

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства,
энергетики и транспорта

Методические рекомендации к практическим занятиям
по дисциплине
«Надежность электроснабжения»
для всех форм обучения направления
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроснабжение)

Мурманск
2021

ВВЕДЕНИЕ

Повышенный интерес к теории надежности со стороны инженеров, экономистов, математиков, менеджеров и других специалистов привёл к расширению исследований и увеличению числа публикаций, которые посвящены общим и специальным её вопросам. Проблемы надежности являются многогранными, которые затрагивают конструктивные, технологические, физико-химические, экономические, экологические организационные и социальные аспекты. Вследствие этого появляется необходимость разработки фундаментального математического аппарата, который приспособлен к рассматриваемым вопросам.

Главная задача обеспечения надежности ЭЭС заключается в снабжении потребителей электроэнергией в нужном количестве и при надлежащем её качестве. Увеличение потребляемой электроэнергии тесно связано с качественными изменениями в характере потребителей, значительно повышает зависимость нормального функционирования отдельных потребителей и районов от надёжности электроснабжения. В итоге нарушение электроснабжения приводит к экономическому ущербу, соизмеримым в ряде случаев по масштабу с национальным бедствием. В некоторых энергосистемах число аварий в течение года достигает нескольких десятков, а годовой недоотпуск электроэнергии из-за аварий – нескольких миллиардов киловатт-часов. Суммарная мощность одновременно простаивающих в аварийном ремонте генераторов составляет десятки миллионов киловатт.

Вследствие последствий от ненадежности требуется постоянное совершенствование методов прогнозирования развития, проектирования, строительства, монтажа, эксплуатации и диагностики ЭЭС, позволяющих более полно учитывать надежность и наиболее экономно расходовать выделяемые на её обеспечение средства.

Существуют различные технические средства, повышающие надежность, т.е. ликвидирующие или предотвращающие развитие аварий. К таким относят: релейная защита от коротких замыканий, автоматическое повторное включение (АПВ), автоматический ввод резерва (АВР), автоматическое регулирование возбуждения (АРВ), автоматическая частотная разгрузка (АЧР), автоматическое регулирование частоты и мощности (АРЧМ), автоматическая синхронизация генераторов, система автоматического отключения нагрузки (САОН) и т.д.

1 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Перерывы электроснабжения потребителей вообще нежелательны, а в ряде случаев недопустимы. Они могут повлечь нарушения нормального функционирования установок связи и транспорта, технологических процессов промышленных предприятий, нормальных условий жизни и деятельности населения. Для предотвращения этого при проектировании и эксплуатации электрических сетей и систем принимают специальные меры для улучшения работы всех их элементов и повышения надежности электроснабжения потребителей.

1.1 Условия работы электрических сетей и повреждаемость оборудования

Климатические условия существенно влияют на работу ВЛ и оборудования подстанций, устанавливаемого на открытом воздухе в открытых распределительных устройствах (ОРУ).

К климатическим условиям, влияющим на работу ВЛ и оборудования подстанции, относятся грозовые явления, изменения температуры, действие ветра, гололедные образования, загрязнение воздуха, сопротивление грунта и т.п. Интенсивность изменения этих условий зависит от времени года, географического местоположения объекта и т.д. При грозовых явлениях в сетях возникают кратковременные перенапряжения, которые во многих случаях могут быть недопустимыми. Повышение температуры приводит к

удлинению проводов, увеличению их стрелы провеса и снижению расстояний между проводами и от проводов до земли, т. е. к понижению надежности и безопасности работы линии. При значительном понижении температуры длина проводов сокращается, и в них могут возникнуть недопустимые механические напряжения. Действие ветра создает дополнительную механическую нагрузку на провода, тросы и опоры, что в ряде случаев утяжеляет и удорожает конструкцию ВЛ.

При определенных атмосферных условиях на проводах и опорах ВЛ образуются обледенение или гололедные образования. Они создают значительные дополнительные механические нагрузки.

В электросетях возникают кратковременные повышения напряжения или перенапряжения—атмосферные при грозовых явлениях и коммутационные в процессах включений и отключений аппаратов.

Старение изоляции. В процессе эксплуатации в изоляции кабельных линий и электрических аппаратов возникают медленные процессы, изменяющие ее структуру. При этом происходит снижение электрической и механической прочности и разрушение изоляции, т. е. ее «старение». Старение изоляции непосредственно зависит от качества изолирующих материалов, совершенства изоляционной конструкции и технологии ее изготовления. В нормальных условиях изоляция может хорошо работать длительное время. В то же время процесс старения изоляции существенно ускоряется при ее увлажнении, а также при высоких температурах. Для предотвращения этого за температурным режимом изоляции, и ее увлажнением при эксплуатации должно вестись особое наблюдение.

Механические повреждения могут быть как на воздушных, так и на кабельных линиях. Провода и тросы, а также и опоры ВЛ могут быть перекрыты, а иногда и повреждены башенными кранами, деревьями ит. п. Механические повреждения кабельных линий в основном происходят при производстве земляных работ вне непосредственной близости от трассы линии.

1.2 Возможности повышения надежности электроснабжения потребителей при проектировании электрических сетей

Учет климатических условий. При проектировании ВЛ используются карты по грозовой деятельности, силе ветра, интенсивности гололедных образований, изменению температур, составленные по данным многолетних наблюдений. Принципиально ВЛ могут быть построены весьма надежными таким образом, чтобы они не разрушались даже при самых неблагоприятных климатических условиях. Однако такие линии будут весьма дорогими. Поэтому считается более экономичным сооружать ВЛ, надежно работающие при определенных расчетных климатических условиях. В зависимости от номинального напряжения ВЛ и ее значимости выбираются расчетные условия, повторяющиеся не реже чем в 5—15 лет. При более тяжелых, но редких климатических условиях (интенсивные гололеды, ураганные ветры ит. п.) ВЛ могут повреждаться. В то же время при выбранных расчетных условиях ВЛ должны работать надежно. Для этого производятся расчеты на механическую прочность проводов и опор ВЛ.

В зависимости от принятых расчетных условий и топографических данных (рельеф местности, наличие водных пространств, лесов, болот и т. п.) производится выбор трассы ВЛ, расположения проводов на опорах и расстояний между ними, высоты опоры, длины пролета.

Для защиты от вибрации на проводах подвешивают специальные грузы виброгасители. В целях защиты от излишних механических нагрузок и условий, способствующих возникновению «пляски» проводов, предусматриваются возможности для временного повышения тока в линии с целью плавки гололеда. В районах с сильно загрязненным воздухом применяются изоляторы с большей изолирующей поверхностью.

Специальное внимание уделяется вопросам защиты ВЛ и оборудования подстанций от перенапряжений. На ВЛ 110 кВ и выше с металлическими и

железобетонными опорами эффективным способом защиты от атмосферных перенапряжений является подвеска хорошо заземленных грозозащитных тросов. Воздушные линии на деревянных опорах обладают удовлетворительными грозозащитными характеристиками. Подвеска тросов на них существенно утяжеляет конструкцию опор и удорожает их на 20-30%. Поэтому на ВЛ с деревянными опорами тросы подвешиваются лишь на участках, примыкающих к подстанциям («подходах»).

1.3 Мероприятия по повышению надежности работы электрических сетей при их эксплуатации

Контроль за состоянием оборудования. Надежность работы сетей в значительной степени зависит от культуры их эксплуатации.

В крупных энергосистемах создаются предприятия по эксплуатации сетей. Эксплуатационный персонал должен проводить систематический контроль за нормальным рабочим состоянием линий и оборудования подстанций. Очень важным является проведение контроля или профилактических испытаний изоляции. При этом выявляются дефекты в изоляционных конструкциях, которые в последующем заменяются или восстанавливаются на месте. Известно, что развитие дефектов изоляции в основном вызывается проникновением в нее влаги. Это обычно является результатом механических повреждений изоляционных конструкций и изменений температурных условий.

Ремонтные работы. Каждый элемент — линия, трансформатор, выключатель, устройство защиты или автоматики и т.п. — должен периодически ремонтироваться. Различают планово-предупредительные и капитальные ремонты. Составляются специальные планы и графики проведения ремонтов. Планово-предупредительные ремонты производятся более часто. При их выполнении производится подробный осмотр и чистка оборудования, смена изоляционного масла в баках трансформаторов и выключателей, регулировка контактов оборудования и т.п. Капитальные

ремонт производится относительно редко. При их производстве заменяются дефектные или износившиеся части аппаратов и опор ВЛ. Аварийные ремонты выполняются по мере надобности в случае возникновения повреждений, нарушающих нормальную работу сети: обрывы проводов, поломки опор, пробой изоляции аппаратов и т.п.

Диспетчерские службы и ликвидация аварий. Помимо эксплуатационного персонала, выполняющего надзор за сетевыми сооружениями и их ремонт, в энергосистемах имеется оперативный персонал диспетчерских служб, работающий круглосуточно. Основными его задачами является оперативное ведение режима работы системы в целом и отдельных ее участков и ликвидация аварийных ситуаций, возникающих при повреждениях линий и оборудования электростанции и подстанции.

В диспетчерских службах составляются графики нагрузки электростанций на каждые последующие сутки. При изменении нагрузки системы в течение текущих суток диспетчер даст указания персоналу электростанций о соответствующем изменении нагрузки.

Для облегчения условий их работы и повышения надежности работы элементов системы широко используются устройства защиты и автоматики, применяется специальная контрольно-измерительная аппаратура для сигнализации о состоянии оборудования, для отыскания мест повреждений в воздушных и кабельных линиях и т.п. Ко всем этим устройствам предъявляются серьезные требования. Они должны работать четко и надежно при различных значениях параметров рабочих режимов сети, быть просты и удобны в эксплуатации. Для обеспечения надежного и экономичного снабжения потребителей электроэнергией требуемого качества необходима четкая координация работы всего эксплуатационного персонала энергосистемы.

1.4 Народнохозяйственный ущерб от перерывов электроснабжения. Категории потребителей.

Количественная оценка народнохозяйственного ущерба, получаемого при перерыве электроснабжения, практически может быть произведена только для промышленных предприятий, хотя некоторый ущерб терпят и электроснабжающие организации. В общем виде народнохозяйственный ущерб промышленного предприятия от перерыва электроснабжения можно разделить на прямой и дополнительный. К прямому ущербу Y_n относится непосредственный ущерб от нарушения технологического процесса, брака продукции, порчи сырья и материалов, аварий и т. п. Его показатели могут быть разделены на три составляющие:

$$Y_n = Y_{no} + Y_n(t_3) + Y_n(t_{mex}),$$

где Y_{no} не зависит от продолжительности перерыва электроснабжения, определяется потерями от брака продукции, порчи сырья, материалов и технического оборудования ит. п.;

$Y_n(t_3)$ зависит от времени перерыва электроснабжения (оплата простоя персонала, непроизводительные расходы тепла, электроэнергии, материалов, газа, воды);

$Y_n(t_{mex})$, характеризует затраты, необходимые для доведения технологического процесса до номинального режима после восстановления электроснабжения, к ним относятся затраты на восстановление и наладку технологического процесса, дополнительные расходы материалов, сырья, топлива, электроэнергии и труда на единицу выпускаемой в этот период продукции ит.д.

К дополнительному ущербу U , относится ущерб от невыпуска продукции, вызванного простоем производства или нарушением технологического процесса. Величина U зависит от возможности и способа

компенсации предприятием невыработанной продукции. Например, на непрерывно работающих химических предприятиях восполнения невыполненной продукции не происходит. На предприятиях с односменными и двухсменными режимами работ невыпуск продукции может быть восполнен в дальнейшем за счет сверхурочных работ.

Категории потребителей.

При проектировании сетей оценка потребителей в отношении обеспечения надежности электроснабжения производится в соответствии с некоторыми условными категориями, устанавливаемыми в ПУЭ. В настоящее время к 1-й категории относятся потребители, нарушение электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, повреждение оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов городского хозяйства. Потребители этой категории должны обеспечиваться электроэнергией не менее чем от двух независимых источников питания. Перерыв их электроснабжения может быть допущен только на время автоматического ввода резервного питания. Независимым источником называют такой источник питания данного объекта, на котором сохраняется напряжение при исчезновении его на других источниках.

Для особо важных групп ЭП, внезапные перерывы электроснабжения которых угрожают жизни людей или могут привести к взрывам и разрушениям основного технологического оборудования, кроме двух независимых источников питания предусматривают третий независимый источник. Он должен находиться в постоянной готовности и автоматически включаться при исчезновении напряжения на обоих основных источниках питания.

Ко 2-й категории относятся потребители, перерыв в электроснабжении которых связан с массовым недоотпуском продукции, простоем рабочих.

Для этих потребителей допускаются перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной бригадой.

К 3-й категории относятся все остальные потребители. Для них допускаются перерывы электроснабжения на время, необходимое для ремонта или замены поврежденного элемента сети, но не более одних суток.

1.5 Основные показатели надежности работы электрических сетей

Под надежностью в электроэнергетике понимают свойство оборудования, установки, схемы или системы сохранять свою работоспособность, т. е. выполнять свои функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных условиях. Количественно надежность определяется статистической вероятностью выполнения этих функций или случайными величинами частоты вынужденных отказов и длительностью нормальной и аварийной работы. Поэтому при оценке надежности используют методы теории вероятности математической статистики и теории надежности.

В соответствии с ГОСТ 13377-75 все единичные показатели надежности разбиты на группы, определяющие безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость объектов. Кроме того, существуют 11 комплексных показателей.

Основными показателями для оценки надежности элементов и систем электроснабжения являются:

- 1) параметр потока отказов ω , отказ/год — среднее количество отказов ремонтируемого изделия в единицу времени, которую обычно принимают равной одному году;
- 2) время восстановления после отказа T , ч/отказ — среднее время вынужденного простоя, необходимого для отыскания и устранения одного отказа;
- 3) коэффициент вынужденного простоя $K_v = \omega * T$, ч/год — определяет вероятность нахождения элемента в вынужденном простое;
- 4) частота плановых ремонтов μ , ремонт/год;

5) средняя продолжительность одного планового ремонта T_p , ч/ремонт;

6) коэффициент планового простоя $K_p = \mu * T_p$, ч/год;

7) коэффициент технического использования $K_t = 1 - K_v - K_p$, характеризует вероятность нахождения установки в работоспособном состоянии (в работе или в резерве).

Показатели надежности элементов определяются на основе обработки статистических данных о работе и ремонтах оборудования.

Значения показателей надежности определяются в зависимости от схемы соединений заданной сети. Предварительно составляется схема замещения этой сети. Последовательно соединяются элементы (выключатели, линии, трансформаторы и др.), отказ любого из которых вызывает простой всех остальных элементов данной ветви. Параллельно соединяются участки сети или ее отдельные элементы, отключение одного из которых не приводит к простоя остальных. В расчетах учитываются и аварийные и плановые отключения элементов.

1.6 Количественная оценка надежности электроснабжения потребителей при проектировании электрических сетей

При проектировании сетей выбирается уровень надежности электроснабжения потребителей и производится технико-экономическое сравнение различных вариантов схем сети. При сравнении вариантов определяется ожидаемое значение ущерба при возможных перерывах электроснабжения. Народнохозяйственный ущерб в этом случае носит вероятностный характер. Задача сводится к определению математического ожидания (среднего значения) ущерба U за определенный период эксплуатации, обычно за 1 год. При этом определяются вероятностные характеристики, от которых зависит надежность схемы или показатели ее надежности.

Рассмотрим, каким образом, возможно, приближенно оценить народнохозяйственный ущерб при аварийном отключении одноцепной линии протяженностью 1 км.

Вероятность аварийного простоя данной линии равна:

$$p_{ав} = \frac{K_{\epsilon}}{T} = \frac{\omega * T_{\epsilon}}{T}, \text{ где}$$

T – длительность периода наблюдения (8760 часов).

Обозначим через $W_{год}$ — количество электроэнергии, получаемой в течение года потребителями, присоединенными к данной линии. Количество электроэнергии, недоотпущенной потребителям за время отключения линии, будет равно:

$$W_{нд} = p_{ав} * W_{год}$$

Отсюда может быть приближенно определен народнохозяйственный ущерб, получаемый при аварийном отключении линии:

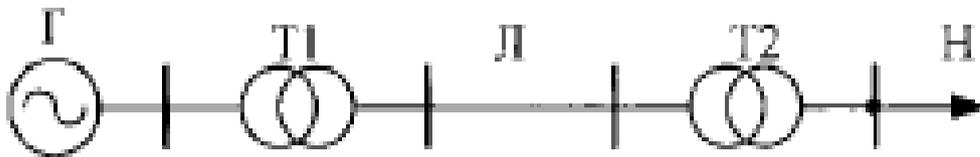
$$Y = y_0 * W_{нд}$$

Аналогично может быть оценен народнохозяйственный ущерб и при планово-предупредительных ремонтах, производимых при отключении линии.

1. Контрольная работа по теме «Математические модели и количественные описания»

Задача 1. Система передачи электроэнергии потребителю состоит из следующих элементов: генератора Γ , повышающего трансформатора $T1$, линии электропередачи L , понижающего трансформатора $T2$. Вероятности повреждения передачи:

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_{Γ}	0,002	0,003	0,011	0,006	0,008	0,014	0,007	0,001	0,001	0,005
Q_{T1}	0,00002	0,000007	0,00004	0,0002	0,00001	0,0012	0,00002	0,0007	0,0005	0,0005
Q_L	0,002	0,004	0,006	0,006	0,006	0,002	0,003	0,006	0,001	0,012
Q_{T2}	0,00004	0,000002	0,00003	0,0005	0,00003	0,0009	0,00009	0,00014	0,00006	0,0001
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Q_{Γ}	0,004	0,001	0,008	0,002	0,013	0,002	0,004	0,002	0,002	0,008
Q_{T1}	0,0006	0,00007	0,00006	0,0001	0,0002	0,0004	0,00014	0,0005	0,00011	0,0005
Q_L	0,009	0,003	0,002	0,006	0,006	0,002	0,005	0,009	0,006	0,005
Q_{T2}	0,00011	0,0006	0,000023	0,00014	0,0009	0,0007	0,0007	0,0006	0,0001	0,0001



Необходимо определить вероятность того, что потребитель не получит электроэнергию из-за повреждения системы, считая события повреждения элементов независимыми друг от друга.

Задача 2. Потребитель получает электроэнергию по двум параллельным цепям линии электропередачи. Вероятность повреждения каждой цепи Q . Каждая цепь может пропустить 100 % мощности. События повреждения цепей независимые.

Требуется определить вероятность повреждения обеих цепей и вероятность сохранения электроснабжения потребителя.

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q	0,004	0,024	0,003	0,041	0,058	0,063	0,072	0,087	0,093	0,011
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Q	0,045	0,071	0,089	0,022	0,034	0,024	0,044	0,027	0,065	0,015

2. Контрольная работа по теме Математические модели и количественные расчёты надёжности систем.

Задача 1. В результате испытания N однотипных конденсаторов за t час отказало $m = X$ штук. Определить вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов и время наработки до отказа T .

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N , шт	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	500
T , ч	2000	1900	2100	2200	1850	2250	2300	1750	1950	1500
X , шт	80	110	123	170	138	260	250	276	320	47
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
N , шт	500	5000	4500	4000	3500	3000	2500	2000	1500	1000
T	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500
X , шт	35	360	335	200	270	250	220	168	132	100

Задача 2. В аварийно-восстановительном ремонте находятся N однотипных трансформаторов. Статистика восстановительных ремонтов такова:

t	20	35	40	60
$n(t)$	X_1	X_2	X_3	X_4

Определить статистические значения интенсивности восстановления и среднюю продолжительность восстановления на каждом интервале.

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N	20	25	30	35	20	25	30	35	20	25
X_1	2	4	7	4	4	5	5	2	1	2
X_2	3	2	2	2	2	3	1	6	5	4
X_3	5	6	1	5	1	2	2	5	1	4
X_4	6	3	5	7	7	6	7	5	4	4
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
N	30	35	20	25	30	35	20	25	30	35
X_1	3	6	1	6	1	6	7	6	3	2
X_2	5	2	5	4	2	4	2	2	2	5
X_3	7	5	1	2	6	4	4	5	6	2
X_4	5	2	6	1	4	1	3	5	2	5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013. – 278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КноРус, 2015. – 724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2015. – 384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.: Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.: РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.: Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КноРус, 2015. – 240 с. ил.
14. Важев В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.: Юрайт, 2015. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.: Юрайт, 2015. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. – М.: Юрайт, 2015. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.: Юрайт, 2015. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.: Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.: Маршрут, 2012. – 492 с. ил.