

УДК 681.511.4

## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

А.А. ДЕРЮШЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 марта 2003

Рассматривается проблема повышения быстродействия импульсных устройств фазовой синхронизации. Проведен краткий анализ традиционных методов повышения быстродействия, в результате которого выявлены пути их улучшения. Показано, что использование изменяемой передаточной функцией, в частности изменяемой передаточной функцией фильтрующе-корректирующих звеньев, позволяет значительно улучшить характеристики импульсного устройства фазовой синхронизации при незначительном схемотехническом усложнении. Предложены способы изменения передаточной функции фильтрующе-корректирующих звеньев. Данные способы могут применяться как при разработке новых устройств, так и при увеличении быстродействия существующих. Для автоматизации проектирования импульсных устройств фазовой синхронизации с изменяемой и неизменяемой передаточной функцией разработан пакет прикладных программ "ИУФС 2.11".

*Ключевые слова:* импульсные устройства фазовой синхронизации, изменяемая передаточная функция, быстродействие.

### Введение

В настоящее время наблюдается рост требований к быстродействию импульсных устройств фазовой синхронизации (ИУФС), однако при повышении быстродействия стремятся к ухудшению качественных показатели устройства в установившемся режиме. В связи с этим противоречием существует множество технических решений [1], направленных на повышение быстродействия ИУФС, каждое из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Наиболее перспективным путем повышения быстродействия при обеспечении высоких качественных показателей является использование устройств с изменяемой передаточной функцией [2, 3], однако в литературе уделяется недостаточное внимание вопросам применения указанного подхода при разработке ИУФС.

В данной статье рассмотрены ИУФС с изменяемой передаточной функцией фильтрующе-корректирующих звеньев (ФКЗ), предложены алгоритмы изменения передаточной функции.

### Теоретический анализ и цифровое моделирование

Положим, что до поступления сигнала на переключение на выходе ИУФС присутствует сигнал с частотой  $f_i$ , при этом фазовый сдвиг между выходным и опорным сигналами составляет  $\varphi_i$ . После прихода сигнала на переключение возникает переходный процесс длительностью  $t_{\Pi}$ , после окончания которого частота выходного сигнала и фазовый сдвиг

принимают соответственно значения  $f_2 > f_1$  и  $\varphi_2 > \varphi_1$ . Примем момент прихода сигнала на переключение за нулевой, а также введем следующие обозначения:  $\Delta f = f_2 - f$ ,  $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_1$ , где  $f$  — текущее значение выходного сигнала во время переходного процесса,  $\varphi$  — текущее значение фазы. При этом задача нахождения максимального быстродействия применительно к фазовой плоскости (рис. 1, а) будет иметь следующий вид: перевести устройство из положения  $A(f_2 - f_1, 0)$  в положение  $B(0, \varphi_2 - \varphi_1)$  за минимально возможное с учетом ограничений на параметры устройства время  $t_{\Pi}$ .

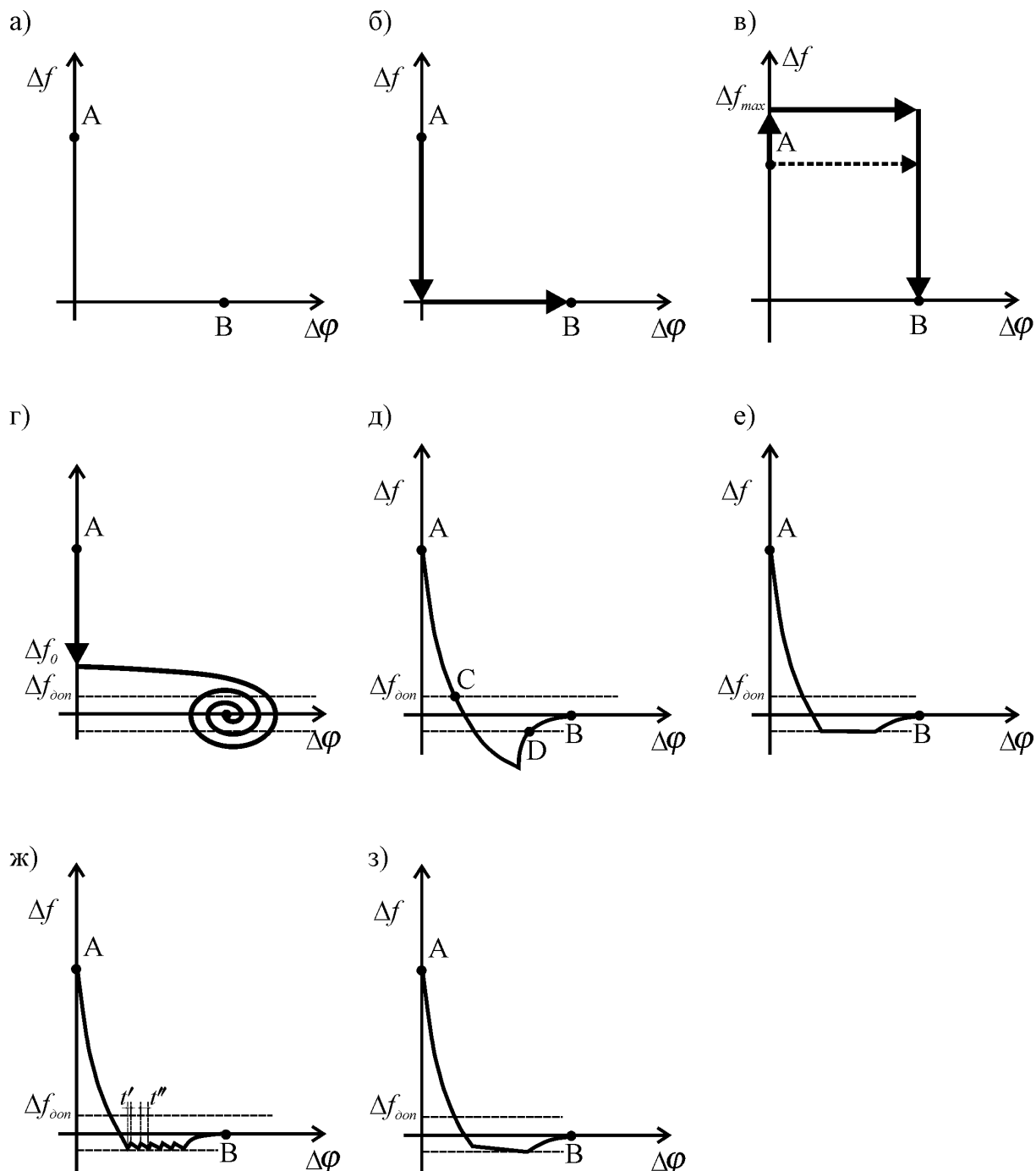


Рис. 1. Фазовые портреты ИУФС

При рассмотрении ИУФС с малой инерционностью объекта управления (например, синтезаторов частоты) можно принять, что  $\Delta f$  может изменяться скачком. При этом для обеспечения минимума длительности переходного процесса, как следует из теории оптимального управления [4, 5], траектория движения изображающей точки на фазовой

плоскости должна быть кусочно-линейной; при введении в структурную схему ИУФС блоков для предварительной установки частоты и предварительной установки фазы изображающая точка может двигаться по траектории, представленной на рис. 1,б. Однако практическая реализация блока предварительной установки фазы вызывает значительные трудности, поэтому реализуют только предварительную установку частоты, а требуемого значения фазы устройство достигает самостоятельно. При таких условиях максимальным быстродействием обладает устройство, фазовый портрет которого приведен на рис. 1,в, при этом в момент прихода сигнала на изменение выходной частоты  $\Delta f$  принимает значение  $\Delta f = \Delta f_{\max} = f_2 - f_{\min}$ , где  $f_{\min}$  — нижняя граница диапазона перестройки. В момент достижения требуемого значения фазы выходная частота принимает значение  $f_2$ . Данный способ удовлетворяет принципу максимума Понтрягина [4, 5] и обеспечивает минимальную длительность переходного процесса, равную  $t_{II} = (\varphi_2 - \varphi_1) / \Delta f_{\max}$ . Как квазиоптимальную разновидность данного способа можно получить способ, при котором фазовая траектория имеет вид, изображенный на рис. 1,в пунктирной линией, согласно которому после прихода сигнала на изменение выходной частоты формируется задержка длительностью  $t_3 = t_{II} = (\varphi_2 - \varphi_1) / (f_2 - f_1)$ , после чего на выход ФКЗ подается дополнительное управляющее напряжение, устанавливающее значение выходной частоты, равное  $f_2$ . Однако для практической реализации данного способа необходима либо возможность измерения мгновенного значения фазы, либо (при стабильных параметрах устройства) возможность изменять сигнал управления с точностью, намного превышающей дискретность временного интервала, вырабатываемого опорным генератором. Поэтому на практике ограничиваются предварительной установкой частоты, при этом переходный процесс протекает под управлением основной обратной связи устройства. Предварительная установка частоты может осуществляться двумя способами [1]: подачей дополнительного управляющего напряжения на выход ФКЗ (фазовый портрет для этого случая построен на рис. 1,з) либо непосредственной установкой требуемого сигнала на выходе ФКЗ путем подачи на его вход управляющих воздействий. Второй способ обеспечивает лучшие характеристики устройства в установившемся режиме, так как отсутствуют дополнительные источники шумов, однако он уступает первому способу в быстродействии. Для увеличения быстродействия во втором способе в структурную схему ИУФС предлагается ввести [1] управляющее устройство, формирующее на входе ФКЗ сигнал по оптимальному алгоритму, что значительно усложняет схемотехническую реализацию. Из сказанного следует, что хотя проблема максимального быстродействия имеет простое теоретическое решение (рис. 1,в), однако на практике представляет интерес улучшение способа предварительной установки частоты (рис. 1,з).

В качестве примера рассмотрим ИУФС с триггерным детектором и следующими параметрами: максимальное напряжение детектора  $U_{d\max} = 5$  В, крутизна управляемого генератора  $S_{yT} = 2$  МГц/В, коэффициент деления в цепи обратной связи  $N_d = 14$ , передаточная функция ФКЗ имеет вид  $W(p) = \frac{1 + pT_1}{(1 + pT_2)(1 + pT_3)}$ , при этом  $T_1 = 0,8$  мкс,  $T_2 = 15$  мкс,

$T_3 = 3$  мкс. С помощью разработанных автором математических моделей [6], реализованных в пакете прикладных программ "ИУФС 2.11", проведем анализ длительности переходного процесса устройства при его включении в зависимости от величины начального частотного рассогласования  $\Delta f_0$  при различных значениях  $T_2$ , при этом в качестве критерия окончания переходного процесса примем момент попадания текущего значения  $\Delta f$  в допустимый коридор  $\Delta f_{\text{дон}}$ , в пределах которого отклонение текущей частоты от установившегося значения не превышает одного процента (рис. 2).

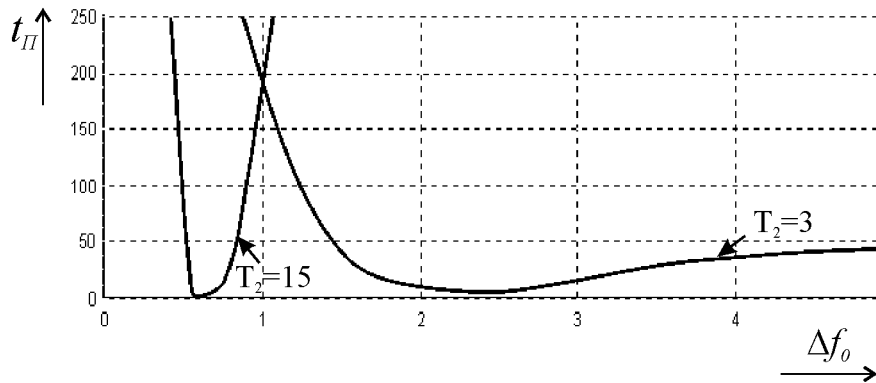


Рис. 2. Зависимость длительности переходного процесса от величины начального частотного рассогласования

Из данного графика видно, что существует значение  $\Delta f_{T\min}$ , зависящее от параметров устройства, при котором достигается минимальная длительность переходного процесса; при выборе начальной частотной расстройки, равной этому значению, устройство с большей постоянной времени  $T_2$  имеет меньшую длительность переходного процесса, чем устройство с меньшей постоянной времени, при этом устройство с большей постоянной времени имеет меньшее значение начальной частотной расстройки (при  $T_2=15$  мкс  $\Delta f_{T\min}=0,65$  МГц и  $t_{П}=1,5$  мкс; при  $T_2=2$  мкс  $\Delta f_{T\min}=2,5$  МГц и  $t_{П}=6,14$  мкс). Поясним этот факт. На рис. 3, а–в приведены соответственно фазовые портреты устройства с большей постоянной времени при  $\Delta f_0=\Delta f_{T\min}$ , устройства с меньшей постоянной времени при  $\Delta f_0<\Delta f_{T\min}$ , устройства с меньшей постоянной времени при  $\Delta f_0=\Delta f_{T\min}$ . Из сравнения фазовых портретов рис. 3, а и рис. 3, б видно, что крутизна фазовой траектории  $\Delta f/\Delta\varphi$  на рис. 3, б больше, в результате чего при уменьшении начальной частотной расстройки по сравнению со значением  $\Delta f_{T\min}$  на фазовой траектории рис. 3, б появляется область А. При уменьшении начальной частотной расстройки область А увеличивается, что сначала увеличивает длительность переходного процесса, а затем переводит устройство в режим биений. Сравнение фазовых траекторий рис. 3, а и рис. 3, в показывает, что в этих случаях процессы в устройстве имеют схожий характер, однако начальная расстройка на рис. 3, в значительно больше начальной расстройки рис. 3, а.

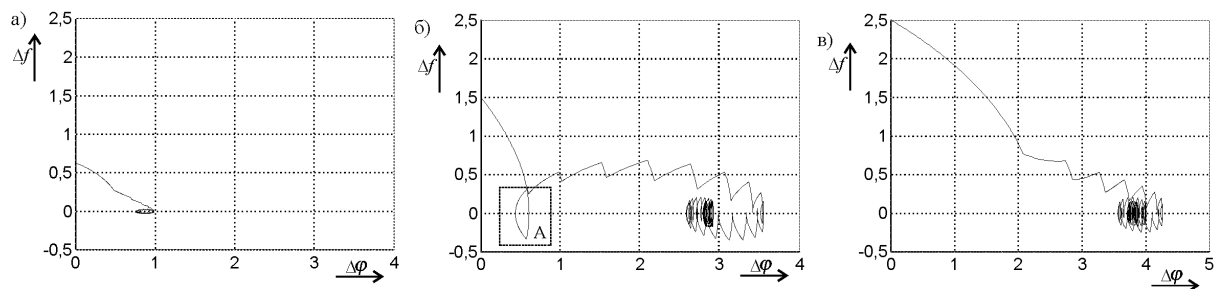


Рис. 3. Фазовые портреты ИУФС при различном начальном частотном рассогласовании и значениях постоянной времени ФКЗ

Величины постоянных времени ФКЗ, а также других параметров, влияющих на коэффициент усиления, выбираются исходя из требований к качественным показателям в установившемся режиме и скорости изменения отслеживаемого сигнала и не могут превышать допустимых значений. В то же время, как показано выше, может потребоваться увеличение постоянных времени ФКЗ для уменьшения длительности переходного процесса. Отсюда следует, что целесообразно использовать ИУФС с переключаемой передаточной функцией ФКЗ (рис. 4), при этом при поступлении сигнала на изменение выходной частоты происходит выбор передаточной функции с большими постоянными времени знаменателя, а после окончания переходного процесса происходит переключение на функцию с меньшими постоянными. Из графика (рис. 2.) также следует, что с ростом постоянных времени

знаменателя передаточной функции ФКЗ происходит рост чувствительности к точности установки начальной частотной расстройки и стабильности параметров устройства, что, в свою очередь, накладывает ограничения на максимальные значения постоянных времени.

Рассмотрим способы повышения быстродействия в случаях, когда невозможно провести быструю предварительную установку частоты. Примерами таких устройств являются устройства с малой инерционностью объекта управления, в которых не допускается подача управляющего сигнала на выход ФКЗ исходя из требований обеспечения спектральных характеристик, а также устройства с инерционным объектом управления (например, устройство управления частотой вращения вала электродвигателя). Будем считать, что передаточная функция объекта управления в этом случае имеет вид  $W(p) = \frac{S}{p(1 + pT)}$ . Для достижения

максимального быстродействия (при ограничении на максимальное значение управляющего сигнала  $|u| \leq U_{\max}$ ) управляющий сигнал должен иметь два интервала постоянства, на каждом из которых должен принимать максимальное по модулю значение и чередующиеся знаки. На рис. 1,д построен фазовый портрет для рассматриваемого объекта управления при переключении на большее значение частоты по результатам расчета оптимального закона управления, приведенным в [7]. Заметим, что в большинстве практических случаев требуется получить за минимальное время с заданной точностью необходимое значение частоты (т.е. минимальное время переходного процесса по частоте), в то время как к переходному процессу по фазе предъявляются менее жесткие требования. С точки зрения этого критерия способ рис. 1,д не является наилучшим, так как требуемое значение выходной частоты достигается в точке D, а не в точке C. Для окончания переходного процесса по частоте в точке C и наименьшем увеличении длительности переходного процесса по фазе фазовый портрет должен иметь вид рис. 1,е. В этом случае при достижении выходной частотой значения  $f_2 + \Delta f_{\text{дон}}$  уровень управляющего сигнала должен фиксироваться и оставаться постоянным до достижения точки D, после чего принимать минимальное значение (рис. 5).

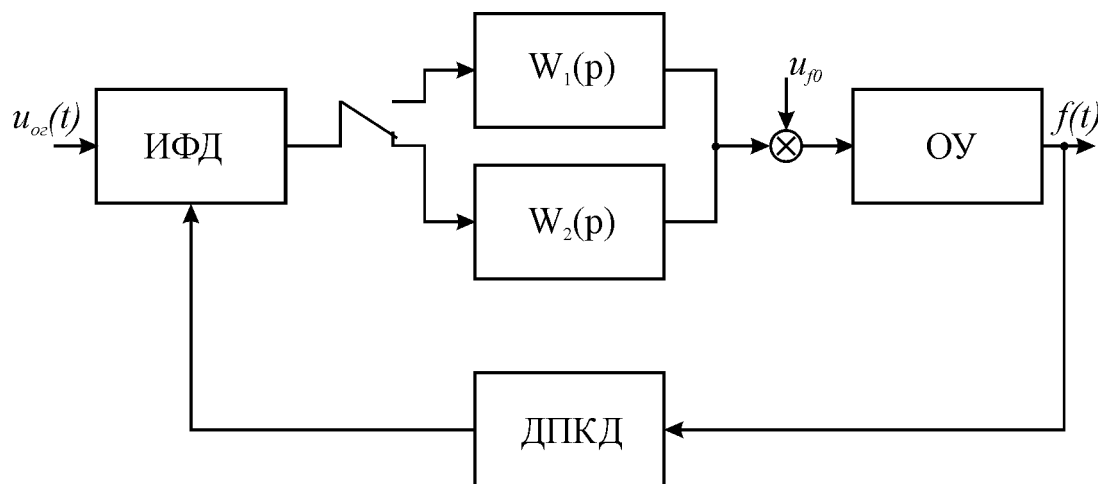


Рис. 4. Структурная схема ИУФС с переключаемой передаточной функцией ФКЗ

Для каждого значения выходной частоты из диапазона перестройки должен устанавливаться свой уровень фиксации, что при большом числе выходных частот представляет неудобство при практической реализации. Заметим, что для фиксации значения выходной частоты на уровне  $f_2 + \Delta f_{\text{дон}}$  может применяться способ рис. 1,ж. При стремлении времени переключения  $t_k = \min(t', t'')$  к бесконечности фазовые портреты рис. 1,е и рис. 1,ж становятся эквивалентными; однако при конечном времени происходит увеличение длительности переходного процесса по фазе. На рис. 1,з показан способ, при использовании которого можно не применять фиксацию управляющего сигнала и не увеличивать время срабатывания коммутирующего устройства. Согласно этому способу, при поступлении сигнала на изменение (в рассматриваемом случае на увеличение) выходной частоты производят переключение управляющего сигнала на максимальное значение. Через время  $t_1$  производят

увеличение постоянной времени  $T$  с первоначального значения  $T_1$  до значения  $T_2$ . По истечении временного интервала  $t_2$  производят одновременное уменьшение постоянной времени до значения  $T_1$  и переключение управляющего сигнала на минимальное значение; после чего через временной интервал  $t_3$  переходный процесс (по фазе и частоте) завершается. Необходимые временные интервалы  $t_1, t_2, t_3$  определяются из следующих соотношений:

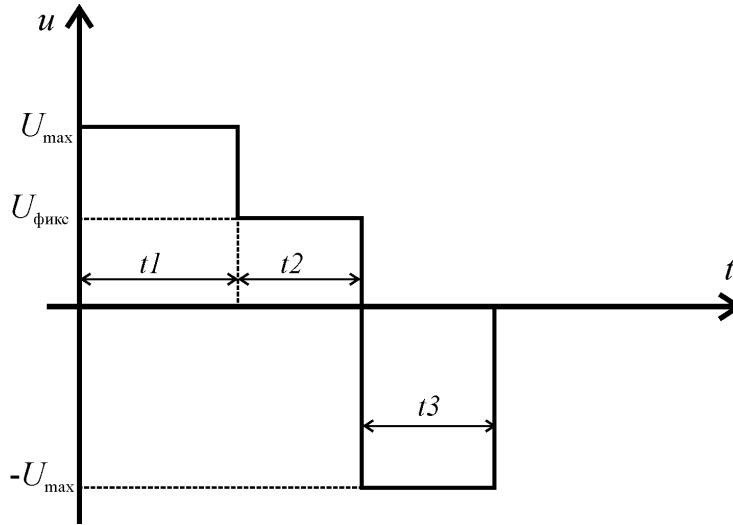


Рис. 5. Управляющий сигнал для уменьшения длительности переходного процесса по частоте

$$f_{max} = SU_{max}, \quad (1)$$

$$f(t_1) = f_{max} + (f_1 - f_{max})e^{-\frac{t_1}{T_1}}; \quad (2)$$

$$f_{max}(t_1 + t_2) + T_1(f_{max} - f_1)(e^{-\frac{t_1}{T_1}} - 1) + T_2(f_{max} - f(t_1))(e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 1) + \alpha T_1 f_2 = \varphi_2 - \varphi_1; \quad (3)$$

$$f_2(1 + \alpha) + f_{max}(e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 1) = \frac{-t_2}{T_2} [f_{max}(1 - e^{-\frac{t_1}{T_1}}) + f_1 e^{-\frac{t_1}{T_1}}]; \quad (4)$$

$$t_3 = -T_1 \ln \frac{1}{1 + \alpha}; \quad (5)$$

$$t_i = t_1 + t_2 + t_3, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — принятое допустимое отклонение частоты.

Данный способ имеет меньшую длительность переходного процесса по фазе по сравнению со способом рис. 1, ж при выполнении условия:

$$t_k < \frac{U_{max} - S^{-1}f_2}{U_{max} + S^{-1}f_2} \frac{T_1}{\frac{T_2}{t_2} - 1}. \quad (7)$$

### Заключение

Предложены способы повышения быстродействия ИУФС. Показано, что в ряде случаев целесообразно использовать ИУФС с переключаемой передаточной функцией фильтрующе-

корректирующих звеньев, что при незначительном схемотехническом усложнении увеличивает эффективность традиционных способов. Для автоматизации проектирования ИУФС разработан пакет прикладных программ "ИУФС 2.11".

## WAYS TO INCREASE SPEED OF PLL

A.A. DERYUSHEV

### Abstract

The problem of increase of PLL speed is considered. The brief analysis of traditional methods of increase of speed as a result of which ways of their improvement are revealed is carried out. It is shown, that use by the switched transfer function in particular switched transfer function of the filter allows improving characteristics of PLL at insignificant complication of realization of the circuit. Ways of change of transfer function of the filter are offered. The given ways can be applied both by development of new devices, and at increase in speed existing. For automation of designing of PLL with continuous and switched transfer function the package of applied programs "IUFS 2.11" is developed.

### Литература

1. Малиновский В.Н., Левин В.А., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки. М., 1989.
2. Stursberg O., Panek S. Control of switched hybrid systems based on disjunctive formulations. [Электрон. ресурс] — HSCC, 2002. Режим доступа: [http:// www.cmu.edu](http://www.cmu.edu).
3. Xu X. Analysis and design of switched systems: Ph. D. dissertation / University of Notre Dame. Notre Dame, 2001.
4. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкrellидзе Р.В. Математическая теория оптимальных процессов. М., 1983.
5. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. М., 1978.
6. Дерюшев А.А. // Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества: Сб. докл. Междунар. науч. конф. Витебск, ВФ УО ИСЗ, 2001. С. 459–461.
7. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / Под общ. ред. Е.А. Санковского. Мн., 1973.