

Dimensionierung eines Dual Slope ADC

Martin Clausen

09.05.2002

Zusammenfassung

Dieser Text erläutert die mathematische Beschreibung eines Dual Slope ADC. Weiterhin wird aus den Ergebnissen dieser Berechnungen die Dimensionierung von Integrationswiderstand und -kondensator sowie die Charakteristik eines passenden Operationsverstärkers abgeleitet.

1 Grundlegendes zum Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker (OP) ist ein mehrstufiger Verstärker mit hohem Verstärkungsfaktor. Durch äußere Beschaltung wird eine definierte Verstärkung erhalten. Grundbaustein des OP ist der Differenzverstärker, der aus zwei möglichst ähnlichen Transistoren aufgebaut wird. Die Basisanschlüsse dieser Transistoren werden dann als invertierender (−) bzw. nicht-invertierender (+) Eingang bezeichnet. Der OP verstärkt stets die Differenz der Spannungen an seinen Eingängen. Die Übertragungsfunktion lautet:

$$U_{out} = A(U_+ + U_-)$$

Dabei beschreibt A die Verstärkung des OP. Um eine definierte Verstärkung zu erhalten wird nun das Ausgangssignal U_{out} auf den invertierenden Eingang zurückgeführt. Damit ergibt sich der invertierende oder nicht-invertierende Verstärker, je nach Art der Gegenkopplung. Die Verstärkung des invertierenden Verstärkers ist:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_{in}}{R_{feedback}}$$

1.1 Der Integrator

Ein analoger Integrator besteht aus einem OP, einem Widerstand und einem Kondensator. $R_{feedback}$ wird hier durch den Wechselstromwiderstand des Kondensators $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ gebildet. U_{in} ist nun als Differenz der Eingangsspannungen $U_{in} \equiv U_- - U_+$ zu verstehen. Man beachte die Vorzeichen in dieser Definition.

Die Übertragungsfunktion lautet:

$$\begin{aligned} U_{out} &= -\frac{U_{in}}{j\omega RC} \\ &= -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{in}(\tau) d\tau \end{aligned}$$

Im Falle des Dual Slope Wandlers wird eine konstante Spannung über den Integrationszeitraum angenommen. Daher kann die Integration sofort aufgeführt werden:

$$\begin{aligned} U_{out} &= -\frac{1}{RC} [U \cdot t - U \cdot 0] + U_{const} \\ &= -\frac{Ut}{RC} + U_{const} \end{aligned}$$

Die Integrationskonstante U_{const} gibt dabei die Spannung an, mit der der Kondensator zu Beginn des Integrationsvorgangs aufgeladen war.

2 Der Wandlungsablauf

Die folgenden Ausführungen beschreiben einen Dual Slope Wandler der eine bipolare Eingangsspannung mit $|U_{in}| \leq U_{max}$ digitalisiert. Für die Referenzspannung gilt: $U_{max} \simeq 2U_{ref}$

2.1 Vorladen des Kondensators

Über die CMOS-Schalter wird der Ausgang des Komparators auf den Eingang des Integrators zurückgeführt. Die Spannungen stellen sich wie folgt ein:

$$\begin{aligned} U_{comp} &= A(U_{int} - U_{ref}) \\ U_{int} &= -\frac{1}{RC} (U_{comp} - U_{ref}) \end{aligned}$$

Damit folgt für den Ausgang des Komparators:

$$\begin{aligned} U_{comp} &= A \left(-\frac{t}{RC} (U_{comp} - U_{ref}) - U_{ref} \right) \\ &= \frac{\frac{t}{RC} - 1}{\frac{1}{A} + \frac{t}{RC}} U_{ref} \end{aligned}$$

Für Zeiten t groß gegen RC folgt bei großer Verstärkung A des Komparators:

$$U_{comp} = U_{ref}$$

Die wirkliche Vorladezeit muss nicht groß gegen RC sein, da der Wandlungsablauf, schon zu einer Spannung in der Nähe von U_{ref} führt. Beim Start des Wandlers nach dem Anlegen der Betriebsspannung ist diese Zeit jedoch zu beachten. Wird der Wandler nicht benutzt, sollte der Wandler immer den Kondensator vorladen. Durch das Vorladen wird auch der Offset des Komparators kompensiert. Das Vorladen entspricht einer Verschiebung des bipolaren Eingangsbereich des Wandlers zu positiven Werten.

2.2 Integration von U_{in}

Nach dem Vorladen des Kondensators, wird U_{in} an den nicht-invertierenden Eingang und U_{max} an den invertierenden Eingang gelegt. Die Ausgangsspannung wird sich in der Zeit wie folgt entwickeln:

$$U_{intl} = -\frac{1}{RC} (U_{max} - U_{in}) t_{lad} + U_{vorlad}$$

2.3 Integration von U_{ref}

Nun wird die Referenzspannung verwendet, um die Ladung des Kondensators zu messen, die sich während der Integration von U_{in} aufgebaut hat. Die Messung erfolgt über die Zeit, die die Integration bis zum Erreichen der Referenzspannung benötigt. Der Spannungsverlauf wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$U_{int} = -\frac{1}{RC} (U_{max} - U_{ref}) t + U_{intl}$$

Die Referenzspannung wird erreicht, wenn $U_{int} = U_{ref}$ gilt. Mit dieser Bedingung und $U_{vorlad} = U_{ref}$ lässt sich die Integrationszeit und damit die Eingangsspannung bestimmen:

$$\begin{aligned} U_{ref} &= -\frac{1}{RC} (U_{max} - U_{ref}) t \\ &\quad -\frac{1}{RC} (U_{max} - U_{in}) t_{lad} \\ &\quad + U_{ref} \end{aligned}$$

Eine einfache Umformung ergibt:

$$t = \frac{U_{in} - U_{max}}{U_{max} - U_{ref}} t_{lad}$$

Da sich U_{ref} immer als vielfaches von U_{max} ausdrücken lässt gilt:

$$t = \frac{U_{in} - U_{max}}{U_{max} - x U_{max}} t_{lad}$$

Im Idealfall gilt $x = 2$, dann kann obige Gleichung vereinfacht werden:

$$t = \left(1 - \frac{U_{in}}{U_{max}} \right) t_{lad} \quad (1)$$

2.4 Bestimmung des Wertebereichs von t

Für die Eingangsspannung gilt mit $x = 2$:

$$-U_{max} \leq U_{in} \leq U_{max}$$

Damit folgt sofort für den Wertebereich von t aus (1):

$$0 \leq t \leq 2t_{lad}$$

2.5 Maximale Ausgangsspannung des Integrators

Während des Vorladens des Kondensators wird sich die Schaltung so einstellen, dass die Differenz der Eingangsspannungen am Integrators verschwindet. Damit stellt sich die Ausgangsspannung des Integrators auf Null ein.

Während der Integration der zu messenden Eingangsspannung wird sich U_{intl} in den folgenden Grenzen bewegen, wenn die Annahmen von Abschnitt 2.4 und $t = 2t_{lad}$ verwendet werden:

$$2U_{max} \left(1 - \frac{t_{lad}}{RC} \right) \leq U_{intl} \leq 2U_{max}$$

Analog folgt für die Integration der Referenzspannung:

$$2U_{max} \left(1 - \frac{t_{lad}}{RC} \right) \leq U_{int} \leq \left(1 + \frac{t_{lad}}{RC} \right) 2U_{max}$$

Die obere Spannung wird hier jedoch durch den Abschluss des Messzyklus bei $U_{int} = 2U_{max}$ begrenzt. Damit folgt für die Spannungen am Ausgang des Integrators:

$$2U_{max} \left(1 - \frac{t_{lad}}{RC} \right) \leq U_{intl} \leq 2U_{max}$$

Wenn man bedenkt, dass normale OP einen auf $U_b - 1,5\text{ V}$ begrenzten Ausgangsspannungshub haben, wird klar, warum die maximale Eingangsspannung bei einer Betriebsspannung von 5 V nicht viel größer als $1,2\text{ V}$ sein kann.

Die Spannungsversorgung muss nicht symmetrisch sein. Höhere Betriebsspannungen sind auch möglich, so lange die maximale Betriebsspannung¹ der Chips nicht überschritten wird.

2.6 Wahl von Kondensator und Widerstand

Wird der 8051 mit f_{cry} betrieben, ergibt sich eine Taktfrequenz des Timers von $\frac{f_{cry}}{12}$. Der Timer hat eine Breite von 16 Bit. Damit dieser nicht überläuft, muss also gelten:

$$t \leq \frac{2^{16}}{\frac{f_{cry}}{12}}$$

Nimmt man den Wert des Kondensators als gegeben an, so folgt mit $t = RC \cdot \alpha$:

$$R = \frac{2^{16}}{\frac{f_{cry}}{12}} \cdot \frac{1}{C \cdot \alpha}$$

Mit den praktischen Werten $\alpha \approx 1,4$, $f_{cry} = 12\text{ MHz}$ und $C = 470\text{ nF}$ ergibt sich $R = 100\text{ K}\Omega$.

Es sollte ein hochwertiger Metallfilm-Kondensator mit Polypropylen, Polyester, Polycarbonat oder Polyester als Dielektrikum² (in dieser Reihenfolge) zum Einsatz kommen. Polyester wird die integrale Linearität des Wandlers verschlechtern. Diese Kunststoffe zeigen niedrigen Leckstrom und niedrige dielektrische Absorption.³ Beide Effekte stören die Funktion des Integrators und wirken sich somit direkt auf die Genauigkeit des Wandlers aus. Der Widerstand sollte ein Metallfilmtyp sein.

2.7 Unipolarer Betrieb

Oft soll nur eine positive Spannung digitalisiert werden. Es gilt also:

$$0 \leq U_{in} \leq U_{max}$$

¹TLC 274 und 4053: $U_{ges} \leq 16\text{ V}$

TL 0X4: $U_{ges} \leq 36\text{ V}$

²Siehe auch: Analog Device Application Note AN-348, Avoiding Passive-Component Pitfalls; Maxim Datenblatt MAX 132

³Dieser Effekt ist vergleichbar mit der Remanenz von magnetischen Stoffen. Der Kondensator "erinnert" sich an Spannungen.

Dann folgt aus (1) folgt für den Wertebereich von t :

$$0 \leq t \leq t_{lad}$$

Während der Integration wird sich die Ausgangsspannung U_{int} in den folgenden Grenzen bewegen, wenn die obigen Annahmen und $t = t_{lad}$ verwendet werden:

$$2U_{max} \left(1 - \frac{t_{lad}}{RC}\right) \leq U_{intlad} \leq 2U_{max}$$

Wird nun ein Single-Supply OP wie der TLC 274 verwendet und sicher gestellt, dass immer $\frac{t_{lad}}{RC} \leq 1$ gilt, kann auch auf die negative Betriebsspannung verzichtet werden. Dann muss der Wert mit dem der Timer geladen wird, von 8000H auf FFFFH geändert werden und der Integrationswiderstand auf $150\text{ K}\Omega$ erhöht werden.