

УДК 625.1

А.А. Ветрогон, канд. техн. наук,

В.П. Долгин, доцент, канд. техн. наук,

В.Н. Торлин, профессор, д-р техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

auto@sevntu.com.ua

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ РЕМОНТИРУЕМОГО КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ

Рассматриваются динамические процессы в системе автоматического регулирования, управляющей растяжением кузова легкового автомобиля, ремонтируемого после аварии. Исследуется возможность достижения предложенной системой автоматического регулирования заданного значения критерия качества технологического процесса, основной смысл которого заключается в обеспечении стабильного течения нестационарного поля пластической деформации.

Ключевые слова: кузовной ремонт, система управления, динамические показатели системы управления.

В технологии кузовного ремонта наилучшие показатели качества достигаются применением методов, использующих в технологических процессах системы автоматического регулирования (САР), обеспечивающих контролируемое протекание процесса. Основные трудности построения таких систем заключаются в геометрической сложности объекта управления – кузова автомобиля, поврежденного при дорожно-транспортном происшествии. Для достижения требуемых показателей геометрической точности ремонтируемого объекта и качества материала конструкции требуется обеспечение стабильности протекания технологического процесса.

Известны САР ходом пластического течения материала, применяемые в машинах растяжения одномерных образцов [1], в которых контролируется скорость деформации и усилие растяжения. Управляемое воздействие на двумерные поля пластической деформации рассмотрены в [2], где приводятся упрощенные аналитические модели объектов простой геометрической формы, описываемой известными кривыми второго порядка. Регулируемой величиной в данном случае является структура материала, подверженного пластической деформации. Известны также САР [3], в которых для описания объектов сложной конфигурации применяются численные методы.

Целью настоящей работы является определение таких показателей работы САР, которые позволяют обеспечить заданные значения параметров технологического процесса пластического деформирования объекта сложной конфигурации.

В качестве объекта регулирования в данном случае принимаем процесс пластического деформирования кузова легкового автомобиля (рисунок 1), описываемого уравнением [1]

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon}, \quad (1)$$

где σ , ε – компоненты тензоров напряжения и деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; t – время.

Компоненты скорости деформации $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ выразим через компоненты вектора скорости $V_x(x, y, t)$ и $V_y(x, y, t)$ следующим образом

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial V_x}{\partial t}, \quad \dot{\varepsilon}_y = \frac{\partial V_y}{\partial t}. \quad (2)$$

Т.к. V_x и V_y – это хорошо измеряемые величины.

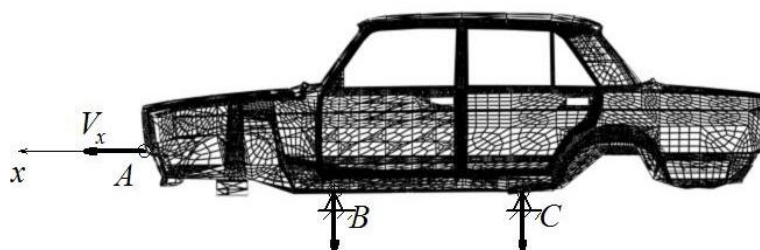


Рисунок 1 – Схема приложения нагрузки

Скорости V_x и V_y связаны с максимальной скоростью пластического течения $V_{\langle y, t \rangle}$, которая имеет место вдоль линий скольжения, расположенных к направлению воздействия под углом φ [1]

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = -\frac{1}{2}V \sin \varphi, \quad \frac{\partial V_y}{\partial y} = \frac{1}{2}V \sin \varphi, \quad (3)$$

где угол φ определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_x}{\partial x}}{\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y}}, \quad (4)$$

а скорость $V_{\langle y, t \rangle}$

$$V_{\langle y, t \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_x}{\partial x}\right)^2}. \quad (5)$$

Для определения V_x и V_y вводят функцию тока

$$V_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}; \quad V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (6)$$

которая удовлетворяет уравнению

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}\right)^2 + 4\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}\right)^2 = \mu V_{\langle y, t \rangle}^2 k^2, \quad (7)$$

где μ и k – параметры вязкопластического течения.

Ввиду сложности конфигурации рассматриваемого объекта анализ ведется с помощью конечноэлементной модели (рисунок 1). Для того чтобы удовлетворить выражения (3)–(7) в пределах одного элемента, скорости деформации интерполировались линейными зависимостями по x и y :

$$\begin{aligned} V_x &= \langle_0 + a_1 x + a_2 y \rangle^{k_1 t}, \\ V_y &= \langle_0 + b_1 x + b_2 y \rangle^{k_2 t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Качество процесса будет стабилизировано, если он будет протекать монотонно.

Критерием монотонности является

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{const}, \quad (9)$$

что обеспечивает постоянство скорости течения.

В рассматриваемом случае процесс будет монотонным, т.к. нет повторных нагрузок, следовательно, основной критерий качества процесса – непрерывность линий скольжения будет соблюдаться [2].

Подставляя (8) в (4), получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_2 e^{k_2 t} - a_1 e^{k_1 t}}{b_1 e^{k_2 t} - a_2 e^{k_1 t}}. \quad (10)$$

Передаточная функция одномерного процесса будет иметь вид

$$W_0 \langle p \rangle = \frac{\operatorname{tg} \varphi \langle p \rangle}{V_x \langle p \rangle}. \quad (11)$$

Подставляя в (11) изображения числителя и знаменателя, получим окончательную передаточную функцию для запаздывающего аргумента

$$W_0 \langle p \rangle = R_0 Z(x) \left(\frac{k_6}{\langle -T_1 p \rangle} + k_7 \right) e^{-\tau p}, \quad (12)$$

где $R_0 = \langle_0 + d_3 \rangle k_5 + e^{k_6} \langle_2 - \langle_0 + d_3 e^{k_5} \rangle 1/k_6 \langle_1$; $k_6 = k_2 - k_3$; $k_5 = k_4 - k_3$; $k_3 = k_1 + k_2$; $k_4 = 2k_1$; $d_1 = b_1 c_1$, $d_2 = a_2 c_1$; $d_3 = d_2 / d_1$; $k_7 = 1/k_5$; T_1 – постоянная времени; $c_1 = a_0 + a_1 x + a_2 y$; $Z(x) = (a_0 + a_1 x) e^{k_1 t}$ – линейная зависимость в пределах одного элемента; τ – время запаздывания.

Основной задачей рассматриваемой системы регулирования является стабилизация регулируемой величины $y = \operatorname{tg} \varphi$, обеспечивающей монотонность характера пластического течения во всех точках объекта. Для того чтобы следить за состоянием всего поля деформации, достаточно знать скорость V_x в одной точке поля, а затем с помощью математической модели восстановить всю картину течения. Для

этого в одной контрольной точке необходимо установить датчик скорости V_x или датчик перемещения U_x , результат измерения которого легко пересчитать в $V_x = U_x \cdot t_i$, где t_i – единица дискретного времени. Структурная схема, реализующая данный алгоритм, показана на рисунке 2.

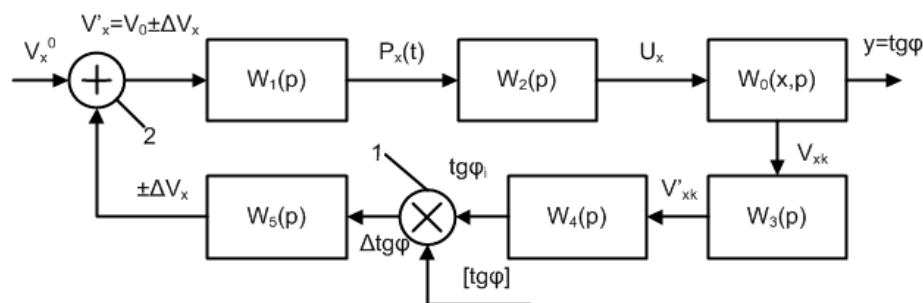


Рисунок 2 – Структурная схема системы стабилизации процесса растяжения ремонтируемого кузова автомобиля

Система работает следующим образом. На входе устанавливается начальная величина скорости растяжения V_x^0 . Затем сигнал V_x^0 в блоке $W_1(p)$ пересчитывается в сигнал $P_x(t)$ – давление в гидроцилиндре механизма нагружения $W_2(p)$, который создает перемещение U_x захватов гидроцилиндра. Процесс деформации $W_0(x, p)$ контролируется в контрольной точке датчиком скорости $W_3(p)$, сигнал от которого поступает в блок расчета поля скоростей, где рассчитываются скорости V_{xi} и V_{yi} в узлах сетки конечных элементов и критерий $tg\varphi_i$. Далее в сравнивающем устройстве 1 значение $tg\varphi_i$ сравнивается с допустимым значением $[tg\varphi]$ и отклонение $\Delta tg\varphi$ направляется в блок $W_5(p)$. Если $tg\varphi_i$ в какой то точке меньше допустимого значения $[tg\varphi]$, то величина $\Delta tg\varphi = [tg\varphi] - tg\varphi_i$ с положительными знаками в блоке $W_5(p)$ пересчитывается в приращение скорости ΔV_x со знаком плюс, в обратном случае ΔV_x выходит из блока $W_5(p)$ со знаком минус, после чего в сумматоре 2 эти величины суммируются с V_x^0 и цикл повторяется до тех пор, пока во всех точках объекта не будет установлено монотонное поле пластической деформации.

Передаточная функция системы будет иметь вид

$$W(x, p) = W_1(p)W_2(p)W_0(x, p)W_3(p)W_4(p)W_5(p), \quad (13)$$

где $W_1(p) = k_1$, $W_2(p) = k_2$, $W_4(p) = k_4$, $W_5(p) = k_5$ – передаточные функции вычислительных блоков;

$W_3(p) = \frac{k_3}{1 + T_0 \cdot p}$ – передаточная функция датчика; T_0 – постоянная времени датчика.

Окончательно передаточная функция системы имеет вид

$$W(x, p) = R_0 Z(x) \left(\frac{k_6}{1 + T_1 p} + k_7 \right) \frac{K_\Sigma}{1 + T_0 \cdot p} e^{-\tau p}, \quad (14)$$

где $K_\Sigma = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$.

При вычислении реакции нелинейного динамического звена возникают затруднения, связанные с выбором метода. Обычно в этом случае прибегают к линеаризации, допуская при этом погрешность, величину которой трудно оценить. Одним из возможных при анализе реакции динамического звена является метод Солодовникова для вычисления переходного процесса по вещественной частотной характеристике его передаточной функции [4]

$$Y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{Re}(\omega) \sin(\omega t)}{\omega} d\omega, \quad (15)$$

где $\text{Re}(\omega)$ – вещественная частотная характеристика.

Для получения переходной характеристики частотная передаточная функция должна быть представлена в алгебраической форме

$$W(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega),$$

где $\text{Re}(\omega)$ и $\text{Im}(\omega)$ могут быть получены на основании операторной передаточной функции.

Вычисления по формуле (15) для сложных нелинейных передаточных функций трудно реализуемы. С целью упрощения вычислений можно аппроксимировать подынтегральную функцию (15).

В этом случае предпочтительной является линейная аппроксимация вещественной характеристики. Для этого необходимо вещественную характеристику $\text{Re}(\omega)$, входящую в подынтегральную функцию (15), разбить на интервалы в выбранном диапазоне изменений аргумента, ограничив верхнее значение частоты диапазона интегрирования $\omega = \omega_{\max}$. Таким образом, решение задачи целесообразно разбить на следующие два этапа: ограничить верхнюю частоту диапазона интегрирования $\omega_{\max}$ и определить границы интервалов.

На первом этапе получить оценку $\omega_{\max}$ можно при выполнении требования

$$\int_0^{\omega_0} |\text{Re}(\omega)| d\omega \gg \int_{\omega_0}^{2\omega_0} |\text{Re}(\omega)| d\omega, \quad (16)$$

где $\int_0^{\omega_0} |\text{Re}(\omega)| d\omega$ – площадь, ограничиваемая функцией вещественной составляющей $\text{Re}(\omega)$ на интервале

от нуля до верхнего искомого значения граничной частоты; $\int_{\omega_0}^{2\omega_0} |\text{Re}(\omega)| d\omega$ – площадь, ограничиваемая

функцией вещественной составляющей $\text{Re}(\omega)$ на таком же по величине интервале справа от верхнего искомого значения граничной частоты; ω_0 – оценка искомого верхнего значения частотного диапазона $\omega_{\max}$. Правая часть выражения (16) является экстраполяцией интегральной оценки вещественной характеристики $\text{Re}(\omega)$ на интервале $\omega = [\omega_0, 2\omega_0]$.

При реализации итерационной процедуры можно заменить пределы интегрирования правой части выражения (2), задав фиксированное значение числа шагов экстраполяции k , и свести его к виду

$$\varepsilon \int_0^{ih} |\text{Re}(\omega)| d\omega \leq \int_{ih}^{(i+k)h} |\text{Re}(\omega)| d\omega, \quad (17)$$

где ih – текущее значение искомого верхнего предела ω_0 ; h – величина шага.

На рисунке 3 изображены графики, иллюстрирующие ход итерационного процесса, где введены следующие обозначения: $Ic(\omega) = \int_0^{ih} |\text{Re}(\omega)| d\omega$, $Ip(\omega) = \int_{ih}^{(i+k)h} |\text{Re}(\omega)| d\omega$ при значении $\varepsilon = 0,1$ для вещественной частотной характеристики $\text{Re}(\omega)$, изображенной на рисунке 4.

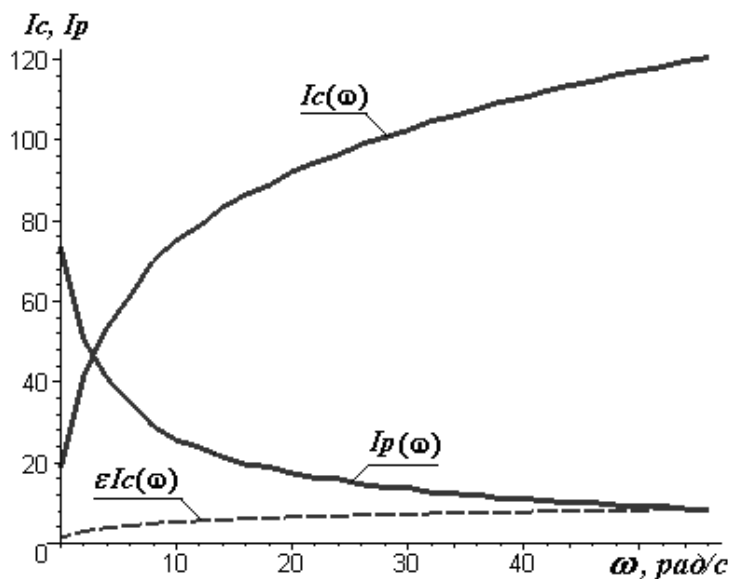


Рисунок 3 – Характер итерационного процесса

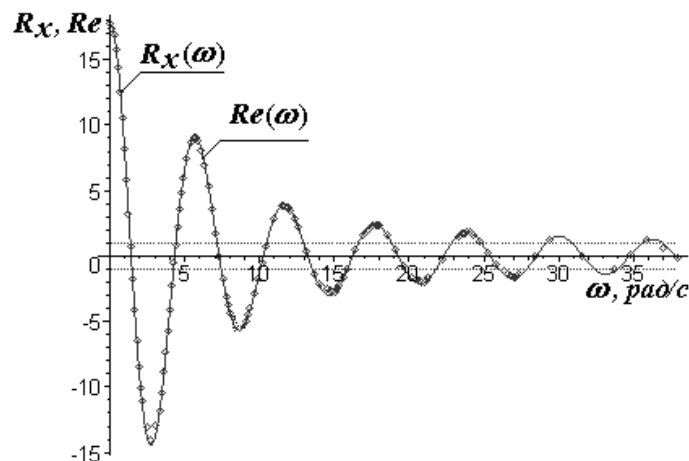


Рисунок 4 – Вещественная характеристика передаточной функции управления процессом

На втором этапе после выбора значения верхней частоты диапазона $\omega_{\max}$ необходимо уточнить число интервалов разбиения и их величину. При постоянном шаге дискретизации h величина погрешности будет разной для каждого из интервалов в зависимости от характера изменения функции $Re(\omega)$, стремясь к минимальному значению в конце диапазона $\omega_{\max}$, т.к. $R(\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} \rightarrow 0$.

Для снижения погрешности аппроксимации функции $Re(\omega)$ до заданной величины необходимо каждый интервал диапазона $\omega = [0, \omega_{\max}]$ разбить на сегменты, для которых погрешность аппроксимации не больше заданной. Обозначим $R_x(\omega)$ – результат аппроксимации функции $Re(\omega)$. При линейной интерполяции реальная кривая будет заменена отрезками прямых F_i , проходящих через точки, ограничивающие i -й сегмент

$$F_i = R_i - \frac{\Delta R_i}{\Delta \omega_i} (\omega_i - \omega), \quad (18)$$

где $R_i = Re(\omega_i)$, $\Delta R_i = R_{i+1} - R_i$; $\Delta \omega_i = \omega_{i+1} - \omega_i$, $\omega = [\omega_i, \omega_{i+1}]$.

При этом будет допущена абсолютная погрешность $\delta_i = |R(\omega) - F_i|$ в середине интервала. Задав допустимое значение погрешности δ , можно найти верхнюю частоту сегмента, для которого выполняется условие $\delta > \delta_i$ путем деления интервала, т.к. на краях интервала при $\omega = \omega_i$ и $\omega = \omega_{i+1}$ погрешность отсутствует в силу условия аппроксимации (19). Таким образом, дробя интервал, можно обеспечить заданное значение погрешности на выбранном i -м сегменте по условию $\delta > \max |\delta_i|$. На рисунке 4 точками изображена аппроксимированная вещественная характеристика $R_x(\omega)$.

На рисунке 5 изображены графики погрешности для одного сегмента в интервале дискретизации $\omega = [2; 4]$ рад/с (рисунок 5, а) и в диапазоне аппроксимации $\omega = [0; 30]$ рад/с (рисунок 5, б) с заданной допустимой погрешностью аппроксимации $\delta = 0,05$.

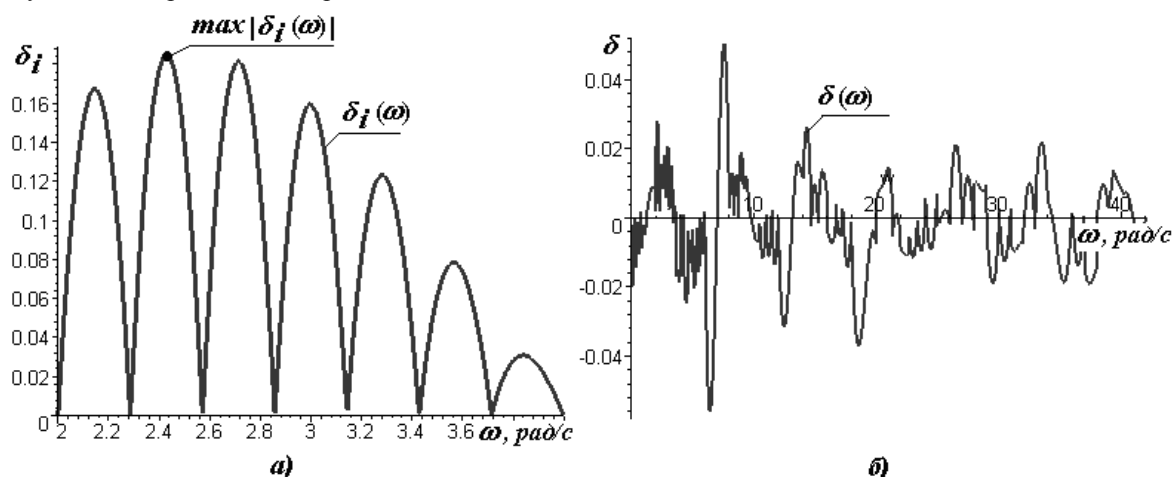


Рисунок 5 – Графики погрешности аппроксимации

Из графика погрешности, изображенного на рисунке 5, б видно, что на участках вещественной характеристики, где скорость изменения возрастает, число сегментов разбиения интервала увеличивается, и сужаются их границы.

По аппроксимированной с помощью линейного сплайна вещественной характеристике передаточной функции (14), показанной на рисунке 4, построена переходная характеристика, изображенная на рисунке 6.

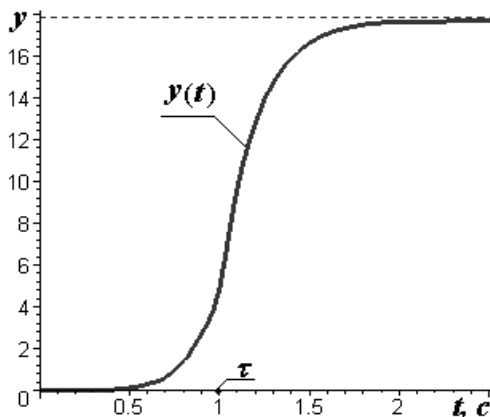


Рисунок 6 – Переходная характеристика

В качестве выводов можно отметить следующее:

1. Регулирование скорости процесса пластического течения объекта сложной конфигурации возможно при условии использования численной модели управления.
2. Реализация разработанного алгоритма стабилизации позволяет повысить производительность процесса и избежать брака по трещинообразованию.

В дальнейшем для уточнения модели процесса следует в соответствии с полной дифференциальной формой (1) учесть изменения состояний объекта во времени, в течение которого протекает процесс.

Библиографический список использованной литературы

1. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. — М.: Машиностроение, 1976. — 488 с.
2. Сегал В.М. Технологические задачи теории пластичности / В.М. Сегал. — М.: Наука и техника, 1997. — 256 с.
3. Теоретические основы обработки металлов давлением: Монография. [в 2-х т.] Т. 2 / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Ершов. — Днепропетровск: РВА "Днипро-ВАЛ", 2002. — 486 с.
4. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотноков, В.Н. Яковлев. — М.: Машиностроение, 1985. — 536 с.

Поступила в редакцию 20.06.2010 г.

Ветрогон О.А., Долгін В.П., Торлін В.М. Управління процесом пластичного розтягування кузова автомобіля, який ремонтується

Розглядаються динамічні процеси в системі автоматичного регулювання, яка управляє розтягуванням кузова легкового автомобіля, що ремонтується після аварії. Досліджується можливість досягнення запропонованою системою автоматичного регулювання заданого значення критерію якості технологічного процесу, основний зміст якого полягає в забезпеченні стабільного перебігу нестационарного поля пластичної деформації.

Ключові слова: кузовний ремонт, система управління, динамічні показники системи управління.

Vetrogon A.A., Dolgin V.P., Torlin V.N. Controlling the plastic tension process for repaired car bodies

We consider the dynamic processes in the automatic control system that regulates tension of a car body repaired after an accident. The possibility of achieving a given value of the quality criterion of a technological process by the proposed system of automatic regulation is considered. The basic meaning of the criterion is to provide for a stable flow of the unsteady plastic deformation field.

Keywords: body repair, control system, dynamic performance control system.