

624,71 кВт. Токораспределение в фазных проводах остается без изменения. Снижается и выравнивается несимметрия фазных напряжений, например, в узле 5 модули напряжений фаз *A, B, C* были соответственно 234,43; 217,48 и 190,64 В, стали 233,53; 216,60 и 192,27 В.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика учета повторного заземления нулевого провода при расчете режимов и потерь в сетях 0,38 кВ с использованием метода узловых напряжений, позволяющая уточнять режимные параметры нулевого провода.

2. Учет повторного заземления нулевого провода оказывает влияние на параметры режима и потери мощности в сети 0,38 кВ, причем сила влияния пропорциональна степени несимметрии токов нагрузки фаз и обратно пропорциональна сопротивлению заземляющих устройств и заземлителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф у р с а н о в, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с.
2. Б у д з к о, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Н. М. Зуль. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.
3. П р а в и л а устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
4. И д е л ь ч и к, В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем / В. И. Идельчик; под ред. В. А. Веникова. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.
5. Б р а м е л л е р, Р. Алан, Я. Хэмэм; пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 192 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 6.06.2007

УДК 534.2

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС РЕГИСТРАЦИИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**ОВЧИННИКОВ В. И., доктора техн. наук ДОРОШКЕВИЧ Е. А.,
УШЕРЕНКО С. М., КАЛИНИЧЕНКО А. С.**

*ГНУ НИИ ПМ ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов
с опытным производством»,
Белорусский национальный технический университет*

Для получения новых материалов с уникальными свойствами нередко используется энергия взрыва, например при сварке разнородных материалов

взрывом, синтезе композиционных керамических материалов и гидроштамповке давлением взрыва, упрочнении металлов взрывом и т. д.

На современном этапе развития технологических установок, связанных с получением и обработкой материалов энергией взрыва, требуется всеобъемлющий контроль параметров взрыва, а не только его некоторых интегральных характеристик. Стандартный контроль за основными параметрами зарядового устройства (тип взрывчатого вещества и его вес) и взрывной волны (например, величина давления, время действия механического импульса и т. д.) не позволяют обеспечить необходимую воспроизводимость технологии обработки материала энергией взрыва, поскольку они описывают в основном интегральные характеристики процесса. Для получения достаточной воспроизводимости технологических параметров при использовании взрывных ускорителей порошка необходимо отслеживание развития тонкой структуры процесса взрыва от начала его детонации (т. е. использование замедлителей детонации, вариация геометрических размеров и формы камеры ускорителя) до его последствия (например, намагничивания некоторых типов мишеней). Измерения в условиях непосредственной близости от эпицентра взрыва (расстояние от нескольких сантиметров до метра) в динамике развития процесса, который характеризуется длительностью микросекундного диапазона, осложнены сверхвысокими давлениями, огромными скоростями распространения ударных волн и другими экстремальными воздействиями (наличием движущейся короткоживущей плазмы). Это требует использования нестандартных приемов по регистрации развития процесса взрыва и изучения тонкой структуры короткоживущих плазменных процессов. Однако практически нет возможности использовать стандартные регистрирующие приборы, а к первичным измерительным преобразователям предъявляются особенно жесткие условия по стабильности и работоспособности в условиях эпицентра взрыва. Поскольку при взрыве образуется и развивается в пространстве неизотермическая турбулентная короткоживущая плазма, была предложена идея контроля развития взрывной обработки материалов по измерению составляющих индукции магнитного поля B_x , B_y , B_z в декартовой системе координат X , Y , Z в непосредственной близости от эпицентра. Временные зависимости $B_x(t)$, $B_y(t)$, $B_z(t)$, а также рассчитанный вектор индукции магнитного поля дают дополнительную информацию о тонкой структуре развития плазменных процессов в динамике, что позволяет установить причинно-следственные связи параметров обработки материалов энергией взрыва и свойств материала после обработки.

Цель данной работы – выбор первичных преобразователей и датчиков, разработка приборной базы, схемы регистрации, методики обработки экспериментальных данных и создание универсального измерительно-вычислительного комплекса регистрации электромагнитного излучения, в первую очередь, в условиях динамического нагружения материалов.

В основу технологического контроля за развитием процесса взрыва при динамической обработке материалов положено измерение составляющих индукции магнитного поля вблизи эпицентра взрыва комплектом миниатюрных датчиков Холла, расположенных в вершине куба по трем взаимно

перпендикулярным плоскостям. Как показали предварительные испытания, миниатюрные преобразователи Холла наиболее эффективны для использования в качестве первичных чувствительных элементов. Их выбор обусловлен диапазоном индукции магнитных полей (до 80 мТл в пике), возникающих на расстоянии 10 см от эпицентра взрыва взрывчатки массой 100–200 г в тротильном эквиваленте. Кроме того, датчики характеризуются широкими возможностями регистрации процессов в динамике. Комплект датчиков Холла (3 шт.) для измерения компонент индукции магнитного поля B_x , B_y , B_z выполнен во взрывозащитном исполнении (в немагнитном герметичном микрокорпусе). По защищенности от воздействия окружающей среды он имеет обыкновенное исполнение по ГОСТ 12997–84.

Небольшое входное электросопротивление (менее 8 Ом) и высокая магнитная чувствительность преобразователей Холла из n -InSb-I-GaAs, разработанных и выпускаемых в ИФТТП НАН Беларуси, в сочетании с миниатюрностью (магниточувствительная область – $0,1 \times 0,1 \times 0,003$ мм и размер кристалла – $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ мм) позволяют исключить помехи (отсутствуют катушки) и обеспечить необходимую точность измерений в микросекундном диапазоне интервалов времен. В комплекте датчиков Холла применены миниатюрные высокостабильные первичные магниточувствительные элементы Холла, которые выбирались (разбраковывались) из партии с близкими характеристиками по магнитной чувствительности, разброс которой не превышал ± 1 %. Выносная коробка с усилителями и блоками питания выполнена в климатическом исполнении по группе С3 (ГОСТ 12997–84), но для работы при температуре от -30 до $+45$ °С и относительной влажности до 98 % – при 35 °С.

Электрические сигналы по каждому из каналов X , Y , Z подаются на первый и второй каскады соответствующего широкополосного усилителя. Далее сигналы с выхода усилителя каналов X , Y , Z подаются на входы плат АЦП системного блока компьютера. По устойчивости к воздействию атмосферного давления комплекс соответствует группе Р1 (ГОСТ 12997–84).

Разработанный измерительно-вычислительный магнитометрический комплекс предназначен для измерения и визуализации на экране дисплея компьютера трехмерных составляющих вектора индукции магнитного поля в зависимости от времени в режиме «in situ», а также дальнейшей математической обработки полученной информации, например с помощью широко распространенной программы MathCAD. Диапазон регистрируемых квазистатических и динамических магнитных полей – $0,01$ мТл– 2 Тл (что соответствует условиям регистрации магнитных полей при взрыве взрывчатки массой до 2 кг). Следует отметить, что под другие задачи этот диапазон легко может быть на порядок как расширен, так и сужен. Результат измерения показан на рис. 1.

Комплекс может быть оснащен комплектом сменных датчиков, позволяющих регистрировать электрические составляющие электромагнитного излучения при взрыве и одновременно такую характеристику плазмы, как зондовый ток. В этом случае по пути распространения движущейся турбулентной плазмы можно располагать зонды, подключенные к постоянному

источнику напряжения для контроля за временными характеристиками тока плазмы.

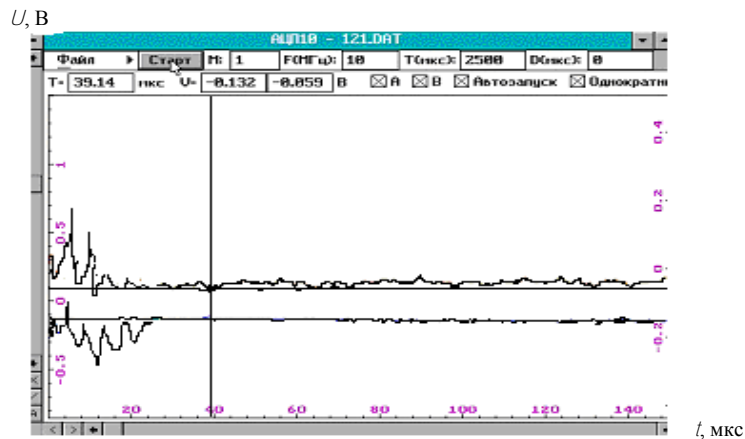


Рис. 1. Вид дисплея компьютера с зарегистрированным сигналом при обработке стали 45 потоком частиц порошка, ускоренных взрывом (заряд аммонита – 200 г)

Так как количество одновременно регистрируемых во времени независимых процессов ограничено числом каналов, т. е. не более четырех, вместо датчиков Холла можно использовать другие взаимозаменяемые датчики с ГСП выходным сигналом. В качестве первичных датчиков электрических составляющих $E_x(t)$, $E_y(t)$, $E_z(t)$ электромагнитного излучения могут быть использованы микрокатушки, размещенные таким образом, чтобы их оси были взаимно перпендикулярны. Это – стандартный метод измерений. На рис. 2 представлена структурная схема магнитометрического комплекса.

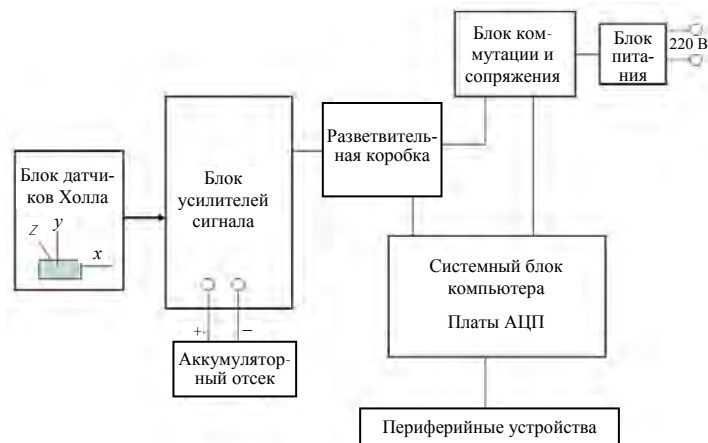


Рис. 2. Структурная схема магнитометрического комплекса

В состав изделия (единичная продукция) включено следующее.

Блок первичных преобразователей Холла (по 3 шт.), размещенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях X , Y , Z в герметичном немагнитном микрокорпусе – 10 компл.

Блок сменных первичных преобразователей (по 3 шт.) для измерения электрических составляющих электромагнитного излучения – 2 компл.

Блок усиления выходных сигналов первичных преобразователей – четыре двухкаскадных широкополосных усилителя – 1 компл.

Аккумуляторный отсек блока питания усилителей и преобразователей Холла – 1 шт.

Блок измерения зондового тока плазмы – 1 шт.

Жгут проводов соединительных длиной 50 м – 1 шт.

Разветвительная коробка – 1 шт.

Блок коммутации – 1 шт.

Блок питания и зарядки аккумуляторов (~220 В, 50 Гц; 12 аккумуляторов типа Varta-AA 1.2 V-1400 mA/h) – 1 шт.

Системный блок компьютера – 1 шт.

Плата АЦП – ADC10M/12 (внутренняя по отношению к компьютеру); два синхронных канала, время преобразования – 40 нс; ОЗУ – 64 Кбт на канал, входной диапазон ± 2 В; четыре линии цифрового (ТТЛ) ввода/вывода; внешняя/внутренняя синхронизация; прерывание; 12 разрядов – 2 шт.

Соединительные провода высокочастотные, 50 Ом (АЦП-разветвительная коробка – 8 шт.

Монитор – 1 шт.

Блок внешней синхронизации: для запуска соответствующей платы АЦП – 2 шт.

Рабочая программа верхнего уровня – 2 шт.

Программа нижнего уровня – 1 шт.

В изделии можно выделить три комплекса: первый – узкоспециализированный, содержащий блок первичных преобразователей, выполненный во взрывозащитном исполнении и с возможностью размещения в эпицентре взрыва, второй – имеющий более универсальное назначение, выполняющий функции усиления сигналов, питания первичных преобразователей, синхронизации запуска программы, аналого-цифрового преобразования сигналов, и третий, обеспечивающий компьютерную обработку измерений и визуализации их на дисплее. Выполнение первой узкоспециализированной части в виде модификаций под конкретные требования решаемой задачи позволяет использовать весь комплекс в целом для измерения электромагнитных полей в различных областях науки и техники, в том числе и для решения других технических проблем.

Методика расчета ЭДС магнитного поля. Эффект Холла заключается в том, что в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, возникают электродвижущие силы. Причины возникновения ЭДС Холла заключаются в изменении траектории движения электронов и дырок в полупроводнике вследствие действия силы Лоренца при наличии внешнего магнитного поля. Она действует перпендикулярно к направлениям скорости носителей заряда и магнитной индукции B . Сила Лоренца

$$F = g[vB], \quad (1)$$

где g – заряд носителей, для электрона ($-e$), для дырки ($+e$); v – их скорости.

Для дырки направления плотности тока в отсутствие магнитного поля и скорости v дырки совпадают, а для электрона они противоположны, по-

этому сила Лоренца отклоняет как электроны, так и дырки к одной грани. Следовательно, напряжение Холла будет вызываться разностным эффектом.

Напряженность поля эффекта Холла H и ЭДС Холла U можно выразить формулами:

$$H = R_X B_n j; \quad (2)$$

$$U = R_X B_n I d, \quad (3)$$

где d – толщина образца; I – полная сила тока; R_X – коэффициент Холла; B_n – проекция величины магнитной индукции на плоскость, перпендикулярную пластине Холла.

Важным параметром для расчетов и измерений физических величин является коэффициент Холла, который изменяется при изменении внешних параметров, воздействующих на полупроводниковый материал датчиков.

В общем случае при наличии двух типов носителей заряда коэффициент Холла может зависеть от магнитной индукции. Для промежуточных полей коэффициент Холла можно представить в виде

$$R_X = \frac{(\rho - nb^2) + b^2 \mu_p^2 B^2 (\rho - n) 1}{(bn + \rho)^2 + b^2 \mu_p^2 B^2 (\rho - n)^2 e}, \quad (4)$$

где $b = \mu_n / \mu_p$. Это выражение справедливо для случая, когда время жизни (релаксации) носителей постоянно и не зависит от их скорости.

Коэффициент Холла обращается в нуль при

$$\rho = \frac{nb^2 (1 + \mu_p^2 B^2)}{1 + b^2 \mu_p^2 B^2}. \quad (5)$$

Измерения составляющих вектора индукции магнитного поля B , т. е. B_x , B_y , B_z в декартовой системе координат X , Y , Z осуществляются с использованием трех преобразователей (датчиков) Холла, размещенных в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, нормаль к которым проходит по осям X , Y , Z соответственно. Датчики размещены в центре защитной коробки в форме куба в соответствии с осями X , Y , Z . Эффект Холла заключается в том, что в полупроводниковой пластине (пленке) с протекающим током, помещенной в магнитное поле B , направленное по нормали к пластине, возникает ЭДС, обусловливаемая силой Лоренца.

Чувствительность преобразователя Холла Υ к магнитному полю B в режиме изменения ЭДС Холла описывается соотношением

$$\Upsilon = U_X / B = R_X I d^{-1} = I(\text{end})^{-1} = (P b \mu / I \text{den})^{1/2}, \quad (6)$$

где U_X – напряжение Холла на выходе датчика; B – величина индукции магнитного поля (одна из составляющих B_x , B_y , B_z , направленная по нормали к соответствующему датчику); P – мощность, рассеиваемая на ПХ;

$R_X = -1/en$ – коэффициент Холла; n и μ – концентрация и подвижность электронов; b , l и d – ширина, длина и толщина пленки; I – ток питания преобразователя; e – заряд электрона.

Составляющие вектора индукции магнитного поля B легко определить из измерений ЭДС датчиков Холла по каждому каналу соответственно:

$$\begin{aligned} B_x &= U_x/\Upsilon_1; \\ B_y &= U_y/\Upsilon_2; \\ B_z &= U_z/\Upsilon_3. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\Upsilon_1, \Upsilon_2, \Upsilon_3$ – магнитные чувствительности датчиков Холла, измеренные при постоянном магнитном поле (в статике наиболее точные измерения).

Для блока датчиков Холла были выбраны следующие номиналы:

$$\Upsilon_1 = \Upsilon_2 = \Upsilon_3 = (300 \pm 3) \text{ мкВ/мТл}. \quad (8)$$

Сигналы по каждому из каналов X, Y, Z подаются на первый каскад соответствующего усилителя с коэффициентами усиления $\Upsilon_x, \Upsilon_y, \Upsilon_z$ определяемыми отношениями $R_5/R_2; R_{13}/R_{10}; R_{21}/R_{18}$ соответственно. Отношения резисторов подбирались с точностью $\pm 2\%$

$$\Upsilon_x = \Upsilon_y = \Upsilon_z = (10 \pm 0,2). \quad (9)$$

Далее сигналы по каждому из каналов X, Y, Z подаются на второй каскад соответствующего усилителя с коэффициентами усиления $\Upsilon_x^*, \Upsilon_y^*, \Upsilon_z^*$ определяемыми соотношением $\Upsilon_x^* = R_8(R_6R_7/R_7 + R_6)^{-1}; \Upsilon_y^* = R_{16}(R_{15}R_{14}/R_{14} + R_{15})^{-1}; \Upsilon_z^* = R_{24}(R_{23}R_{22}/R_{23} + R_{22})$.

Отношения резисторов подбирались с точностью $\pm 2\%$

$$\Upsilon_x^* = \Upsilon_y^* = \Upsilon_z^* = (9,43 \pm 0,2). \quad (10)$$

Сигналы с выхода усилителя каналов X, Y, Z подаются на соответствующие входы плат АЦП системного блока компьютера.

Чувствительности прибора к индукции магнитного поля на входе платы АЦП получаются по каждому каналу перемножением выражений

$$V = V_x = V_y = V_z = \Upsilon_1\Upsilon_x^*\Upsilon_x^* = \Upsilon_2\Upsilon_y^*\Upsilon_y^* = \Upsilon_3\Upsilon_z^*\Upsilon_z^* = (28,3 \pm 1,4) \text{ мВ/мТл}. \quad (11)$$

Если в момент времени t на экране монитора ЭДС по каналам X, Y, Z равны U_x, U_y, U_z (мВ), то соответствующие составляющие вектора магнитной индукции (мТл) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} B_x &= U_x^*/V; \\ B_y &= U_y^*/V; \\ B_z &= U_z^*/V. \end{aligned} \quad (12)$$

Основная погрешность измерения не превышает $\pm 5\%$.

Модуль вектора магнитной индукции рассчитывается по формуле

$$B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2} = \frac{(U_x^{*2} + U_y^{*2} + U_z^{*2})^{1/2}}{V}. \quad (13)$$

Дополнительная погрешность, вызванная отклонением размещения оси, например X от заданного направления на угол β , вычисляется по формуле

$$\Delta x = \frac{B_x - B_x \cos(\beta)}{B_x} = 1 - \cos(\beta). \quad (14)$$

Расчетная дополнительная (приведенная) погрешность, выраженная в процентах от верхнего предела измерений (± 2 В), от изменения температуры окружающего воздуха на каждые 10°C по сравнению с комнатной не должна превышать $\pm 0,75\%$.

Анализ возможных технических задач, которые могут быть решены при помощи ИВК и его модификаций.

1. Известно, что одним из наиболее распространенных методов намагничивания различных изделий является импульсный метод – разряд батареи конденсаторов большой емкости через токовый проводник. При этом контроль параметров технологического процесса практически не производится или производится косвенным путем. Как показала практика, при этом не оптимизируется форма токового импульса, геометрия проводников и др. В частности, на АО «Атлант» при изготовлении из ферромагнитных лент магнитных вставок для холодильников, где применяются процессы импульсного намагничивания с помощью токов разрядки конденсаторов, периодически фиксируется технологический брак, и этот участок производства на сегодняшний день является проблемным и требует повышенного внимания. Использование магнитометрического ИВК позволит не только скорректировать параметры технологического процесса, но и значительно уменьшить употребление электроэнергии. Износ индукторов (основных функциональных деталей процесса намагничивания), обеспечивающих технологический процесс, также контролируется по регистрируемым величинам компонент индукции магнитного поля. Применение модификации магнитометрического ИВК целесообразно также для целей дефектоскопии как дополнительного метода обследования дефектных участков, совместно с традиционными используемыми методами ультразвуковой и СВЧ-дефектоскопии.

2. Не меньший интерес, например, для экологии представляет процесс взаимодействия сильных магнитных возмущений локального характера на поведенческое состояние людей и природы. Локальные магнитные возмущения (т. е. пространственно ограниченные и многократные изменения индукции магнитного поля, происходящие в кратковременные промежутки времени) могут вызывать болезненное состояние людей и т. д. Например, нахождение человека у рельс тормозящего поезда или электрички, вагонов метро и т. д. вынуждает объект подвергаться сильному нерегистрируемому (а значит, и не нормируемому) возмущению электромагнитного характера с увеличением от среднего значения в $10\text{--}1000$ раз. Поэтому технический прогресс должен обращать внимание на экологический мониторинг окружающей среды. Применение одной из модификаций данного комплекса в измерительно-диагностических целях позволяет объективно сертифицировать объекты по их техническому состоянию и экологической безопасности.

3. Проблема использования импульсных магнитных полей величиной в $1,5\text{--}2$ Тл приобрела в последнее время особую актуальность в медицине в связи с возможностью черепной стимуляции головного мозга и лечения таким образом неврологических заболеваний человека, а также наркомании.

Только в США за последний год запатентовано более 50 изобретений по устройствам создания импульсных магнитных полей определенной формы и длительности импульса магнитного поля. Поэтому тенденция в применении методов магнитной стимуляции человеческих органов требует применения аппаратов с высокой скоростью нарастания магнитной индукции вплоть до значений 10^5 Тл/с. Следовательно, должны развиваться и методы измерений импульсных магнитных полей в медицине. Поэтому возможна перспектива использования одной из модификаций комплекса и в медицине.

ВЫВОДЫ

1. Разработан измерительный комплекс, снабженный датчиками Холла и позволяющий регистрировать электромагнитное излучение, образующееся при быстро протекающих динамичных процессах в широком интервале температуры значений магнитного поля, например при взрывном легировании деталей.

2. Выполнены расчеты ЭДС магнитного поля и определена напряженность поля эффекта Холла, что послужило основой выбора параметров датчиков и основных элементов регистрирующего прибора с погрешностью не более 5%.

3. Измерительный комплекс обеспечивает регистрацию как электромагнитных полей, так и зондового тока плазмы, что позволяет использовать комплекс для ряда быстро протекающих процессов, таких как намагничивание изделий импульсным методом, образование электромагнитного излучения при торможении электропоездов, в ряде методов лечения с применением магнитного воздействия на человека.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и теплотехники

Поступила 6.06.2007

УДК 621.31-83-52

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Докт. техн. наук, проф. ФИРАГО Б. И., канд. техн. наук, доц. ОПЕЙКО О. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Для систем электропривода большое значение имеет обеспечение показателей качества при параметрических и внешних возмущениях. В [1–5] и других работах предложены методы решения задачи оптимального робастного управления, в частности синтеза линеаризованных систем с учетом параметрических возмущений объекта.

Целью работы является синтез системы электропривода переменного тока со скалярным управлением [6–8], обеспечивающего необходимые показатели качества динамики при параметрических и внешних возмущениях, удовлетворяющих заданным ограничениям. Двигатели переменного тока