

УДК 621.372.21

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-23-27

Т. В. КОВАЛЕВА
О. О. КОМЯКОВА
Н. В. ПАШКОВА

Омский государственный
университет путей сообщения,
г. Омск

ЗАВИСИМОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрена математическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока с учетом стационарных и нестационарных волновых процессов, которая позволяет проанализировать влияние параметров системы на электромагнитные процессы в различных ее точках. Приведены временные диаграммы токов и напряжений на фидере тяговой подстанции при различных режимах работы электроподвижного состава и его удаленности от тяговой подстанции, полученные с помощью приведенной математической модели. При создании и модернизации объектов системы электроснабжения возможно применение предложенной математической модели для расчетов электрических параметров устройств тяговых подстанций и контактной сети, согласования работы систем тягового и внешнего электроснабжения, анализа показателей качества электрической энергии и электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: электрические железные дороги, переменный ток, электромагнитные процессы, цепь с распределенными параметрами, гармоники.

При модернизации и строительстве новых участков электроснабжения электрических железных дорог необходимо определять энергетические показатели работы системы тягового электроснабжения [1, 2].

Сложность рассмотрения электромагнитных процессов в цепях электрических железных дорог переменного тока [3, 4] заключается в том, что в их расчетной схеме замещения необходимо представлять линии электропередач (ЛЭП), тяговую сеть распределенными, а тяговые подстанции (ТП) и электроподвижной состав (ЭПС) сосредоточенными параметрами (рис. 1).

В этой системе свойства элементов с распределенными параметрами определяют характер электромагнитных процессов. Они приводят к появлению нежелательных стационарных волновых процессов. В результате ухудшается гар-

монический состав напряжения и тока, а также условия, в которых находится изоляция электрооборудования [5].

Преобразователи ЭПС являются источником нестационарных волновых процессов [6]. К нестационарным относятся волновые процессы, которые возникают при работе преобразователей электровозов. Они обусловлены скачкообразными изменениями напряжения и тока в цепях ЭПС. Параметры трансформатора обуславливают изменение тока на интервале коммутации. Активные и индуктивные сопротивления силовой цепи ЭПС резко увеличиваются при переходе из режима коммутации в обычный режим. При этом изменяется потребляемая электровозом мощность. Следствием этих процессов является появление волн тока и напряжения в тяговой сети, которые протекают в прямом

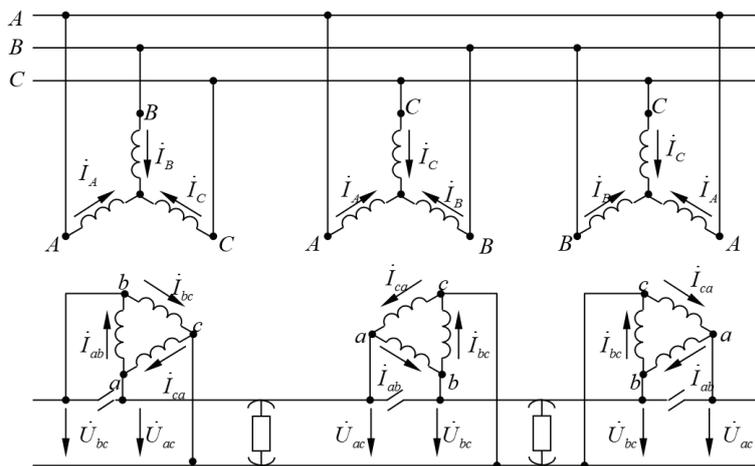


Рис. 1. Схема замещения участка электроснабжения

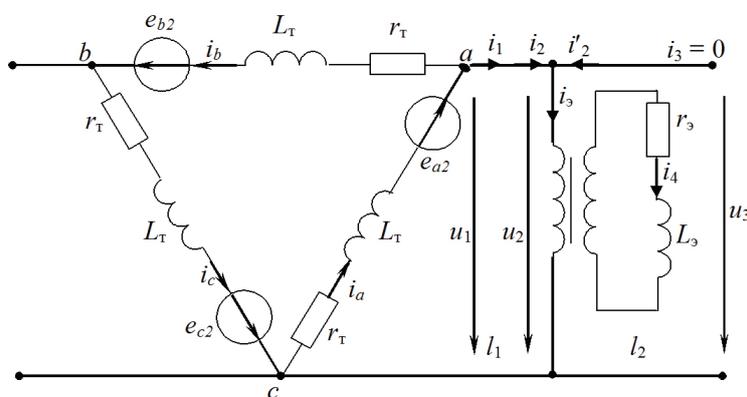


Рис. 2. Схема замещения участка электроснабжения при одностороннем питании

и обратном направлениях, отражаясь в точках присоединения тяговых трансформаторов и других устройств. После каждой коммутации волны напряжения и тока затухают в течение времени, которое зависит от параметров длинных линий (тяговая сеть и ЛЭП).

Коммутация силовых цепей электровоза в установившемся режиме имеет периодический характер и осуществляется с частотой питающего напряжения. При коммутациях возникают затухающие волны, которые на больших временных интервалах периодически повторяются. Они накладываются на волны основного процесса и еще больше искажают и ухудшают гармонический спектр кривых тока и напряжения.

Электровозы переменного тока генерируют в тяговую сеть нечетные гармоники тока, которые, наряду с волновыми процессами в ЛЭП и тяговой сети, определяют мешающее влияние на смежные устройства линий связи, сигнализации, централизации и блокировки.

Систему электроснабжения можно представить в виде соединения активных или пассивных четырехполюсников с распределенными и сосредоточенными параметрами. Результирующая математическая модель является совокупностью математических моделей входящих в ее состав четырехполюсников.

Приведенная на рис. 2 расчетная схема содержит вторичную обмотку тягового трансформатора ТП и участок тяговой сети между подстанциями при одностороннем питании. Электровоз представлен совокупностью элементов схемы замещения, подключенных к питающей контактной сети через обмотки трансформатора [7].

Анализ электромагнитных процессов может быть проведен с помощью системы уравнений в комплексной форме, представляющей собой математическую модель системы электроснабжения участка тяговой сети переменного тока при одностороннем питании:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = A_3 \dot{U}_3 + B_3 \dot{I}_3; \dot{I}'_2 = C_3 \dot{U}_3 + A_3 \dot{I}_3; \\ r_1 \dot{I}_3 + j\omega(L_{S1} + L_{10}) \dot{I}_3 + j\omega M_3 \dot{I}_4 = \dot{U}_2; \\ r'_2 \dot{I}_4 + j\omega(L'_{S2} + L_{10}) \dot{I}_4 + \dot{I}_4 (r_3 + j\omega L_3) = -j\omega M_3 \dot{I}_3; \\ \dot{I}_2 + \dot{I}'_2 - \dot{I}_3 = 0; \\ \dot{U}_1 = A_2 \dot{U}_2 + B_2 \dot{I}_2; \dot{I}_1 = C_2 \dot{U}_2 + A_2 \dot{I}_2; \\ \dot{E}_{a2} = \dot{U}_1 + \frac{2}{3} \dot{I}_1 Z'_T; \dot{U}_{A1} = k_T \dot{E}_{a2}; \\ \dot{U}_{A0} = \dot{U}_{A1} A_1 + \dot{I}_{A1} B_1; \dot{I}_{A0} = \dot{U}_{A1} C_1 + \dot{I}_{A1} A_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\dot{U}_{A1}, \dot{I}_{A1}$ — напряжение и ток первичной обмотки фазы А понижающего трансформатора;

$\dot{U}_{A0}, \dot{I}_{A0}$ — напряжение и ток в начале участка расчетной фазы ЛЭП; $A_1 = ch\gamma_{\perp} l$, $B_1 = \underline{Z}_{\text{вл}} sh\gamma_{\perp} l$, $C_1 = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{вл}}} sh\gamma_{\perp} l$ — параметры четырехполюсника, представляющего расчетную модель фазы ЛЭП; $\underline{Z}_{\text{вл}} = \sqrt{(r_{0l} + j\omega L_{0l})(g_{0l} + j\omega C_{0l})}$ — волновое сопротивление ЛЭП; $\gamma_{\perp} = \sqrt{(r_{0l} + j\omega L_{0l})(g_{0l} + j\omega C_{0l})}$ — коэффициент распространения ЛЭП; $r_{0l}, g_{0l}, L_{0l}, C_{0l}$ — первичными параметрами ЛЭП, отнесенные к единице длины линии; \dot{E}_{a2} — ЭДС вторичной обмотки тягового трансформатора; $k_{\tau} = \frac{w_1}{w_2}$ — коэффициент трансформации тягового трансформатора с числом витков w_1 и w_2 соответственно первичной и вторичной обмоток; \underline{Z}'_{τ} — приведенное комплексное сопротивление тягового трансформатора; \dot{U}_1, \dot{I}_1 — напряжение и ток в начале расчетного участка тяговой сети; \dot{U}_2, \dot{I}_2 — напряжение и ток в конце расчетного участка тяговой сети (точка, в которой находится ЭПС); $A_2 = ch\gamma_{\text{тс}} l_1$, $B_2 = \underline{Z}_{\text{втс}} sh\gamma_{\text{тс}} l_1$, $C_2 = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{втс}}} sh\gamma_{\text{тс}} l_1$ — параметры четырехполюсника, представляющего расчетный участок тяговой сети; $\underline{Z}_{\text{втс}} = \sqrt{(r_{0\text{тс}} + j\omega L_{0\text{тс}})(g_{0\text{тс}} + j\omega C_{0\text{тс}})}$ — волновое сопротивление тяговой сети; $\gamma_{\text{тс}} = \sqrt{(r_{0\text{тс}} + j\omega L_{0\text{тс}})(g_{0\text{тс}} + j\omega C_{0\text{тс}})}$ — коэффициент распространения тяговой сети; $r_{0\text{тс}}, g_{0\text{тс}}, L_{0\text{тс}}, C_{0\text{тс}}$ — первичными параметрами тяговой сети, отнесенные к единице длины линии; \dot{I}_3 — ток, протекающий в первичной обмотке трансформатора ЭПС; \dot{I}_4 — приведенный ток вторичной обмотки трансформатора ЭПС; $M_3 = k_{\text{тз}} L_{10}$ — коэффициент взаимной индукции обмоток трансформатора ЭПС; $k_{\text{тз}}$ — коэффициент трансформации трансформатора ЭПС; L_{10} — индуктивность контура намагничивания трансформатора ЭПС; r_1, L_{S1} — активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора ЭПС; r'_2, L_{S2} — активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора ЭПС, приведенные к числу витков первичной обмотки; r_3, L_3 — приведенные параметры цепей выпрямленного тока; \dot{I}'_2 — ток в начале участка тяговой сети, следующим за расчетным (за точкой подключения ЭПС); \dot{U}_3, \dot{I}_3 — напряжение и ток в конце участка тяговой сети, следующего за расчетным (за точкой подключения ЭПС); $A_3 = ch\gamma_{\text{тс}} l_2$, $B_3 = \underline{Z}_{\text{втс}} sh\gamma_{\text{тс}} l_2$, $C_3 = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{втс}}} sh\gamma_{\text{тс}} l_2$ — параметры четырехполюсника, представляющего участок тяговой сети, следующий за расчетным (за точкой подключения ЭПС).

Расчеты осуществляются при следующих условиях:

а) схемы замещения фаз вторичных обмоток тяговых трансформаторов ТП представляют собой последовательно включенные комплексное сопротивление обмотки $\underline{Z}_{\tau} = r_{\tau} + j\omega L_{\tau}$ и источник ЭДС;

б) первичные параметры тяговой сети не меняются по всей длине рассматриваемого участка (однородная линия);

в) ЭПС представляет собой нагрузку, имитируемую двухполюсником с комплексным сопротивлением $\underline{Z}_3 = r_3 + j\omega L_3$, учитывающим разветвленность схемы ЭПС. Это сопротивление может рассматриваться в качестве входного сопротивления системы.

Приведенная математическая модель (1), в которой тяговая сеть и ЛЭП представлены как линии с распределенными параметрами, позволяет выполнить расчет токов и напряжений в любой точке электрической цепи с учетом стационарных волновых процессов.

Основой определения параметров элементов системы тягового электроснабжения в силу сложности исследуемой задачи является эксперимент.

Нестационарные волновые процессы учтены в системе (1) несинусоидальными током и напряжением в точке подключения ЭПС к контактной сети, которые получены в ходе экспериментальных исследований и представлены в виде ряда Фурье с нечетными гармониками.

Любая цепь с распределенными параметрами, в том числе и тяговая сеть, характеризуется первичными параметрами $r_{0\text{тс}}, g_{0\text{тс}}, L_{0\text{тс}}, C_{0\text{тс}}$ на единицу длины [8]. Вторичные параметры (волновое сопротивление $\underline{Z}_{\text{втс}}$ и коэффициента распространения $\gamma_{\text{тс}}$) определяются по первичным параметрам.

Первичные параметры тяговой сети определяются экспериментально в режимах холостого хода и короткого замыкания, и для различных участков практически одинаковы. В дальнейших расчетах использованы опытные данные, полученные на одном из участков железной дороги переменного тока (табл. 1).

Поперечная проводимость $g_{0\text{тс}}$ является частотно-зависимым параметром. Однако для линий напряжением меньше 330 кВ ее значение принимается равным нулю [9].

Определение параметров трансформатора ТП проводится по приведенным ниже расчетным выражениям.

Для обмотки низкого напряжения трансформатора активное сопротивление определяется по выражению:

Таблица 1

Первичные и вторичные параметры однопутного участка тяговой сети переменного тока на основной частоте

$r_{0\text{тс}}, \text{ Ом}$	$L_{0\text{тс}} \cdot 10^{-3}, \text{ Гн/км}$	$C_{0\text{тс}} \cdot 10^{-9}, \text{ Ф/км}$	$\underline{Z}_{\text{втс}}, \text{ Ом}$	$\gamma_{\text{тс}}, \text{ км}^{-1}$
0,21	1,33	17	287,92 - j68,28	$3,65 \cdot 10^{-4} + j1,54 \cdot 10^{-3}$

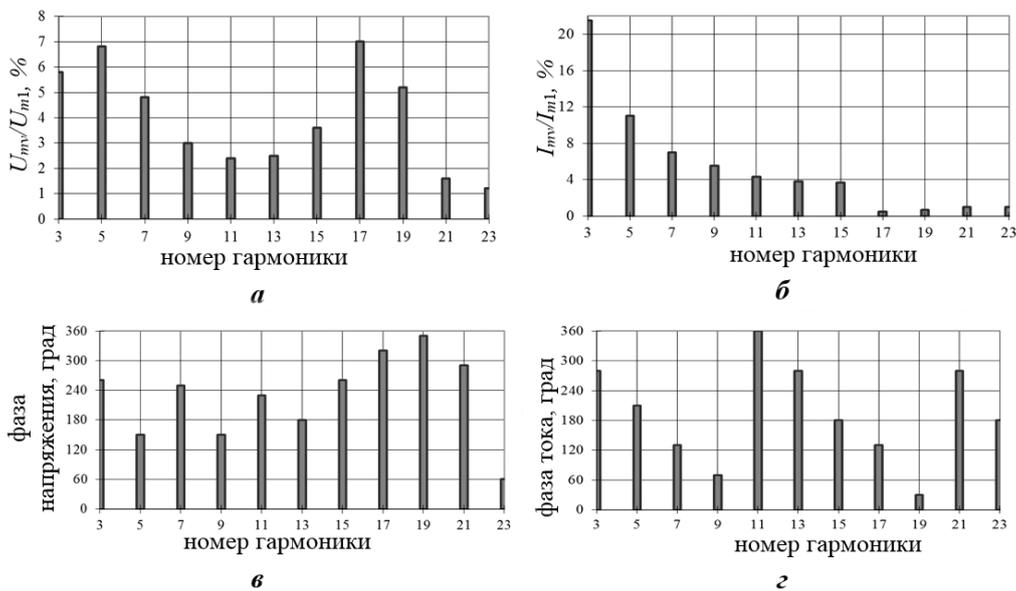


Рис. 3. Гармонические спектры в месте подключения ЭПС к контактной сети напряжения (а), тока (б), фазы напряжения (в), фазы тока (г)

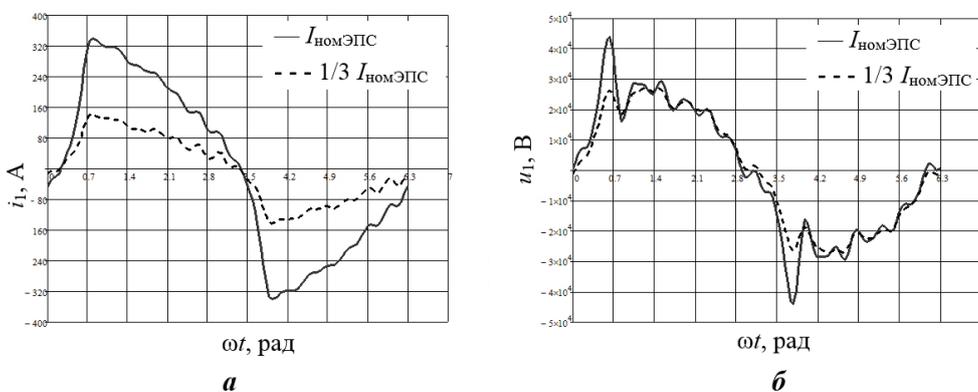


Рис. 4. Временные диаграммы токов (а) и напряжений (б) на фидере ТП при различных нагрузках ЭПС и его удаленности от ТП на 53 км

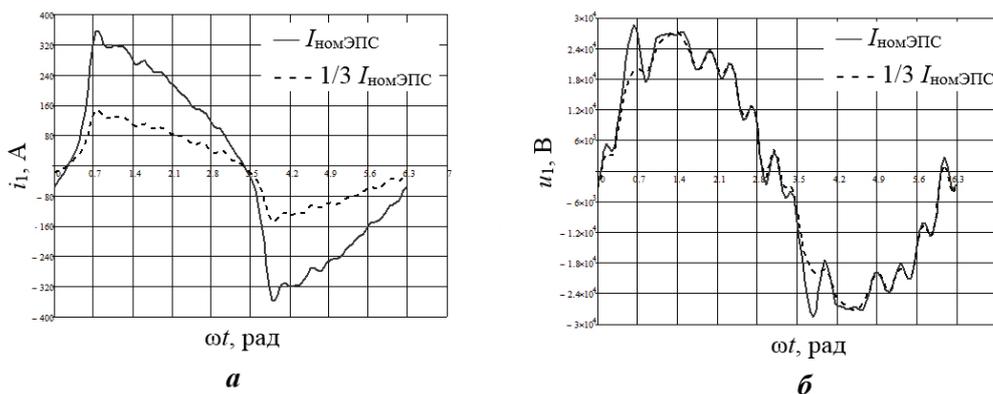


Рис. 5. Временные диаграммы токов (а) и напряжений (б) на фидере ТП при различных нагрузках ЭПС и его удаленности от ТП на 25 км

$$r_{\tau} = 3\Delta P \frac{U_{\text{т.ном}}^2 10^3}{k_{\text{т}}^2 S_{\text{т.ном}}^2}, \quad (2)$$

где $U_{\text{т.ном}}$ — номинальное напряжение на обмотке высокого напряжения трансформатора, кВ; $S_{\text{т.ном}}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; ΔP — потери мощности в обмотках трансформатора, кВт.

Значение индуктивного сопротивления первой гармоники обмоток трансформатора определяется по выражению:

$$x_{\tau} = 3 \frac{u_{\text{к}}}{100} \frac{U_{\text{т.ном}}^2 10^3}{k_{\text{т}}^2 S_{\text{т.ном}}}, \quad (3)$$

где $u_{\text{к}}$ — напряжение трансформатора в режиме к.з., в процентах.

В расчете использованы параметры тягового трансформатора ТДТНЭ-40000/110-70У1 [10]: $r_{\tau} = 0,284 \text{ Ом}$, $x_{\tau} = 5,955 \text{ Ом}$.

Для примера на рис. 3 представлены гармонические спектры токов и напряжений в точке подключения ЭПС, полученные в результате экспериментальных исследований и использованные в дальнейших расчетах.

В результате расчета получены временные диаграммы токов и напряжений на фидере тяговой подстанции при различных нагрузках ЭПС и удаленности ЭПС от ТП, которые приведены на (рис. 4, 5).

С помощью предложенного математического аппарата (1) для анализа электромагнитных процессов в тяговой сети переменного тока с учетом стационарных и нестационарных волновых процессов возможно рассчитать и построить зависимости тока и напряжения от времени при разных параметрах системы электроснабжения. Полученные в результате расчетов временные диаграммы отражают реальные электромагнитные процессы в тяговой сети.

При создании и модернизации объектов системы электроснабжения возможно применение предложенной математической модели для расчетов электрических параметров устройств тяговых подстанций и контактной сети, согласования работы систем тягового и внешнего электроснабжения, анализа показателей качества электрической энергии и электромагнитной совместимости.

Библиографический список

1. Копыленко В. А., Космин В. В. Изыскания и проектирование железных дорог. М.: УМЦ, 2017. 573 с. ISBN 978-5-89035-990-2.
2. Вильгельм А. С., Комяков А. А., Незевак В. Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока // Известия Транссиба. 2014. № 3 (19). С. 54–65.
3. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
4. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС России, 2002. 637 с. ISBN 5-89035-065-X.
5. Косарев А. В., Фролов А. В., Волинцев В. В. Волновые процессы в тяговых сетях с экранированным усиливающим проводом // Транспорт: наука, техника, управление. 2001. № 1. С. 30–32.

6. Зажирко В. Н., Черемисин В. В. Влияние волновых процессов на гармонический состав напряжений и токов в контактной сети переменного тока // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта: сб. ст. Омск: Изд-во ОмГАПС, 1999. С. 6–13.

7. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе контактная сеть – электровоз // Электричество. 2002. № 2. С. 29–35.

8. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. М.: Лань, 2010. 591 с. ISBN 978-5-8114-0800-9.

9. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 71–79.

10. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: ЭНАС, 2012. 376 с. ISBN 978-5-4248-0049-8.

КОВАЛЕВА Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 7545-0724

AuthorID (РИНЦ): 650721

Адрес для переписки: tatevgeniy@list.ru

КОМЯКОВА Ольга Олеговна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 1929-6266

AuthorID (РИНЦ): 517522

Адрес для переписки: komyakovaoo@mail.ru

ПАШКОВА Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 9137-5016

AuthorID (РИНЦ): 650714

Адрес для переписки: nvp78@mail.ru

Для цитирования

Ковалева Т. В., Комякова О. О., Пашкова Н. В. Зависимость волновых процессов в тяговой сети переменного тока от параметров системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 23–27. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-23-27.

Статья поступила в редакцию 23.03.2019 г.

© Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова