

другого рабочего тела до величины, требуемой, например, для создания микроклимата в зданиях и сооружениях субъекта. В общем случае субъект для удовлетворения своих потребностей в тепле, холоде, электрической энергии должен создать запас термомеханической формы энергии, т.е.:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{1\text{т.м.}},$$

$$\Delta Q_{1\text{т.м.}} = (\Delta L_{\text{мех}} + \Delta U + \Delta U_{\text{дис}} + \Delta L_{\text{дис}}),$$

которая состоит из термической и механической форм энергии движущегося потока рабочего тела.

Именно этот суммарный запас энергии нужен для создания температурного, механического, электрического потенциалов. Этот запас необходим для совершения работы проталкивания жидкости по трубопроводам в рабочей части турбогенератора, холодильной установки, для технической работы вращения вала генератора с целью получения электричества. Суммарная энергия нужна для доставки теплоты в системы теплоснабжения и на погашение всех диссипационных составляющих, требуемых для обеспечения того или иного технологического производства:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{1\text{т.м.}} = & (\Delta U_{\text{мех}} + \Delta L_{\text{мех.т.}}) + \\ & + (\Delta U_{\text{мех.эл.}} + \Delta L_{\text{мех.эл.}}) + (\Delta U_{\text{дис}} + \Delta L_{\text{дис}}), \end{aligned}$$

где $\Delta U_{\text{дис}}$, $\Delta L_{\text{дис}}$ – необходимые расходы внутренней энергии и механической работы на диссипационные процессы. Таким образом, вся приходящая энергия уходит в окружающую среду:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{окр.ср.1.}} \rightarrow \Delta Q_1 = \Delta U + (\leftrightarrow) \\ \Delta L + \Delta U_{\text{дис}} + \Delta L_{\text{дис}} \rightarrow \Delta E_{\text{окр.ср.2.}}, \end{aligned}$$

тогда можно написать, что

УДК 681.05.015

$$\Delta E_{\text{окр.ср.1.}} = \Delta E_{\text{окр.ср.2.}}$$

Однако при рассмотрении последнего равенства следует иметь в виду, что субъект создает разность температурных, электрических потенциалов для совершения полезного действия. Количество энергии, взятое из окружающей среды, возвращается обратно в окружающую среду, но с гораздо меньшим потенциалом.

Все вышесказанное указывает на то, что первый и второй законы не могут быть поняты в раздельном их изложении. Только при интегральном подходе субъект может сформировать необходимую глубину понимания совместного действия двух существующих концептуальных положений. Именно такое интегральное представление позволяет с большей наглядностью описать основные закономерности взаимопревращения как минимум нескольких форм энергии. Такого рода интегральная общность после соответствующего разъяснения дает ключ к пониманию процессов, идущих в большинстве физико-технических систем.

Таким образом, после совершения субъектом термодинамического цикла по полезной переработке энергии вся оставшаяся, невостребованная энергия в виде теплоты с пониженными параметрами рассеивается в окружающую среду. Значит, задача технической организации состоит в том, чтобы последовательно создать нужные полезные реальности с конечной разностью термодинамических сил, термодинамических потоков с необходимыми свойствами рабочих тел и выгодно (в смысле ценообразования) их использовать.

Литература

1. Игонин, В.И. О принципах интегральности, системности и жизнеспособности / В.И. Игонин // Экология и безопасность. Газета МАНЭБ. – 2009. – № 7.
2. Игонин, В.И. Пути повышения эффективности тепловых энергетических систем / В.И. Игонин. – Вологда, 2007.

Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев

МОДАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В МЕТАЛЛУРГИИ

В статье представлена математическая модель определения параметров модального регулятора для электромеханической системы. Показана более высокая эффективность использования модального управления в автоматизированных электроприводах по сравнению с традиционными методами на примере металлургического агрегата.

Модальное управление, широкополосный стан, коэффициенты модального регулятора, параметры переходных процессов, двигатель постоянного тока.

The paper presents the mathematical model for determining the parameters of the modal control for electromechanical system. High efficiency of modal control in automated electric drive compared to traditional methods on the example of metallurgical units is considered in the paper.

Реализация высоких потенциальных возможностей, которыми обладают современные машины и технологии в металлургии, невозможна без использования систем автоматического управления. Наиболее перспективными, с точки зрения автоматизации, являются технологические процессы обработки металлов, осуществляемые на высокопроизводительном оборудовании в прокатном производстве обычно непрерывного действия. При этом наиболее распространенными задачами, которые решаются системой автоматизированного управления (САУ), являются: управление линейными и угловыми перемещениями рабочих органов машин, а также поддержание режимных параметров технологического процесса (натяжение, толщина металла и т.п.). В большинстве случаев одними из самых эффективных инструментов управления технологическими переменными промышленных установок, непосредственно связанными с качеством и количеством выпускаемой продукции, являются электромеханические системы (ЭМС), включающие в себя силовой преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и исполнительный орган. Как следствие, к системам управления ими предъявляются и наиболее высокие требования [3], [4].

Однако в настоящее время для подавляющего большинства применяемых в промышленности ЭМС характерно использование одноконтурных САУ с типовыми П, ПИ, ПИД-регуляторами или систем подчиненного регулирования координат [2]. Для инерционных объектов невысокого порядка, характеризующихся отсутствием взаимного влияния координат состояния и выраженных колебательных свойств, это является оправданным и позволяет строить системы автоматического управления, отвечающие достаточно высоким технологическим требованиям. Использование таких САУ оправдано и для более сложных объектов, но при невысоких технических требованиях к качеству процессов управления.

В современных динамических системах применение типовых законов регулирования в высокودинамичных системах дает неудовлетворительные результаты. Так, при использовании типового ПИ-регулятора скорости в электроприводе одного из рольгангов широкополосного прокатного стана (ШПС) отсутствует стабилизация скорости, и возникают значительные быстропотекающие динамические отклонения скорости (рис. 1), достигающие (80 – 100) % от установившегося значения.

Повышение требований к качеству управления влечет за собой необходимость учета более тонких эффектов функционирования объектов управления и, как следствие, усложнение их математических моделей, проявляющееся в появлении новых, скрытых ранее, факторов сложности и требует применения более совершенных методов управления, обладаю-

щих широкими функциональными возможностями в обеспечении качества протекающих процессов [5].

Еще недавно считалось, что использование более совершенных методов управления сдерживается недостаточным быстродействием управляющих контроллеров, не позволяющих реализовывать сложные алгоритмы. Однако с появлением быстродействующих микропроцессорных средств положение принципиально не изменилось. Очевидно, это связано с тем, что наука предлагает практикам методы, недостаточно адаптированные к производственному использованию. Одним из наиболее перспективных методов синтеза управляющих устройств, используемых в системах автоматизации, является модальное управление, предоставляющее разработчику широкие возможности в обеспечении требуемых показателей качества протекания процессов: повышение быстродействия, устранение колебательности при наличии упругости и люфтов в кинематических связях и т.д. В связи с этим в последнее время вопросы анализа и синтеза систем модального управления (СМУ) электроприводами становятся все более актуальными, им уделяется большое внимание [6].

Важную роль в теории и практике автоматического управления стала играть проблема обеспечения параметрической грубости (низкой параметрической чувствительности к изменению параметров режима системы в процессе ее эксплуатации) синтезируемых динамических систем, т.е. сохранения их работоспособности, а также основных показателей качества в условиях возможных вариаций параметров объекта управления (ОУ).

Еще одной важной проблемой является обеспечение статической точности СМУ. Ее повышение традиционно достигается двумя способами: изменением характеристического полинома или введением интегральной составляющей в закон управления [1], [8]. Использование первого требует изменения динамических показателей СМУ, применение второго – снижает параметрическую грубость и повышает вероятность выхода САУ на аварийные режимы работы: возникновение автоколебаний в замкнутых контурах регулирования и т.п. Таким образом, существует необходимость разработки новых способов обеспечения показателей точности и надежности работы САУ при использовании систем модального управления, лишенных этих недостатков.

Все элементы ЭМС имеют ограничения на величины допустимых значений переменных состояния: токов, моментов, скоростей [1]. Их превышение может привести к выходу из строя электрических и механических компонентов систем. Поэтому еще одной важной практической проблемой является ограничение значений переменных СМУ в переходных режимах, возникающих при отработке задающих и возмущающих воздействий.

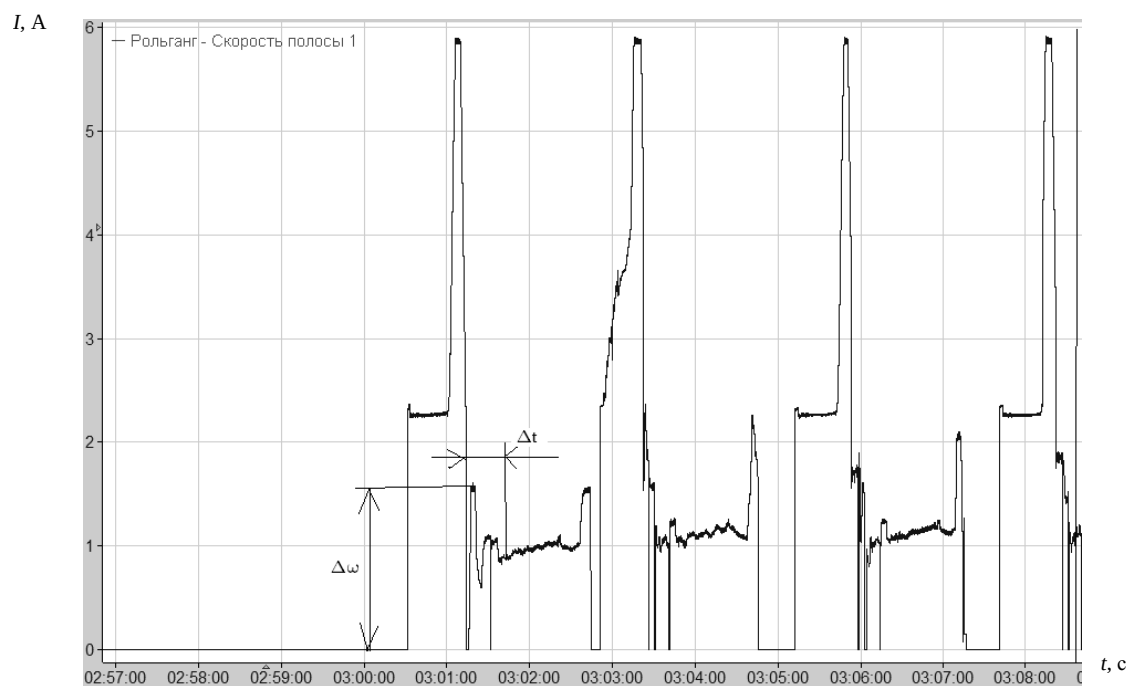


Рис. 1. График изменения скорости рольганга ШПС

Разнообразие структурных решений СМУ [6], зависимость помехоустойчивости, параметрической грубости и динамических свойств систем от дискретности информационно-управляющих сигналов по времени и по уровню, возрастание сложности и стоимости цифровых элементов при повышении их разрядности, быстродействия и т.п. делают актуальной задачу разработки методики проектирования СМУ, увязывающую особенности структурных решений и практической реализации цифровых управляющих устройств. И, наконец, эффективное применение методов модального управления невозможно без разработки соответствующего программного обеспечения [6], позволяющего проводить анализ свойств объектов и синтез управляющих устройств.

Суть модального управления состоит в определении численных значений коэффициентов передачи безынерционных обратных связей (ОС) по всем переменным состояниям объекта с целью обеспечения заданного распределения корней характеристического уравнения замкнутой САУ.

Корни характеристического уравнения САУ полностью определяют ее свободное движение

$$x(t) = c_1 e^{-p_1 t} + c_2 e^{-p_2 t} + \dots + c_n e^{-p_n t}.$$

Каждая составляющая $c_i e^{-p_i t}$ такого движения, соответствующая отдельному корню p_i (или паре комплексно сопряженных корней), называется *модой* — отсюда и термин «модальное управление». Корни уравнения однозначно зависят от его коэффициентов, поэтому модальное управление можно трактовать как целенаправленное изменение коэффициентов характеристического уравнения объекта с помощью безынерционных ОС.

В технической литературе приводятся различные

наборы стандартных характеристических полиномов различного порядка и соответствующие им графики переходных процессов с указанными на них показателями качества (биномиальные полиномы Ньютона, полиномы Баттерворта и др.) [3]. Исходя из порядка объекта и заданных в техническом задании показателей качества САУ электроприводом, можно выбрать требуемый график переходного процесса и соответствующий ему «стандартный» характеристический полином, а затем, используя излагаемый далее алгоритм, выполнить синтез модальных ОС, обеспечивающих заданные показатели качества САУ. Таким образом, теория модального управления позволяет осуществлять синтез многоконтурных замкнутых САУ с заранее заданными показателями качества.

Отсюда следуют четыре главных преимущества модального управления:

1. Синтезированная модальная САУ не требует проверки на устойчивость (так как она заранее должна быть устойчивой и обладать требуемой степенью устойчивости).
2. Синтезированная модальная САУ не требует введения дополнительных корректирующих устройств (так как она сама уже удовлетворяет требуемым показателям качества).
3. Введение модальных ОС, в силу их безынерционности, не повышает порядок объекта и не нарушает его управляемость и наблюдаемость (что происходит при введении пассивных инерционных корректирующих устройств).
4. Относительная простота и экономичность технической реализации модальных САУ (реализации модальных ОС может быть выполнена с помощью маломощных измерительно-преобразовательных устройств и электронных усилителей с малыми тепловыми потерями).

Рассмотрим методику синтеза модального регулятора в САУ ЭМС. Пусть задано уравнение полностью управляемого объекта с одним входом:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица состояния размерностью $n \times n$; $\mathbf{B}$ – матрица управления размерностью $n \times 1$; $\mathbf{U}$ – вектор управляющих воздействий.

Требуется определить вектор $\mathbf{K}$ коэффициентов передачи $k_i (i = \overline{1, n})$ модального регулятора

$$\mathbf{U} = -k_1 x_1 - \dots - k_n x_n = -\mathbf{K}^T \mathbf{X}, \quad (2)$$

при которых замкнутая САУ имела бы желаемый «стандартный» характеристический полином

$$g(p) = p^n + g_{n-1}p^{n-1} + \dots + g_1p + g_0. \quad (3)$$

Решение задачи базируется на использовании следующей теоремы [6]: пусть матрицы полностью управляемой системы представлены в двух различных базисах $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}\}$ и $\{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}\}$. Тогда матрица преобразования $\mathbf{P}$ пары $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}\}$ в пару $\{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}\}$ единственна и вычисляется по формуле

$$\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{R}^{-1}, \quad (4)$$

где матрицы

$$\mathbf{R} = (\mathbf{B} : \mathbf{A}\mathbf{B} : \mathbf{A}^2\mathbf{B} : \dots : \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B})_{n \times n}; \\ \tilde{\mathbf{R}} = (\tilde{\mathbf{B}} : \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{B}} : \tilde{\mathbf{A}}^2\tilde{\mathbf{B}} : \dots : \tilde{\mathbf{A}}^{n-1}\tilde{\mathbf{B}})_{n \times n} \quad (5)$$

На основании (1), (2) запишем уравнение свободного движения замкнутой САУ:

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}^T)\mathbf{X} \quad (6)$$

Определяем характеристический полином матрицы $\mathbf{A}$:

$$A(p) = |p\mathbf{E} - \mathbf{A}| = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_1p + a_0. \quad (7)$$

Записываем соответствующую ему пару $\{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}\}$ в каноническом базисе:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & -a_{n-2} & -a_{n-1} \end{pmatrix}; \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Теперь, согласно (3), (4), (5), можно вычислить

матрицу канонического преобразования $\mathbf{P}$ и записать уравнение объекта (1) в канонической форме

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{U}}, \quad \mathbf{U} = -\tilde{\mathbf{K}}^T \tilde{\mathbf{X}}, \quad (9)$$

где

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}; \quad \tilde{\mathbf{B}} = \mathbf{P}\mathbf{B}; \\ \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{P}\mathbf{X} \Rightarrow \mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}\tilde{\mathbf{X}}; \quad \tilde{\mathbf{K}}^T = \mathbf{K}^T\mathbf{P}^{-1}; \quad (10)$$

при этом, естественно, матрицы $\tilde{\mathbf{A}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$ будут иметь нормальную форму (8).

На основании (9), подобно (6), получаем

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T)\tilde{\mathbf{X}}. \quad (11)$$

Для полинома (2), подобно (8), можно записать

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -g_0 & -g_1 & \dots & -g_{n-2} & -g_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Из (11), (12) очевидно, что

$$\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T = \tilde{\mathbf{G}}. \quad (13)$$

Поскольку

$$\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{K}}^T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot (\tilde{k}_1 \quad \tilde{k}_2 \quad \dots \quad \tilde{k}_{n-1} \quad \tilde{k}_n) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \tilde{k}_1 & \tilde{k}_2 & \dots & \tilde{k}_{n-1} & \tilde{k}_n \end{pmatrix},$$

то согласно (13), с учетом (8), (12), получаем

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -(a_0 + \tilde{k}_1) & -(a_1 + \tilde{k}_2) & \dots & -(a_{n-2} + \tilde{k}_{n-1}) & -(a_{n-1} + \tilde{k}_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -g_0 & -g_1 & \dots & -g_{n-2} & -g_{n-1} \end{pmatrix}.$$

Отсюда найдем коэффициенты модального регулятора

$$\tilde{k}_1 = g_0 - a_0; \quad \tilde{k}_2 = g_1 - a_1; \quad \dots;$$

$$\tilde{k}_{n-1} = g_{n-2} - a_{n-2}; \quad \tilde{k}_n = g_{n-1} - a_{n-1}$$

или

$$\tilde{k}_i = g_{i-1} - a_{i-1}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Таким образом, коэффициенты передачи модального регулятора (модальных обратных связей) в каноническом виде определяются как разность соответствующих коэффициентов желаемого «стандартного» характеристического полинома САУ (3) и характеристического полинома объекта (7).

Используя (10), находим искомую матрицу строку коэффициентов передачи модального регулятора в исходном базисе:

$$\mathbf{K}^T = \tilde{\mathbf{K}}^T \mathbf{P}. \quad (14)$$

Для проверки полученного решения задачи целесообразно, согласно (6), (14), вычислить матрицу

$$\mathbf{G}' = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}^T$$

и определить ее характеристический полином

$$G'(p) = |p\mathbf{E} - \mathbf{G}'| = p^n + g'_{n-1}p^{n-1} + \dots + g'_1p + g'_0.$$

Отметим совпадение коэффициентов этого полинома с соответствующими коэффициентами.

В качестве примера рассмотрена синтезированная САУ модального управления для ЭМС «тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока» (ТП-ДПТ) с модальным регулятором (МР). Напряжение управления U_y формируется сравнением напряжения задания U_z и напряжения модального регулятора U_{mr} .

Для реализации этого варианта МР необходимо провести измерения или вычисления трех переменных: угловой скорости ω , углового ускорения $d\omega/dt$ и производной тока якоря $dI_\# / dt$. Выполним настройку на биномиальное распределение корней, порядок характеристического полинома равен 3. Этот способ

заключается в формировании всех корней характеристического уравнения в одной точке с координатами

$$(-\omega_0; 0j), \quad \text{здесь} \quad j \equiv \sqrt{-1},$$

где частота $\omega_0 > 0$ на комплексной плоскости, значение ω_0 определяется требованиями к быстродействию системы (чем больше ω_0 , тем меньше время регулирования).

Тогда характеристический полином обращается в бином Ньютона $(p + \omega_0)^n$, раскрывая который, получаем следующие выражения для характеристического полинома:

$$p^3 + 3 \cdot \omega_0 \cdot p^2 + 3 \cdot \omega_0^2 \cdot p + \omega_0^3.$$

Биномиальное распределение применяется в тех случаях, когда необходимо обеспечить монотонный переходный процесс.

Расчеты выполнены для одного из высокодинамичных рольганговых двигателей ШПС мощностью 25 кВт, 1000 об./мин. Показатели качества переходных процессов подобных устройств определяют эффективность, производительность и надежность работы прокатного оборудования. Для сравнения основных параметров качества переходных режимов аналогичные вычисления произведем для стандартной двухконтурной системы подчиненного регулирования (СПР). Моделирование переходных режимов осуществлялось в математическом пакете MATLAB.

Моделируем процесс управляемого пуска системы с номинальной нагрузкой. В качестве возмущения рассмотрим сброс 50 % нагрузки через 2,5 с. Сравнение графиков изменения параметров режима при управлении и возмущении приведены на рис. 2 (ток якоря) и рис. 3 (угловая скорость).

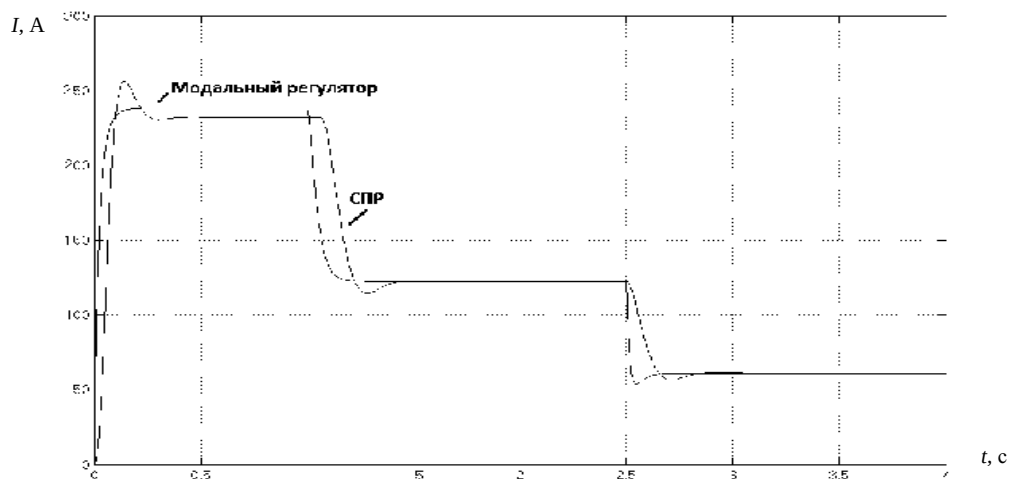


Рис. 2. Графики изменения тока якоря двигателя постоянного тока рольганга прокатного стана при стандартном (СПР) и модальном управлениях

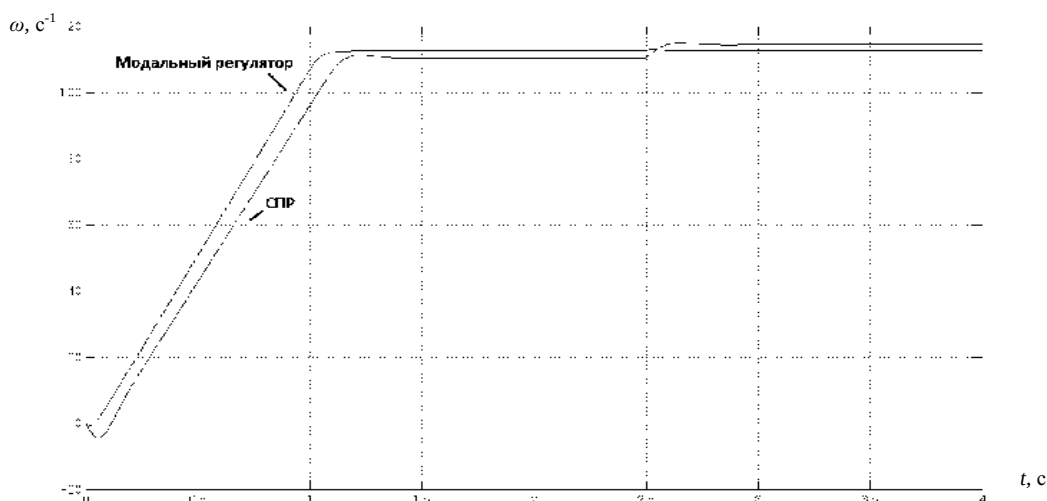


Рис. 3. Графики изменения угловой скорости двигателя постоянного тока рольганга прокатного стана при стандартном (СПР) и модальном управлениях

Результаты сравнения изменения основных параметров при управлении и возмущении (время переходного процесса t_{mn} , перерегулирование σ , статическая ошибка ε и показатель колебательности M) сведен в таблицу.

Перерегулирование σ характеризует динамическую ошибку начала переходного процесса, а показатель колебательности M — количество полных колебаний до достижения установившегося режима. Сравнение параметров показывает, что САУ ЭМС с модальным управлением по всем показателям превосходит классическую систему подчиненного регулирования: по отсутствию перерегулирования и, особенно, по быстродействию: время переходных процессов t_{mn} в контуре тока уменьшается от 0,6 с до 0,15 с, т.е. в 4 раза при реакции на управление и от 0,5 с до 0,15 с, т.е. в 3,5 раза при реакции на возмущение; t_{mn} в контуре скорости уменьшается от 1,1 с до 0,05 с, т.е. в 1,5 раза при реакции на управление и от 0,4 с до 0,05 с, т.е. в 8 раз при реакции на возмущение.

Таблица

Основные показатели качества переходных процессов

Параметр	Система	При управлении				При возмущении			
		t_{mn}, c	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M	t_{mn}, c	$\sigma, \%$	$\varepsilon, \%$	M
Ток якоря	САУ с МР	0,15	0	0	0	0,12	5	0	0,5
	САУ с СПР	0,6	16	0	1	0,5	8	0	1
Скорость	САУ с МР	1,1	0	0	0	0,05	0	0	0
	САУ с СПР	1,6	4	-5	0,5	0,4	8	4	0,5

Таким образом, при известной структуре матриц ЭМС как объекта управления расчет модального регулятора проводится непосредственно путем приравнивания коэффициентов характеристического полинома замкнутой системы и желаемого характеристического полинома. При решении задачи повы-

шения качества переходных режимов для полностью управляемой системы достаточно в качестве желаемого характеристического полинома задать устойчивый полином стандартной формы распределения корней и решить соответствующую задачу модального управления.

Выводы:

1. Разработана математическая модель определения параметров модального регулятора желаемой формы.
2. Проведено исследование показателей качества переходных процессов САУ ЭМС традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором.
3. Показана более высокая эффективность использования модального управления электроприводами в металлургических агрегатах по сравнению с традиционными регуляторами.

Литература

1. Башарин, А.В. Управление электроприводами / [А.В. Башарин и др.] — Л., 1982.
2. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. — М., 1980.
3. Кузовков, Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. — М., 1976.
4. Кухаренко, Н.В. Синтез модальных регуляторов при неполной управляемости объектов / Н.В. Кухаренко // Техническая кибернетика. — 1992. — № 3. — С. 3 — 10.
5. Мелешкин, А.И. Модальный синтез регуляторов пониженного порядка / А.И. Мелешкин. — Новосибирск, 1999.
6. Панкратов, В.В. Специальные разделы теории автоматического управления / В.В. Панкратов, О.В. Нос. — Новосибирск, 2011. — Ч. 1. Модальное управление и наблюдатели.
7. Ротач, В.Я. Автоматизация настройки систем управления / [В.Я. Ротач и др.]; Под ред. Ротача В.Я. — М., 1984.
8. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. — М., 1987.