



### Список литературы

1. Пат. 9003 V Україна, МПК С 08 j3/02, С 08 F 12/00, В 22 С1/16. Застосування живичного скипидару як розчинника для відходів пінополістиролу / О. Й. Шинський, Є. В. Терліковський, А. О. Стрюченко та ін. – Опуб. 15.09.2005, Бюл. № 9.
2. Пат. 77338 С2 Україна, МПК В 22 С9/10, С 08 L 25/00, С 08 F 12/00, С 09 F 3/00. Полістирольне зв'язуюче для виготовлення ливарних форм та стержнів / О. Й. Шинський, В. Л. Найдек, А. О. Стрюченко та ін. – Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
3. Пат. 77105 С2 Україна, МПК В 22 С 9/10. Суміш для ливарних форм та стержнів / О. Й. Шинський, В. Л. Найдек, А. А. Стрюченко та ін. – Опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.
4. Апатова Л. Д., Ладарева Ю. Ю., Рыбицкий А. И. Технология получения и применения связующего материала и формовочной смеси на основе отходов пенополистирола // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 73-76.

Поступила 17.03.2010

**УДК 621.744.362**

**П. В. Русаков**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ДУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВИБРОФОРМОВКИ.

### Сообщение 2

*Раскрыты особенности дуального частотно-силового управления процессом вибрационного уплотнения литейных форм. Установлены общие принципы электромеханической адаптации силового поля путем создания условий пространственного перемещения вектора поляризованной вибрационной силы. Предложена методология синтеза самонастраивающихся вибрационных систем с дуальным управлением.*

**Ключевые слова:** литейная форма, формовочная смесь, вибрационная формовка, дуальное управление, вибрационная машина.

*Розкрито особливості дуального частотно-силового управління процесом вібраційного ущільнення ливарних форм. Встановлено загальні принципи електромеханічної адаптації силового поля шляхом створення умов просторового переміщення вектора поляризованої вібраційної сили. Запропонована методологія синтезу самоналагоджувальних вібраційних систем з дуальним управлінням.*

**Ключові слова:** ливарна форма, формувальна суміш, вібраційне формування, дуальне управління, вібраційна машина.

*The features of adaptive control the process of vibration compression of castings forms are exposed in work. General principles the adaptation of the vibration force are set. Methodology of synthesis of the self-adjusting systems is offered.*

**Keywords:** casting form, sand blend, vibration flask molding, dual-mode control, casting technological system vibration stand.

### Введение

Специфика вибрационных процессов уплотнения сыпучих формовочных материалов в определенной степени связана с наличием в них двух полярных свойств: гравитационного осыпания массы под действием случайных возмущений или достижения статической устойчивости сжатой смеси в литейной оснастке. В кварцевых формовочных песках имеются указанные свойства, так как они представляют собой совокупность твердых частиц, размеры которых позволяют считать силы взаимодействия между частицами малыми по сравнению с их массой, а движение частиц определяется сцеплением, трением и столкновением между ними. Совокупность разнообразных составов формовочных песчаных смесей и методов их уплотнения дает достаточно возможностей для управления процессами получения литейных форм с целью изготовления сложных отливок.

Однако, для качественного уплотнения формовочной массы необходимо оптимально управлять процессом виброформовки, то есть выбирать виды и параметры технологических воздействий на смесь, которые учитывали бы реологические, теплофизические и прочие свойства смеси, размеры и конфигурацию модельно-опочной оснастки, различные конкретные производственные ситуации и т. п. В настоящее время отсутствует единая универсальная модель уплотнения песчаных литейных форм, которую можно было бы без значительной доработки реализовать на одной из действующих систем автоматизированного управления процессом формообразования. Специфика вибрационного уплотнения формовочной смеси заключается в том, что необходимо обеспечить и поддерживать интенсивное безотрывное движение частиц формовочного материала, чтобы заполнить сложные по форме пустоты и горизонтальные отверстия модели песком и достичь при этом максимального его уплотнения.

Каким образом можно осуществить управление параметрами силового вибрационного поля в данной ситуации, не зная реальных плавающих реологических свойств формовочных смесей и изменяющихся статических и динамических параметров литейной формы? Постоянно существующая недостаточность априорной информации о технологических параметрах силовых воздействий приводит к необходимости предварительного, в определенном смысле целевого изучения, объекта управления\* перед тем, как начать рабочий цикл вибрационного уплотнения. Но можно ли в процессе виброформовки параллельно определять оптимальные параметры управления? Как показывают проведенные исследования такие возможности практически существуют.

### *Постановка проблемы*

В работах [1-7], посвященных теории виброформовки и синтеза вибрационных литейно-технологических систем (ВЛТС), проведен анализ многопараметрических моделей управления процессами вибрационного уплотнения формовочных смесей. Однако в них не в полной мере освещены проблемы, касающиеся выбора оптимальных режимов виброуплотнения форм. Данная работа продолжает развитие теории управления ВЛТС и совершенствования процессов формообразования. В ней раскрыты особенности дуального частотно-силового управления процессом уплотнения литейных форм и электромеханической адаптации силового поля путем создания условий пространственного перемещения вектора поляризованных вибрационных возмущений.

Известно, что для получения удовлетворительных характеристик систем управления необходимы методы, основанные на принципах структурной и параметрической адаптации управляющих устройств [8-11]. Эти методы развиваются в рамках прямых или непрямых подходов к задаче синтеза алгоритмов адаптации систем. В то же время известность приобретают и методы, в которых предпочтение отдается достоверности получаемых результатов в условиях неопределенности, другими словами, получению гарантированного результата. Вопрос консолидированного

---

\*Под объектом управления в дальнейшем понимают систему, включающую литейную форму и устройство вибрационной обработки формы

применения этих методов в задачах синтеза сложных мехатронных ЛТС не считается изученным полностью.

Дуальное управление предусматривает активное изучение случайным образом изменяющихся характеристик объекта управления [12]. При этом на вход объекта подаются «изучающие» воздействия, а реакция объекта анализируется управляющим устройством, таким образом, управляющие воздействия используются не только для управления объектом, но одновременно также и для его изучения. В этой ситуации управляющие силовые воздействия носят информативный характер. Они служат как средством изучения, познания объекта, так и направления его к желаемому состоянию, то есть оптимальному. Такое управление, характеризуемое как дуальное, носит двойственный характер, в котором всегда существует противоречие между познавательной и исполнительной целями силового воздействия. Успешное управление возможно, если свойства объекта в процессе динамического познания становятся хорошо известными и управляющее устройство быстро реагирует на изменение состояния объекта. Следовательно, применение принципов дуального управления и методов адаптации силового вибрационного воздействия на объект определяют синтез и создание гибких вибрационных систем, приспособляющихся к меняющимся в динамике реологическим свойствам формовочных сред. Указанные системы должны быть более эффективными, чем ранее известные, и обеспечивать движение формовочной среды в полости моделей и другие элементы литейной формы при условии оптимального силового воздействия на объект.

### *Исследование методологии синтеза самонастраивающихся ВЛТС*

Для оценки основных параметров вибрационного уплотнения необходимо знать обусловленные технологическим процессом требуемые кинематические параметры движения рабочего органа вибрационной машины. К ним следует отнести основную частоту, амплитудный и фазовый спектры ускорения, форму траекторий движения характерных точек рабочего органа и ориентацию траекторий в пространстве, допустимую или необходимую неравномерность эпюры размахов колебаний точек на поверхности литейной формы. Задание указанных кинематических параметров должно исходить из учета состава и свойств формовочной смеси, размеров и конфигурации литейной формы, а также необходимой продолжительности вибрирования. Определение количественных зависимостей между перечисленными факторами и задаваемыми параметрами машины возможно на основе законов вибрационного уплотнения формовочных смесей и теории управления, которая должна быть математически сформулирована и экспериментально подтверждена. Поскольку ни одна из выдвигающихся гипотез не охватывает проблему с достаточной полнотой и обоснованностью и не стала теорией в указанном смысле, то разработка принципов дуального управления процессами вибрационной формовки является одним из решений указанной проблемы.

Заметим, что, согласно традиционной методологии, самонастройка динамических параметров ВЛТС заключается в обеспечении желаемых свойств в условиях изменяющейся внешней среды, оказывающих свое влияние на динамические характеристики объекта управления. При обобщенном подходе к рассматриваемой проблеме можно констатировать, что желаемые свойства и качество достаточно часто задаются моделью, которая реализуется в явном или неявном виде, причем динамические свойства самой модели могут быть как постоянными, так и изменяемыми во времени, что в реальных задачах является более предпочтительным. Разомкнутые и замкнутые аналитически самонастраивающиеся ВЛТС должны функционировать в соответствии с критерием первичной оптимизации, обусловленным конкретной целью управления. Узлы и блоки самонастройки в самонастраивающейся системе должны функционировать по замкнутому циклу в соответствии с критерием вторичной оптимизации вида  $I = \text{extr}$ . Необходимо отметить, что такая самонастройка предусматривает изменение динамических свойств системы управления при помощи изменения ее рабочих параметров. Самонастройка может быть обеспечена по отработке внешних воздействий или коррекции внутренних свойств, например, изменение свойств формовочной смеси или массы формы, влияющих на рабочие

параметры и нарушающие оптимальные настройки системы [3-5]. Следует также заметить, что возможность и качество организации ВЛТС с элементами адаптации зависят от объема и объективности априорной информации об изменении внешних воздействий и полезных сигналов. Данный недостаток практически может быть компенсирован одновременным применением в системе нескольких датчиков наблюдения — измерительных устройств и средств диагностирования, функционирующих на различных физических принципах. Кроме того, в ВЛТС достаточно успешно можно использовать методы косвенных измерений, реализуемые при программном или микропроцессорном управлении системой. Для ВЛТС, рассматриваемых в качестве объекта исследования, аналитическую самонастройку можно предусмотреть, а также качественно и эффективно организовать в следующих случаях [5, 6]:

- если аналитические выражения, описывающие полезные сигналы (например, сигнал управления частотой и ускорением вибрации), заранее известны, но неизвестны точные значения его параметров, при этом также должны быть известны статические характеристики помех, поступающих в ВЛТС по каналам управления и возмущения;

- если известен полезный сигнал и достоверно установлено отсутствие помех в канале управления; информация о статических характеристиках помех при этом неизвестна.

Методология синтеза ВЛТС, функционирующих по принципам аналитической самонастройки, имеет ряд принципиальных особенностей, на рассмотрении которых необходимо остановиться подробнее. Во-первых, синтез данного класса объектов должен выполняться по конечной цели управления, то есть по предельному значению показателей качества (например, по точности или быстродействию системы). Во-вторых, необходимо учитывать, что реальные мехатронные системы, в которых конструктивно не предусмотрена самонастройка, всегда функционируют с действующими отклонениями  $\varepsilon$  от оптимального режима. При этом в качестве критериев оценки значений действующих величин отклонений можно использовать частные критерии [13]. Рассмотрим их.

Критерий минимума среднеквадратичной ошибки  $\varepsilon_{\text{ск}}$  в каждый момент времени при заданном законе изменения динамической ошибки  $\varepsilon_{\text{до}}(t)$

$$\varepsilon_{\text{до}}(t) = \min \text{ при } \varepsilon_{\text{д}}(t) = \varepsilon_{\text{до}}(t).$$

Критерий минимума квадрата динамической ошибки  $\varepsilon_{\text{д}}$  при пропорциональной связи динамической и среднеквадратической ошибок

$$|\varepsilon_{\text{д}}|^2(t) = \min \text{ при } |\varepsilon_{\text{д}}|^2(t) = a^2(t) \varepsilon_{\text{ск}}(t),$$

где  $a(t)$  – известный коэффициент пропорциональности.

Статический критерий первичной оптимизации для рассматриваемой системы можно сформулировать с учетом ограничений на промежуточные переменные  $U(t)$  системы управления

$$U^2(t) = \min \text{ при } \varepsilon_{\text{д}}(t) = \varepsilon_{\text{до}}(t),$$

например, в следующем виде:

$$\int_{T_i}^{T_{i+1}} \left[ \varepsilon_{\text{д}}^2(t) + \lambda^2(t) \varepsilon_{\text{ск}}^2(t) \right] dt = \min.$$

Заметим, что физический смысл сформулированного критерия заключается в обеспечении экстремума интегрального показателя качества цели управления

Для рассматриваемого класса объектов критерием первичной оптимизации

может являться, например, условие максимума быстродействия или обеспечение инвариантности к внешним возмущениям. Вторичная оптимизация, в свою очередь, применяется для совершенствования алгоритма разомкнутой самонастройки мехатронной ЛТС и технически реализуется во введении управления некоторыми рабочими параметрами на основе информации от предварительного анализа отклонений текущего режима реального функционирования от изначально сформированного оптимального режима.

### *Алгоритм синтеза дуального управления процессом виброформовки*

Построим алгоритм управления, функционирующий на основе непрерывно поступающих данных о состоянии объекта управления. При этом процесс идентификации на каждом шаге должен быть совмещен с процессом управления.

*1 этап.* Исследование требований технологического процесса, условий и факторов внешней среды. Выявление в объекте управления рабочих параметров, влияющих на окончательное распределение плотности в объеме песчаной формы: внешние воздействия, свойства смеси, свойства модели. К внешним воздействиям относим гравитационное и электромагнитное поля, силовые механические воздействия и т. д. Свойства смеси и свойства модели: реологические – пластичность, текучесть; теплофизические – теплоемкость, теплопроводность; механические и термические свойства. Перечисленные параметры являются функциями трех пространственных координат и времени, то есть процессы, протекающие в формовочной смеси при формообразовании, носят переходный характер и управление ими требует тщательного учета механизма уплотнения в том или ином случае, а также построения адекватных моделей, специализированных для целей управления.

*2 этап.* Формулирование критериев самонастройки по каждому замкнутому циклу системы, которые напрямую или косвенно связаны с критериями первичной оптимизации и зависят от настраиваемых параметров.

*3 этап.* Синтез и разработка метода прикладной реализации алгоритма дуального управления.

Исходя из рассмотренных вариантов самонастраивающихся ВЛТС, можно сформулировать ряд частных процедур, образующих алгоритм управления:

- синтез и первичная оптимизация модели устройства [14]; определение параметров и возможных диапазонов изменений внешних воздействий;
- настройка параметров оптимальной модели по параметрам внешних воздействий; идентификация объекта управления;
- настройка параметров регуляторов по рабочим параметрам оптимальной модели и объекта управления;
- организация и реализация алгоритма вторичной оптимизации контуров самонастройки.

### *Формирование и реализация алгоритма управления ВЛТС*

Сформируем укрупненный алгоритм дуального управления процессом виброформовки (рис. 1), из которого видно, что дуальность управления заключается в совмещении процесса неявной идентификации с процессом управления (прогнозированием) по текущим данным эксплуатации объекта. Обновление параметров модельного блока, модельной оснастки и параметров формовочной смеси на каждом интервале дискретности позволяет практически непрерывно учитывать изменение параметров объекта. Анализируя предложенный алгоритм, следует отметить, что уже на стадии синтеза необходимо рассматривать вопросы его последующей практической реализации. При этом существующие стандартные вибрационные системы в большинстве случаев не позволяют обеспечить точную и адекватную его реализацию, что связано со сложностями технической реализации и поиска конструктивных решений по управлению отдельными параметрами процесса вибрационного нагружения. Рассмотрим процесс синтеза мехатронной ВЛТС с дуальным управлением в соответствии блок-схемой, приведенной на рис. 1.

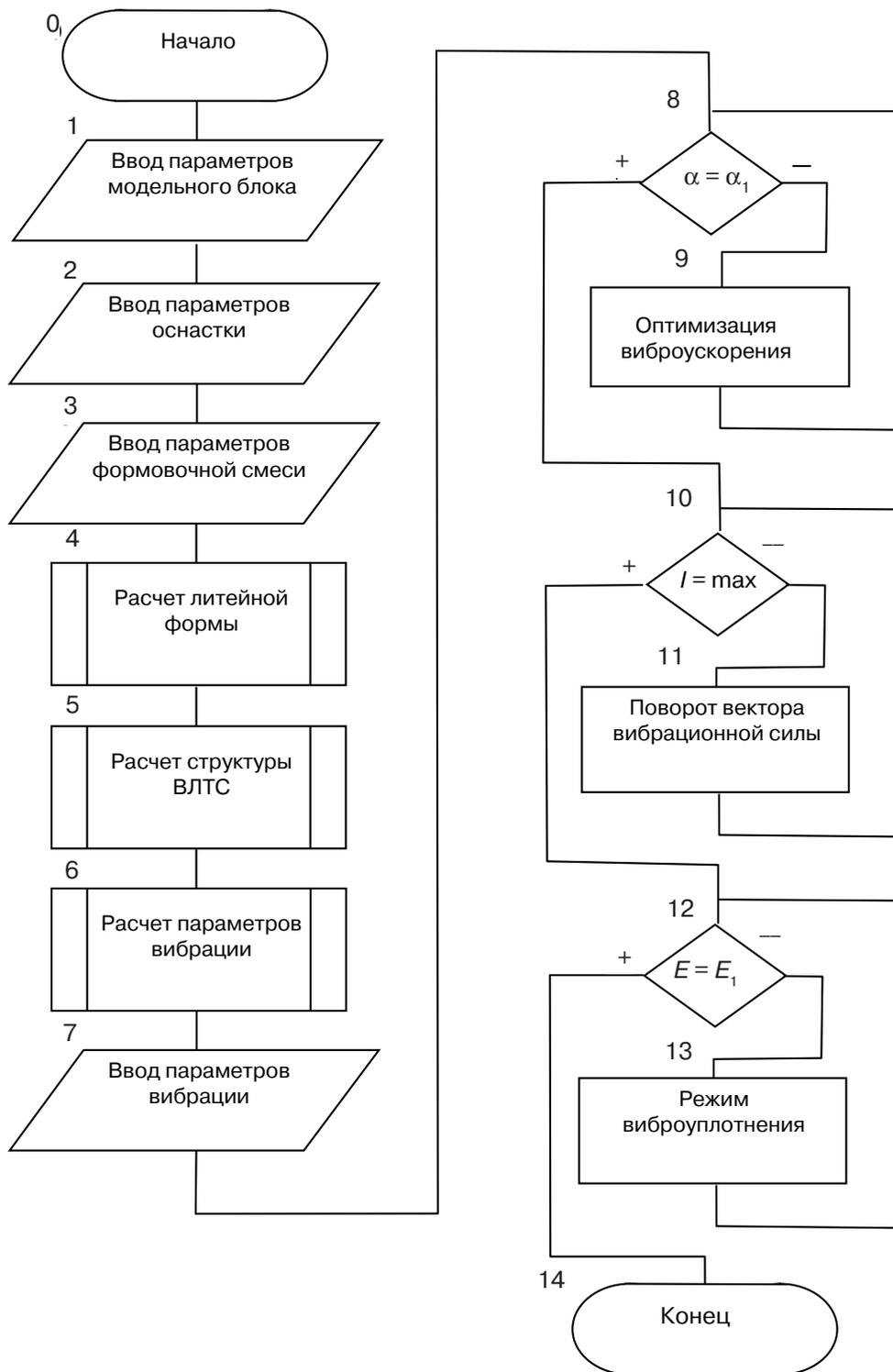


Рис. 1. Укрупненная блок-схема управления процессом виброформовки

*Синтез мехатронной ВЛТС с дуальным управлением*

Структурная схема самонастраивающейся поисковой системы управления вектором поляризованной вынуждающей силы по критерию максимума дилатансии формовочной среды при условии поддержания заданной частоты вибрации и ускорения показана на рис. 2. Для полного представления конструктивных

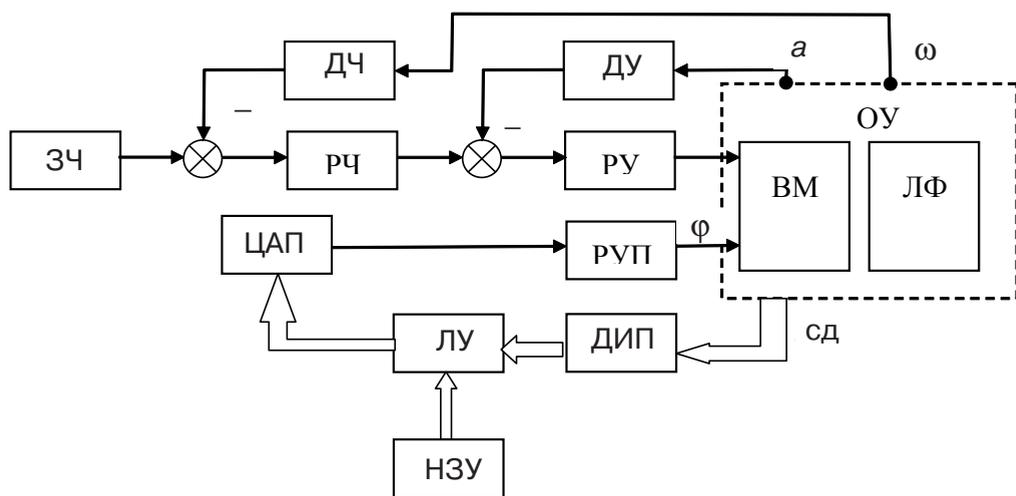


Рис. 2. Структурная схема самонастраивающейся ВЛТС: ОУ – объект управления (ВМ – вибрационная машина, ЛФ – литейная форма); ЗЧ – задатчик частоты вибрации; ДЧ – датчик частоты вибрации; ДУ – датчик ускорения; РЧ – регулятор частоты вибрации; РУ – регулятор ускорения; НЗУ – нечеткий задатчик угла приложения поляризованной вибрации; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; РУП – регулятор угла приложения вибрации; ЛУ – логическое сравнивающее устройство, определяющее максимум скорости дилатансии формовочной массы по разности двух информационных сигналов интенсивности уплотнения формовочной массы в литейной оснастке; ДИП – датчик интенсивности процесса

особенностей ВЛТС на рис. 3 приведена новая конструкция вибростола с рабочим органом, содержащим вибровозбудитель поляризованной вибрации и привод изменения угла  $\varphi$  приложения вектора поляризованной вынуждающей силы. Технический результат достигается тем, что ВЛТС содержит вибромашину 1, создающую направленные вибрационные колебания с вынуждающей силой  $F$ , передаваемые через платформу стола 2 литейной форме 3. Поворот вектора вынуждающей силы происходит посредством привода 4, который связан с вибромашинной 1 зубчатой ременной передачей 5. На рис. 4 показана кинематическая схема вибромашины, в которую входят привод вращения дебалансов 6, зубчатая передача 7, дебалансы 8.

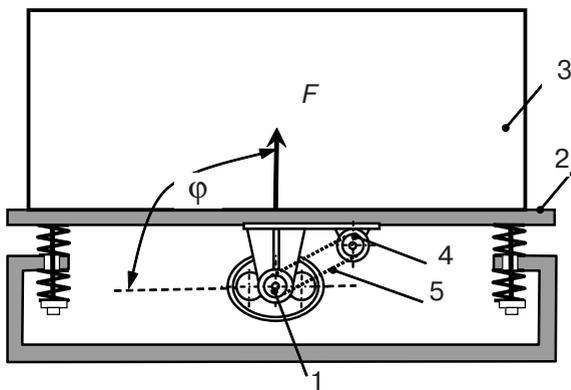


Рис. 3. Конструкция вибростола с рабочим органом

#### Логика работы поисковой системы

Рассмотрим логику работы поисковой системы (рис. 5). Допустим, что исходное состояние системы на плоскости  $\omega, \varphi$  характеризуется точкой  $A$ . Заданная частота вибрации литейной формы  $\omega_1$  – с вибрационным ускорением  $a_1$ . Максимальная скорость дилатансии формовочной смеси для этой частоты  $\omega_1$  и для определенных внешних воздействий будет в том случае, если  $\omega$  и  $\varphi$  выбраны так, что изображающей точкой является точка  $C$ . Логическое устройство может сделать первый шаг (пусть система шаговая) в правильном направлении, а может его сделать и в ложном. Предположим, что сделан ложный шаг, тогда после его совершения и «подтягивания»  $\varphi$  с помощью регулятора угла приложения вибрации (см. рис. 3, 4) к заданному значению изображающая точка на плоскости  $\omega, \varphi$  попадет в положение  $B$ . Затем

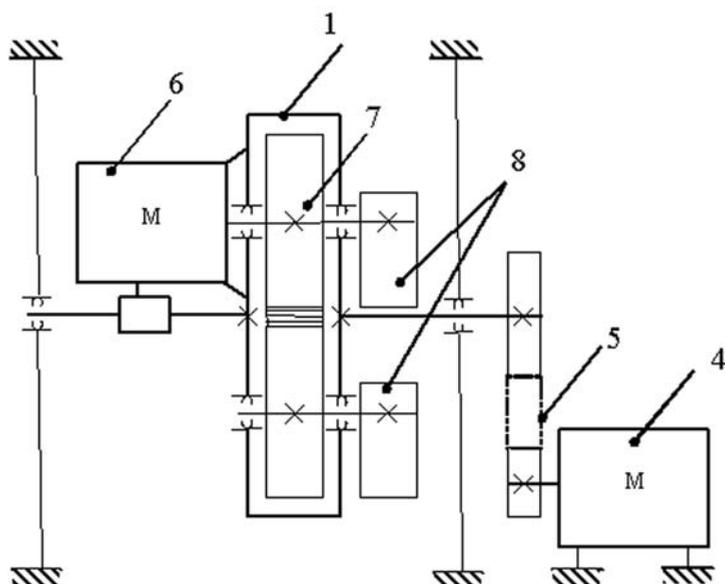


Рис. 4. Кинематическая схема вибромашины

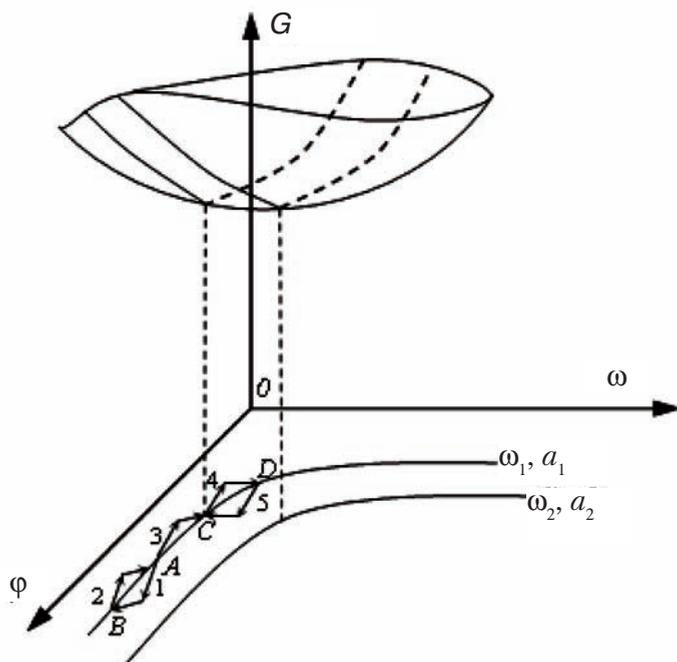


Рис. 5. Схема работы поисковой системы

после обнаружения ложности сделанного шага произойдет реверс изменения  $\varphi$  и будут сделаны второй, а затем третий и четвертый шаги в противоположном направлении, пока изображающая точка не попадет в положение  $D$ . Затем снова произойдет реверс и в конце концов установятся автоколебания около точки  $C$  с амплитудой, равной одному (как показано на рис. 5) или нескольким шагам изменения варьируемого параметра  $\varphi$ . Величина амплитуды автоколебаний зависит не только от логики работы контура самонастройки, но и инерционности этого контура. Если будут заданы другая частота вибрации и виброускорение или допустим изменятся какие-либо другие условия, то снова начнется поиск таких значений  $\varphi$ ,

которые являются оптимальными. Получившуюся систему можно рассматривать как дуальную систему управления процессом виброформовки с диапазоном варьируемых значений параметра  $\varphi$ .

### Заключение

При разработке ВЛТС с дуальным управлением особый интерес представляют системы с поляризацией вибрационных колебаний и системой самонастройки угла приложения вектора вынуждающей силы, которой задаются желаемые свойства объекта управления. Функционирование данного класса систем имеет ряд особенностей. Начальный сигнал задания параметра  $\varphi$  приложения вектора вынуждающей силы устанавливается равным  $\pi/2$  и затем по выделяемой в результате сравнения ошибке формируется корректирующий сигнал для настройки оптимального значения. Предложены единые общие принципы методологии построения ВЛТС для управления технологическими процессами виброформовки, что позволяет упростить синтез управляющих систем. Принцип дуального регулирования может быть пригодным также для управления другими неустойчивыми объектами с переменными параметрами, использование свойств скользящего режима позволяет предотвратить появление некорректных данных для вычисления величины управления и обеспечить условия оптимального уплотнения формовочной смеси для получения отливок с качественной поверхностью при литье в песчаные формы.



### Список литературы

1. Авдокушин В. П. Выбор оптимальных режимов виброуплотнения форм при литье по газифицируемым моделям // Литейн. пр-во. – 2001. – № 4. – С. 38-40.
2. Авдокушин В. П. Виброуплотняемые формовочные смеси – новые возможности в технологии литейного производства // Сборник научных и методических трудов. – Киев: КПИ, 1994. – Ч 1. – С. 78-83.
3. Русаков П. В. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 12-17.
4. Найдек В. Л., Шинский О. И., Русаков П. В. Энергочастотное управление режимами вибрационной формовки // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 69-76.
5. Русаков П. В. Особенности моделирования виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой // Там же. – 2009. – № 3. – С. 35-42.
6. Русаков П. В., Шинский О. И., Здохненко В. В. Модель ЛТС с синхронизированными по частоте вибрационными машинами // Там же. – 2010. – № 3. – С. 36-45.
7. Авдокушин В. П., Нечипуренко В. В., Панчук А. Н. Автоматизированное проектирование технологических процессов изготовления отливок // Сборник научных и методических трудов. – Киев: КПИ, 1994. – Ч II. – С. 131-134.
8. Растрингин Л. А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
9. Цвиркун А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
10. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – Киев: Радюаматор, 2008. – 972 с.
11. Применение методов искусственного интеллекта в управлении проектами / Под ред. А. Ю. Соколова. – Харьков: НАУ им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2002. – 474 с.
12. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – Киев: Выща школа, 1989. – 431 с.
13. Современные методы проектирования систем автоматического управления: анализ и синтез / Под ред. Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, Ю. И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1967. – 703 с.
14. Найдек В. Л., Русаков П. В., Шинский О. И. Индукционно-тигельные среднечастотные печи. Энергетическая стратегия конструктивно-технологической оптимизации // Процессы литья. – 2007. – № 6. – С. 24-28.

Поступила 11.01.2010