

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

С.С. Абрамов, А.М. Сажнев, Г.А. Воинцев,  
В.Б. Малинкин, Л.Г. Рогулина

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
г. Новосибирск; abramov@neic.nsk.su*

*Представлена членом редколлегии профессором С.И. Дворецким*

**Ключевые слова и фразы:** динамические режимы; имитационная модель; нелинейная система; несимметричная линейная и динамическая нагрузки; нормы динамических характеристик системы; степень искажения питающего напряжения.

**Аннотация:** Разработана имитационная модель в среде Simulink сложной нелинейной системы с учетом внешних воздействий со стороны нагрузки, включающей несимметричную линейную и динамическую нагрузки, что позволяет оценить степень искажения питающего напряжения. Это позволяет рассчитать сечение нулевого провода с учетом уравнивающего тока, а также проверить на соответствие нормам динамических характеристик системы при работе от промышленной сети.

---

Одной из проблем, возникающих при функционировании сложной нелинейной системы, включающей электропитающее оборудование, является искажение формы напряжения, вызванное гармоническими составляющими тока, потребляемого несимметричной и динамической нагрузками. Несимметрия нагрузки трехфазной сети обусловлена применением однофазных нагрузок, подключаемых к разным фазам. Большая часть компьютерного оснащения, предназначенного для мониторинга промышленного и офисного оборудования, представляет собой динамические нагрузки, что создает обратную помеху. Суммарный эффект этих нагрузок выражается в искажении напряжения, которое воздействует на другое оборудование, подключенное к этому же источнику. Это может вызывать сбои в других устройствах, повреждения аппаратуры и другие нежелательные эффекты.

Степень искажения напряжения определяется коэффициентом искажения синусоидальности  $K_{U_1}$ , коэффициентами несимметрии напряжения по обратной  $K_{2U_1^i}$  и нулевой  $K_{0U_1}$  последовательности [1]. Эффекты, вызываемые высшими гармониками напряжения и тока, делятся на эффекты мгновенного и длительного воздействий. К эффектам мгновенного воздействия относят: искажения формы питающего напряжения; падение напряжения в распределительной сети; эффект гармоник, кратных трем (в трехфазных сетях); резонансные явления на частотах высших гармоник; наводки в оборудовании иных систем и управляющих сетях; повышенный акустический шум в электромагнитном оборудовании; вибрацию в электромашинных системах. Проблемы длительного воздействия – это нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и электрических машинах; нагрев конденсаторов и нагрев кабелей распределительной сети.

Высшие гармоники тока, кратные трем (то есть 3, 9, 15, 21 и т.д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические токи во всех трех фазах сдвинуты на  $120^\circ$ , а сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает и напряжения смещения нейтрали. Это утверждение остается справедливым для большинства гармоник. Однако некоторые из них имеют направление вращения вектора тока в ту же сторону, что и основная гармоника (первая, 50 Гц), то есть имеют прямую последовательность. Другие же вращаются в обратном направлении и, таким образом, имеют обратную последовательность. Это не относится к гармоникам, кратным трем:

$$n = 3(2k + 1), \text{ где } k = 0, 1, 2, \dots$$

В трехфазных цепях они сдвинуты на  $360^\circ$ , совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные трем, суммируются в нейтрали. В результате в действующем значении фазных токов общий ток нейтрали может превышать фазные токи:

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

Так, например, при фазных токах, равных 37 А, ток нейтрали составляет 55 А при частоте, равной 150 Гц [2]. Неправильно спроектированные четырехпроводные кабели трехфазных сетей могут перегреваться вплоть до воспламенения, поджигая тем самым необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных кабелей сети. Гармоники, кратные трем, приводят к потерям как в нейтрали, так и в фазных проводниках, вызывая искажения формы напряжения сети.

При наличии высших гармоник в электрических цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами, какими могут считаться блоки, узлы и распределительные сети рассматриваемой сложной системы, возникает опасность образования резонансных явлений. При возникновении резонансного или близкого к нему режима на какой-либо высшей гармонике эта составляющая оказывается больше, чем амплитудное значение первой гармоники на тех же участках цепи. Это отрицательным образом может отразиться на работоспособности отдельных элементов и узлов системы.

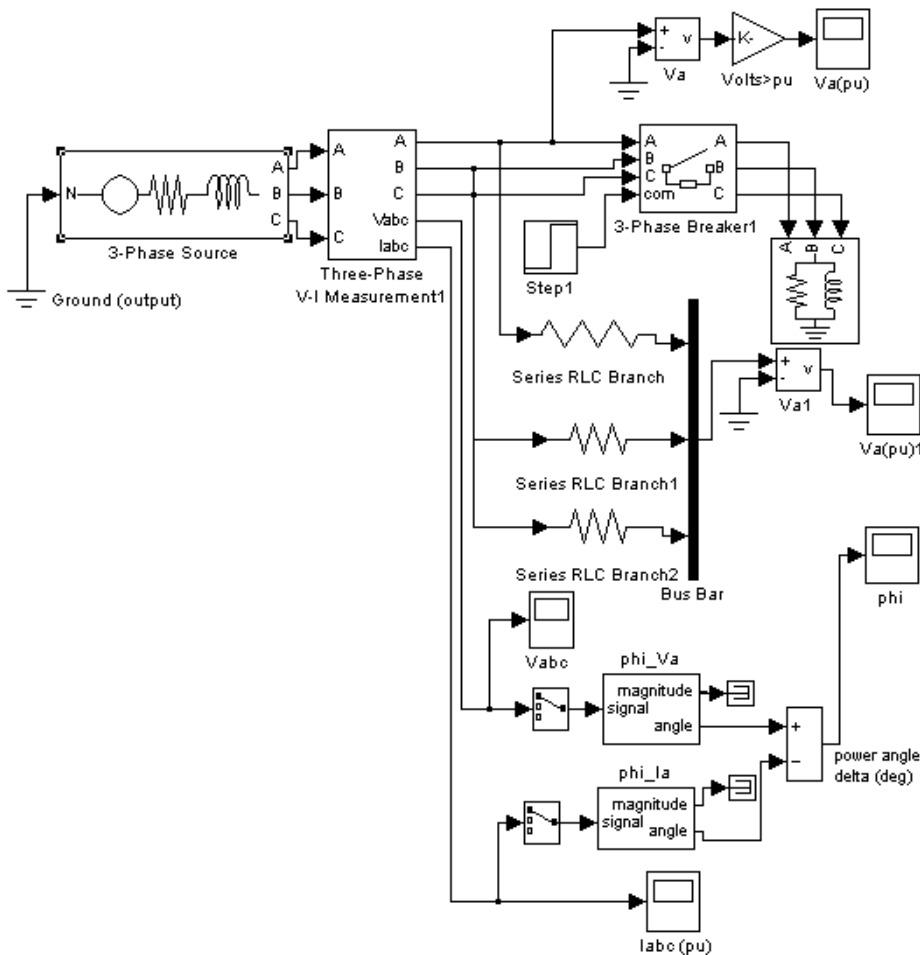
Таким образом, при проектировании четырехпроводных линий (TN-C) трехфазных сетей для надежного функционирования системы в динамических режимах требуется их проверка, что возможно только путем моделирования. Наиболее удобной, полной и подходящей для этих целей является интерактивная среда Simulink. Она включает в себя библиотеку блоков, что позволяет моделировать сложные нелинейные системы. Среда состоит из взаимосвязанных компонентов – математического, информационного и программно-технического. Каждый из компонентов может видоизменяться автономно, независимо от других. Математический компонент включает модели элементов системы, входящих в состав библиотеки Sim Power Systems, которые можно пополнять созданием других моделей устройств. Уравнения связи между элементами, специальные уравнения математической стыковки элементов в случае различных координат переменных, а также алгоритмы управления процессами полной структуры сложной нелинейной системы с любой фиксированной конфигурацией можно создавать посредством математических функций и методов моделирования, имеющихся в подсистеме Simulink [3]. В настоящей работе представлена модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки комплексного типа, позволяющая проводить проверку системы в динамических режимах при схеме заземления типа TN-C.

## Модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки

Для проведения измерений в системе при несимметричной и динамической нагрузках разработана имитационная модель в среде Simulink (рис. 1). В качестве сети промышленной частоты используется трехфазный источник напряжения (3-Phase Source).

К задаваемым параметрам относятся: действующее значение линейного напряжения, В (Phase-to-phase rms voltage, V); начальная фаза напряжения в фазе А, град (Phase angle of phase A, deg); частота источника, Гц (Frequency, Hz); соединение фаз источника (Internal connection), где значение параметра выбирается из списка: Y – звезда, Yn – звезда с нулевым проводом, Yg – звезда с заземленной нейтралью; задается также собственное полное сопротивление источника, используя параметры короткого замыкания (Specify impedance using short-circuit level).

Для измерения токов и напряжений в трехфазных цепях в модели используется трехфазный измеритель (Three-Phase V-I Measurement). К параметрам блока относятся: измерение напряжений (Voltage Measurement); использование метки (Use a label); метка сигнала (Signal label); измерение напряжений в относительных единицах (Volts in p.u.); измерение токов (Current measurement); использование



**Рис. 1. Модель нелинейной системы при воздействии со стороны нагрузки комплексного типа**

метки (Use a label); метки сигнала (Signal label); измерение токов в относительных единицах (Currents in p.u.); выходной сигнал (Output signal). Выбор значения параметра возможен только при условии, что с помощью блока Powergui установлен режим расчета на переменном токе (Phasor simulation). В этом случае значение параметра выбирается из списка: Magnitude – амплитуда (скалярный сигнал); Complex – комплексный сигнал; Real-Imag – вектор, состоящий из двух элементов – действительная и мнимая составляющие сигнала; Magnitude-Angle – вектор, состоящий из двух элементов – амплитуда и аргумент сигнала.

Выходными сигналами блока являются векторы сигналов измеряемых переменных.

Несимметричная нагрузка имитируется посредством соединения в звезду отдельных элементов с заземлением на общей шине. Задание параметров последовательной RLC-цепи обеспечивается блоком Series RLC Branch. К параметрам блока относятся:

- величина активного сопротивления, Ом (Resistance R, Ohms); индуктивность, Гн (Inductance L, H); емкость, Ф (Capacitance C, F). Для исключения резистора (или индуктивности) из цепи его (ее) величину нужно задать равным нулю, для конденсатора значение емкости нужно задать равной inf. В этом случае на пиктограмме блока элемент отображаться не будет;

- измеряемые переменные (Measurements). Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно контролировать с помощью блока Scope.

### Исследование влияния несимметричной и динамической нагрузок на переходные процессы в системе

С помощью разработанной имитационной модели нелинейной системы (см. рис. 1) проведены расчеты влияния асимметричной нагрузки в фазах на токи и напряжения на выходе, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Исследования влияния асимметричной нагрузки**

Входные параметры			Измеряемые характеристики	
Мощность нагрузки	Угол фазового сдвига $\varphi$	Асимметрия нагрузки, %	Асимметрия тока сети, %	Асимметрия напряжения сети, %
Линейной $P_L = 4$ кВт; Динамической: активная $P = 0,2$ кВт; реактивная $Q_L = 0,2$ кВАр	29°	9,09	9,0	0,45
		24,24	14,4	1,11
		28,57	26,4	1,76
		37,50	35,8	2,30
		44,44	40,9	2,44
		50,00	46,5	2,63
Линейной $P_L = 1$ кВт; Динамической: активная $P = 1$ кВт; реактивная $Q_L = 1$ кВАр	27	1,0	0,22	0,008
		2,0	0,4	0,09
		3,0	1,1	0,12

Результаты проведенных исследований показали, что на асимметрию напряжения влияет не только величина асимметрии нагрузки, но и соотношение мощностей линейной и динамической нагрузок и их характер. Из табл. 1 следует, что при несимметричной нагрузке, равной 30 % и выше, асимметрия напряжения превышает нормируемое значение 2 % в соответствии с [1]. Следовательно, при распределении нагрузки по фазам необходимо учитывать это критическое значение для удовлетворения нормы по асимметрии напряжения.

При выборе сечения нулевого провода необходимо учитывать величину уравнивающего тока, возникающего при асимметрии фаз. Напряжения смещения нейтрали при несимметричной нагрузке приведены в табл. 2.

Измерения были проведены при следующих исходных данных: активная мощность линейной нагрузки  $P_{л}=4$  кВт; номинальное напряжение  $U_n=220$  В; номинальная частота  $f_n = 50$  Гц; составляющие мощности динамической нагрузки: активная  $P=0,2$  кВт, реактивная  $Q_L=0,2$  кВАр. На основании подобных измерений можно рассчитать поперечное сечение нулевого провода, учитывая допустимые значения асимметрии нагрузки в фазах.

Из множества переходных процессов, протекающих в системах, наибольший интерес для практики представляют динамические нагрузки в несимметричных режимах работы. При анализе переходных процессов частоту и уровень напряжения питания принимаем постоянными, так как их изменения являются медленными по отношению ко времени протекания переходных процессов в сети. Момент коммутации нагрузки задается внешним воздействием на коммутатор посредством генератора ступенчатого сигнала Step, в котором время наступления перепада сигнала равно 2 с. Расчеты были проведены при следующих данных: активная мощность линейной нагрузки  $P_{л} = 4$  кВт; составляющие мощности динамической нагрузки: активная –  $P=3$  кВт; реактивная –  $Q_L = 3$  кВАр. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что к увеличению импульсного значения тока и времени установления переходного процесса приводит только перегрузка одной из фаз. Снижение нагрузки в ней не ухудшает динамику процессов, а приводит к появлению уравнивающего тока. Последнее является причиной перегрузки нулевого провода, что может привести к его разрушению. Значения импульсного тока (см. табл. 3) не пре-

Таблица 2

**Зависимость напряжения смещения нейтрали от асимметричной нагрузки**

Асимметрия нагрузки, %	Напряжение смещения нейтрали, В
9,09	5,0
24,24	9,6
28,57	17,2
37,50	23,7
44,44	29,1
50,00	33,8

Таблица 3

**Динамические показатели при несимметричном режиме**

Входные параметры			Измеряемые характеристики	
Характер асимметрии нагрузки	Асимметрия тока сети, %	Асимметрия напряжения сети, %	«Наброс» нагрузки, $\Delta I$ , %	Время установления, $t_{уст}$ , с
Симметрия	0,0	0,0	19,1	4,7
Недогрузка	49,6	1,04	8,36	3,6
Перегрузка	33,3	0,29	22,7	9,6

вышают нормируемой величины  $6I_{\text{ном}}$  длительностью более 1 с при работе на несимметричную и динамическую нагрузки [4]. Исследования показали, что на переходные процессы в большей мере влияет величина перегрузки, а не ее асимметрия.

По результатам проведенных исследований получено семейство зависимостей напряжения асимметрии и напряжения смещения нейтрали при различных видах нагрузок для ряда мощностей (рис. 2–5).

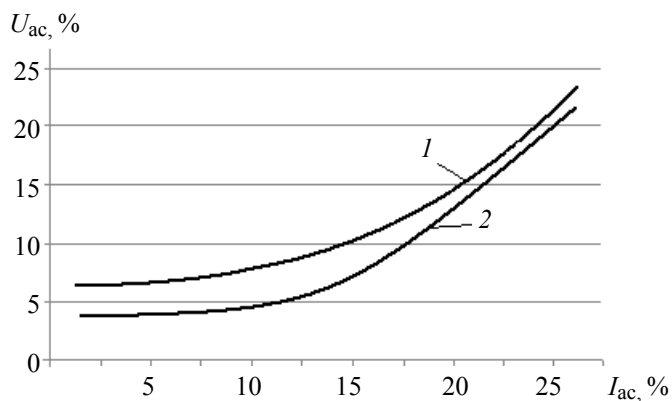


Рис. 2. Зависимость напряжения асимметрии при изменении активной нагрузки для  $P$ , кВт:  
1 – 2; 2 – 4

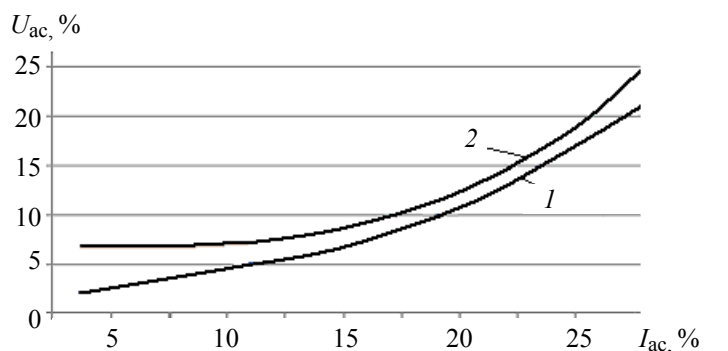


Рис. 3. Зависимость напряжения асимметрии при изменении активно-индуктивной нагрузки для  $P$ , кВт:  
1 – 2; 2 – 4

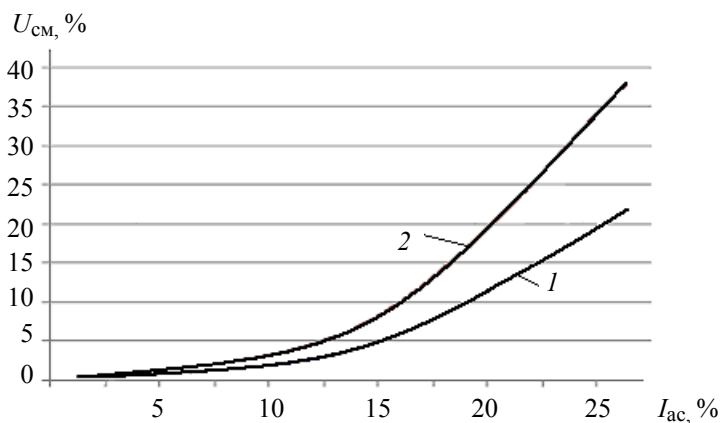


Рис. 4. Зависимость напряжения смещения при изменении активной нагрузки для  $P$ , кВт:  
1 – 2; 2 – 4

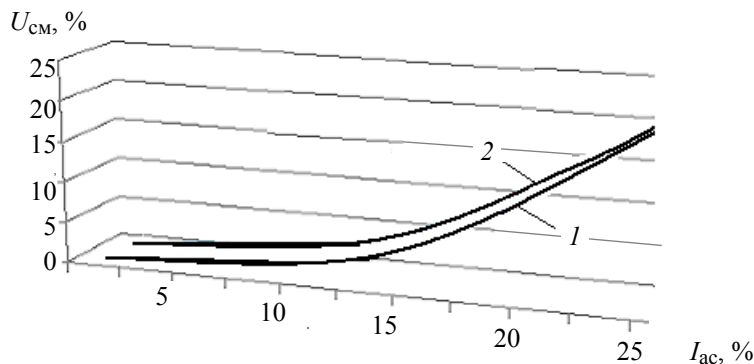


Рис. 5. Зависимость напряжения смещения при изменении активно-индуктивной нагрузки для  $P$ , кВт:  
1 – 2; 2 – 4

Таким образом, имитационная модель нелинейной системы при воздействии со стороны комплексной нагрузки (несимметричная статическая и динамическая) позволяет оценить степень асимметрии напряжения и рассчитать сечение нулевого провода по величине уравнительного тока, возникающего при асимметрии нагрузки, а также проверить удовлетворение нормам динамических параметров системы при работе от промышленной сети в штатном режиме. Результаты моделирования динамических режимов нелинейной системы следует считать неотъемлемой частью синтеза любых сложных систем.

#### Список литературы

1. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13108–87 ; введ. 1999–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 33 с.
2. Капустин, В.М. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть / В.М. Капустин, А.А. Лопухин // Соврем. технологии автоматизации. – 1997. – № 2. – С. 104–108.
3. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MatLab : учеб. курс / Ю. Лазарев. – СПб. : Питер ; Киев : ВНУ, 2005. – 512 с.
4. ОСТ 45.183–2001. Установки электропитания аппаратуры электросвязи стационарные. Общие технические требования. – Введ. 2001–03–01. – М. : ЦНТИ «Информсвязь», 2001. – 23 с.

---

### Research into Dynamic Properties of Complex Systems

S.S. Abramov, A.M. Sazhnev, G.A. Vointsev, V.B. Malinkin, L.G. Rogulina

*Siberia State University of Telecommunications and Computer Science, Novosibirsk;*  
*abramov@neic.nsk.su*

**Key words and phrases:** degree of supply voltage distortion; dynamic modes; imitation model; non-linear system; non-symmetrical and dynamic loads; standards of system dynamic characteristics.

**Abstract:** The paper studies the designed simulation model in the Simulink media of complex non-linear system accounting for the effect of external loads including non-symmetrical linear and dynamic ones; thus, it allows estimating the degree of supply voltage distortion. It enables to calculate the cross-section of neutral conductor taking into account the balanced current as well as to check whether the dynamic characteristics of the system meet the standards when fed from industrial power supply. Simulink, developed as a tool for modeling, simulating and analyzing multidomain dynamic systems (including linear and nonlinear systems), allows to estimate the degree of supply voltage distortion. It enables to calculate the cross-section of neutral conductor taking into account the electric current as well as to check whether the dynamic characteristics of the system meet the standards in industrial network operation.

### *References*

1. GOST 13109–07. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical devices. Electrical energy norms in energy supply systems. – Vzamen GOST 13108–87 ; vved. 1999–01–01. – M. : Izd-vo standartov, 1998. – 33 p.
2. Kapustin, V.M. Computers and three-phase electrical network / V.M. Kapustin, A.A. Lopuhin // *Sovrem. tehnologii avtomatizacii*. – 1997. – № 2. – P. 104–108.
3. Lazarev, Yu. Processes and systems modeling in MatLab : uchebnij kurs / Yu. Lazarev. – SPb. : Piter ; Kiev : BHV, 2005. – 512 p.
4. OST 45.183–2001. Stationary electricity supply units. General technical requirements. – Vved. 2001–03–01. – M. : CNTI «Informsvyaz», 2001. – 23 p.

---

## **Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der komplizierten Systeme**

**Zusammenfassung:** Es ist das Simulationsmodell im Medium Simulink des komplizierten unlinearen Systems mit Berücksichtigung der Außeneinwirkungen von der Seite der asymmetrischen linearen und dynamischen Belastungen ausgearbeitet, was den Grad der Verfälschung der Speisespannung einzuschätzen erlaubt. Das erlaubt sowohl den Schnitt des Nullkabels mit Berücksichtigung des Ausgleichsstroms zu berechnen, als auch die Entsprechung der Normen der dynamischen Charakteristiken des Systems bei der Arbeit vom Betriebsnetz nachzuprüfen.

---

## **Etude des propriétés dynamiques des systèmes complexes**

**Résumé:** Est élaboré un modèle d'imitation dans le milieu Simulink d'un système complexe non linéaire compte tenu des actions extérieures du côté de la charge comprenant la charge asymétrique non linéaire et dynamique ce qui permet d'évaluer le degré de décalage de la tension d'alimentation. Cela permet de calculer la section du fil conducteur nul compte tenu du courant compensateur ainsi que de vérifier le



conformement aux normes des caractéristiques dynamiques du système lors du fonctionnement à partir du réseau industriel.

---

**Авторы:** *Абрамов Сергей Степанович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиопередающих устройств и электропитания; *Сажнев Александр Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиопередающих устройств и электропитания; *Воинцев Георгий Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Систем радиосвязи»; *Малинкин Виталий Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Многоканальная электрическая связь и оптические системы»; *Розулина Лариса Геннадьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиопередающих устройств и электропитания, ГОУ ВПО «СибГУТИ».

**Рецензент** Муромцев Юрий Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ГОУ ВПО «ТГТУ».

---