

УДК 621.37

*В.А. Сороцкий (Санкт-Петербург, Россия),  
В.М. Царев (Москва, Россия)*

## **МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

*V.A. Sorotsky (St.-Petersburg, Russia),  
V.M. Tsarev (Moscow, Russia)*

### **METHODS OF GENERATION SIGNALS IN TRANSMITTERS OF PERSPECTIVE NAVIGATION SYSTEMS**

Рассмотрены перспективы дальнейшего развития наземных навигационных систем. С учетом требований, предъявляемых к системам нового поколения «eLORAN» и «eЧАЙКА», предложен новый подход к построению усилителей мощности радиопередающих устройств. Приведены результаты расчетов некоторых технических характеристик усилителей мощности.

НАЗЕМНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА. РАДИОНАВИГАЦИОННЫЙ СИГНАЛ. РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ.

The paper covers the perspectives of further development of land-based navigation systems. Considering the requirements for the next generation «eLORAN» and «eChAYKA» systems a new approach to development of transmitters' power amplifiers has been proposed. Results of modelling some technical characteristics of power amplifiers are included.

LAND-BASED NAVIGATION SYSTEM. RADIONAVIGATION SIGNAL. TRANSMITTER. POWER AMPLIFIER.

После развертывания систем GPS и ГЛОНАСС ряд заинтересованных стран, и в первую очередь США, Россия, Великобритания, Франция, Норвегия, Южная Корея, довольно быстро осознали, что недооценка рисков, связанных с преднамеренным или непреднамеренным нарушением их работоспособности может сопровождаться серьезными негативными последствиями как в сфере национальной безопасности, так и в экономике [1, 3]. В этой связи принято решение о независимом резервировании глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2, 3] и на эту роль лучше всего подходят наземные радионавигационные системы.

Помимо отмеченной выше возможности нарушения работоспособности ГНСС, существуют и чисто технические проблемы. Как показал

опыт практического применения систем GPS и ГЛОНАСС, последние не всегда обеспечивают требуемые характеристики координатно-временного обеспечения (КВО) потребителей по таким основным показателям, как целостность и доступность навигационной информации, точность и непрерывность определения координат подвижных объектов [4, 5]. Указанная проблема может быть преодолена на основе интегрированного использования ГНСС и наземных импульсно-фазовых радионавигационных систем (ИФРНС) [1, 4, 5].

Отмеченные выше факторы стимулировали начало работ по существенной модернизации ИФРНС. Этот процесс ставит своей целью плавный переход к системам нового поколения – типа «eLoran» (США) и «eЧайка» (Россия), которые должны заметно расширить свои функ-

циональные возможности и улучшить характеристики КВО потребителей [1, 6]. В частности, погрешность местоопределения объекта должна уменьшиться с типичного для систем «Logan-C» и «Чайка», значений 250...500 м до значений порядка 8...10 м, соизмеримых с аналогичными характеристиками ГНСС [1, 3, 6]. Таким образом, реализация указанного плана позволит наземным ИФРНС стать независимым дополнением ГНСС, а в случае необходимости – их резервом.

Необходимость модернизации ИФРНС выдвигает в число первоочередных проблем и задачу повышения энергетических и качественных характеристик входящих в их состав радиопередающих устройств (РПДУ). Именно они по многим важным показателям определяют облик радионавигационных систем нового поколения. Решение данной задачи должно осуществляться на основе последних достижений в технике и технологии разработки мощных РПДУ.

Для того чтобы подчеркнуть принципиальные отличия рассматриваемых в настоящей статье перспективных методов генерирования и стабилизации параметров излучаемых радионавигационных сигналов, вначале целесообразно рассмотреть наиболее характерные особенности существующих методов их генерирования.

#### **Основные ограничения метода ударного возбуждения колебаний в антенне РПДУ**

Применяемым до последнего времени в наземных ИФРНС радиопередающим устройствам, которые разрабатывались на основе полученных во второй половине XX века теоретических решений и ориентировались на использование электронно-вакуумных и газоразрядных приборов (единственно возможной в тот период времени элементной базе, позволявшей получить на частоте в 100 кГц мощность в антенне порядка сотен киловатт – единиц мегаватт), присущ ряд серьезных недостатков. Они связаны как с обеспечением сравнительно жестких требований, предъявляемых к форме генерируемых радиоимпульсов, так и с необходимостью поддержания стабильности их параметров в условиях воздействия различного рода дестабилизирующих факторов.

В получившем широкое распространение методе ударного возбуждения формирование колебаний в антенной системе осуществляется при

воздействии на выходную колебательную систему РПДУ с помощью одного импульса.

Подбором параметров колебательной системы и импульса возбуждения в данной схеме можно обеспечить формирование заданной огибающей радиоимпульса с требуемой точностью при условии, что параметры нагрузки остаются неизменными. Однако при изменении параметров нагрузки или воздействии иных дестабилизирующих факторов никаких механизмов, позволяющих обеспечить стабилизацию характеристик огибающей и фазы высокочастотного заполнения радионавигационного сигнала [7, 8], в данном методе практически не существует.

Следует отметить, что энергия, которая подводится к антенне РПДУ в течение интервала времени формирования выходного сигнала, передается от источника питания в колебательную систему в течение сравнительно короткого импульса возбуждения. Как следствие этого, пиковая мощность импульса возбуждения должна превышать среднюю мощность выходного радионавигационного импульса в десятки раз. Это условие даже при сравнительно небольшом значении пиковой мощности  $P_{\text{пик}} \approx 100$  кВт приводит к необходимости генерирования входного импульса тока с амплитудой в тысячи ампер, что существенно усложняет реализацию данного метода по сравнению с другими рассматриваемыми ниже методами формирования радионавигационных сигналов.

#### **Методы, основанные на формировании на входе антенны напряжений (токов) ступенчатой формы**

Альтернативой способу ударного возбуждения колебаний могут служить методы, основанные на генерировании напряжений (токов) ступенчатой формы с изменяемыми по определенному правилу амплитудами ступеней. При этом в случае, когда эквивалентная схема замещения антенны и согласующего устройства может быть представлена в виде последовательного колебательного контура, получение ступенчатого сигнала на ее входе должно обеспечиваться путем последовательного соединения необходимого числа импульсных источников напряжения. В варианте, когда указанная эквивалентная цепь представляется в виде параллельного контура, ее возбуждение должно осуществляться путем параллельного соединения варьируемого по



определенному закону количества импульсных источников тока. Высокая энергетическая эффективность и в том, и в другом случае обеспечивается за счет ключевого режима работы импульсных источников, а повышение стабильности излучаемых импульсов при изменении параметров антенной системы может быть реализовано за счет адаптивной подстройки параметров ступенчатых сигналов. Следует отметить, что с теоретической точки зрения обе эти задачи являются дуальными и решение одной из них может распространяться при соответствующей замене обозначений (тока на напряжение или наоборот) и на другую. С практической точки зрения генерирование импульсов тока прямоугольной формы обычно представляет собой значительно более сложную задачу, чем генерирование импульсов напряжения. В этом случае может оказаться более предпочтительным перейти от сложения в нагрузке РПДУ импульсов тока прямоугольной формы к сложению полуволн тока гармонической формы. Примером такого решения, в частности, может служить генератор Assuffix 7500, разработанный компанией «Megapuls» [9]. Однако даже с учетом такой модификации данного метода его применение не позволит реализовать массогабаритные показатели РПДУ, которые могут быть достигнуты при использовании метода возбуждения колебаний в антенной системе с помощью последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Возможные варианты практической реализации последнего метода и их характеристики рассмотрены ниже.

#### **Методы формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных сигналов на основе сложения выходных напряжений ключевых генераторных ячеек**

Основная идея данного подхода состоит в структурировании усилителя мощности РПДУ на большое количество однотипных по своим характеристикам элементарных секций – генераторных ячеек (ГЯ), работающих в ключевом режиме. Такое структурирование обеспечивает возможность:

формировать напряжение ступенчатой формы с заданными параметрами на основе динамически изменяемого количества ГЯ, участвующих в работе на отдельных временных интервалах;

сохранять работоспособность РПДУ при выходе из строя отдельных ГЯ, если количество

продолжающих функционировать ГЯ превышает минимально допустимый предел.

Следует особо отметить, что последнее свойство позволяет получить требуемый уровень надежности РПДУ при относительно небольшой избыточности резервирования ГЯ и, тем самым, избавиться от недостатков методов резервирования с целой кратностью. Применительно к рассматриваемой в настоящей публикации теме разработки РПДУ для наземных ИФРНС недостаток метода резервирования с целой кратностью проявляется в том, что для обеспечения требуемой надежности приходится использовать еще один радиопередатчик, находящийся в «горячем» резерве.

Структурирование усилителя мощности РПДУ на сравнительно большое количество однотипных ГЯ может использоваться не только для повышения его надежности, но также и для решения задачи стабилизации параметров излучаемых навигационных импульсов на основе компьютерного управления.

Исходя из отмеченных выше преимуществ обсуждаемого в данном разделе подхода, представляется целесообразным рассмотреть несколько методов формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных импульсов, классификация которых приведена на рис. 1.

В первом методе формировании импульса тока заданной формы [7] осуществляется путем сложения выходных напряжений варьированного по определенному правилу количества ГЯ. При этом каждая из ГЯ, работающих в ключевом режиме, формирует отрезок колебаний прямоугольной знакопеременной формы типа «меандр». Данный метод может быть реализован двумя способами: когда все ГЯ имеют одинаковое выходное напряжение, а также когда определенная часть ГЯ имеет уменьшенное значение выходного напряжения для более точной подстройки формы огибающей импульса тока. И в том, и в другом случае регулирование (стабилизация) параметров радионавигационного сигнала может осуществляться изменением количества ГЯ: включением в работу дополнительных ГЯ или, наоборот, исключением из процесса формирования выходного напряжения использовавшихся до этого ГЯ. Использование ГЯ с уменьшенным значением выходного напряжения, или т. н. «подстроечных» ГЯ позволяет уменьшить их общее количество при обеспечении тех же требований к точности формирования импульса тока [7, 8].



Рис. 1. Методы формирования и стабилизации параметров излучаемых навигационных сигналов

Второй метод предполагает использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходных напряжений ГЯ по закону, обеспечивающему получение в антенне импульса тока заданной формы [7, 8]. Для получения требуемой мощности в антенне может использоваться не одна, а несколько ГЯ, но при этом следует обратить внимание на то, что количество ГЯ, участвующих в формировании импульса тока, на всех временных интервалах остается неизменным, а стабилизация параметров радионавигационного сигнала может быть осуществлена на основе широтно-импульсного регулирования (ШИР).

Третий метод может рассматриваться как комбинация первых двух методов: формирование импульса тока заданной формы [7, 8] осуществляется путем сложения выходных напряжений варьируемого по определенному правилу количества ГЯ, а стабилизация параметров импульса тока осуществляется на основе ШИР. Применение такого подхода может оказаться перспективным с точки зрения уменьшения углов регулирования выходных напряжений ГЯ, что, в свою очередь, будет способствовать уменьшению коммутационных потерь в транзисторах ГЯ.

#### Формирование радионавигационного сигнала на основе динамического сложения напряжений транзисторных генераторных ячеек

Напряжение гармонической формы, кото-

рое необходимо приложить ко входу антенны с добротностью  $Q$  для получения импульса тока  $i(t) = A \left( \frac{t}{65} \right)^2 e^{2-2t/65} \sin(2\pi t/10 + PC)$ , соответствующего требованиям ИФРНС «Loran-C» [7], описывается выражением:

$$E_0(t) = \frac{E(t)}{AR} = Bt^2 e^{-at} \sin \omega t + \frac{Q}{\omega} Bte^{-at} (2 - at) \sin \omega t + QBt^2 e^{-at} \cos \omega t + \frac{Q\omega B}{2j} \left\{ e^{z_1 t} \left[ \frac{t^2}{z_1} - \frac{2t}{z_1^2} + \frac{2}{z_1^3} \right] - e^{z_2 t} \left[ \frac{t^2}{z_2} - \frac{2t}{z_2^2} + \frac{2}{z_2^3} \right] \right\} + \frac{Q\omega B}{2j} \left( \frac{2}{z_2^3} - \frac{2}{z_1^3} \right), \quad (1)$$

где  $A$  – масштабный множитель,  $z_{1,2} = -a \pm j\omega$ ,  $B = (e/65)^2$ ,  $a = 2/65$ ,  $\omega = 2\pi/10$ .

При использовании в качестве ГЯ ключевых генераторов (КГ), выполненных по мостовой схеме, значение напряжения прямоугольной формы  $e_i$ , которое необходимо приложить ко входу антенны на полупериоде с номером  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), связано с амплитудой первой гармоники напряжения  $[(E_0)_{\max}]_i$ , действующей на входе антенны в течение этого же полупериода, соотношением:

$$e_i \approx \frac{\pi [(E_0)_{\max}]_i}{4}. \quad (2)$$

Таким образом, с помощью (1) и (2) можно рассчитать последовательность напряжений прямоугольной формы  $e_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), которые

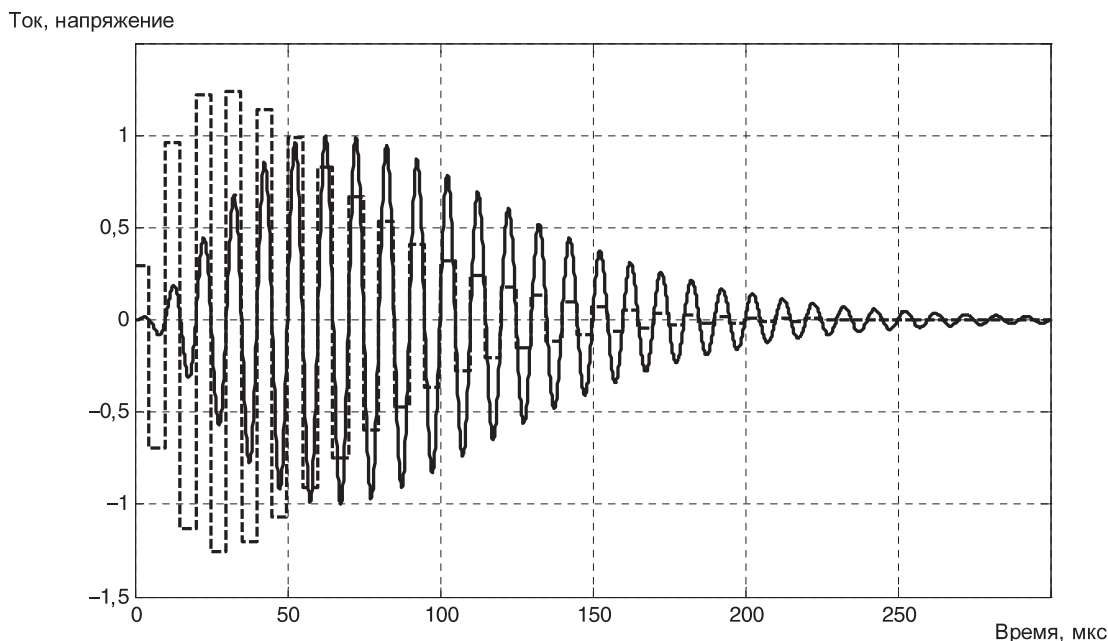


Рис. 2. Временные диаграммы прямоугольного знакопеременного напряжения на входе антенны и тока, протекающего через антенну, при  $Q = 16$  (—) ток; (- - • - -) напряжение

необходимо приложить ко входу антенны с добротностью  $Q$  для получения импульса тока, используемого в ИФРНС «Logan-C» (рис. 2).

Строго говоря, использованный в (2) известный коэффициент, связывающий между собой амплитуду первой гармоники напряжения и значение прямоугольного знакопеременного напряжения типа «меандр», применим только в установившемся режиме. Характерной особенностью данного случая является как раз то, что свободные колебания, обусловленные переходными процессами, не успевают закончиться и наряду с вынужденной составляющей колебаний также участвуют в формировании выходного импульса тока. Чтобы подчеркнуть эту особенность рассматриваемой задачи, которая может привести к погрешности в (2), в этом соотношении использован знак приближенного равенства.

Принимая во внимание, что переход от напряжения гармонической формы (1) к напряжению прямоугольной формы (2) будет сопровождаться погрешностью формирования огибающей импульса тока, представляется целесообразным определить такие значения  $e_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), при которых указанная погрешность будет не только отвечать требованиям стандарта [7], но и будет принимать минимальные значения.

Для реализации поставленной цели решена

оптимизационная задача:

$$F(\vec{e}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где

$$F = \sqrt{\left\{ \sum_{n=1}^8 [I_n(\vec{e}) - S_n]^2 \right\} / 8} - \text{целевая функция [7, 8];} \quad (4)$$

$I_n(\vec{e})$  – нормированное значение амплитуды тока в антенне на полупериоде с номером  $n$ , зависящее от вектора варьируемых параметров  $\vec{e} = \{e_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 13$ ;  $S_n$  – эталонное нормированное значение амплитуды тока на полупериоде с номером  $n$ .

Решение задачи (3) осуществлялось с учетом следующих ограничений, накладываемых на  $I_n(\vec{e})$  [7, 8]:

$$|I_n(\vec{e}) - S_n| \leq 0,03; \quad n = 1, 2, \dots, 8; \quad (5)$$

$$|I_n(\vec{e}) - S_n| \leq 0,1; \quad n = 9, 10, \dots, 13. \quad (6)$$

Отличительной особенностью рассматриваемой оптимизационной задачи (3) с учетом ограничений (5), (6), приводящей к существенному ее усложнению, является то, что для нахождения нормированных амплитуд токов  $I_n(\vec{e})$  при каждом наборе значений вектора варьируемых параметров  $\vec{e} = \{e_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 13$  необходимо решить

Оптимальные значения вектора  $\bar{e} = \{e_i\}, i = 1, 2, \dots, 13$

Эквивалентная добротность антенны	$n(i)$	$\bar{e}_{\text{opt}} = \{e_{i\text{opt}}\},$ $i = 1, 2, \dots, 13$	$I_n(\bar{e})$ $(n = 1, 2, 3, \dots, 13)$	$F$	$ I_n(\bar{e}) - S_n $
$Q = 13,5$	1	0,2235	0,0156	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-8}$
	2	0,7669	0,0832		$5,2 \cdot 10^{-9}$
	3	0,8874	0,1898		$4,9 \cdot 10^{-8}$
	4	1,2039	0,3153		$4,2 \cdot 10^{-8}$
	5	1,1406	0,4448		$1,5 \cdot 10^{-8}$
	6	1,3297	0,5687		$3,2 \cdot 10^{-8}$
	7	1,1575	0,6803		$5,5 \cdot 10^{-8}$
	8	1,2775	0,7760		$8,2 \cdot 10^{-8}$
	9	1,1406	0,8599		0,0056
	10	1,0683	0,9200		0,0050
	11	0,9892	0,9628		0,0045
	12	0,9071	0,9897		0,0041
	13	0,8251	1,0022		0,0037
$Q = 16,0$	1	0,2665	0,0159	$5,6 \cdot 10^{-4}$	0,0002
	2	0,8831	0,0828		0,0004
	3	1,0536	0,1904		0,0005
	4	1,3343	0,3147		0,0006
	5	1,3566	0,4454		0,0007
	6	1,4022	0,5680		0,0007
	7	1,3867	0,6809		0,0005
	8	1,2715	0,7754		0,0006
	9	1,2092	0,8505		0,0038
	10	1,1894	0,9137		0,0013
	11	1,0523	0,9616		0,0032
	12	0,9150	0,9887		0,0030
	13	0,8099	0,9988		0,0004

систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в антенной системе РПДУ. Результаты решения оптимизационной задачи для представляющего практический интерес набора значений  $Q$  представлены в таблице.

Значения вектора  $\bar{e}_{\text{opt}}$  охватывают 1...13 полупериоды генерируемого импульса тока, поскольку жесткие ограничения, накладываемые спецификацией ИФРНС «Logan-C», распространяются именно на эти временные интервалы. Что же касается последующих временных интервалов ( $i > 13$ ), то в [7] требования к ним не оговариваются, поэтому в качестве амплитуды напряжения прямоугольной формы, прикладываемого к антенне на соответствующем временном интервале

( $i = 13, 14, 15, \dots$ ), можно использовать значения, рассчитанные с помощью (2), (3).

Полученные в результате решения оптимизационной задачи (3) напряжения ступеней соответствуют идеализированному случаю, когда количество ГЯ  $N_{\text{ГЯ}} \rightarrow \infty$ . Использование конечного количества ГЯ в РПДУ неизбежно приведет к отклонению напряжений ступеней от их оптимальных значений и, как следствие этого, увеличению среднеквадратического отклонения  $F$ . Зависимости  $F$  от  $N_{\text{ГЯ}}$  для двух значений эквивалентной добротности антенны  $Q$  приведены на рис. 3.

При сравнительно малом количестве ГЯ ( $5 \leq N_{\text{ГЯ}} \leq 10$ ) поведение функции  $F$  имеет явно

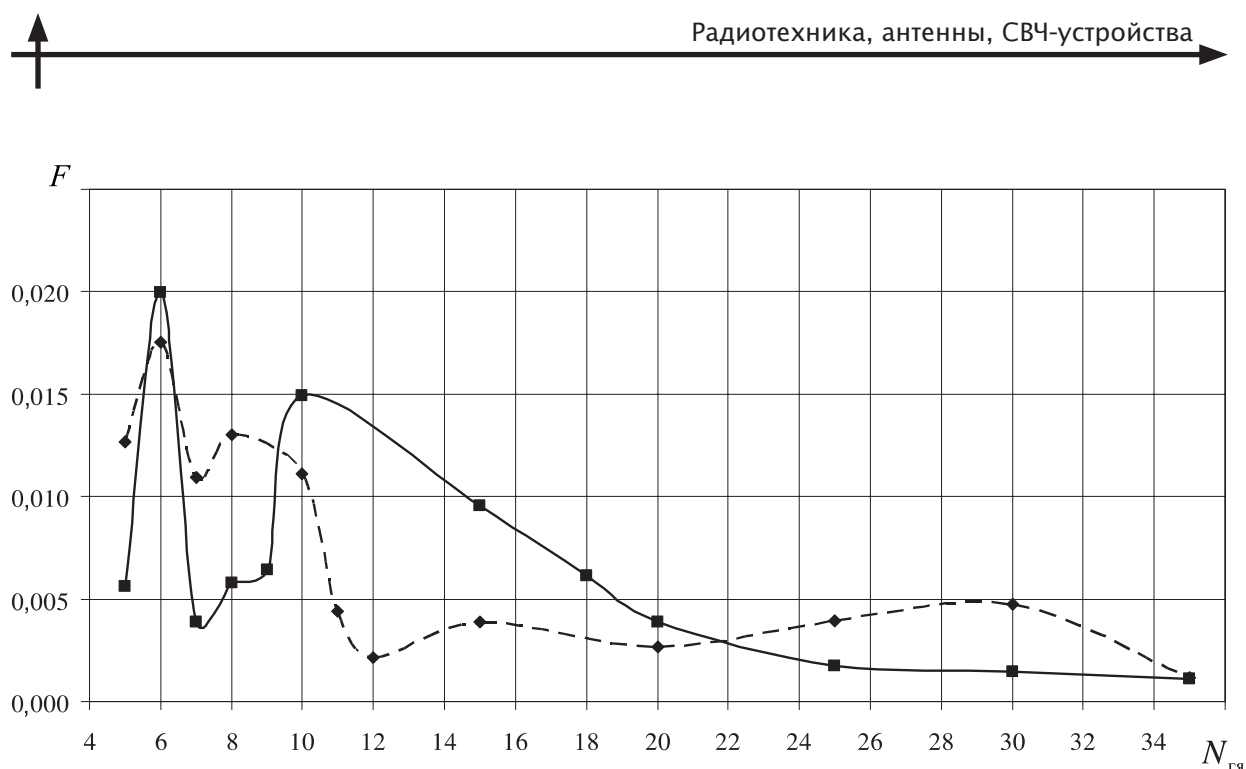


Рис. 3. Зависимости среднеквадратического отклонения  $F$  от  $N_{ГЯ}$   
 (---◆---)  $Q = 16$ ; (—■—)  $Q = 13,5$

выраженный пульсирующий характер. Это объясняется тем, что при  $N_{ГЯ} < 10$  эффект от добавления каждой дополнительной ГЯ может оказаться как положительным, когда расхождение основных компонент вектора аппроксимирующих напряжений ступеней  $\vec{e}_{\text{аппрок}} = \{e_{\text{аппрок}}^{(i)}\}, i = 1, 2, \dots, 13$ , оказывающих наиболее заметное влияние на функцию  $F$ , и аналогичных компонент вектора  $\vec{e}_{\text{орт}} = \{e_{\text{орт}}^{(i)}\}, i = 1, 2, \dots, 13$ , уменьшится, так и, наоборот, привести к увеличению этого расхождения.

При  $N_{ГЯ} \geq 10$  поведение представленных на рис. 3 зависимостей становится существенно более монотонным. Полученные результаты свидетельствуют, что при  $Q = 13,5$  сформулированное в [7] условие  $F \leq 0,01$  выполняется при  $N_{ГЯ} \geq 15$ , а при  $Q = 16$  – соответственно при  $N_{ГЯ} \geq 11$ . При этом окончательное решение о необходимом количестве ГЯ следует принимать с учетом обеспечения как требуемой выходной мощности в пиковой точке, так и необходимого резервирования.

Реализация усилителей мощности радиопередающих устройств перспективных наземных ИФРНС на основе предложенных принципов по-

зволят обеспечить их преимущество по сравнению с существующими прототипами по целому ряду важнейших показателей, в том числе:

значительное снижение погрешности формирования огибающей и фазы высокочастотного заполнения радионавигационного сигнала как при работе на антенну с номинальными параметрами, так и при изменении последних;

компьютерное управление работой РПДУ и мониторинг параметров излучаемых сигналов, создающие предпосылки для перехода к развертыванию необслуживаемых радиопередатчиков с уменьшенными эксплуатационными расходами, контроль за основными рабочими характеристиками которых может осуществляться в дистанционном режиме;

повышение надежности РПДУ за счет реализации усилителя мощности в виде структурированного набора генераторных ячеек, количество которых должно выбираться не только исходя из условия получения требуемой выходной мощности, но и введения избыточности, достаточной для того, чтобы радиопередатчик продолжал функционировать при выходе из строя отдельных ячеек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радионавигационный план Российской Федерации (ред. 2011 г.) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.internavigation.ru>

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2008 г. № 323.  
 3. Narins, M.J. The eLoran Evaluation and

Modernization Program: Federal Aviation Administration Navigation Services Overview [Электронный ресурс] / M.J. Narins // International CGSIC Meeting. –Geneva, Switzerland, 28 May 2007.

4. **Царев, В.М.** Пути повышения эффективности радионавигационных систем дальней навигации наземного и космического базирования при их комплексном применении: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.М. Царев. –М.: Моск. академия рынка труда и информационных технологий, 2005.

5. **Кульнев, В.** Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам [Текст] / В. Кульнев, С. Михайлов // Беспроводные технологии. –2006. –№ 3. –С. 61–69.

6. Final Programmatic Environmental Impact Statement on the Future of the United States Coast Guard Long Range Aids to Navigation (Loran–C) Program [Электронный ресурс] / US Coast Guard, Docket Number: USCG-2007-28460, May, 2009.

7. Specification of the Transmitted Loran–C Signal: Commandant Instruction M 16562.4A [Электронный ресурс] / United States Department of Transportation, United States Coast Guard. –1994.

8. ГОСТ Р 53168-2008. Система радионавигации «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. –М.: Стандартиформ, 2009. –21 с.

9. **Johannessen, E.** Accufix System Enhancements for eLoran [Электронный ресурс] / E. Johannessen. –Megapulse Inc., 2008.