

УДК 621.37

Н.В. Семаков, В.А. Сороцкий

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ КЛЮЧЕВЫХ ПРИБОРОВ НА ИСКАЖЕНИЕ СИГНАЛОВ В УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

N.V. Semakov, V.A. Sorotsky

THE INFLUENCE OF SWITCH DEVICES' RESPONSE TIME ON SIGNAL DISTORTION IN POWER AMPLIFIERS OF RADIO TRANSMITTERS

Рассмотрен метод расчета искажений, возникающих вследствие инерционности ключевых приборов при генерировании сигналов в радиопередающем устройстве. На основе математической модели установлена связь между длительностью интервалов коммутации ключевых приборов и искажениями огибающей и фазы высокочастотного заполнения генерируемых сигналов. Метод может использоваться при оценке искажений в радиопередающих устройствах, применяемых в системах радиосвязи, радионавигации и радиовещания.

РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. КЛЮЧЕВОЙ РЕЖИМ. ИСКАЖЕНИЕ СИГНАЛОВ.

The paper gives an overview of method for computing distortion originating due to key devices' inertance while generating signal in radio transmitters. A connection between devices' time response and envelope and carrier distortions has been established on the basis of the mathematical model of radio signal. The method can be used for distortions assessment of radio transmitters being applied in data communications, navigation or broadcasting systems.

RADIO TRANSMITTER. SWITCH MODE. SIGNAL DISTORTION.

В [1] рассмотрены способы уменьшения искажений, возникающих при генерировании радиосигналов в оконечных каскадах радиопередающих устройств (РПДУ) с использованием ключевых методов. Полученные при этом результаты основаны на широко используемом при расчете ключевых генераторов и усилителей мощности допущении о безынерционности применяемых в них приборов. Однако, принимая во внимание существующую тенденцию к увеличению коммутируемой мощности приборов и связанное с этим неизбежное ухудшение их инерционных свойств, обоснованность использования указанного выше допущения становится уже не столь очевидной. В данной ситуации при решении вопроса о применимости идеализированного подхода к расчету характеристик ключевых генераторов и усилителей мощности необходимо учитывать вносимую при этом погрешность.

Исходя из изложенного, цель данной работы – уточнение рассмотренной в [1] модели сигналов, что позволит сформулировать количественные критерии относительно необходимости учета инерционности ключевых приборов.

Учет инерционности ключевых приборов в математической модели генерируемого радиосигнала

По аналогии с [1] рассмотрим в общем виде напряжение, которое может быть сформировано с помощью набора генераторных ячеек (ГЯ), образующих усилитель мощности РПДУ (рис. 1). Здесь напряжения U_1, U_2, \dots, U_N – амплитуды ступеней; $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}, \dots, \alpha_{M1}, \alpha_{N2}$ – угловые координаты ступеней. При этом условимся, что первый индекс параметра α обозначает номер ступени, а второй индекс, принимающий значения 1 или 2, обозначает соответственно момент

начала или окончания этой ступени.

Для того чтобы учесть в модели инерционность процесса переключения усилительных приборов, воспользуемся известным приемом, в соответствии с которым закон изменения напряжения на ключах на интервалах времени коммутации принято аппроксимировать линейной зависимостью [2]. В этом случае импульсы напряжения на выходе ГЯ приобретут вместо идеализированной прямоугольной формы, как это было рассмотрено в [1], трапецеидальную форму (см. рис. 1). Будем полагать в первом приближении длительности интервалов нарастания и спада напряжения на ключах одинаковыми и равными $v = \omega t_\phi$.

В соответствии с методом наложения ток, протекающий в антенне РПДУ, может быть представлен в виде суперпозиции токов $i_n(t)$, обусловленных воздействием знакопеременной последовательности им-

пульсов $u(t)$ трапецеидальной формы с амплитудами U_n , угловыми координатами α_{n1} , α_{n2} ($n = 1, 2, \dots, N$) и длительностью интервалов фронта и спада напряжения v :

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^N i_n(t). \quad (1)$$

Каждый из импульсов последовательности $u(t)$ удобно представить в виде суперпозиции двух ступеней напряжения, сдвинутых во времени друг относительно друга и имеющих противоположную полярность (рис. 2):

$$u(t) = (-1)^{n+1} \frac{U_n}{t_\phi} [1^*(t - \alpha_{n1} / \omega) - 1^*(t - (\alpha_{n2} / \omega - t_\phi))], \quad (2)$$

где $1^*(t) = \begin{cases} t, & 0 < t < t_\phi \\ 1, & t \geq t_\phi \end{cases}$, ω – круговая частота генерируемых колебаний.

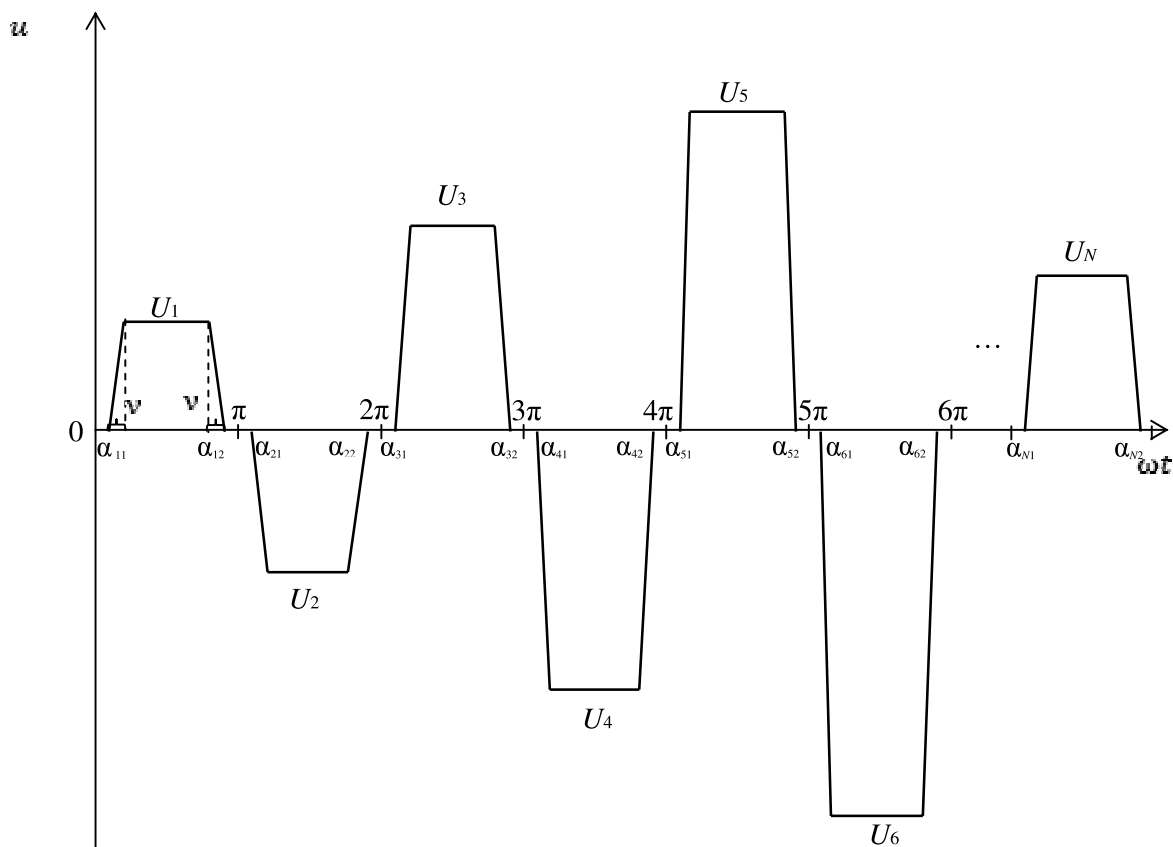


Рис. 1. Форма выходного напряжения усилителя мощности с учетом инерционности ключевых приборов

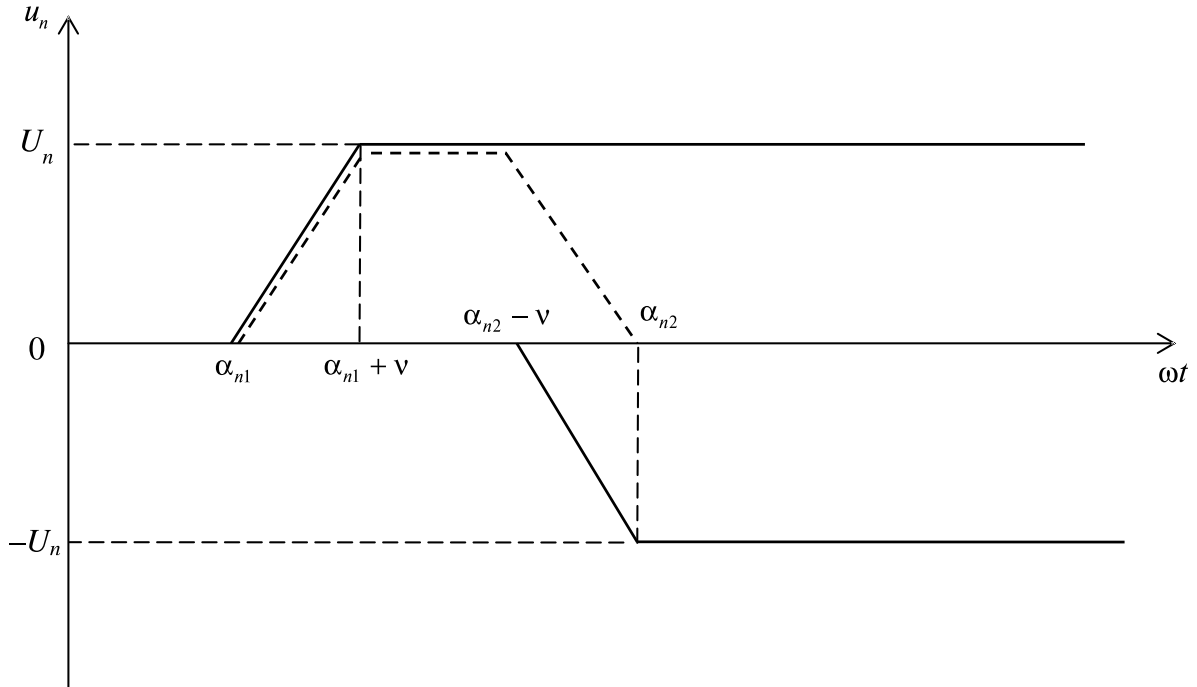


Рис. 2. Эквивалентное представление n -й ступени напряжения u с угловой длительностью фронта v в виде суперпозиции двух скачков напряжения противоположной полярности

С учетом (1), (2) ток в антенне РПДУ окончательно может быть представлен в виде

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} [i_n'(t - \alpha_{n1} / \omega) - i_n''(t - (\alpha_{n2} / \omega - t_\Phi))], \quad (3)$$

где ток $i_n'(t)$ обусловлен первым слагаемым, стоящим в прямоугольных скобках в (2) (т. е. фронтом импульса напряжения), а ток $i_n''(t)$ — соответственно вторым слагаемым в этом выражении, определяющим спад импульса напряжения $u_n(t)$.

Для вычисления токов $i_n'(t)$ и $i_n''(t)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) воспользуемся математическим аппаратом операционного исчисления. Как известно, изображение преобразованного по Лапласу скачка напряжения положительной полярности амплитудой U_n , длительностью фронта t_Φ , произошедшего в момент времени $t_{n1} = \alpha_{n1} / \omega$, имеет вид [3]:

$$\tilde{u}_n^{(+)}(p) = \frac{U_n / t_\Phi - U_n e^{-pt_\Phi} / t_\Phi}{p^2} e^{-pt_{n1}}. \quad (4)$$

По аналогии с (4) запишем изображе-

ние преобразованного по Лапласу скачка напряжения отрицательной полярности:

$$\tilde{u}_n^{(-)}(p) = -\frac{U_n e^{pt_\Phi} / t_\Phi - U_n / t_\Phi}{p^2} e^{-pt_{n2}}. \quad (5)$$

Суммируя (4) и (5) для всех значений n ($n = 1, 2, \dots, N$), получим выражение в операторной форме для напряжения, действующего на входе антенной системы:

$$\tilde{u}(p) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} U_n [e^{-pt_{n1}} (1 - e^{-pt_\Phi}) + e^{-pt_{n2}} (1 - e^{pt_\Phi})] / t_\Phi p^2. \quad (6)$$

С помощью множителя $(-1)^{n+1}$ учитывается изменение полярности импульсов напряжения.

Будем полагать, как и в [1], что эквивалентная схема замещения антенны, включая согласующую цепь, может быть представлена в виде последовательного контура с элементами L , C и R , сопротивление которой в операторной форме имеет вид:

$$Z(p) = \frac{L}{p} [p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \quad (7)$$

$$\times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})],$$

где $\lambda = R/2L$, $Q = \sqrt{L/C} / R$ – добротность антенного контура.

С учетом (6), (7) изображение тока, протекающего через антенну, может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{i}_A(p) = & \left(\sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \{ U_n [e^{-pt_{n1}} + e^{-pt_{n2}}] / \right. \\ & / t_\phi p^2 - U_n [e^{-p(t_{n1}+t_\phi)} + \\ & \left. + e^{-p(t_{n2}-t_\phi)}] / t_\phi p^2 \} \right) p / \\ & / (L[p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \\ & \times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})]). \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения оригинала тока антенны $i_A(t)$ по его изображению $\tilde{i}_A(p)$, рассмотрим одно из слагаемых, входящих в состав (8):

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{An}(p) = & (U_n - U_n e^{-pt_\phi}) p / \\ & / (L t_\phi p^2 [p + \lambda(1 + \sqrt{1 - 4Q^2})] \times \\ & \times [p + \lambda(1 - \sqrt{1 - 4Q^2})]). \end{aligned} \quad (9)$$

В последнем выражении опущен из рассмотрения множитель $(-1)^{n+1}$, посредством которого задается полярность импульса тока, а также экспоненциальные члены вида $e^{-pt_{n1}}$ и $e^{-pt_{n2}}$, которые будут учтены в оригинале тока антенны в виде соответствующих временных сдвигов.

Изображению функции $\tilde{i}_{An}(p)$ с учетом таблицы обратных преобразований Лапласа [3] соответствует оригинал

$$\begin{aligned} i_{An}(t) = & \frac{U_n}{\omega t_\phi Q R} \times \\ & \times \left[e^{-\lambda(t-t_\phi)} \left(\frac{e^{j\lambda(t-t_\phi)\sigma} - e^{-j\lambda(t-t_\phi)\sigma}}{2j\sigma} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{e^{-j\lambda(t-t_\phi)\sigma} + e^{j\lambda(t-t_\phi)\sigma}}{2} \right) - \right. \\ & \left. - e^{-\lambda t} \left(\frac{e^{j\lambda t\sigma} - e^{-j\lambda t\sigma}}{2j\sigma} + \frac{e^{-j\lambda t\sigma} + e^{j\lambda t\sigma}}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где j – мнимая единица, $\sigma = \sqrt{4Q^2 - 1}$.

При выводе выражения (10) было

учтено, что для применяемых на практике антенных систем выполняется условие $Q > 0,5$.

Переходя к вещественной нормированной форме записи в (10) получим:

$$\tilde{i}'_{An}(t - t_{n1}) = \begin{cases} \frac{\tilde{U}_n}{\omega t_\phi Q} e^{-\lambda(t-t_{n1})} \times \\ \times \left\{ e^{\lambda t_\phi} \left[\frac{\sin(\varepsilon_{1\phi})}{\sigma} + \cos(\varepsilon_{1\phi}) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{\sin(\varepsilon_1)}{\sigma} + \cos(\varepsilon_1) \right] \right\}, \text{ при } t \geq t_{n1} \\ 0, \text{ при } t \leq t_{n1} \end{cases} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \lambda\sigma(t - t_{n1}), \\ \varepsilon_{1\phi} &= \lambda\sigma(t - t_{n1} - t_\phi), \\ \tilde{u}_n &= \frac{U_n}{U_{\max}} = \frac{U_n}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}} R, \\ \tilde{i}'_{An}(t - t_{n1}) &= \frac{i'_{An}(t - t_{n1})}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}}, \end{aligned}$$

$$\tilde{i}''_{An}(t - t_{n2}) = \frac{i''_{An}(t - t_{n2})}{|i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}}}, \quad |i_A(\omega t)|_{\text{импмакс}} -$$

максимальное значение тока в антенне.

Ток, протекающий в антенне под воздействием отрицательного перепада напряжения:

$$\tilde{i}'_{An}(t - t_{n2}) = \begin{cases} -\frac{\tilde{U}_n}{\omega t_\phi Q} e^{-\lambda(t-t_{n2})} \times \\ \times \left\{ e^{-\lambda t_\phi} \left[\frac{\sin(\varepsilon_{2\phi})}{\sigma} + \cos(\varepsilon_{2\phi}) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{\sin(\varepsilon_2)}{\sigma} + \cos(\varepsilon_2) \right] \right\}, t \geq t_{n2} \\ 0, t \leq t_{n2} \end{cases} \quad (12)$$

где $\varepsilon_2 = \lambda\sigma(t - t_{n2})$, $\varepsilon_{2\phi} = \lambda\sigma(t - t_{n2} + t_\phi)$.

Используя выражения (3), (11) и (12), можно определить ток, протекающий в антенне РПДУ на произвольном временном интервале.

Проверка выражений (11), (12) с помощью предельного перехода $\omega t_\phi \rightarrow 0$ приводит к выражениям, справедливым для

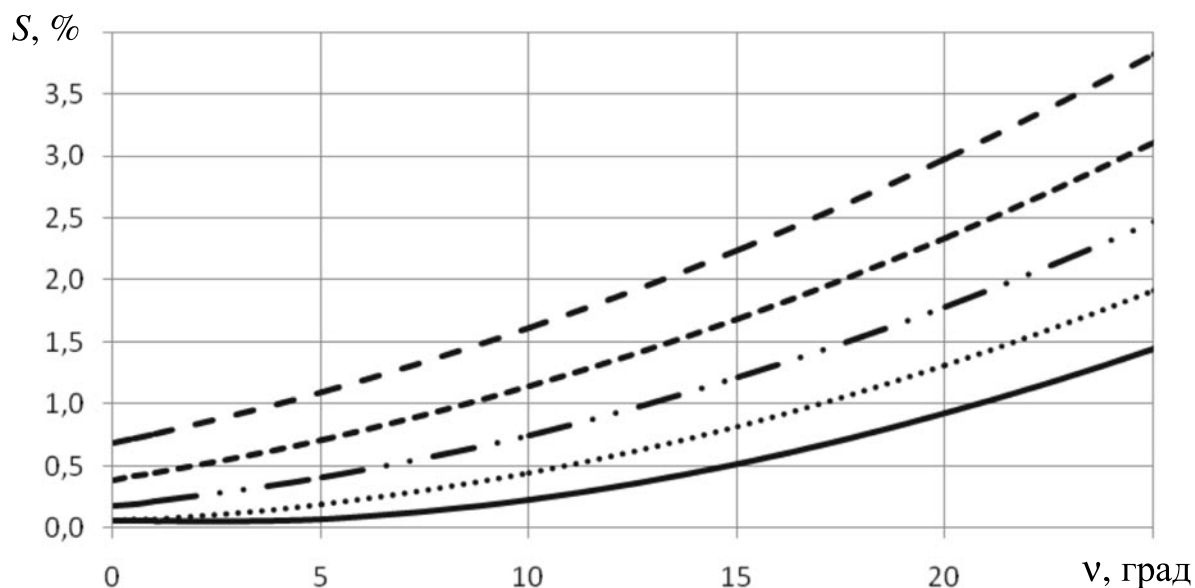


Рис. 3. Зависимость S от длительности интервала коммутации ключевых приборов
(— — —) $\gamma = 10,0^\circ$; (— · — ·) $\gamma = 7,5^\circ$; (— · · ·) $\gamma = 5,0^\circ$; (· · · · ·) $\gamma = 2,5^\circ$; (—) $\gamma = 0,0^\circ$

идеализированных безынерционных ключей [1].

Результаты моделирования

Полученные выше соотношения позволяют количественно определить степень влияния инерционности ключевых приборов на искажение радиосигналов в усилителе мощности РПДУ. В качестве примера оценим вклад инерционности ключевых приборов в искажение сигналов, формируемых в радиопередающем устройстве навигационной системы длинноволнового диапазона. Данный случай интересен тем, что в системах такого типа к усилителю мощности РПДУ предъявляются жесткие требования по точности формирования огибающей радиоимпульсов. В частности, среднеквадратическое отклонение (СКО) S амплитуд первых восьми полуволн тока антенны от их эталонных значений не должно превышать 1 % [4, 5]. При этом следует учесть, что поскольку результирующее искажение обусловлено не одним, а целым рядом факторов, то допустимый вклад инерционности ключевых приборов в искажение сигналов как одного из этих факторов, как правило,

не должен превышать нескольких десятых долей процента.

На рис. 3 представлены зависимости S как функция параметра v при различных значениях углов регулирования γ_{nk} . Для удобства угловые координаты ступеней α_{nk} представлены в виде отклонений от углов, кратных $n\pi$, где $n = 1, 2, \dots$:

$$\alpha_{nk} = \begin{cases} (n-1)\pi + \gamma_{nk}, & k = 1 \\ n\pi - \gamma_{nk}, & k = 2 \end{cases}$$

В расчете полагалось, что величины отклонений от углов (γ_{nk}) одинаковы. Анализ этих зависимостей показал, что наименее заметно влияние инерционности ключевых приборов проявляется в случае, когда регулирование ширины импульсов отсутствует, т. е. в первом приближении можно считать, что напряжение на выходе КГ имеет форму «меандр». В частности, если принять, что допустимое значение $S \leq 0,25\%$, то, как следует из нижней кривой, приведенной на рис. 3, параметр v может достигать значения 10° . Отсюда следует, что инерционностью ключевых приборов можно пренебречь, если относительная длительность фронта (спада) ключевого прибора не превышает

$$t_{\phi} / T \leq 2,8 \%$$

При сужении выходных импульсов напряжения более чем на 5° влияние инерционности ключевых приборов на искажение генерируемого сигнала становится более заметным. В этом случае применение при оценке искажений сигналов соотношений, полученных в [1], уже не гарантирует требуемой точности. Что же касается влияния инерционности ключей на фазу высокочастотного заполнения радиосигнала, то

оно сказывается значительно слабее. Так, например, при $\nu = 15^\circ$ отклонение точек перехода через ноль тока антенны не превышает 8 нс.

Таким образом, полученные в настоящей работе математические соотношения позволяют учесть вклад инерционности ключевых приборов в искажение генерируемых радиосигналов и сформулировать требования к быстродействию ключей по заданной допустимой величине этих искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеев, М.А.** Уменьшение искажений при генерировании радиосигналов ключевыми методами [Текст] / М.А. Алексеев, В.А. Сороцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — № 3(174). — С. 26–32.
2. **Артым, А.Д.** Усилители класса *D* и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании [Текст] / А.Д. Артым. — М.: Связь, 1980. — 209 с.
3. **Деч, Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и

Z-преобразования [Текст] / Г. Деч; Пер. с нем. — М.: Наука, Гл. редакция физматлит, 1971. — 288 с.

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

5. **ГОСТ Р 53168-2008.** Система радионавигации «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования. — М.: Стандартинформ, 2009. — 21 с.

REFERENCES

1. **Alekseev M.A., Sorockii V.A.** Umen'shenie iskazhenij pri generirovanii radiosignalov klyuchevymi metodami / Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatica. Upravlenie. Telekommunikatsii. — St.-Petersburg: Izd-vo Politehn. un-ta, 2013. — № 3(174). — S. 26–32. (rus)
2. **Artym A.D.** Usiliteli klassa *D* i klyucheveye generatory v radiosvjazi i radioveshhanii. — Moscow: Svjaz', 1980. — 209 s. (rus)
3. **Dech G.** Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniju preobrazovanija Laplasa i

Z-preobrazovanija; Per. s nem. — Moscow: Nauka, Gl. redakcija fizmatlit, 1971. — 288 s. (rus)

4. Specification of the Transmitted Loran — C Signal: Commandant Instruction M 16562.4 A / United States Department of Transportation, United States Coast Guard. — 1994.

5. **GOST R 53168-2008.** Sistema radionavigacii «Chajka». Signaly peredajushhikh stancij. Tehnicheskie trebovania. — Moscow: Standartinform, 2009. — 21 s. (rus)

СЕМАКОВ Никита Владимирович — студент кафедры радиотехники и телекоммуникации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: lanfren2@gmail.com

SEMAKOV, Nikita V. St. Petersburg State Polytechnical University .

195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: lanfren2@gmail.com

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович — *заведующий кафедрой радиотехники и телекоммуникации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

SOROTSKY, Vladimir A. *St. Petersburg State Polytechnical University .*
195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.
E-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru