

существенно) до температуры близкой к температуре окружающего газа, как это следует из континуальной теории теплопроводности. Связано это с тем, что, как показывают расчеты, реальные тепловые потоки на частицу, обусловленные потоком молекул газа, значительно меньше соответствующих потоков континуальной модели теплообмена.

С уменьшением давления газа критерий  $Kn$  увеличивается при прочих равных условиях, область применения модели сплошной среды сужается, но зато увеличивается верхний размер частиц, не возмущающих температурное поле окружающего газа. Так если при  $P = 1$  атм, таковой размер был порядка 1 мкм, то при давлении  $P = 0.1$  атм он увеличился практически до 10 мкм, то есть примерно прямо пропорционально значению  $Kn$ .

Уменьшение давления газа приводит к существенному уменьшению тепловых потоков на частицу и к степени ее нагрева. Для мелких частиц, когда они практически не возмущают температурное поле газа, разность (скачек) температур между стенкой и газом сосредоточена в пристеночном слое толщиной, равной средней длине свободного пробега молекул газа, где нет равновесия и где неправомерно вводить такую характеристику как температура газа.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта PZ-013-02, поддерживаемого совместно Американским фондом гражданских исследований и развития (АФГИР), Министерством образования РФ и правительством Республики Карелия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ХАТЧИНСОНА-РАЙТА

Брызгалов Е. В.  
ПГУ

Попытки моделирования динамики популяций при ограниченных ресурсах предпринимались с середины 19 века. Впервые эффект запаздывания был учтён почти 100 лет спустя Хатчинсоном. Он модифицировал «классическое» уравнение Ферхюльста, а именно сомножитель, учитывающий наличие верхней границы популяции, вычисляется в некоторый предшествующий данному момент времени:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r \left[ 1 - \frac{N(t-T)}{K} \right] N(t)$$

Уравнение, получившее название уравнения Хатчинсона-Райта имеет 2 равновесных состояния: 0 и  $K$ . Можно доказать, что первое состояние равновесия линейно неустойчиво, а второе линейно устойчиво при  $rT < \pi/2$  и неустойчиво в противном случае. В частности, при  $T=0$  уравнение (1) превращается в уравнение Ферхюльста, где  $K$  — устойчивое равновесное состояние.

Следующим шагом становится введение автором в модель параметрически изменяющегося биотического потенциала. Действительно, в природе большое влияние на процесс размножения оказывают сезонные факторы и пр. То есть мы можем записывать в модели биотический потенциал не как константу, а как функцию от времени:

$$r = r_0 + f(t)$$

Выбирая в качестве неизвестной функции гармоническую и учитывая, что изменение биотического потенциала не влияет на коэффициент внутривидовой конкуренции ( $m=r/K$ ), получим:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r \left[ 1 - \frac{r_0}{r} \frac{N(t-T)}{K} \right] N(t),$$

где  $r = r_0 + A \sin(2\pi t/\tau)$

Очевидно, что исследование данной модели возможно лишь численно.

Следует отметить, что большинство современных математических пакетов (Maple и пр.) не позволяет непосредственно осуществлять исследование систем на основе уравнений с запаздывающим аргументом. Для изучения поведения данной системы была использована разработанная автором моделирующая среда «Model Designer», позволяющая описывать и исследовать широкий класс динамических систем, в том числе и с использованием отклоняющегося аргумента.

Решение полученного уравнения осуществлялось средой с использованием схемы Штермера 5-го порядка, в качестве начального условия было принято  $N(t) = N_0$  для  $-T < t \leq 0$ .

Для определения и идентификации динамического режима известно достаточно большое число способов. «Model Designer» поддерживает возможности построения фазовых плоскостей и спектров Фурье. С их помощью можно достаточно легко разбить режимы на периодические, квазипериодические (сумма нескольких периодических движений, которая, вообще говоря, не является периодической) и аperiodические.

Исследование модели затрудняется наличием большого числа параметров (биотический потенциал, время запаздывания, емкость среды, амплитуда и период колебаний биотического потенциала). Соответственно, в работе не везде выделены области того или иного режима, а только приведены найденные режимы. Часть режимов обнаруживаются в рамках модели Хатчинсона-Райта ( $A=0$ ).

Полагая время запаздывания равным нулю, мы получаем логистическую кривую. Увеличивая запаздывание, мы приходим к первой бифуркации — смене режима монотонного возрастания (затухания) на режим затухающих колебаний. Время этого запаздывания обратно пропорционально биотическому потенциалу:  $rT \in (0.45, 0.5)$ . При дальнейшем нарастании  $T$ , колебания становятся более явными. Частота их пропорциональна биотическому потенциалу и постоянна при постоянном наборе параметров, что подтверждает спектр. При  $rT = \pi/2$  согласно теории наступает смена затухающих колебаний нарастающими, которые становятся более выраженными при увели-

чении  $T$ . Неустойчивость состояния  $N=K$  подтверждается спектром.

Вторая серия численного эксперимента связана с изменением амплитуды колебаний биотического потенциала при отсутствии запаздывания. ( $T=0$ ). В данном случае вне зависимости от  $A$ , в итоге получаются периодические колебания. Незначительное отличие состоит только в поведении системы до выхода на предельные циклы.

Наиболее интересные результаты даёт комбинирование предыдущих двух серий. Примером может служить бипериодическое движение (его бипериодичность подтверждает спектр), получить которое невозможно в рамках первых двух серий, или биения.

Но в любом случае, в рамках данной модифицированной модели мы можем получить только квазипериодические движения, так как фактически у нас два источника возникновения периодичности: запаздывание и изменение биотического потенциала. Кроме того, необходимо учитывать, что первый источник порождает нестабильные (затухающие или нарастающие) колебания, а второй стабильные. Следовательно при малых  $rT$  (строго говоря, при любом  $rT < \pi/2$ ) произойдет исчезновение первого источника и достаточно продолжительное наблюдение даст результаты, аналогичные результатам второй серии, при больших  $rT$  постоянные колебания второго источника будут поглощены.

#### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Воробьев К.И., Тихомиров В.Г.

В настоящее время в России растет актуальность проблемы исследования работы сборочно-сварочных робототехнологических систем при их проектировании. Это связано с ужесточением условий конкурентной торговли на внутреннем рынке, обусловленным импортом высоких технологий, капитала и, как следствие, развитием высокорентабельных производств современных товаров. Покупатели предъявляют все более высокие требования к качеству, номенклатуре, цене высокотехнологичных товаров и таким образом формируют потолок цен на каждый вид продукции, определяют емкость рынка. Поэтому необходимо обеспечить разработку гибких производственных систем, которые способны обеспечить рынок широким спектром выпускаемой продукции, оперативно реагировать на изменения в потребительских предпочтениях, при обеспечении снижения затрат на строительство и оснащение производственного комплекса.

При этом цена ошибки на данной стадии подготовки производства исключительно высока. Если на этой стадии основные проектно-технологические параметры комплекса сварки будут определены неправильно, то это отразится сначала в неправильной конструкции производственно-технологического оборудования, а затем в изготовленном и смонтированном в цехе оборудовании. Несоответствие же параметров работы комплекса выявится только на этапе запуска и ввода его в эксплуатацию, после чего придется про-

водить мероприятия по модернизации действующего оборудования и выводу комплекса на проектную мощность. Это на порядки дороже, чем определить правильные проектно-технологические параметры производственной системы на ранних стадиях ее проектирования, и здесь же найти надежный способ подтвердить правильность сделанного выбора.

В процессе проектирования подобных робототехнологических систем необходимо определить требования к отдельным группам оборудования (производительность роботов, такты сборочно-сварочных линий, размеры промежуточных накопителей, параметры транспортных систем) и объединить их в единый производственный комплекс.

Существует множество способов решения этих вопросов: проверенные временем методики аналитических расчетов, создание математических моделей, использование мирового опыта аналогичных производств, экспертные оценки. Однако в настоящее время наиболее эффективным инструментом для решения подобного рода задач является компьютерное имитационное моделирование.

Имитационное моделирование позволяет учитывать сложность проектируемых производственных систем и обеспечивает простоту разработки модели, удобство использования и очевидность результатов. Оно способно учесть стохастичность ее параметров.

Необходимо отметить, что в сборочно-сварочных робототехнологических системах существуют довольно тесные связи между промышленными роботами, вспомогательным оборудованием, транспортными средствами и другими компонентами. Поэтому любое отступление от нормальной работы одной составляющей распространяется и на другие. Имитационное моделирование позволяет выявить подобные узкие места еще на стадии проектирования и устранить их.

В ходе имитационного моделирования можно варьировать запуски деталей различных наименований, изучать складывающиеся материальные потоки при использовании различных транспортных средств, определять причины образования очередей у различного оборудования, изучать влияние объема накопителей на производительность комплекса, последствия отказов и времени восстановления оборудования.

Рассматриваемая методика исследования была использована при проектировании комплекса сборки-сварки кузовов автомобиля ВАЗ-1118 «Калина» на ОАО «АвтоВАЗ».

Проведенное моделирование позволило сократить проектные размеры накопителей деталей, в общем, на 5%, по отдельным позициям – на 30-75%. Увеличение тактов отдельных автоматических линий сварки увеличило срок эксплуатации и позволило применить менее дорогие роботы.

Имитационное моделирование позволило визуально определить особенности работы комплекса и выявить узкие места, спрогнозировать производительность комплекса, оптимизировать параметры комплекса для достижения конкретной мощности производства, минимизировать капитальные затраты, уменьшить объемы незавершенного производства и затраты, связанные с эксплуатацией оборудования