		5.2. Динамические модели автономных инверторов. Виды ШИМ автономных инверторов	1
11,12	6. Динамические свойства электромеханических систем	6.1. Структура линеаризованной электромеханической системы и ее параметры	0,5
		6.2. Динамические свойства линеаризованной электромеханической системы	0,5
		6.3. Демпфирование электроприводом упругих механических колебаний	1
		6.4. Переходные процессы в линеаризованном электроприводе	1
		Переходные процессы в асинхронном электроприводе, способы снижения колебаний электромагнитного момента, влияния различных факторов на энергоэффективную работу электропривода	1
13, 14	7. Многодвигательные электроприводы	7.1. Особенности работы нескольких электродвигателей на один механический вал	1
		7.2. Способы выравнивания нагрузки в многодвигательном электроприводе	1
		7.3. Задача согласования работы электроприводов разнесенных в пространстве, электрический вал и варианты его реализации	2
15-17	8. Особенности выбора элементов электропривода	8.1. Тепловые переходные процессы в электроприводе	1
		8.2. Факторы, влияющие на массогабаритные показатели электропривода, энергетическая модель электропривода, общий подход к определению потерь энергии	0,5
		8.3. Потери энергии в электроприводе при установившихся режимах работы	1

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Темы лекций и их содержание	Объем в часах
		8.4. Потери энергии в электроприводе в переходных процессах	1
		8.5. Нагрузочные диаграммы электропривода	0,5
		8.6. Стандартные режимы работы электропривода	0,5
		8.7. Выбор мощности элементов электропривода, работающего в отличном от стандартных режимов работы	1
		Итого:	34

4.2. Лабораторные занятия

Неделя семестра	Раздел дисциплины	Наименование работы	Объем в часах
1-3	2	1. Исследование динамических свойств механической части электропривода	6
4,5	3	2. Обобщенная электрическая машина	4
6,7	4	3. Исследование динамических свойств электрических машин постоянного тока	4
8-10	4	4. Исследование динамических свойств асинхронных электродвигателей	6
11-13	4	5. Исследование динамических свойств синхронных двигателей с постоянными магнитами	6
14,15	6	6. Исследование свойств линеаризованного электропривода	4
16,17	6	7. Переходные процессы в электроприводе с упругими связями	4
		Итого:	34

4.3. Самостоятельная работа студента

Раздел дисциплины	№ недели	Вид СРС	Объем в часах	Трудоемкость, ЗЕ
2	1	Домашнее задание по лабораторной работе 1	5	0,138889
	2	Домашнее задание по лабораторной работе 1	4	0,111111
	3	Подготовка отчета по лабораторной работе 1	5	0,138889
3	4	Домашнее задание по лабораторной работе 2	4	0,111111
	5	Подготовка отчета по лабораторной ра-	5	0,138889

		боте 2		
4	6	Домашнее задание по лабораторной работе 3	4	0,111111
	7	Подготовка отчета по лабораторной работе 3	5	0,138889
4	8	Домашнее задание по лабораторной работе 4	4	0,111111
	9	Домашнее задание по лабораторной работе 4	4	0,111111
	10	Подготовка отчета по лабораторной работе 4	5	0,138889
4	11	Домашнее задание по лабораторной работе 5	4	0,111111
	12	Домашнее задание по лабораторной работе 5	4	0,111111
	13	Подготовка отчета по лабораторной работе 5	5	0,138889
6	14	Домашнее задание по лабораторной работе 6	4	0,111111
	16	Подготовка отчета по лабораторной работе 6	5	0,138889
	16	Домашнее задание по лабораторной работе 7	4	0,111111
6	17	Подготовка отчета по лабораторной работе 7	5	0,138889
		Итого:	76	2,111111

4.4. Распределение трудоемкости изучения дисциплин по видам учебной аудиторной и самостоятельной работы студента

Трудоемкость освоения дисциплины – 5 ЗЕ. Трудоемкость учебной работы составляет 4 ЗЕ.

Недели семестра	Виды учебной работы, ЗЕ					
	Аудиторная (1,888889)				Самостоятельная	
	ЛК		ЛЗ		ДЗ	ПО
	П	ТК	П	В	В	В
1		КС		УО	ДЗ	–
2	–	КС		УО	ДЗ	–
3		КС		ЗО	–	ПО
4	–	КС		УО	ДЗ	–
ТК	–	0,222222	–	0,222222	0,361111	0,138889
5		КС		ЗО	–	ПО

Недели семестра	Виды учебной работы, ЗЕ					
	Аудиторная (1,888889)				Самостоятельная	
	ЛК		ЛЗ		ДЗ	ПО
	П	ТК	П	В	В	В
6	–	КС		УО	ДЗ	–
7		КС		ЗО	–	ПО
8	–	КС		УО	ДЗ	–
ТК	–	0,222222	–	0,222222	0,222222	0,277778
9		КС		УО	ДЗ	–
10	–	КС		ЗО	–	ПО
11		КС		УО	ДЗ	–
12	–	КС		УО	ДЗ	–
ТК	–	0,222222	–	0,222222	0,333333	0,138889
13		КС		ЗО	–	ПО
14	–	КС		УО	ДЗ	–
15		КС		ЗО	–	ПО
16	–	КС		УО	ДЗ	–
ТК	–	0,055556	–	0,055557	0,222222	0,277778
17		КС		ЗО	–	ПО
Итого	0,944444		0,944445		1,138889	0,972222

ЛК – лекции
ЛЗ – лабораторные занятия
ТК – текущий контроль
П – посещение занятия
В – выполнение задания
ДЗ – домашнее задание
ПО – подготовка отчета по лабораторной работе
ЗО – защита отчета
УО – устный опрос студента
КС – контрольный срез

5. Образовательные технологии

Лекционные занятия по всем темам проводятся с использованием мультимедийных презентаций и элементов дискуссии со студентами.

Лабораторные занятия проводятся в компьютерном классе и более чем на 70 % заключаются в выполнении студентами самостоятельных заданий с использованием специального программного обеспечения.

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Текущий контроль

Домашние задания по лабораторным работам заключаются в самостоятельном выполнении с использованием знаний, полученных в ходе лабораторного занятия, основного объема лабораторного задания.

Защита отчетов по лабораторным работам включает в себя устный опрос студента. При опросе преподаватель вправе задать любой вопрос, касающийся материала лабораторной работы, при этом знание ответов на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях к работе, является обязательным. По результатам защиты отчетов студент получает оценку полученных знаний.

Устный опрос студента в ходе лабораторного занятия предусматривает выявление степени самостоятельности выполнения лабораторного задания и понимания механизмов его решения. По его результатам определяется уровень овладения студентом навыков.

Контрольный срез проводится в конце каждой лекции и состоит из трех вопросов, два из которых охватывают материал текущей лекции, а один – предыдущей лекции. На первой лекции контрольный срез включает вопросы только по прослушанному материалу.

Промежуточный контроль

Экзамен проводится в виде собеседования, в ходе которого определяется уровень теоретических знаний студента по списку вопросов, выдаваемых заранее, а также степень самостоятельности и качество выполнения проекта.

Экзаменационный билет включает в себя три теоретических вопроса из приведенного ниже списка, подготовка к ответу на которые рассчитана на 60 минут. Во время подготовки студента к ответу проводится дополнительная проверка полноты и качества документирования проекта.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Для контроля самостоятельной работы студента по выполнению домашних заданий по лабораторным работам служат разделы «Порядок выполнения работы» и «Контрольные вопросы», приведенные в методических указаниях к работе.

Заключение

Представленный отчет является заключительным в рамках выполнения научно-исследовательской работы "Разработка энергоэффективных средств управления электроприводами горных машин с учетом особенностей динамических режимов их работы в рамках создания энергосберегающих систем распределения и потребления электроэнергии". В ходе работы были получены следующие основные результаты:

- Получены математические модели асинхронного электропривода горных машин в динамических режимах
- Проведены исследования электромеханического преобразования энергии в динамических режимах
- Разработаны алгоритмы энергосберегающего управления

Таким образом можно утверждать, что предложенные методы и средства энергосбережения могут использоваться при реальной эксплуатации частотно-регулируемых электроприводов горных машин, что позволит снизить их энергопотребление, одновременно снижая как издержки угледобывающего предприятия, так и вероятность преждевременных отказов электрооборудования, более эффективно используя его габаритную мощность. Помимо указанного, полученные результаты обогащают программу обучения студентов Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, являющегося ведущим университетом по подготовке кадров в угледобывающей отрасти Сибирского федерального округа.

Список использованных источников

1. Кочубиевский И.Д. Системы нагружения для исследования испытаний машин и механизмов – М.: Машиностроение, 985. – 224 с.
2. Хватов С.В. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С.В. Хватов, В.Г. Титов, А.А. Поскробко, В.Ф. Цыпкайкин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
3. Шпак Ю.А. Программирование на языке С для AVR и PIC микроконтроллеров. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 400 с.
4. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: “Додэка –XXI”, 2007. – 592 с.
5. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR – микроконтроллеров. – К.: “МК-Пресс”, 2006. – 208 с.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
8. Ещин Е.К. Моделирование систем управления электромеханическими объектами – Кемерово: КузГТУ, 2001. - 146 с.
9. Дьяконов В.П. Matlab 6 – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
10. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 247с.
11. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
12. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
13. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
14. Фираго Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Мн.:Техноперспектива, 2006. – 363 с.
15. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 247 с.