



УДК 004.021:621.38 621.396.6

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.344.345

# ФАЗОВАЯ МАКРОМДЕЛЬ СХЕМ ФАПЧ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

## PLL PHASE MICROMODEL CONSIDERING NONLINEAR EFFECTS

ГУРАРИЙ МАРК МОИСЕЕВИЧ<sup>1</sup>GOURARY MARK M.<sup>1</sup>ЖАРОВ МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ<sup>1</sup>ZHAROV MICHAEL M.<sup>1</sup>ИОНОВ ЛЕОНИД ПЛАТОНОВИЧ<sup>2</sup>IONOV LEONID P.<sup>2</sup>МУХИН ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ<sup>2</sup>MUKHIN IGOR I.<sup>2</sup>РУСАКОВ СЕРГЕЙ ГРИГОРЬЕВИЧ<sup>1</sup>RUSAKOV SERGEY G.<sup>1</sup>ТЕН ИВАН МИХАЙЛОВИЧ<sup>2</sup>TEN IVAN M.<sup>2</sup>УЛЬЯНОВ СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ<sup>1</sup>ULYANOV SERGEY L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем проектирования в микрэлектронике РАН (ИППМ РАН)  
124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3  
ippm@ippm.ru

<sup>2</sup>АО «НИИМА «Прогресс»  
125183, г. Москва, проезд Черепановых, 54  
info@mri-progress.ru

<sup>1</sup>Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (IPPM RAS)

3 Sovetskaya St., Zelenograd, Moscow, 124365  
ippm@ippm.ru

<sup>2</sup>Microelectronics Research Institute PROGRESS JSC  
("PROGRESS MRI" JSC)  
54 Cherepanovych Lane, Moscow, 125183, Russia  
info@mri-progress.ru

В работе рассмотрены проблемы шумового анализа схем ФАПЧ с дробным делителем частоты при наличии нелинейных эффектов в токовом ключе. Предложен алгоритм учета рассогласования токов при получении эквивалентного спектра шума квантования для формирования линейной фазовой макромодели ФАПЧ. Приведены примеры моделирования.

**Ключевые слова:** аналоговые схемы; синтез частот; фазовая автоподстройка частоты; рассогласование токов; фазовый шум; шумовой анализ; передаточная функция; эквивалентная схема.

The paper considers problems of noise analysis of fractional-N PLL circuits in the presence of nonlinear effects in the charge pump. An algorithm taking into account the current mismatch has been proposed for obtaining an equivalent quantization noise spectrum for the formation of a PLL linear phase macro-model. Simulation examples have been presented.

**Keywords:** analog circuits; frequency synthesis; phase locked loop; current mismatch; phase noise; noise analysis; transfer function; equivalent circuit.

Данная работа представляет расширение системы шумового моделирования фазовых шумов синтезатора частоты на базе разработанного авторами метода анализа ФАПЧ с дробным делителем частоты, основанного на представлении фазовой макромодели в виде эквивалентной электрической схемы [1]. В рамках этого подхода используются линейные идеализированные модели основных блоков ФАПЧ. При этом не учитываются так называемые неидеальности токового ключа (ТК) [2] на выходе частотно-фазового детектора (ЧФД), к которым относятся токи утечки, разделение и утечка зарядов, мертвая зона, рассогласование фронтов, рассогласование токов накачки и откачки. Как показано в [3], последний фактор играет основную роль в существенном возрастании фазового шума на выходе дробным делителем частоты. Учет влияния рассогласования токов может быть достаточно легко реализован в рамках поведенческой модели ФАПЧ [4], однако такая модель требует значительно больших вычислительных затрат. Поэтому целью данной

работы была разработка алгоритма шумового анализа на основе фазовой макромодели ФАПЧ с учетом рассогласования токов в ТК. При разработке алгоритма использовались некоторые результаты, полученные в [5].

Разработка алгоритма шумового анализа построена на том, что основным фактором усиления выходного шума ФАПЧ является шум квантования сигма-дельта-модулятора на выходе делителя частоты [5]. Транзисторными шумами блоков ФАПЧ, а также шумом квантования в петле обратной связи можно пренебречь при оценке влияния рассогласования токов в шумовом анализе ФАПЧ с дробным делителем частоты. Поэтому в макромодели схемы ФАПЧ блок ЧФД+ТК по-прежнему представляется линейной передаточной функцией  $KPD = I_m/2\pi$ , где  $I_m$  — среднее значение амплитуд токов накачки ( $I_{up}$ ) и откачки ( $I_{down}$ ). Нелинейность вида рис. 1 $\sigma$  учитывается включением дополнительного кусочно-линейного блока на выходе сигма-дельта-модулятора.



$$\Delta N^{out}(\Delta N) = \begin{cases} \Delta N \cdot (1+e/2) & \text{при } \Delta N > 0 \\ \Delta N \cdot (1-e/2) & \text{при } \Delta N < 0 \end{cases} \quad e = \frac{I_{up} - I_{down}}{I_{up} + I_{down}}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta N$  — корректировки коэффициента деления на выходе сигма-дельта-модулятора [1], пример которых представлен на рис. 2а. Учитывая, что среднее значение сигнала на выходе ЧФД+ТК должно быть нулевым (для сохранения заданной частоты управляемого генератора благодаря сдвигу фазы петли обратной связи), то и среднее на выходе (1) также нулевое при некотором входном сдвиге  $h$ , что приводит к уравнению относительно  $h$ .

$$\overline{\Delta N^{out}}(\Delta N) = \sum_{k=1}^K \Delta N^{out}(\Delta N_k + h)/K = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta N_k$ ,  $K$  — значение  $\Delta N$  на  $k$ -м шаге и общее количество шагов соответственно. В работе предложен алгоритм решения (2) на основе построения гистограммы величин  $\Delta N_k$  (рис. 2б). После определения  $h$  находится спектр последовательности  $\Delta N^{out}(\Delta N_k + h)$  и проводятся операции, представленные в [1].

Авторы считают, что в данной работе новым является алгоритм формирования эквивалентного шума на основе построения гистограммы распределения выходных значений сигма-дельта-модулятора.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гурарий М.М., Жаров М.М., Мухин И.И., Ионов Л.П., Русаков С.Г., Ульянов С.Л. Использование электрических макромоделей для анализа синтезатора частот с дробным коэффициентом деления // Наноиндустрия. Спецвыпуск (82), 2018. — С. 385–391.
- Save S., Mishra B.K., Pandya J. Performance Enhancement of Charge Pump using Modified Wilson Current Mirror // International Journal of Engineering Research and General Science 3(4), 2015. P. 497–509.
- Leoncini M., Bonfanti A., Levantino S., Lacaia A.L. Efficient Behavioral Simulation of Charge-Pump Phase-Locked Loops // IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers. Vol. 65. №6. 2018. P. 1968–1980.
- Hosseini K., Fitzgibbon B., Kennedy M.P. Observations Concerning the Generation of Spurious Tones in Digital Delta-Sigma Modulators Followed by a Memoryless Nonlinearity // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. Vol. 58. Is. 11, Nov. 2011. P. 714–718.
- Michael Peter Kennedy, Hongjia Mo, Zhida Li, Guosheng Hu, Paolo Scognamiglio, Ettore Napoli. The noise and spur delusion in fractional-N frequency synthesizer design // Circuits and Systems (ISCAS), 2015 IEEE International Symposium May 2015. P. 2577–2580.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



## ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. СПРАВОЧНИК. В 2-Х КНИГАХ

Под ред. К. Кумбза

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. — 2032 с.,  
ISBN 978-5-94836-258-8  
Т.1, — 1016 с. Т.2. — 1016 с.

В издании рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценка надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем. Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности, поскольку печатные платы являются фундаментом проектирования и производства изделий электроники. Данная книга может служить учебным пособием для студентов и аспирантов вузов соответствующих специальностей.

**КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?**  
e-mail: knigi@technosphera.ru;  
sales@technosphera.ru

125319, Москва, а/я 91;

төл.: +7 495 234-0110;  
факс: +7 495 956-3346;