

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 678.023.3:681.5.01; 517.977.58

Ю. А. Байда, ассистент (БГТУ)

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕЗИНОСМЕШЕНИЯ

В статье представлен способ синтеза адаптивной системы управления процессом резиносмешения. В качестве регулируемого параметра принята частота вращения смесительного ротора. Предлагается в пределах одной стадии смесительного цикла использовать постоянную частоту. Таким образом, искомой величиной адаптации является вектор частот вращения, определяющий для рассматриваемой рецептуры частоту вращения ротора на каждой стадии. Для нахождения оптимального вектора предложен адаптивный поисковый алгоритм, приведены условия его сходимости, а также построена структурная схема адаптивной системы. Алгоритм предусматривает осуществление некоторого числа замесов для достижения оптимальных значений частот вращения.

This paper presents a method for synthesis adaptive control system of rubber mixing process. The variable parameter is a rotation speed of rotors. It is proposed to use the constant speed during every stage of mixing cycle. So, sought for parameter of adaptation is the vector which contains different rotation speeds of rotors for every stage of a mixing cycle. The criterion of process is integral electric power and the duration of a mixing cycle. To find optimal vector is suggested searching algorithm of adaptation, note conditions of its convergence, built the structure of adaptive control system. Algorithm requires make some mixing cycle to aim an optimal rotations speed of rotors. For different formulations of a rubber compound have to use different optimal vectors.

Введение. В настоящее время является актуальным синтез адаптивных систем управления технологическими процессами, т. е. систем, которые обеспечивают оптимальное протекание технологического процесса на любой стадии и при любых изменениях технологических параметров. Оптимальность подразумевает нахождение таких параметров технологического процесса (с учетом существующих ограничений), при которых принятый критерий будет достигать экстремума.

Процесс резиносмешения является одним из важных этапов резинотехнического производства и во многом определяет качество готовых изделий. В результате анализа процесса резиносмешения как объекта управления была предложена структура системы адаптивного управления процессом [1].

Учитывая энергоемкость процесса резиносмешения, в критерии оптимальности предлагается учесть затраты электроэнергии и производительность резиносмесителя.

Регулирование частоты вращения роторов резиносмесителя – один из эффективных способов оперативного управления процессом резиносмешения [1]. Поставим задачу нахождения оптимального закона управления частоты

той вращения роторов в течение смесительного цикла.

Основная часть. Для решения задачи оптимизации примем ряд допущений. Допустим, что в пределах одной стадии смесительного цикла при изготовлении смеси требуемой рецептуры искомая оптимальная частота вращения изменяется незначительно. Значительное изменение оптимальной частоты в пределах одного замеса может наблюдаться на различных стадиях.

Введем понятие средней оптимальной частоты для каждой стадии смесительного цикла при приготовлении смеси конкретной рецептуры. Рассмотрим вектор средних частот для выбранной j -й рецептуры:

$$\omega^j = [\omega_1^j \quad \omega_2^j \quad \dots \quad \omega_i^j \quad \dots \quad \omega_k^j]^T, \quad (1)$$

где ω_i^j – частота вращения i -й стадии j -й рецептуры; k – число стадий в j -й рецептуре.

Таким образом, задача сводится к нахождению для каждой рецептуры оптимального вектора частот вращения.

Критерий оптимальности запишем в виде

$$J(P, t) = \int_0^T (\alpha_1 P(t) + \alpha_2) dt, \quad (2)$$

где $P(t)$ – мгновенная мощность, потребляемая электроприводом смесителя; t – текущее время смесительного цикла; T – длительность смесительного цикла; α_1, α_2 – весовые коэффициенты.

Таким образом, предложенный критерий равен сумме взвешенных значений затрат электроэнергии, потребляемой за смесительный цикл, и длительности всего цикла. Требование минимизации затрат энергии обусловлено высокой энергоемкостью процесса, а уменьшение длительности цикла, во-первых, позволяет увеличить производительность резиносмесителя, во-вторых, не приводит к чрезмерному повышению температуры смеси, что является небезопасным для ее качества. Очевидно, необходимо достигнуть минимума критерия.

Задача нахождения оптимального закона изменения частоты сводится к определению такого вектора частот вращения (1), при котором критерий (2) будет достигать минимального значения.

В системе присутствуют ограничения. Частота вращения ограничена минимальным и максимальным значениями. Существуют требования к температуре смеси, так как при высоких температурах происходит деструкция полимера. Следует наложить ограничения на длительность смесительного цикла. Также немаловажным параметром является качество готовой смеси, которое к концу смесительного цикла должно быть не ниже требуемого значения.

Очевидно, что в случае смешения с переменной скоростью длительности стадий смешения должны быть изменены, поскольку при смешении с повышенной скоростью процесс смешения ускоряется, а при смешении с пониженной – замедляется. Уменьшение длительности стадий смешения приведет к повышению производительности резиносмесителя.

Предложим способ определения моментов окончания стадий смешения, для чего рассмотрим такой важный информативный показатель протекания процесса смешения, как мощность, потребляемая электроприводом смесителя в течение всего смесительного цикла. График изменения мощности представлен на рис. 1.

Очевидно, изменение мощности за цикл смешения можно считать случайным процессом. По графику можно проследить начало и конец каждой стадии: первая стадия длится от момента t_1 до t_2 , вторая – от t_3 до t_4 и третья – от t_5 до конца. Длительности стадий в существующих системах, работающих с постоянной частотой смешения, определяются технологическим регламентом.

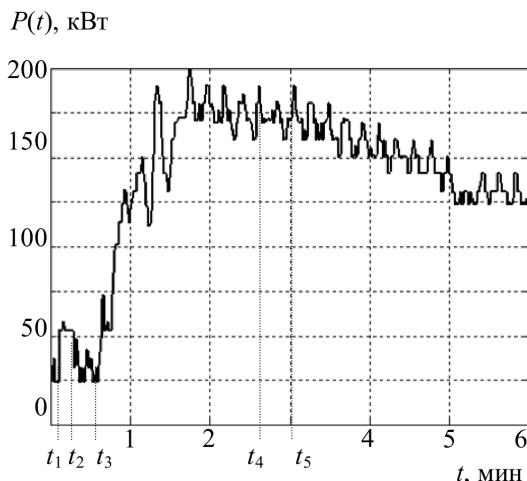


Рис. 1. Изменение потребляемой мощности в течение смесительного цикла

Для установления момента окончания каждой стадии в адаптивной системе воспользуемся условием достижения смеси такого состояния в конце рассматриваемой стадии, которого она достигала при номинальной скорости вращения. Под состоянием смеси можно понимать ее среднюю вязкость, температуру, однородность смешения. Однако осуществлять оценку всех параметров в процессе смешения не представляется возможным. Более того, скорости изменения параметров по-разному зависят от частоты вращения. В результате, в случае смешения с переменной частотой вращения, окажется невозможным получить смесь с аналогичными характеристиками. Для достижения состояния, близкого к такому, в качестве оцениваемого параметра выберем вязкость смеси. Для оценки вязкости будем вычислять момент сопротивления, оказываемый смесью:

$$M_C(t) = \frac{P(t)\eta}{\omega(t)}, \quad (3)$$

где $P(t)$ – текущее значение потребляемой мощности; η – средний КПД смесителя; $\omega(t)$ – текущая частота вращения.

С другой стороны, для определения мгновенного значения момента сопротивления можно воспользоваться выходным сигналом преобразователя частоты, используемого для регулирования частоты вращения (при наличии требуемой функции).

Условие соответствия текущего момента сопротивления значению, требуемому для окончания рассматриваемой стадии, запишем в виде

$$|M_C(t) - M_C^{i,j}| \leq dM, \quad (4)$$

где $M_C^{i,j}$ – значение момента, требуемое для окончания i -й стадии j -й рецептуры; dM – величина допустимого отклонения.

Для исключения влияния случайного и преждевременного попадания значения оцениваемого момента сопротивления в область требуемого значения дополним условие (4) ограничением на длительность стадии:

$$(t - t^{i,j}) \leq dt^{i,j}, \quad (5)$$

где t – текущее время смешения; $t^{i,j}$ – момент начала i -й стадии смесительного цикла j -й рецептуры; $dt^{i,j}$ – минимально возможная длительность i -й стадии j -й рецептуры.

Очевидно, при такой постановке задачи найти в явном виде зависимость значения критерия от заданного вектора частот не представляется возможным. Более того, учитывая нестационарность процесса, критерий (2) запишем в виде математического ожидания от реализаций:

$$J(P, t) = M \{Q(P(t), \omega^j)\}, \quad (6)$$

где $Q(P(t), \omega^j)$ – реализация (т. е. значение критерия, рассчитанное для проведенного замеса при векторе частот, равном ω^j), которая в свою очередь может быть найдена по формуле

$$Q(P(t), \omega^j) = \alpha_1 \int_0^T P(t, \omega^j) dt + \alpha_2 \sum_{i=1}^k T^{i,j}, \quad (7)$$

где $P(t, \omega^j)$ – потребление мощности в течение цикла смешения, полученное в результате одного замеса при векторе частот, равном ω^j ; $T^{i,j}$ – длительности стадий смешения, полученные при векторе частот, равном ω^j .

Для решения поставленной задачи, учитывая неявный способ задания функционала от искомого вектора, сложный характер процесса, а также его нестационарность, будем применять методы адаптации. Для адаптивного управления таким процессом предлагается воспользоваться вероятностным итеративным методом. Условие оптимальности запишется в следующем виде [2]:

$$\nabla J(P, t) = M \{ \nabla_{\omega} Q(P(t), \omega^j) \} = 0, \quad (8)$$

где $\nabla J(P, t)$ – градиент функционала по ω^j ; $\nabla_{\omega} Q(P(t), \omega^j)$ – градиент реализации по ω^j .

Возникает сложность с нахождением не только $\nabla J(P, t)$, но и $\nabla_{\omega} Q(P(t), \omega^j)$. В таком случае используют поисковые алгоритмы адаптации [2]. Найдем оценку градиента с помощью разделенных разностей [3]. Введем векторы отклонений оценки критерия на шаг dv в большую и меньшую стороны:

$$\begin{aligned} Q_+(P(t), \omega^j, dv) &= [Q(P(t), \omega^j + dve_1) \dots \\ &\dots Q(P(t), \omega^j + dve_k)], \\ Q_-(P(t), \omega^j, dv) &= [Q(P(t), \omega^j - dve_1) \dots \\ &\dots Q(P(t), \omega^j - dve_k)], \end{aligned} \quad (9)$$

где dv – шаг для нахождения оценки градиента; e_i – базисные векторы ($e_i = [0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0]^T$).

Тогда оценка градиента критерия будет равна:

$$\begin{aligned} \tilde{\nabla}_{\omega}^{\pm} Q(P(t), \omega^j, dv) &= \\ &= \frac{Q_+(P(t), \omega^j, dv) - Q_-(P(t), \omega^j, dv)}{2dv}. \end{aligned} \quad (10)$$

Поисковый алгоритм адаптации в рекуррентной форме можно представить следующим образом [2]:

$$\begin{aligned} \omega[n] &= \omega[n-1] - \gamma[n] \times \\ &\times \tilde{\nabla}_{\omega}^{\pm} Q(P(t), \omega[n-1], dv[n]), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\omega[n]$ – вектор частот вращения на текущем такте адаптации; $\omega[n-1]$ – вектор частот вращения на предыдущем такте адаптации; $\gamma[n]$ – величина шага адаптации.

Структурная схема адаптивной системы, реализующая алгоритм (8), представлена на рис. 2.

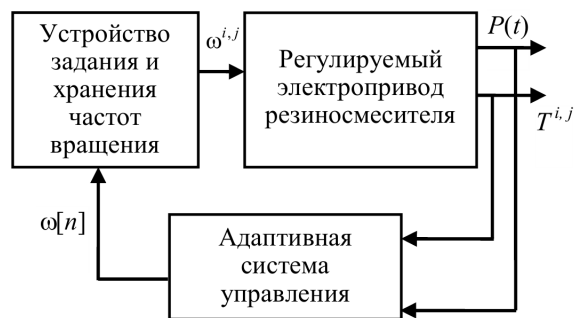


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы управления процессом резиносмешения

Существенный вопрос, к которому следует обратиться при реализации алгоритма адаптации – его сходимость. В связи со случайным характером процесса $P(t)$ векторы $\omega[n]$ также являются случайными и для них не применимо обычное понятие сходимости. Воспользуемся понятием сходимости в вероятностном смысле. Наиболее приемлемым видом такой сходимости будет сходимость почти наверное [2].

Последовательность случайных векторов $\omega[n]$ сходится при $n \rightarrow \infty$ к ω^* почти наверное, если вероятность обычной сходимости $\omega[n]$ к ω^* равна 1, т. е.:

$$P \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} \|\omega[n] - \omega^*\| = 0 \right\} = 1. \quad (12)$$

Для обеспечения сходимости установим необходимые и достаточные условия сходимости.

Для того чтобы вектор $\omega[n]$ сходил к ω^* , необходимо выполнение равенства (8) при $n \rightarrow \infty$.

Достаточные условия сходимости приведем без подробных комментариев ввиду их сложности [2]:

$$\begin{aligned}
 & 1) \sum_{n=1}^{\infty} \gamma[n] = \infty, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \gamma[n] dv[n] < \infty, \\
 & \quad \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\gamma[n]}{dv[n]} \right)^2 < \infty; \\
 & 2) (\omega - \omega^*)^T (Q_+(P(t), \omega, \varepsilon) - Q_-(P(t), \omega, \varepsilon)) \geq (13) \\
 & \geq K \|\omega - \omega^*\| \|Q_+(P(t), \omega, \varepsilon) - Q_-(P(t), \omega, \varepsilon)\|, \\
 & \quad \varepsilon > 0, K > 1/\sqrt{2}; \\
 & 3) \|Q_+(P(t), \omega, dv) - Q_-(P(t), \omega, dv)\| \leq \\
 & \quad \leq A \|\omega - \omega^*\| + B.
 \end{aligned}$$

Скорость сходимости зависит от реализации (т. е. замесов) и носит случайный характер.

Для достижения оптимального вектора ω^* следует определить момент остановки, т. е. такой такт адаптации, на котором можно считать, что оптимальный вектор частот (или окрестность вектора) достигнуты. В связи со стохастичностью процесса смещения процесс адаптации носит случайный характер. Адаптацию можно представить как последовательное приближение значений частот к оптимальным значениям и колебание в окрестности этих значений. Для определения такта остановки будем на каждом такте усреднять N последних значений частот и сравнивать с оценкой на предыдущем такте, т. е. воспользуемся скользящим средним [2]:

$$m_N[n] = \sum_{k=n-N+1}^n \omega[k], \quad (14)$$

где N – количество охватываемых тактов.

Далее после каждого такта адаптации необходимо проверять неравенство:

$$\|m_N[n-1] - m_N[n]\| < \varepsilon, \quad (15)$$

где ε – достаточно малая величина. Начиная с некоторого такта, неравенство начинает выполняться, что определяет достижение вектора частот, близкого к оптимальному.

Рассмотрим работу адаптивной системы для замеса, принятого в качестве типового.

Зададим вектор начальных частот вращения. В качестве начальных значений частот можно выбрать равные значения, например, максимально возможные или используемые в рассматриваемом смесителе ранее (в случае нерегулируемой частоты). Также начальные значения могут быть заданы опытным технологом.

При выбранном начальном векторе частот ω_0 совершается замес. Используя полученную зависимость потребляемой мощности от времени и использованные длительности стадий, найдем значение критерия по (7). Далее для установления оценки градиента (10) необходимо найти векторы отклонений оценки критерия на шаг dv по формулам (9). В рассматриваемом случае для определения вектора отклонений в одну сторону следует провести три замеса (по числу стадий в цикле). Следовательно, для нахождения одного значения оценки градиента (10) необходимо осуществить шесть замесов. После нахождения оценки градиента по формуле (11) определим вектор частот следующего такта адаптации. Таким образом, один шаг адаптации требует шести тестовых замесов.

Для реализации процесса адаптации необходимо задаться законами изменений $\gamma[n]$ и $dv[n]$. Эти зависимости должны соответствовать условиям сходимости (13).

Заключение. В статье предложен способ синтеза адаптивной системы управления процессом резиносмешения.

В качестве регулируемого параметра принята частота вращения смесительного ротора. Предлагается в пределах одной стадии смесительного цикла использовать постоянную частоту. Таким образом, искомой величиной адаптации является вектор частот вращения, определяющий для рассматриваемой рецептуры частоту вращения ротора на каждой стадии.

Для нахождения оптимального вектора частот предложен адаптивный поисковый алгоритм (11), приведены условия его сходимости, а также построена структурная схема адаптивной системы.

Алгоритм предусматривает осуществление некоторого числа замесов для достижения оптимальных значений частот вращения. После достижения оптимального вектора частот предлагается периодически контролировать значение критерия, так как параметры процесса со временем могут измениться, что будет требовать повторного поиска оптимального вектора.

Литература

1. Байда, Ю. А. Анализ резиносмесителя как объекта управления / Ю. А. Байда // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2008. – Вып. XVI. – С. 95–98.
2. Цыпкин, Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
3. Хемминг, Р. В. Численные методы (для научных работников и инженеров) / Р. В. Хемминг. – М.: Наука, 1972. – 400 с.

Поступила 02.03.2011