

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННОГО НОНИУСНОГО МЕТОДА

В.Л. Чураков, науч. сотр. ФГБУН Удмуртский ФИЦ УрО РАН, канд. техн. наук,
v.l.churakov@mail.ru

С.П. Юркевичюс, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, доц.,
jursp@extech.ru

А.Е. Гриценко, зам. нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук,
gritsenkoae@extech.ru

Рецензент: С.В. Стрельников, АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», д-р техн. наук, orionsvs@mail.ru

Разработан алгоритм измерения длительности временного интервала с применением нониусного метода, при использовании которого для уточнения результата измерения учитываются не только количество периодов нониусного генератора, отсчитанное до первого момента изменения разности фаз, но и число групп периодов этого генератора, определяемых серией последующих моментов изменения разности фаз.

Ключевые слова: временной интервал, фаза, нониусный генератор, нониусный метод, алгоритм.

MEASURING TIME INTERVALS USING THE GENERALIZED VERNIER METHOD

V.L. Churakov, Researcher, FSBI Udmurt Federal Research Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering, v.l.churakov@mail.ru

S.P. Yurkevichyus, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, Assistant Professor, jursp@extech.ru

A.E. Gritsenko, Deputy Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, gritsenkoae@extech.ru

An algorithm has been developed for measuring the duration of a time interval using the vernier method, using which, to clarify the measurement result, not only the number of periods of the vernier generator, counted before the first moment of change in the phase difference, is taken into account, but also the number of groups of periods of this generator, determined by a series of subsequent moments of change in the phase difference.

Keywords: time interval, phase, vernier generator, vernier method, algorithm.

При измерении временных интервалов электронным нониусным методом основная и нониусная шкалы формируются с помощью двух генераторов. Генератор основной шкалы запускается в момент, соответствующий началу, а нониусной – окончанию измеряемого интервала. При этом начальный сдвиг фаз между сигналами, вырабатываемыми генераторами, т.е. взаимное смещение передних фронтов, определяется длительностью измеряемого интервала. Так как периоды генераторов выбираются различными, первоначальная разность фаз уменьшается, что в итоге приводит к изменению ее знака. Это событие называется моментом изменения разности фаз [1], начиная с которого запаздывание сигнала нониусного генератора по отношению к сигналу основного сменяется опережением или наоборот. Если

для определенности обозначить период генератора основной шкалы символом T_1 , а нониусной – T_2 , то:

$$T_2(1 + \alpha_0)T_1, \tag{1}$$

где: $0 < \alpha_0 < 1$.

При измерении длительности временного интервала генератор основной шкалы G_1 , как показано на рис. 1, запускается от начала измеряемого интервала t_x и совершает до момента изменения разности фаз, отмеченного точкой В на рис. 1, k периодов. Генератор нониусной шкалы G_2 запускается от конца временного интервала (см. рис. 1) и формирует до того же момента l_0 периодов. Для рассматриваемого случая $k = 6$, $l_0 = 2$. Число уложившихся во временной интервал целых периодов генератора основной шкалы составляет $k - l_0 - 1$, а его дробная часть периода T_1 на рис. 1 обозначена символом y_0 . Дальнейший процесс представляет собой последовательную компенсацию с каждым периодом нониусного генератора начальной разности фаз $(1 - y_0)T_1$ на α_0 -ю часть периода T_1 . Следовательно,

$$(1 - y_0)T_1 = l_0\alpha_0 T_1 - y_1 T_1, \text{ или } y_1 = 1 - l_0\alpha_0 + y_0, \tag{2}$$

где: y_1 – часть периода T_1 , на которую передний фронт генератора нониусной шкалы сдвинется относительно переднего фронта генератора основной шкалы в момент изменения разности фаз.

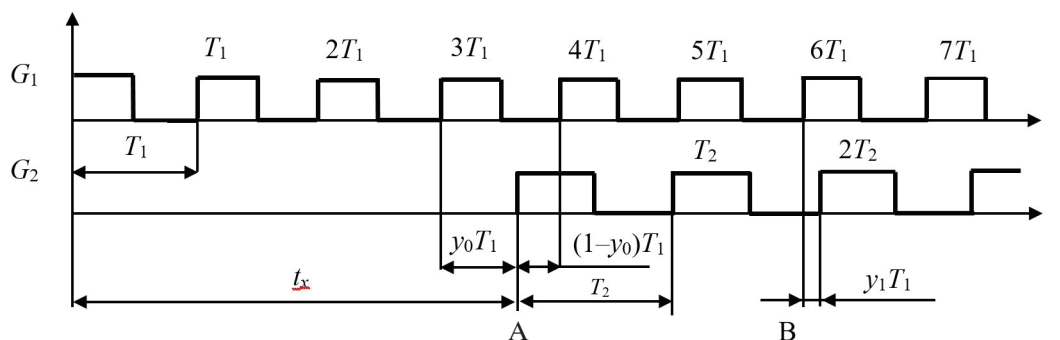


Рис. 1. Измерение временного интервала нониусным методом

Следовательно, $0 < y_1 < \alpha_0$.

На основании изложенного длительность временного интервала, выраженная через период основной шкалы T_1 , равна

$$x = k - l_0 - \alpha_0 l_0 + y_1. \tag{3}$$

Так как $0 < y_1 < \alpha_0$, то

$$k - l_0 - \alpha_0 l_0 \leq x < k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0. \tag{4}$$

Изложенное является основой обычного нониусного метода.

Для поиска путей повышения точности измерения временного интервала проанализируем процесс изменения сдвига фаз генераторов через определенные группы периодов. Сдвиг фаз нониусного генератора по отношению к фазе основного генератора от одного момента изменения разности фаз до другого обозначим α_1 , а этот отрезок времени назовем циклом первого порядка. Предположим, что генераторы начали работать одновременно, как показано на рис. 2. Тогда за время цикла первого порядка нониусный генератор сформирует p_0 , основной – $p_0 + 1$ периодов, а α_1 будет представлять часть периода T_1 , на которую передний фронт нониусного генератора будет сдвинут по отношению к переднему фронту основного генератора в момент изменения разности фаз (на рис. 2 $p_0 = 4$), т. е.:

$$T_2 p_0 = T_1(p_0 + 1) + T_1 \alpha_1. \tag{5}$$

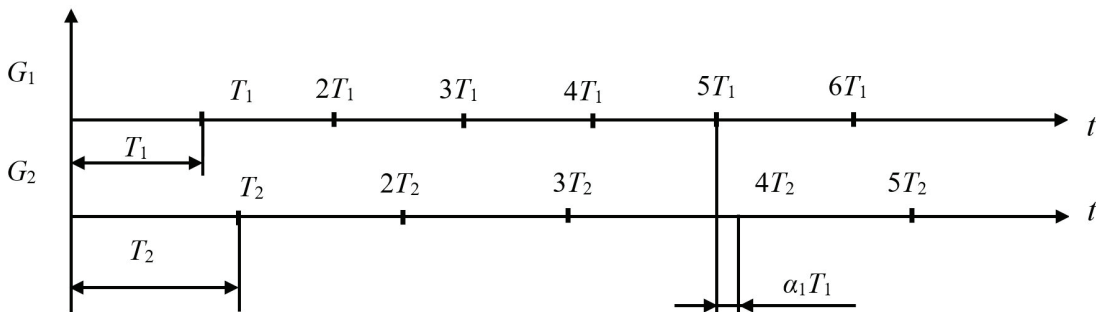


Рис. 2. Диаграмма цикла первого порядка. Периоды генераторов нанесены на оси времени и отделены друг от друга метками

Подставив (1) в (5), получим:

$$T_1(1 + \alpha_0)p_0 = T_1(p_0 + 1) + T_1 \alpha_1, \text{ или } \alpha_1 = \alpha_0 p_0 - 1 \tag{6}$$

при условии

$$\alpha_0(p_0 - 1) < 1 < \alpha_0 p_0. \tag{7}$$

Как видно из (6) и (7), $\alpha_1 < \alpha_0$. Рассмотрим несколько следующих друг за другом циклов первого порядка, как показано на рис. 3.

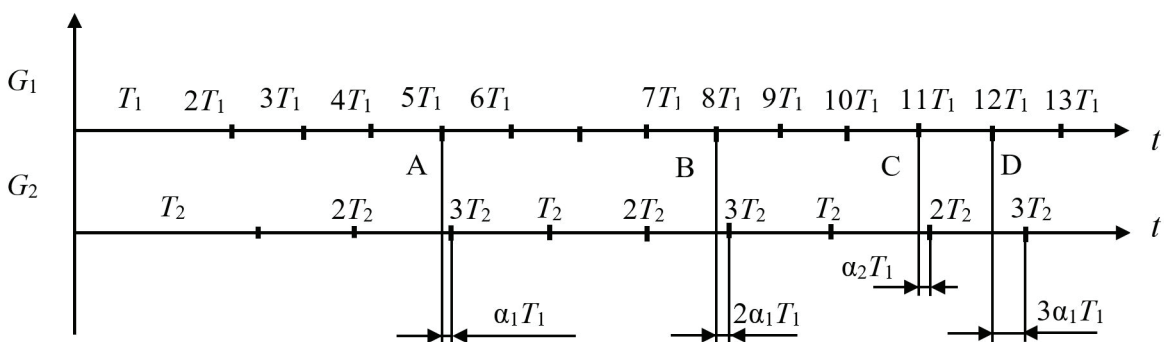


Рис. 3. Диаграмма цикла второго порядка

Каждый такой цикл в момент своего окончания приводит к сдвигу фазы α_1 (точки А и В на рис. 3) нониусного генератора относительно фазы основного генератора по сравнению с разностью фаз в момент окончания предыдущего цикла первого порядка. В момент окончания p_i -го цикла первого порядка разность фаз составит $\alpha_1 p_1$ (точка D на рис. 3, $p_1 = 3$). Пусть справедливо

$$\alpha_1(p_1 - 1) < \alpha_0 < \alpha_1 p_1. \quad (8)$$

Так как в момент изменения разности фаз сдвиг фронта нониусного генератора относительно фронта основного генератора не может превышать α_0 , то изменение разности фаз наступает на один период нониусного генератора раньше. Таким образом, в p_1 -ом цикле первого порядка укладывается не p_0 , а $p_0 - 1$ период нониусного генератора, и сдвиг фронта нониусного генератора относительно фронта основного генератора составит

$$\alpha_2 = \alpha_1 p_1 - \alpha_0. \quad (9)$$

Следовательно, интервал времени, включающий p_1 циклов первого порядка, по аналогии с предыдущим может быть назван циклом второго порядка. Цикл второго порядка начинается с момента начала следующего после укороченного (содержащего $p_0 - 1$ период) цикла первого порядка и заканчивается укороченным циклом первого порядка.

Из (9) с учетом (8) следует, что $\alpha_2 < \alpha_1$.

Рассмотрим следующие друг за другом циклы второго порядка. Каждый цикл при своем окончании изменяет сдвиг фаз на α_2 . Но окончание p_2 таких циклов:

$$\alpha_2(p_2 - 1) < \alpha_1 < \alpha_2 p_2. \quad (10)$$

Отсюда можно сделать вывод, что p_1 -й цикл первого порядка приводит к приращению разности фаз двух генераторов на α_1 , следовательно, содержит p_0 периодов нониусного генератора. В свою очередь, $(p_1 - 1)$ -й цикл первого порядка, входящий в p_2 -й цикл второго порядка, сдвигая фазы генераторов на α_1 , в итоге обеспечивает сдвиг фаз, меньший α_1 . Значит, $(p_1 - 1)$ -й цикл первого порядка должен содержать $p_0 - 1$ период нониусного генератора, а цикл второго порядка должен содержать $p_1 - 1$ циклов первого порядка. На основании этих рассуждений определяется сдвиг фаз двух генераторов после окончания цикла третьего порядка, начинающегося с момента начала первого цикла второго порядка (после цикла, содержащего на один цикл первого порядка меньше) и заканчивающегося таким же укороченным циклом второго порядка:

$$\alpha_3 = \alpha_2 p_2 - \alpha_1. \quad (11)$$

Из условия (10) и уравнения (11) следует, что $\alpha_3 < \alpha_2$.

Таким образом, сдвиг фазы после окончания каждого из последующих циклов, которые можно отличить по внешним признакам, будет уменьшаться, а длительность этих циклов — увеличиваться. В итоге получаем систему уравнений:

$$1 = \alpha_0 p_0 - \alpha_1, \quad \alpha_0 = \alpha_1 p_1 - \alpha_2, \quad \alpha_1 = \alpha_2 p_2 - \alpha_3. \quad (12)$$

На основании изложенного можно сформулировать методику уточнения измерения временного интервала, т.е. оценки величины y_1 (см. рис. 1). Для этого следует продолжить измерение с фиксацией циклов первого порядка. После одного цикла первого порядка в следующий момент изменения разности фаз сдвиг фаз основного и нониусного генераторов составит $y_1 + \alpha_1$, спустя еще один цикл первого порядка достигнет $y_1 + 2\alpha_1$ и т.д. Однако

такое увеличение сдвига фаз не может продолжаться безгранично, так как в момент изменения разности фаз сдвиг не может превышать α_0 . Пусть после l_i -го цикла первого порядка сдвиг фаз генераторов составит $y_1 + l_1 \alpha_1 > \alpha_0$, это означает, что момент изменения разности фаз произошел периодом нониусного генератора раньше. Сдвиг фаз основного и нониусного генераторов в этот момент:

$$y_2 = y_1 + l_1 \alpha_1 - \alpha_0, \text{ т. е. } y_1 = \alpha_0 - l_1 \alpha_1 + y_2. \quad (13)$$

Очевидно, что $0 \leq y_2 < \alpha_1$. Отсюда следует, что уточнение длительности временного интервала путем подсчета циклов первого порядка должно прекратиться по получении первого укороченного цикла. Подставив (13) в (3), получим:

$$x = k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - l_1 \alpha_1 + y_2, \quad (14)$$

так как измеряемый интервал находится в пределах:

$$k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - l_1 \alpha_1 \leq x < k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - (l_1 - 1)\alpha_1, \quad (15)$$

Дополнительное уточнение результата, т. е. начальной разности фаз y_2 , осуществляется путем фиксации циклов второго порядка. Подсчет циклов второго порядка ведется до получения первого укороченного цикла включительно, когда в результате l_2 -кратного прибавления к начальной разности фаз y_2 сдвиг фаз будет превышать α_1 на величину y_3 .

$$y_3 = y_2 + l_2 \alpha_2 - \alpha_1, \text{ т. е. } y_2 = \alpha_1 - l_2 \alpha_2 + y_3, \quad (16)$$

$$x = k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - (l_1 - 1)\alpha_1 - l_2 \alpha_2 + y_3. \quad (17)$$

Учитывая, что $0 \leq y_3 < \alpha_2$, находим пределы измеряемого интервала:

$$k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - (l_1 - 1)\alpha_1 - l_2 \alpha_2 \leq x;$$

$$x < k - l_0 - (l_0 - 1)\alpha_0 - (l_1 - 1)\alpha_1 - (l_2 - 1)\alpha_2. \quad (18)$$

В общем случае для n -го шага уточнения:

$$k - l_0 - l_n \alpha_n - \sum_{i=0}^{n-1} (l_i - 1)\alpha_i \leq x < k - l_0 - \sum_{i=0}^n (l_i - 1)\alpha_i. \quad (19)$$

Метод измерения длительности временного интервала, при котором уточнение результата осуществляется с помощью определения числа циклов высшего порядка, предлагается назвать обобщенным нониусным методом. Результаты проведенного анализа остаются справедливыми и в том случае, если период нониусного генератора меньше периода основного: $T_2 < T_1$. Тогда:

$$k - l_0 + \sum_{i=0}^n (l_i - 1)\alpha_i < x \leq k - l_0 + l_n \alpha_n + \sum_{i=0}^{n-1} (l_i - 1)\alpha_i. \quad (20)$$

При технической реализации измерительного устройства, функционирующего в соответствии с разработанным алгоритмом, исключается необходимость юстировки генераторов основной и нониусной шкал, требуемая точность достигается путем математической обработки результатов с помощью микропроцессорных вычислительных средств.

Список литературы

1. Богородицкий А.А., Рыжевский А.Г. Нониусные аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергия, 1975.

References

1. Bogoroditsky A.A., Ryzhevsky A.G. (1975) *Noniusnye analogo-tsifrovye preobrazovateli* [Vernier analog-to-digital converters] *Energiya* [Energy]. Moscow.