

HS-Profile

HS-Profile bezeichnen eine spezielle Art der Bewegungsgestaltung für periodisch arbeitende Mechanismen mit Kurven. „HS“ steht für „Harmonische **S**ynthese“ und bedeutet, dass Bewegungen als Fourierreihe, durch Überlagerung von Sinusfunktionen mit jeweiligen Amplituden und Phasenverschiebungen gestaltet werden. HS-Profile werden besonders für schnell laufende „High-Speed“-Mechanismen verwendet, die für Eigenschwingungen anfällig sind.

HS-Profile beziehen sich auf den gesamten Bewegungszyklus der periodisch arbeitenden Maschine, nicht auf einen einzelnen Bewegungsabschnitt.

Bei der Berechnung von Kurven wird die gewünschte Bewegung meist am Abtrieb vorgegeben. Die Kurvenprofile werden daraus rein kinematisch berechnet, ohne Berücksichtigung von Elastizitäten.

Mechanismen sind aber in Wirklichkeit immer elastisch. Der kinematischen Grundbewegung sind deshalb immer Eigenschwingungen überlagert. Oft ändern sich die Eigenfrequenzen während eines Umlaufs nur wenig und können als konstant betrachtet werden. Bei entsprechend hoher Taktzahl bzw. hohem Abstimmungsverhältnis $\eta = \text{Taktzahl}/\text{Eigenfrequenz}$ werden die überlagerten Eigenschwingungen so groß, dass die Funktion des Mechanismus beeinträchtigt wird.

Es ist nicht möglich, eine feste Grenze für das zulässige Abstimmungsverhältnis anzugeben, bis zu der die überlagerten Eigenschwingungen unbedenklich sind, weil die Anregung der Eigenschwingungen sehr von der Bewegungsgestaltung abhängt und die Genauigkeitsanforderungen unterschiedlich sind.

Man kann die überlagerten Eigenschwingungen aber grob mit Hilfe von Einmassenschwingermodellen abschätzen oder genauer durch Simulation mit MKS-Programmen ermitteln.

Ziel beim Einsatz eines HS-Profiles ist, die dynamischen Abweichungen von der gewollten Bewegung bei Betriebsdrehzahl zu minimieren.

Die Idee besteht darin, den Mechanismus im Bereich der Eigenfrequenzen möglichst wenig anzuregen, da eine Anregung in diesem Bereich die kinematisch vorgegebene Bewegung besonders stark verfälscht. Deshalb wird die Bewegung aus wenigen Harmonischen zusammengesetzt, deren höchste Frequenz deutlich unter der niedrigsten Eigenfrequenz des Mechanismus bleibt. Die k -te Harmonische ist dabei eine Sinusfunktion mit der Frequenz $k \cdot \text{Taktzahl}$.

Die resultierende Bewegung am Abtrieb setzt sich aus der anregenden Bewegung der Kurve und den überlagerten Eigenschwingungen zusammen. Diese resultierende Bewegung soll bei Betriebsdrehzahl so nah wie möglich an der für den Abtrieb gewünschten Bewegung liegen.

Folgende zwei Ansätze sind bei der Anwendung von HS-Profilen besonders bedeutsam:

Ansatz 1: Vorgabe eines Bewegungsdiagramms und Verwendung der ersten N Harmonischen aus der Fourieranalyse

$s(\varphi)$ = vorgegebene Bewegung mit Periodenlänge 2π

Darstellung als unendliche Fourierreihe:

$$s(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(k \cdot \varphi) + b_n \cdot \sin(k \cdot \varphi)]$$

Die Fourierkoeffizienten a_k und b_k , die zusammen Amplitude und Phase einer Harmonischen k definieren, sind mit Hilfe der Fourieranalyse aus dem vorgegebenen Bewegungsverlauf $s(\varphi)$ berechenbar:

$$a_k = 1/\pi \cdot \int_0^{2\pi} s(x) \cdot \cos(k \cdot x) \cdot dx$$

$$b_k = 1/\pi \cdot \int_0^{2\pi} s(x) \cdot \sin(k \cdot x) \cdot dx$$

Die Amplitude A_n der k . Harmonischen ist berechenbar durch

$$A_k^2 = a_k^2 + b_k^2$$

Die Phasenverschiebung φ_k der k . Harmonischen ist bestimmt durch

$$\tan(\varphi_k) = a_k / b_k$$

Das HS-Profil $s^*(\varphi)$ ergibt sich als Summe der ersten N Harmonischen:

$$s^*(\varphi) = a_0 / 2 + \sum_{k=1}^N [a_n \cdot \cos(k \cdot \varphi) + b_n \cdot \sin(k \cdot \varphi)]$$

Die Anzahl N zu berücksichtigender Harmonischer kann so gewählt werden, dass die Abweichung der resultierenden Bewegung am Abtrieb von der gewünschten Bewegung minimal wird.

Bei zu wenigen Harmonischen ist die kinematische Abweichung durch das HS-Profil sehr groß, so dass der Mechanismus schon bei kleiner Taktzahl nicht funktioniert. Bei zu vielen Harmonischen facht man schon die Eigenschwingungen an.

Ansatz 2: Vorgabe von Toleranzschläuchen für die resultierende Bewegung am Abtrieb und Ermittlung des HS-Profiles mit dem Simplex-Algorithmus

Bei dieser Technik gibt man Toleranzkanäle vor, die sowohl von der kinematischen Bewegungsvorgabe (der Anregung) als auch von der auf Basis eines Einmassenschwinger-Modells abgeschätzten Reaktion am Abtrieb eingehalten werden sollen.

Ein numerisches Verfahren, der Simplex-Algorithmus, sucht ein HS-Profil mit einer vorgegebenen Zahl von Harmonischen, das diese Toleranzkanäle einhält und außerdem eine lineare Zielfunktion optimiert, beispielsweise die Summe der Amplituden der Harmonischen.

Mit dem Simplex-Algorithmus benötigt man meist nur sehr wenige Harmonische, um mit Anregung und Reaktion die Toleranzkanäle einzuhalten. Allerdings kommen die Numerikprogramme erfahrungsgemäß nicht bei jeder Vorgabe zu einem Ergebnis.

Beide Ansätze sind in der Mechanismensoftware OPTIMUS MOTUS (R) implementiert.