

УДК 621.318.1; 537.611.4

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-141-145

Сравнение последовательной и параллельной схем сложения мощностей многих автогенераторов

А.Р. Сафин, Н.Н. Удалов, М.В. Капранов

Исследованы параллельная и последовательная схемы сложения мощностей больших ансамблей автогенераторов (АГ) гармонических колебаний. Работа мотивирована исследованиями в области спинтроники и спин-трансферных наноосцилляторов (СТНО). Основными недостатками подобных осцилляторов является низкая выходная мощность генерируемых колебаний, достигающая сотен нановатт, поэтому одним из способов повышения мощности устройств на базе СТНО является объединение их в ансамбли с целью синхронизации и сложения мощностей. При сложении мощностей активных элементов используются мостовые схемы, обеспечивающие взаимную развязку и отсутствие связи через общую нагрузку. При сложении мощностей наноразмерных осцилляторов использовать мостовые схемы сложения не представляется возможным, поскольку количество генераторов может достигать нескольких сотен. В этом случае встает вопрос о наилучшем способе объединения генераторов (геометрии объединения) и методе связи с нагрузкой. Одним из способов связи наноосцилляторов является токовое включение короткозамкнутыми соединителями, которое приводит либо к параллельной, либо к последовательным схемам включения.

На основе упрощенной эквивалентной схемы единичного АГ, состоящей из колебательного контура с потерями и нелинейного активного элемента, получены укороченные уравнения ансамблей и исследованы простейшие равноамплитудные синхронные режимы. На базе полученных моделей построено семейство нагрузочных характеристик ансамблей АГ и найдены условия работы ансамблей при аварийном выходе из строя произвольного количества элементов. Показано, что при аварийных отказах M элементов в ансамбле из N автогенераторов параллельная схема будет работоспособной только при $N > 2M$, тогда как последовательная схема будет работать для любых $N > M$. Отметим, что условие самовозбуждения для параллельной схемы при $M > N/2$ не выполняется. При коротком замыкании в параллельной и обрыве в последовательной схемах происходит выход из строя всего ансамбля, поэтому необходимо использовать более сложные топологии объединения элементов, например, объединять рассмотренные виды ансамблей в подансамбли. Данные результаты важны при построении больших ансамблей АГ (спин-трансферных наноосцилляторов), когда реализация мостовых схем невозможна.

Ключевые слова: сложение мощностей, взаимная синхронизация, отказы, ансамбль.

Для цитирования: Сафин А.Р., Удалов Н.Н., Капранов М.В. Сравнение последовательной и параллельной схем сложения мощностей многих автогенераторов // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 141—145. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-141-145.

Comparison between the Series and Parallel Power Output Summation Arrangements for an Ensemble of Self-oscillators

A.R. Safin, N.N. Udalov, M.V. Kapranov

The parallel and serial arrangements for summing the power outputs in large ensembles of sine-wave self-oscillators (SO) are investigated. The study was prompted by research activities carried out in the field of spintronics and spin-transfer nanooscillators (STNO). The main drawback of such oscillators is a low power level of the generated oscillations (a few hundred of nanowatts); therefore, one of possible ways for increasing the power output of STNO-based devices is combining them into ensembles to synchronize and sum up their power outputs. In summing up the powers of active elements, bridge circuits are used, which provide mutual decoupling and lack of connection through the common load. The use of bridge circuits for summing up the powers of nanoscale oscillators does not seem to be feasible because the number of generators can reach several hundred. In view of this circumstance, a need arises to seek for the best way of combining the generators (the uniting geometry) and the method for arranging their connection with the load. One possible way in which nanooscillators can be interlinked is to unite their current circuits by means of short-circuited connectors to form either a parallel or a series wiring schemes.

Abridged equations of ensembles were derived proceeding from the simplified equivalent circuit of a single self-oscillator consisting of an oscillating loop with losses and a nonlinear active element, and the elementary equal-amplitude synchronous modes are investigated. The obtained models were used to construct a family of SO ensemble external load characteristics. In addition, the ensemble operation conditions are found for the case when an arbitrary number of ensemble elements fail in emergency manner. It is shown that if M elements in the ensemble consisting of N self-oscillators fail, their parallel-connected arrangement will remain operable only if $N > 2M$, whereas the series-connected scheme will remain operable with any $N > M$. It should be pointed out that the self-excitation condition for the parallel scheme is not fulfilled if $M > N/2$. If there occurs a short-circuit fault in the parallel scheme and an open-circuit fault in the series scheme, the entire ensemble fails. Therefore it is necessary to use more intricate component combining topologies, e.g., to unite the considered types of ensembles into sub-ensembles. The obtained results are of importance in constructing large ensembles of SOs (specifically, spin-transfer nanooscillators) when the implementation of bridge circuits is impossible.

Key words: summation of power outputs, mutual synchronization, failures, ensemble.

For citation: Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V. Comparison between the Series and Parallel Power Output Summation Arrangements for an Ensemble of Self-oscillators. MPEI Vestnik. 2018;3:141—145. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-141-145.

Введение

Для создания телекоммуникационных устройств пятого поколения необходимы мощные, стабильные и миниатюрные генераторы СВЧ-колебаний. Одними из кандидатов на эту роль являются спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО), обладающие размерами в десятки и сотни нанометров [1]. Их основными недостатками считается низкая выходная мощность генерируемых колебаний, достигающая сотен нановатт, поэтому одним из способов повышения мощности устройств на базе СТНО является объединение их в ансамбли с целью синхронизации и сложения мощностей [2 — 6]. Известны различные механизмы внешней и взаимной синхронизации СТНО [6]. Несмотря на большое количество работ в области взаимной синхронизации СТНО, многие задачи до сих пор не решены.

При сложении мощностей активных элементов, очень часто, используются мостовые схемы, обеспечивающие взаимную развязку и отсутствие связи через общую нагрузку [7]. При сложении мощностей СТНО использовать мостовые схемы сложения не представляется возможным поскольку количество генераторов может достигать нескольких сотен. В этом случае встает вопрос о наилучшем способе объединения генераторов (геометрии объединения) и методе связи с нагрузкой. Один из способов связи СТНО — токовое включение короткозамкнутыми соединителями [2, 3], которое приводит либо к параллельной, либо к последовательной схемам включения.

Исследовано влияние отказов в двух схемах ансамблей автогенераторов (АГ) и сделаны рекомендации по выбору более сложной топологии объединения в ансамбли большого числа элементов. В качестве эквивалентной схемы единичного АГ применяется схема, состоящая из колебательного контура с малыми потерями и активного нелинейного элемента с падающим участком вольт-амперной характеристики (ВАХ). Укороченные уравнения для медленно меняющихся амплитуды и фазы выходного напряжения такого АГ при некоторых параметрах [1, 5] совпадают с укороченными уравнениями для СТНО и других АГ (транзисторных, диодных). Полученные результаты могут использоваться при построении схем сложения мощностей больших ансамблей автогенераторов различной физической природы.

Укороченное уравнение и нагрузочная характеристика единичного автогенератора

Рассмотрим АГ, эквивалентная схема которого представлена на рис. 1, состоящий из параллельного соединения нелинейного активного элемента НЭ, rLC -контура и нагрузки RL (цепи питания активного элемента не показаны). Выбор рабочей точки на падающем участке ВАХ [7, 8] при некоторых условиях обеспечивает компенсацию потерь в колебательной системе,

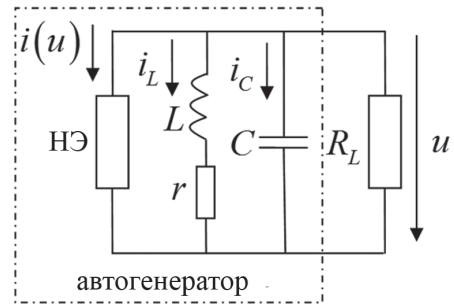


Рис.1. Эквивалентная высокочастотная (без цепей питания) схема автогенератора

ме, что дает возможность существованию колебаний в АГ. Уравнение Кирхгофа для токов приводит к уравнению относительно мгновенного напряжения u вида:

$$i(u) + \frac{u}{pL+r} + pCu + \frac{u}{R_L} = 0, \quad (1)$$

где $i(u) = -\alpha u + \beta u^3$ — «мягкая» характеристика активного элемента; α, β — константы [8]; $p \equiv d/dt$ — оператор дифференцирования; L, C, r — индуктивность, емкость и сопротивление потерь колебательной системы; R_L — сопротивление нагрузки.

Введем обозначения $\omega_0^2 = 1/LC$, $\delta = r\omega_0 C$, $R = \omega_0 L/\delta$, $\bar{p} = p/\omega_0$ и перепишем (1) в виде

$$[\bar{p}^2 + \delta\bar{p} + 1]u = -\delta R[\bar{p} + \delta] \left\{ i(u) + \frac{u}{R_L} \right\}. \quad (2)$$

Методом медленно меняющихся амплитуд [8 — 10] от (2) перейдем к укороченному уравнению для медленно меняющихся амплитуды $U(t)$ и фазы $\varphi(t)$. Пропуская промежуточные выкладки, запишем укороченное уравнение для комплексной амплитуды $\dot{U} = Ue^{j\varphi}$

$$T \frac{d\dot{U}}{dt} = -R \left[-\alpha + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_L} + 0,75\beta|\dot{U}|^2 \right] \dot{U}, \quad (3)$$

где $T = 2/\omega_0\delta$.

Условие самовозбуждения и стационарная амплитуда колебаний U_0 следуют из (3)

$$\alpha R > 1 + R/R_L; \quad (4)$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{\alpha R - 1 - R/R_L}{0,75\beta R}}. \quad (5)$$

Мощность P_L первой гармоники в нагрузке R_L в стационарном режиме при этом равна:

$$P_L = \frac{U_0^2}{2R_L} = \frac{2[\alpha R - 1 - R/R_L]}{3\beta R_L R}. \quad (6)$$

Нагрузочная характеристика, т. е. зависимость P_L от R_L представлена на рис. 2. Здесь минимальное сопротивление R_L^{\min} , при котором возникают колебания $R_L^{\min} = R/[\alpha R - 1]$, а оптимальное сопротивление, дающее

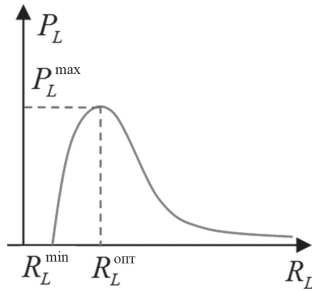


Рис. 2. Нагрузочная характеристика автогенератора

максимальную мощность в нагрузке $R_L^{opt} = 2R/[\alpha R - 1]$. Соответствующее оптимальному сопротивлению максимальное значение мощности в нагрузке равно $P_L^{max} = [\alpha R - 1]^2 / (6\beta R^2)$. Рассмотрим простейшие ансамбли АГ.

Параллельная и последовательная схемы ансамблей автогенераторов

Параллельная и последовательная схемы соединения АГ представлены на рис. 3, а, б. Рассмотрим параллельную схему соединения АГ (рис. 3, а). Возьмем равноамплитудный синхронный режим на одной рабочей частоте, равной частоте колебательной системы ω_0 . В этом случае можно считать, что активные и реактивные элементы ансамблей соединены параллельно и уравнение для напряжения u примет вид

$$Ni(u) + \frac{Nu}{pL+r} + NpCu + \frac{u}{R_L} = 0, \quad (7)$$

где N — количество элементов ансамбля.

Поделив левую и правую части (7) на N видим, что данная схема эквивалентна одному АГ, нагруженному

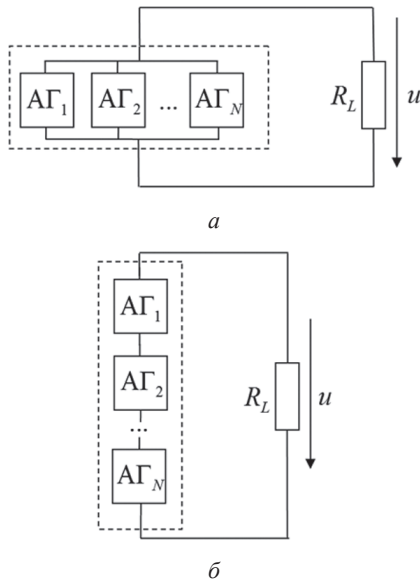


Рис. 3. Параллельная (а) и последовательная (б) схемы сложения мощностей АГ в общей нагрузке R_L

на сопротивление NR_L , при этом получим следующее выражение для стационарной мощности в нагрузке $R_L^{пар}$:

$$P_L^{пар} = \frac{2[\alpha R - 1 - R/NR_L]}{3\beta R_L R}. \quad (8)$$

Очевидно, что зависимость (8) повторяет (6), но минимальное сопротивление, при котором возникают колебания, $R_L^{пар.мин} = R/(N[\alpha R - 1])$, а оптимальное сопротивление, дающее максимум мощности, $R_L^{пар.опт} = 2R/(N[\alpha R - 1])$. При $R_L = R_L^{пар.опт}$ мощность $P_L^{пар.макс} = NP_L^{макс}$, что соответствует идеальному сложению мощностей в N раз.

Для последовательной схемы, изображенной на рис. 3, б, $u = N\tilde{u}$, где \tilde{u} — напряжение на одном АГ. Мощность в нагрузке $P_L^{пос} = N^2 |\dot{U}_0^{пос}|^2 / 2R_L$, где $\dot{U}_0^{пос}$ — стационарная амплитуда парциального АГ в последовательной схеме. По аналогии с параллельной схемой найдем окончательное выражение для мощности в нагрузке $R_L^{пос}$

$$P_L^{пос} = \frac{2N^2[\alpha R - 1 - NR/R_L]}{3\beta R_L R}. \quad (9)$$

В данном случае оптимальное сопротивление, дающее максимум мощности $P_L^{пос.макс} = NP_L^{макс}$, задается выражением $R_L^{пос.опт} = 2NR/[\alpha R - 1]$.

На рис. 4 представлены зависимости мощности в нагрузке для обеих схем сложения, нормированные к максимальной мощности в нагрузке $k_{\{пар,пос\}} = P_L^{\{пар,пос\}} / P_L^{макс}$, от нормированного значения

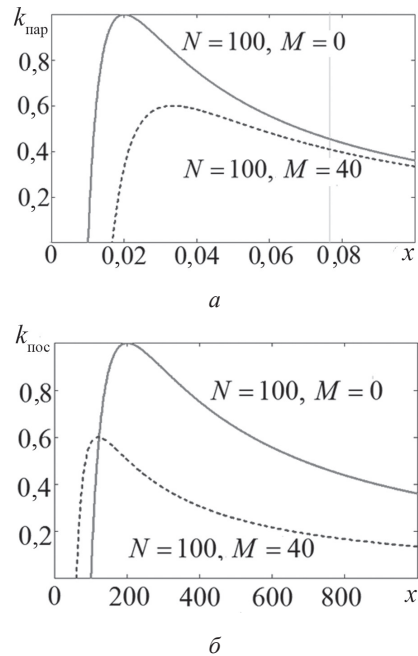


Рис. 4. Зависимости нормированной мощности в нагрузке $k = P_L/P_L^{макс}$ от нормированного сопротивления нагрузки $x = R_L/R_L^{мин}$ для параллельной (а) и последовательной (б) схем сложения мощностей

сопротивления нагрузки $x = R_L/R_L^{\min}$. Аналитические выражения примут следующий вид:

$$k_{\text{пар}} = \frac{4(Nx-1)}{(Nx)^2}; \quad (10)$$

$$k_{\text{пос}} = \frac{4N(x-N)}{(x)^2}. \quad (11)$$

Отметим, что оптимальные нормированные сопротивления $x_{\text{опт}}$, соответствующие максимуму мощности в нагрузке, равны $x_{\text{опт}}^{\text{пар}} = 2/N$ и $x_{\text{опт}}^{\text{пос}} = 2N$ для параллельной и последовательной схем, соответственно. Для последовательной схемы необходимо выбирать в N раз большее сопротивление нагрузки по сравнению с единичным генератором, тогда как для параллельной схемы в N раз меньше, что гораздо удобнее на практике. Перейдем к анализу аварийных отказов в работе ансамблей двух этих типов.

Аварийные отказы элементов ансамбля

Рассмотрим влияние аварийных отказов M элементов ансамбля на мощности $P_L^{\text{пар}}, P_L^{\text{пос}}$. Пусть, первоначально ансамбли работали в режиме максимума отдаваемой в нагрузку мощности $P_L^{\text{пар,max}}, P_L^{\text{пос,max}}$ на соответствующих сопротивлениях $R_L^{\text{пар,опт}}, R_L^{\text{пос,опт}}$. Зависимости $k(x)$ для $N = 100$ при наличии отказов из $M = 40$ элементов приведены на рис. 4. При отказах для параллельной схемы минимальное сопротивление, при котором возникают колебания в схеме, увеличивается, а для последовательной схемы уменьшается.

Для количественной оценки влияния аварийного отказа в работе M элементов введем величину $\delta = P_L^N / P_L^{N-M}$ раз. При отказах сопротивление нагрузки не изменилось и соответствует $R_L^{\text{пар,опт}}, R_L^{\text{пос,опт}}$. После упрощений выражения для δ получим в виде:

$$\delta_{\text{пар}} = \frac{N-M}{N-2M}; \quad (12)$$

$$\delta_{\text{пос}} = \frac{N^3}{(N-M)^2(N+M)}. \quad (13)$$

Зависимости $\delta_i(M)$ для $N = 100$ представлены на рис. 5. Важной особенностью является то, что работоспособность параллельной схемы возможна только при $N > 2M$, тогда как последовательная схема будет работать для любого $N > M$. При малом количестве отказавших элементов M (для $M < 20$ на рис. 5) различий в двух рассматриваемых схемах нет и характер зависимостей $\delta(M)$ совпадает. При больших M $\delta_{\text{пос}}(M)$ монотонно возрастает, тогда как $\delta_{\text{пар}}(M)$ возрастает быстрее и при $M > N/2$ стремится к бесконечности, данная схема не является работоспособной. Такое сильное различие в выражениях для δ связано с разницей в геометрии связи элементов ансамбля. Для параллельной схемы с выходом из строя M элементов минимальное сопротивление будет возрастать и может реализоваться

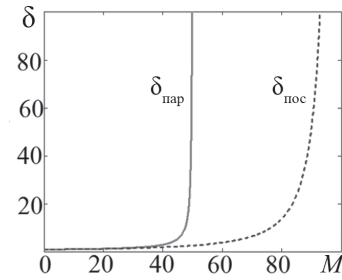


Рис. 5. Зависимости $\delta(M)$ для $N = 100$

ситуация, при которой оно станет больше выбранного сопротивления нагрузки, настроенного на максимум мощности. Для последовательной схемы подобная ситуация невозможна, поскольку минимальное сопротивление при отказах убывает. На данных примерах проявляется существенная разница в энергетических свойствах параллельной и последовательной схем, то есть влияние топологии.

В настоящем случае проанализированы два типа аварийных отказов. Для параллельной схемы это холостой ход, т. е. обрыв в электрической цепи аварийного АГ, а для последовательной схемы — короткое замыкание аварийного АГ. Для ансамблей СТНО возможны оба вида отказов, т. е. для последовательной схемы возможен обрыв в электрической цепи, что выводит из строя весь ансамбль, а для параллельной схемы возможно короткое замыкание, которое также приведет к выходу из строя всего ансамбля. В этом заключается негативная особенность простейших схем ансамблей АГ, поэтому необходимо усложнять топологическую структуру ансамблей, например, разбивая их на подансамбли. Подобные схемы для СТНО предлагались ранее и обсуждались в [3]. Они учитывают негативные особенности простейших ансамблей АГ в виде параллельной и последовательной схем и являются более предпочтительными. Анализ ансамблей, состоящих из подансамблей, можно проводить по той же методике, что и для параллельной и последовательной схем. В реальных схемах подобрать идеальное совпадение параметров АГ невозможно, особенно при проектировании больших ансамблей СТНО [4], что существенно усложняет рассмотрение их характеристик.

Заключение

Исследованы нагрузочные характеристики простейших схем сложения мощностей АГ — параллельной и последовательной. Показано, что при аварийных отказах M элементов в ансамбле параллельная схема будет работоспособной только при $N > 2M$, тогда как последовательная схема будет работать для любых $N > M$. Отметим, что условие самовозбуждения для параллельной схемы при $M > N/2$ не выполняется. При коротком замыкании в параллельной и обрыве в последовательной схемах происходит выход из строя всего ансамбля, поэтому необходимо использовать более

сложные топологии объединения элементов. Данные результаты являются важными при построении больших ансамблей АГ, когда реализация мостовых схем невозможна [9 — 12].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента для молодых кандидатов наук (№ МК-7026.2016.8).

Литература

1. **Slavin A., Tiberkevich V.** Nonlinear Auto-oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current // *IEEE Trans. Mag.* 2009. V. 45. Pp. 1875—1918.
2. **Grollier J., Cros V., Fert A.** Synchronization of Spin-transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents // *Phys. Rev.* 2006. V. 73. P. 060409(R).
3. **Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A.** Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-oscillators on Their Synchronization: an Analytical Theory // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. P. 232504.
4. **Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Mutual Phase Locking of Very Nonidentical Spin Torque Nano-oscillators via Spin Wave Interaction // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2014. V. 67. P. 20601.
5. **Сафин А.Р. и др.** Нагрузочные характеристики спин-трансферного наноосциллятора // *Письма в ЖТФ.* 2017. № 6. С. 56—63.
6. **Mitrofanov A., Safin A., Udalov N., Kapranov M.** Theory of Spin Torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop // *J. of Appl. Phys.* 2017. V. 122. P. 123903.
7. **Дворников А.А.** Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств. М.: Энергия, 1980.
8. **Дворников А.А., Уткин Г.М.** Автогенераторы в радиотехнике. М.: Радио и связь, 1991.
9. **Tamaru S. e. a.** Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122. P. 193901.
10. **Kreissig M. e. a.** Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits // *AIP Advances.* 2017. V. 7. P. 056653.
11. **Awad A. e. a.** Long-range Mutual Synchronization Of Spin Hall Nano-oscillators // *Nat. Phys.* 2016. V. 14. P. 1—9.
12. **Lebrun R. e. a.** Mutual Synchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-Range and Tunable Electrical Coupling Scheme // *Nat. Comm.* 2017. V. 8. P. 1—7.

References

1. **Slavin A., Tiberkevich V.** Nonlinear Auto-oscillator Theory of Microwave Generation by Spin-Polarized Current. *IEEE Trans. Mag.* 2009;45:1875—1918.
2. **Grollier J., Cros V., Fert A.** Synchronization of Spin-transfer Oscillators Driven by Stimulated Microwave Currents. *Phys. Rev.* 2006;73:060409(R).

3. **Georges B., Grollier J., Cros V., Fert A.** Impact of the Electrical Connection of Spin Transfer Nano-oscillators on Their Synchronization: an Analytical Theory. *Appl. Phys. Lett.* 2008;92:232504.

4. **Safin A.R., Udalov N.N., Kapranov M.V.** Mutual Phase Locking of Very Nonidentical Spin Torque Nano-oscillators via Spin Wave Interaction. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2014;67:20601.

5. **Safin A.R. i dr.** Nagruzochnye Kharakteristiki Spin-Transfernogo Nanoostillyatora. *Pis'ma v ZHTE.* 2017;6:56—63. (in Russian).

6. **Mitrofanov A., Safin A., Udalov N., Kapranov M.** Theory of Spin Torque Nano-oscillator-based Phase-locked Loop. *J. of Appl. Phys.* 2017;122:123903.

7. **Dvornikov A.A.** Fazirovannye Avtogeneryatory Radiopereadayushchikh Ustroystv. М.: Energiya, 1980. (in Russian).

8. **Dvornikov A.A., Utkin G.M.** Avtogeneryatory v Radiotekhnike. М.: Radio i Svyaz', 1991. (in Russian).

9. **Tamaru S. e. a.** Measurement of Shot Noise in Magnetic Tunnel Junction and its Utilization for Accurate System Calibration. *J. Appl. Phys.* 2017;122:193901.

10. **Kreissig M. e. a.** Vortex Spin-torque Oscillator Stabilized by Phase Locked Loop Using Integrated Circuits. *AIP Advances.* 2017;7:056653.

11. **Awad A. e. a.** Long-range Mutual Synchronization Of Spin Hall Nano-oscillators. *Nat. Phys.* 2016;14:1—9.

12. **Lebrun R. e. a.** Mutual Synchronization of Spin Torque Nanooscillators Through a Long-Range and Tunable Electrical Coupling Scheme. *Nat. Comm.* 2017;8:1—7.

Сведения об авторах

Сафин Ансар Ризаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: arsaafin@gmail.com

Удалов Николай Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: udalovnn@rambler.ru

Капранов Михаил Владимирович — кандидат технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: kapranovmv@mail.ru

Information about authors

Safin Ansar R. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: arsaafin@gmail.com

Udalov Nikolay N. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: udalovnn@rambler.ru

Kapranov Mikhail V. — Ph.D. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: kapranovmv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.06.2017