

## АНАЛИЗ РЕЗИНОСМЕСИТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

In the article discuss methods of a control of a rubber mixer. Main parameters of process have been revealed, the interrelation between them in a general view is certain. Parameters accessible to measurement and parameters accessible to regulation are certain. Structures of observers of the important process parameters inaccessible to measurement are offered. Possible control channels and levels are analyzed. Criterions and limitations of the control system are offered. The structure of the control system in a general view is synthesized. The step-by-step adaptation system is offered.

**Введение.** Изготовление резиновых смесей является одним из основных процессов резинового производства и оказывает существенное влияние на качество изделий.

Процесс резиносмешения – сложный механохимический процесс, в котором механические процессы диспергирования, гомогенизации происходят совместно с тепловыми и химическими явлениями. Ввиду большого различия в физических свойствах исходных компонентов резиновой смеси, широких вариаций количественного их соотношения и порядка введения в камеру резиносмесителя число возможных положений компонентов в рабочем пространстве машины очень велико. Это вызывает сложность аналитического определения усилий, возникающих в камере резиносмесителя при приготовлении резиновых смесей [1]. Более того, в процессе приготовления резиновой смеси могут происходить фазовые превращения компонент, что в общем случае приводит не только к количественным, но и к качественным изменениям свойств самой смеси. В результате возникает необходимость для описания процессов, происходящих в смесителе, применять зависимости с переменной структурой.

Целью процесса резиносмешения является достижение такого распределения компонентов в смеси, которое обеспечивает однородность физических и химических свойств в любой точке резиновой смеси. Для характеристики свойств готовой смеси с достаточной точностью используют: однородность распределения компонентов по объему каучука, вязкость смеси, ее температуру и дисперсность частиц компонента.

Для количественного описания однородности опираются на статистический анализ. Он основан на сравнении генеральной дисперсии с фактическим значением среднеквадратичного отклонения концентраций диспергируемого вещества. (Численный критерий – индекс смесения.)

Наряду с выравниванием концентраций диспергируемой фазы смешение сопровождается ее измельчением. Конечные размеры частиц, как и равномерность распределения, определяют качество изделий. Существует понятие оп-

тимальной степени диспергирования, превышение которой ухудшает характеристики материала.

Процесс смешения резиновой смеси можно представить как процесс ее деформирования, причем для большинства полимеров деформация при смешении может быть сведена к деформации сдвига. Каучук в процессе смешения можно отнести к группе псевдопластичных жидкостей, для которых уменьшается эффективная вязкость с увеличением скорости сдвига. Для математического описания деформации сдвига в настоящее время используются эмпирические зависимости [2].

Показателем степени гомогенности резиновой смеси может служить поверхность раздела фаз смешиваемых компонентов. Существует прямая зависимость поверхности раздела фаз от деформации сдвига. Однако в реальных смесителях, где имеют место многомерные течения, пользуются широким кругом обобщающих понятий (например, суммарной среднемассовой деформацией сдвига (ССДС)) [3].

Процесс резиносмешения сопровождается выделением теплоты, что приводит к увеличению температуры смеси. Температура определяет вязкость смеси, а также фазовые превращения, происходящие в ней. Превышение температурой некоторого критического значения может привести к необратимым химическим реакциям и к потере смесью требуемых свойств.

**Выявление зависимостей между параметрами процесса.** Для получения структуры системы регулирования необходимо выявить основные зависимости между параметрами процесса. На данном этапе достаточно выявить зависимости в общем виде. Представим их в виде нелинейных дифференциальных уравнений. Часть уравнений имеет переменную структуру, т. е. вид функции определяется фазовыми переходами, происходящими в смеси.

Взаимосвязь между параметрами процесса можно представить следующими уравнениями:

$$T = F_1^a(T_0, \omega, t, g, \mu), \quad (1)$$

$$\mu = F_2^a(\omega, t, T, \mu_0), \quad (2)$$

$$\gamma = F_3^a(\omega, n, \dot{\eta}), \quad (3)$$

$$J = F_4^a(\gamma, \mu, t), \quad (4)$$

$$a = F_5(T, \mu, t), \quad (5)$$

$$P = F_6(\mu, \omega, g, t), \quad (6)$$

$$n = F_7(\omega, t), \quad (7)$$

где  $T$  – температура смеси;  $a$  – показатель фазового состояния смеси, определяет вид зависимостей (1)–(4);  $T_0$  – параметр (вектор параметров), характеризующий температуру исходных компонент смеси;  $\omega$  – скорость вращения роторов смесителя;  $t$  – время смешения;  $g$  – сила давления на верхний затвор;  $\mu$  – вязкость смеси;  $\mu_0$  – параметр (вектор параметров), характеризующий вязкость исходных компонент смеси;  $n$  – число оборотов роторов смесителя;  $J$  – показатель однородности смеси (например, индекс смешения);  $\gamma$  – показатель деформации сдвига (например, ССДС);  $P$  – мощность, развиваемая приводом смесителя.

**Выявление и анализ параметров процесса, доступных регулированию.** Можно выделить следующие параметры процесса резиносмешения, доступные регулированию: полное время смешения, моменты ввода соответствующих добавок, моменты и длительность подъема затвора, величина давления затвора (при наличии соответствующей системы регулирования), скорость вращения роторов (при наличии управляемого электропривода).

С ростом времени смешения происходит увеличение температуры смеси и уменьшение ее вязкости, а также до некоторой степени повышается однородность. Ввод добавок вызывает изменение зависимостей (1)–(4), т. е. приводит к качественным изменениям свойств смеси. Подъем затвора позволяет провернуть смесь без давления и переориентировать ее относительно смесительных роторов для увеличения эффективности дальнейшего смешения. Изменение силы давления на поршень дает возможность регулировать температуру смеси. При возрастании скорости вращения роторов смесителя увеличивается скорость нарастания температуры и уменьшается эффективная вязкость.

**Выявление и анализ параметров процесса, доступных измерению.** Температура смеси выступает важным параметром, который косвенно указывает на вязкость смеси и реакции, происходящие в ней. Следует отметить, что сигнал о температуре смеси поступает с существенным запаздыванием. Это объясняется невозможностью установки датчика непосредственно в камере смесителя, где происходит интенсивное движение высоковязкой среды. Однако существующие системы управления, например [4], используют вместо температуры смеси температуру корпуса смесителя с учетом теплового гистерезиса, при этом обеспечивает-

ся необходимая точность. Кроме того, температура является основным регулируемым параметром в данной системе.

Наиболее общим параметром, характеризующим степень воздействия резиносмесителя на смесь, является мощность, развиваемая электроприводом резиносмесителя. Существуют системы управления, в которых по затраченной мощности судят о степени смешения компонентов и по ее значению определяют момент завершения смешения [5].

Общим числом оборотов, которое совершает ротор смесителя, во многом определяется гомогенность смеси. Измерение суммарного числа оборотов ротора позволит говорить о качестве смеси во время смешения.

Частота вращения роторов смесителя определяет скорость изменения температуры и влияет на значение вязкости смеси. С другой стороны, регулируемый электропривод требует измерения частоты вращения для ее стабилизации.

**Формирование критериев и ограничений системы управления процессом.** Регулирование резиносмесителем в общем случае следует свести к определению момента окончания процесса смешения, при котором достигается требуемое качество смешения (однородность, вязкость, температура готовой смеси). В этом случае выполняется основной критерий – получение смеси данного качества.

Отдельным критерием системы регулирования следует отметить затраты электроэнергии. Процессы изготовления резиновых смесей связаны со значительными затратами энергии. Доля затрат на смешение компонентов резиновых смесей в общих затратах на изготовление шин составляет 10–20%, причем из них 30–60% затраты на энергию [2]. Очевидно, одна из целей системы управления – минимизация затрат электроэнергии. Можно выделить следующие пути уменьшения затрат энергии: снижение времени смешения; регулирование скорости вращения роторов смесителя.

Снабжение резиносмесителя регулируемым приводом позволит управлять такими параметрами, как температура и вязкость смеси. Вязкость и температура являются косвенными показателями качества резиновой смеси. Вязкость определяет момент сопротивления смешению (напряжение сдвига), т. е. мощность, развиваемую двигателем. От температуры смеси зависит не только вязкость, но и химические реакции, которые протекают в смеси и приводят к качественным изменениям ее свойств. В результате таких изменений происходит изменение вида зависимостей (1)–(4), что необходимо учитывать во время регулирования. На основании вышесказанного можно отметить важность регулирования и контроля темпера-

туры и вязкости в процессе смешения, а также получение смеси требуемой температуры и вязкости в конце смесительного цикла. Превышение температурой смеси некоторого критического значения приводит к непоправимым химическим реакциям и браковке всего замеса, что требует наличия аварийной выгрузки смеси при критическом значении температуры.

Процесс диспергирования происходит под действием напряжений сдвига, причем увеличение напряжений сдвига способствует его интенсификации. При возрастании температуры снижается напряжение сдвига, следовательно, для достижения заданной степени диспергирования требуется большая деформация сдвига. Важно отметить, что превышение оптимальной степени диспергирования ухудшает физико-механические характеристики материала.

**Анализ возможных каналов и уровней системы управления процессом.** Рассмотрим в общем виде систему автоматического управления (САУ), которая минимизирует время смешения при условии обеспечения необходимого качества смеси. Такой САУ необходимо получать информацию о качестве смеси в режиме непрерывного времени. Параметрами качества смеси можно считать ее вязкость, температуру и гомогенность компонентов.

Для получения информации о неизмеряемых показателях в непрерывном времени необходимо построить их наблюдатель, который позволит дать оценку параметрам, недоступным измерению. Имея зависимости (1)–(7) в явном аналитическом виде, можно выразить интересующие нас характеристики (вязкость, гомогенность) относительно измеряемых.

Рассмотрим уравнение (2). На основании данной формулы можно получить оценку вязкости при условии, что известна вязкость исходных веществ. Получение подобной информации сопряжено с затратами времени и сложностью учета большого числа входных параметров. Однако, анализируя уравнение (6), можно сделать вывод о возможности получения дополнительной информации о вязкости по изменению потребляемой мощности. Подобный подход можно встретить в [4]. Запишем наблюдатель вязкости в общем виде как

$$\mu^{\wedge} = F_8^a(\omega, T, P, \dot{\eta}), \quad (8)$$

где  $\mu^{\wedge}$  – оценка вязкости смеси.

Как видно из уравнения (4), гомогенность концентрации распределемого компонента зависит от деформации сдвига (например, ССДС) и вязкости смеси. Важно помнить, что критерии качества смешения только первоначально зависят от деформации сдвига, а затем наступает своеобразное насыщение. Более того, увеличение деформации сдвига может привести к ухудшению показателей качества смеси. Де-

формация сдвига в свою очередь зависит от скорости вращения и количества оборотов роторов (3). В качестве информации о вязкости используем ее оценку, полученную с помощью наблюдателя (8). Следовательно, наблюдатель однородности смеси в общем случае будет иметь вид

$$J^{\wedge} = F_9^a(\omega, n, \mu^{\wedge}, \dot{\eta}), \quad (9)$$

где  $J^{\wedge}$  – оценка показателя однородности смеси.

САУ получает информацию о качестве смеси от наблюдателя и прекращает процесс смешения при достижении заданного уровня качества или при невозможности дальнейшего его увеличения.

При формализации критерия минимизации энергии, а также при регулировании температуры и вязкости возникает задача регулирования частоты вращения роторов. Частота вращения роторов будет изменяться САУ в зависимости от затраченной мощности, температуры и вязкости смеси. Для системы регулирования скорость вращения роторов возможна разработка специального закона управления, который обеспечит минимизацию затрат энергии.

Контроль температуры необходим для обеспечения информацией о ходе химических преобразований в смеси, что влечет изменение структуры зависимостей показателей. Для оценки параметра  $a$ , характеризующего фазовое состояние смеси, необходим наблюдатель. Данный наблюдатель, полученный на основе уравнения (5), будет иметь следующий вид:

$$a^{\wedge} = F_{10}(T, \mu^{\wedge}, \dot{\eta}), \quad (10)$$

где  $a^{\wedge}$  – оценка показателя фазового состояния смеси.

Это позволит учитывать изменение структуры уравнений в процессе регулирования, а также реализовать САУ переменной структуры. Такая система обеспечит автоматическое изменение параметров при качественных изменениях смеси.

Необходима аварийная остановка процесса при достижении температурой смеси критического значения. Управление температурой смеси можно обеспечить регулированием скорости вращения роторов и (или) давления при помощи затвора [6].

В процессе эксплуатации данной САУ возможно проводить анализ качества смеси экспресс-методами после получения смеси. Это позволит создать систему постепенной адаптации и вносить коррекцию в САУ после каждого замеса, что приведет к адаптации системы для большого числа рецептур. Система адаптации, получив совокупность параметров качества смеси ( $\{J, \mu, K_1, K_2, \dots\}$ ), формирует вектор настроек коэффициентов для САУ ( $\{R_1, R_2, \dots\}$ ).

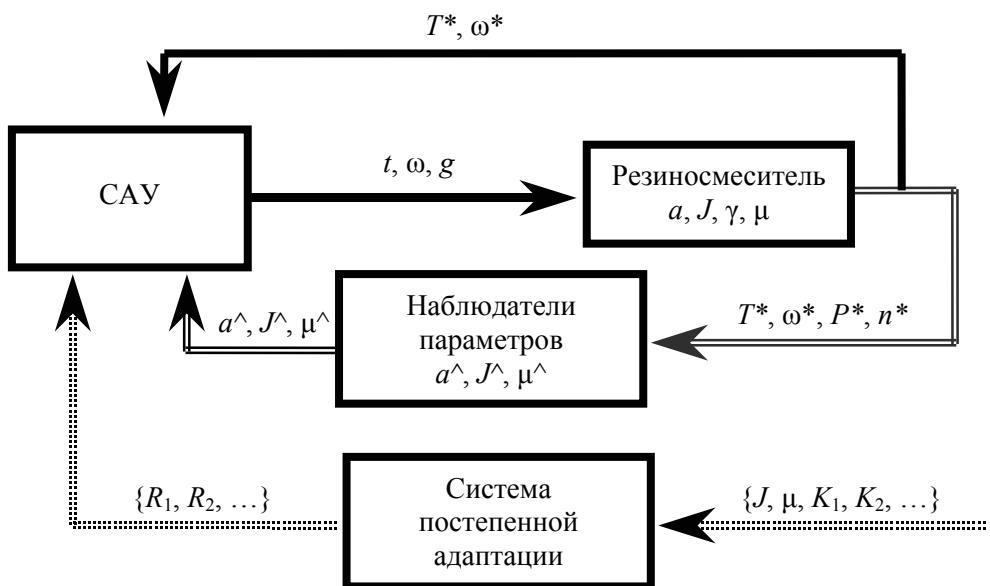


Рисунок. Схема системы управления процессом резиносмешения

На основании вышесказанного синтезируем структурную схему системы управления резиносмесителем, представленную на рисунке. В данной схеме параметры, помеченные символом « $*$ », характеризуют измеренное значение соответствующей величины, а символом « $\wedge$ » – ее оценку.

**Заключение.** Изучение процесса позволило определить параметры, доступные регулированию, и параметры, доступные измерению. Анализ процесса дал возможность выявить зависимости между показателями смесителя в общем виде. Были получены структуры наблюдателей важных параметров, недоступных измерению; сформулированы требования к САУ переменной структуры, которая обеспечивает минимизацию затрат электроэнергии при сохранении заданного уровня качества; предложена система постепенной адаптации САУ.

### Литература

1. Бекин, Н. Г. Машины и агрегаты заводов резиновой промышленности: в 4 т. / Н. Г. Бекин. – Ярославль: Изд-во Ярослав. политехн. ин-та, 1976. – 4 т.

2. Смешение полимеров / В. В. Богданов [и др.]. – Л.: Химия, 1979. – 192 с.

3. Богданов, В. В. Основы технологии смешения полимеров / В. В. Богданов, В. И. Метелкин, С. Г. Саватеев; под ред. В. Н. Красовского. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1984. – 192 с.

4. Thermally regulated closed mixer: patent. WO 02 22334 World Intellectual Property Organization, IPC B29B 7/28, 7/82 / Antonio Proni, Daniele Ballasso; fil. 27.08.01; publ. 21.03.02.

5. Method of mixing and kneading control of a rubber kneader: patent. 4076220 U.S.A., IPC B29B 7/28, 7/82 / Katsumoto Nakashima, Toshiro Kita; fil. 10.02.76; publ. 28.02.78.

6. Control for batch mixer: patent. 0244121 European Patent Office, IPC B29B 7/28 / Sureshchandra Rambhai Patel; fil. 15. 04.87; publ. 04.11.87.