

*П. А. Будко*

Д.т.н., профессор, профессор Военной академии связи

*А. И. Литвинов*

К.т.н., зам. начальника отдела организации научной работы  
и подготовки научно-педагогических кадров, Военная академия связи

*В. К. Гойденко*

Адъюнкт Военной академии связи

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**АННОТАЦИЯ.** В статье обозначена актуальность совершенствования системы технического обеспечения техники связи и автоматизированных систем управления и как следствие ее подсистем контроля и прогнозирования технического состояния электрооборудования систем электроснабжения специального назначения. Проведена оценка и представлена классификация существующих методов прогнозирования, на основании которой выбран подходящий класс методов прогнозирования. Рассмотрена основная задача прогнозирования. Сформирована общая структура системы контроля и прогнозирования электрооборудования систем электроснабжения систем специального назначения. Предложено решение задачи прогнозирования технического состояния, основанное на регистрации изменений параметров динамических процессов в цепях питания электрооборудования систем электроснабжения специального назначения и вероятностно-аналитических моделях развития деграционных процессов. С целью последующего формирования методик бесконтактного контроля и прогнозирования по изменению параметров динамических процессов в цепях питания электрооборудования систем электроснабжения специального назначения, обосновано введение виртуального генератора «информационных признаков» в схемы контроля технического состояния. Обосновано, что для аналитического прогнозирования времени сохранения работоспособности электрооборудования систем электроснабжения специального назначения необходимо использовать статистические модели развития деграционных процессов. Обозначено, что в прямом подходе к решению этой задачи необходимо рассмотреть физический механизм образования деграционных процессов в конкретном случае и его проявление в измеряемых параметрах динамических процессов в цепях питания, а далее производить сравнение реально имеющих место изменений с предсказываемой аналитической моделью и делать соответствующие выводы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** техника связи и АСУ; электрооборудование систем электроснабжения специального назначения; прогнозирование технического состояния; бесконтактный контроль; динамические процессы в цепях питания; информационный признак; определяющий параметр.

### **Введение**

В современных условиях требования к подержанию готовности войск на уровне, обеспечивающем обороноспособность страны, а так-

же проводимая в настоящее время реформа сил специального назначения (СН), направленная на формирование их нового облика, обуславливают повышение уровня требований к управлению силами СН, боевыми средствами и оружием [1, 2].

Повышенные требования к системе управления в свою очередь предъявляют более жесткие требования к системе связи, в том числе к её надежности. Одним из основных элементов системы связи являются узлы связи (УС) различного назначения. Способность узлов связи выполнять свои функции зависит не только от наличия современных средств связи, но и от безотказного функционирования их средств электроснабжения.

Ужесточение требований предъявляемых к системам электроснабжения (СЭС) выдвигает на передний план вопросы повышения их эксплуатационно-технических характеристик. Вместе с тем, в современных условиях появился ряд негативных факторов, снижающих эффективность применения СЭС СН. Наиболее существенным из них является фактор износа и старения электрооборудования (ЭО) входящего в состав этих СЭС. В настоящее время, более 50 % существующих СЭС выработали свой эксплуатационный ресурс. В этой связи отказы в устройствах электроснабжения становятся более вероятными и труднопрогнозируемыми. Принятая программа развития систем вооружения сил СН до 2020 года в соответствии с которой ежегодные поставки нового вооружения будут составлять не менее 9 % от общего числа ВВСТ, работы проводимые по сервисному обслуживанию, а также планируемые МО РФ процедуры по переводу военно-промышленного комплекса на работу по контрактам жизненного цикла не позволят решить данную проблему в полном объеме, так как доля выработавших эксплуатационный ресурс СЭС на протяжении этого периода будет оставаться высокой [1].

Анализ отказов на гарантийной технике связи и АСУ за 2014 г. и 2015 г. показал, что некоторые новые образцы техники связи и АСУ имеют низкие надежность показатели. Предприятиями изготовителями ведется доработка этих средств связи и их составных частей с целью повышения их безотказности [2].

В связи с вышеизложенным, а также с учетом того обстоятельства что боевая готовность и боеспособности органов управления и сил СН, обеспечение их техникой и имуществом связи является главной задачей технического обеспечения связи и АСУ, вопросы совершенствования системы технического обеспечения техники связи и АСУ и как следствие ее подсистем контроля и прогнозирования технического состояния приобретают актуальность [1, 2].

Одним из перспективных направлений совершенствования систем контроля технического состояния (ТС) является развитие физико-технических методов и устройств неразрушающего контроля (НК) [3–10]. При использовании этих методов в элементах и устройствах не происходит каких-либо изменений, влияющих на качество, параметры и характеристики оборудования. Методы бесконтактного НК позволяют по косвенным признакам обнаружить скрытые дефекты, либо выявить предпосылки к возникновению отказов. Указанные методы наиболее эффективны для получения диагностической информации о ТС ЭО в реальном масштабе времени, что особенно важно при эксплуатации техники связи и АСУ специального назначения. [11].

*Целью статьи* является рассмотрение возможности решения задач прогнозирования технического состояния на основе существующих методов бесконтактного контроля параметров динамических процессов в цепях питания электрооборудования систем электроснабжения техники связи и АСУ специального назначения (далее ЭО СЭС СН).

### **Классификация методов прогнозирования**

При классификации методов прогнозирования технического состояния сложных систем в литературе выделяются три больших класса [12–14]: экстраполяции, моделирования и опроса экспертов. Наиболее известные методы в зависимости от классификационных признаков приведены в таблице.

Проведенная классификация позволяет определить, что:

- в зависимости от применяемого математического аппарата классификация методов прогнозирования чрезвычайно обширна;
- в настоящее время разработаны десятки различных математических методов прогнозирования, многие из которых могут быть использованы для решения задач прогнозирования технического состояния ЭО СЭС СН;
- выбор математического аппарата для решения конкретной задачи прогнозирования определяется главным образом постановкой задачи и видом математической модели прогнозируемого процесса;

Т а б л и ц а

Признак классификации	Метод прогнозирования
Информационное обоснование метода	Фактографический, экспертный, комбинированный
Принцип обработки информации	Статистический, метод аналогий, опережающий
Полнота результатов прогноза	Прогноз: предупреждающий, разрешающий, командный
Форма представления количественных результатов	Прогноз: аналитический, вероятностный, прямой, обратный, альтернативный
Значение интервала упреждения	Прогноз: оперативный, краткосрочный, среднесрочный, долгосрочный
Вид информации о прогнозируемых процессах	Прогноз: индивидуальный, групповой, одномерный, многомерный
Применяемый аппарат	Экстраполяция и интерполяция, регрессия и корреляция, факторные модели, опрос и анализ, генерация идей, игровые модели
Критерий качества прогнозирования	Обобщенный показатель качества, векторный показатель качества, частный показатель качества

— из всей совокупности методов прогнозирования самыми распространенными и работоспособными являются экстраполяционные методы прогнозирования.

Использование экстраполяции в прогнозировании имеет в своей основе предположение о том, что рассматриваемый процесс  $Y(t)$  представляет собой сочетание регулярной и случайной составляющей вида:  $Y(t) = \eta(t, \alpha_i) + \varepsilon(t)$ .

Предполагается, что регулярная составляющая  $\eta(t, \alpha_i)$  представляет собой гладкую функцию времени, описываемую конечномерным вектором параметров  $\alpha_i$ , которые сохраняют свои значения на периоде упреждения прогноза. Эта составляющая имеет ряд синонимов: тренд, уровень, тенденция, детерминированная основа процесса. Случайная составляющая  $\varepsilon(t)$  обычно считается некоррелированным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием. Оценки  $\varepsilon(t)$  необходимы для определения точностных характеристик прогноза.

Методы экстраполяции во многом пересекаются с методами прогнозирования по регрессионным моделям. Специфическими чертами экстраполяционных методов прогнозирования являются:

1) предварительная обработка числового ряда в целях преобразования его к виду, удобному для прогнозирования;

2) анализ логики и физики прогнозируемого процесса, оказывающий существенное влияние, как на выбор вида экстраполирующей функции, так и на определение границ изменения ее параметров.

### Прогнозирование аварийных ситуаций

К основной задаче технического прогнозирования относится определение времени, в течение которого в контролируемом объекте гарантируется отсутствие аварийной ситуации с заданной вероятностью. Другой задачей, логически следующей из основной, следует считать определение времени возникновения аварийной ситуации на основании бесконтактной регистрации динамических процессов в цепях питания (ДПЦП) контролируемого объекта.

Любая аварийная ситуация представляет собой завершающую фазу развития деградиционных процессов. Схематично этот процесс представлен на рис 1.

В первом приближении развитие деградиционных процессов можно представить состоящим из трех фаз, продолжительностью  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  соответственно. Две последние фазы протекают, открыто и не представляет труда их зафиксировать.

Наиболее эффективным способом предотвращения аварийной ситуации является ее обнаружение на первой стадии и прогнозирование развития в плане предсказания продолжительности времен  $t_1$  и  $t_2$ . На основании этого прогнозирования оператор принимает решение либо об остановке объекта и проведения соответствующих ремонтных и восстановительных работ, либо о продолжении работы с соответствующим риском.

Обнаружение деградиционных процессов на фазе их скрытого развития и прогнозирование времени  $\tau_1$ , на протяжении которого можно,

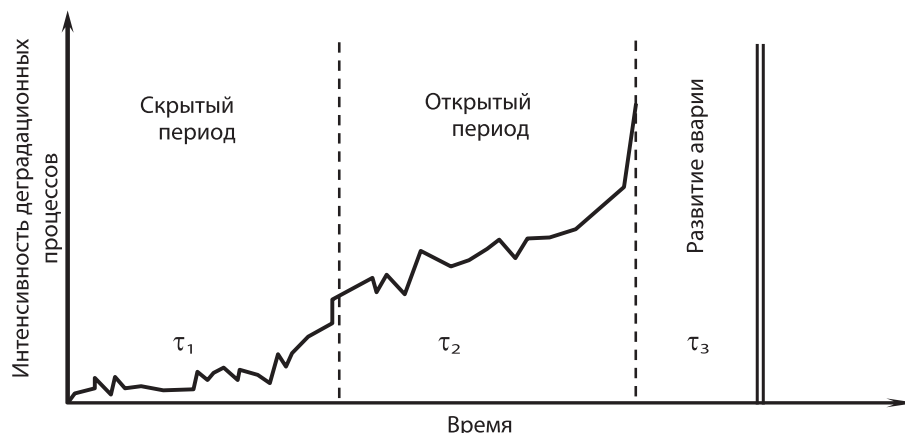


Рис. 1. Диаграмма развития аварийной ситуации

безусловно, продолжать работу, оказывается возможным благодаря существованию «информативных признаков».

Под «информативными признаками» понимают физические эффекты, создающие сигналы о возникновении в объекте дефектов или внеплановых деграционных процессов, которые с высокой степенью вероятности приводят к отказам через определенное время либо при определенных условиях. «Информативный признак» может быть скрыт от непосредственного наблюдения и выявления сигналами, связанными с нормальной работой объекта, или же представлять собой специфическое изменение этих сигналов [12, 13].

В рамках предлагаемого решения задачи прогнозирования технического состояния под «информативными признаками» аварийных ситуаций понимаются изменения параметров ДПЦП ЭО СЭС СН от нормы, вызванные развитием деграционных процессов и приводящие к возникновению аварийных ситуаций. Физический механизм возникновения «информационных признаков» может быть очень сложным и не всегда допускает возможность теоретического описания.

При обнаружении в параметрах ДПЦП изменений («информационных признаков»), последующий контроль сводится к наблюдению развития только «информационных признаков» и появлению существенных изменений в параметрах ДПЦП. Если параметры «информационных признаков» в течение длительного времени не изменяются, то можно говорить о консервации разрушительных процессов и делать «благоприят-

ный прогноз» об исправном функционировании устройства в течение определенного временного промежутка. Если в процессе последовательного контроля наблюдается изменение параметров «информационных признаков», то прогноз исправного функционирования объекта приобретает «неблагоприятное развитие». При достаточно интенсивном изменении параметров «предвестников», особенно если это сопровождается появлением заметных изменений в параметрах ДПЦП ЭО СЭС СН, прогноз становится «существенно неблагоприятным».

Набор физических величин, принимаемых за параметры «информационных признаков» и особенности их изменений являются индивидуальными для каждого типа объекта. Поэтому в общем случае их можно свести к набору условно безразмерных величин и провести анализ общих принципов реализации прогнозирования технического состояния по изменению параметров ДПЦП ЭО СЭС СН.

### Формирование общей структуры системы контроля и прогнозирования

Для последующего формирования методик бесконтактного контроля и прогнозирования технического состояния по изменению параметров ДПЦП ЭО СЭС СН предлагается в структурную схему контроля [8] ввести виртуальный генератор «информационных признаков» (ВГИП) рис 2.

Введение ВГИП позволяет считать, что объект контроля не имеет каких-либо изменений в параметрах ДПЦП ЭО СЭС СН. Накопление

дефектов вследствие внутренних деградиционных процессов в объекте контроля, с помощью набора соответствующих физических механизмов, запускает и управляет работой эквивалентного ВГИП, который с некоторого момента времени начинает вырабатывать сигнал тока определенной формы, складывающийся с потребляемым током, что воспринимается как появление малых изменений в параметрах динамических процессов цепях питания ЭО СЭС СН [11].

ВГИП является условным эквивалентным блоком, не входящим в реальную конструкцию объекта. Фактически он представляет собой материализацию синергетического эффекта

от действия неопределенного числа факторов и процессов, сопровождающих работу объекта контроля в штатном режиме.

На рис. 2: 1 — объект контроля (ЭО СЭС СН); 2 — источник энергии; 3 — генератор «информационного признака»; 4 — управляющие воздействия физическими эффектами; 5 — устройство бесконтактной регистрации параметров динамических процессов в цепи питания ЭО СЭС СН; 6 — блок обработки и отображения информации).

Управляющие воздействия 4 на ВГИП представлены в форме потоков информации, являющейся внутренней для контролируемого ЭО СЭС СН. Для решения задач прогнозирования технического

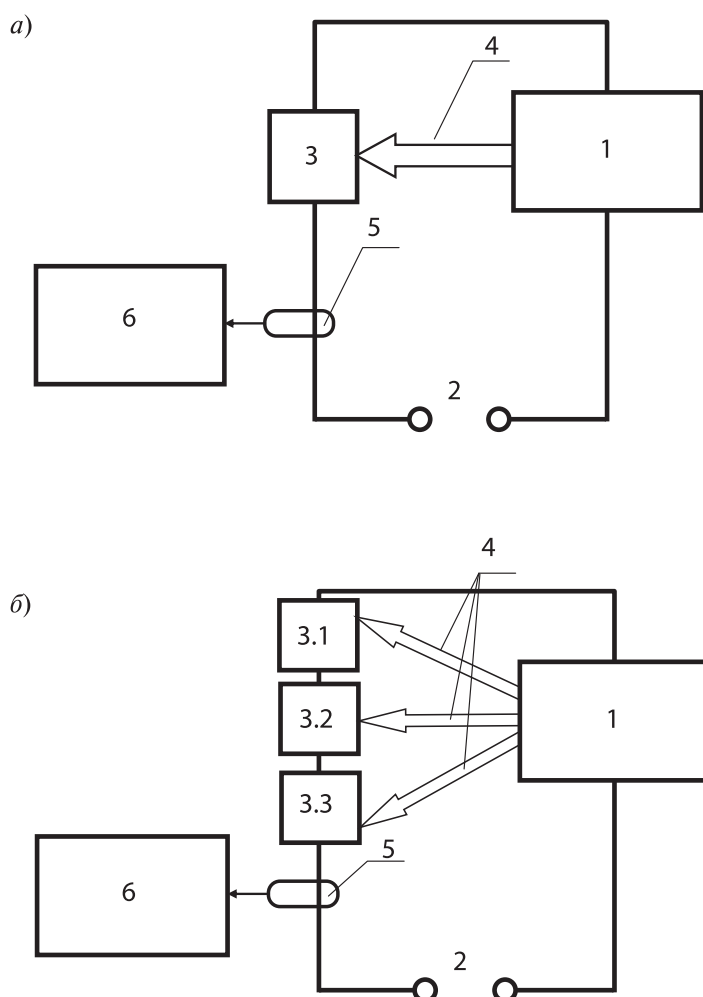


Рис. 2. Структурные блок-схемы введения эквивалентного генератора «информационных признаков»: *а* — генерация «информационного признака» одного типа; *б* — генерация набора «информационных признаков»

состояния достаточно получить информацию о развитии во времени результата действия этих процессов. Данную функцию выполняет ВГИП.

Исследования показывают, что технически целесообразнее для каждого вида «информационного признака» вводить отдельный ВГИП (рис. 2, б). Поэтому, в дальнейшем, при анализе работы системы прогнозирования технического состояния с использованием одного ВГИП будем по умолчанию рассматривать только один «информационный признак». Каждый «информационный признак» может иметь достаточно большое число параметров, по которым можно проследить динамику накопления деградиационных процессов. Разделение «информационных признаков» и автоматизация индивидуального прогнозирования осуществляется в блоке обработки и отображения информации (блок б на рис. 2)

Рассмотрим, один из вариантов представления структуры виртуального генератора «информационных признаков» для случайного дефекта.

Пусть сигнал основного тока контролируемого объекта в состоянии «норма» имеет вид:

$$i = f_1(t, a, b, c, \dots), \quad (1)$$

где  $a, b, c$  и далее — безразмерные параметры состояния объекта контроля.

Предполагается, что зарождение деградиационных процессов приводит к появлению дополнительного тока «информационного признака», который в соответствии со схемой (рис. 2) складывается с основным сигналом и результирующий сигнал тока принимает вид:

$$i = f_1(t, a, b, c, \dots) + \delta f(t, a, b, c, \dots, \alpha, \beta, \dots, t_1, t_2, t_3, \dots) \times [1(t-t_1) - 1(t-t_2)], \quad (2)$$

где  $\delta f(t, a, b, c, \dots, \alpha, \beta, \dots, t_1, t_2, t_3, \dots)$  — «информационный признак»;  $t_1, t_2, t_3$  — временные па-

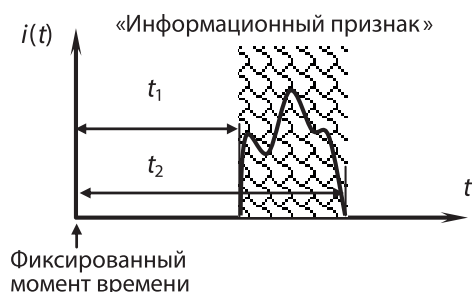


Рис. 3. Временная локализация «информационного признака»

раметры «информационного признака»;  $\alpha, \beta$  — безразмерные амплитудные параметры сигнала генератора «информационных признаков»;  $1(t-t_1)$  и  $1(t-t_2)$  — единичные функции.

В зависимости от конкретного типа объекта, протекающих в нем физических процессов, характера формирования «информационных признаков» и т. п. можно ожидать, что «информационные признаки» должны наблюдаться на определенном временном интервале рис. 3.

Сам информационный признак может представлять собой сигнал достаточно сложной формы. Характеристическими параметрами формы должны быть безразмерные амплитудные параметры сигнала генератора «информационного признака»  $\alpha, \beta$ . Наблюдение за изменением этих параметров «информационного признака» на протяжении некоторого интервала времени позволит осуществить прогнозирование технического состояния ЭО СЭС СН.

Прогнозирование технического состояния ставит своей целью обнаружение изменений определяющего параметра (ОП) на ранних стадиях развития деградиационных процессов и определение степени приближения ОП к предельно допустимому значению, которое устанавливается заранее. Важнейшей особенностью решения является получение реальной информации о значении ОП в некоторый момент времени и предсказание его значения через интервал времени  $\Delta t$ . Предсказание значения ОП осуществляется с использованием аппроксимационных моделей развития деградиационного процесса. Выбор оптимальной аппроксимации должен быть сделан на основе наблюдения за изменениями ОП, фиксируемого с помощью регистрации параметров ДПЦП ЭО СЭС СН. Поскольку наиболее важным является установление развития процессов отказа в начальный момент, то можно предположить, что они развиваются достаточно медленно. Интервалы времени между последовательным получением измерительной информации могут быть достаточно большими (не обязательно равными), а их значение также может определяться использованной аппроксимационной моделью: чем ближе находится значение ОП к заданному предельному значению, тем меньше этот интервал.

### Заключение

Решение задачи прогнозирования технического состояния возможно при условии одновремен-

ного использования, определяющего параметра, полученного с помощью таблиц измерений параметров динамических процессов в цепях питания ЭО СЭС СН и вероятностно-аналитических моделей развития деградационных процессов.

В связи с тем, что реализация предлагаемого решения основывается на анализе получаемого сигнала об изменении параметров динамических процессов в цепях питания, предлагается под «информативными признаками» понимать определенную особенность измерительного сигнала, которая связана с состоянием контролируемого ЭО СЭС СН.

Для аналитического прогнозирования времени сохранения работоспособности ЭО СЭС СН необходимо использовать статистические модели развития деградационных процессов. В пря-

мом подходе к решению этой задачи необходимо рассмотреть физический механизм образования деградационных процессов в конкретном случае его проявления в измеряемых параметрах динамических процессов в цепях питания, а далее производить сравнение реально имеющих место изменений с предсказываемой аналитической моделью и делать соответствующие выводы.

В тоже время при всей ординарности идеи, данный подход предполагает объемные математические вычисления, а также рассмотрение вопросов унификации существующих аналитических моделей развития деградационных процессов к данному классу объектов контроля, в рамках предложенного решения. Указанные вопросы требуют отдельных исследований и будут рассмотрены авторами в дальнейшем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Литвинов А. И.** Анализ существующего научно-методического аппарата диагностирования электрооборудования систем электроснабжения военного назначения / Сборник трудов всеармейской научно — практической конференции «Инновационная деятельность в Вооруженных Силах Российской Федерации». — СПб.: ВАС, 2014. — С. 180—185.
2. **Дорошенко Г. П.** Анализ состояния и перспективы развития системы технического обеспечения связи и автоматизации / Г. П. Дорошенко, Е. Б. Харченко, А. В. Чихачев // Сборник трудов научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». — СПб.: ВАС, 2016. — С. 205—208.
3. **Будко П. А.** Кинетический метод контроля и диагностики технических средств / П. А. Будко, А. И. Литвинов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 7. — С. 42—47.
4. **Будко П. А., Винограденко А. М., Литвинов А. И. и др.** Реализация кинетического метода контроля и диагностики технических средств // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 8. — С. 37—44.
5. **Будко П. А.** Экспериментальные исследования по применению кинетического метода контроля и диагностики технических средств / П. А. Будко, А. М. Винограденко, А. И. Литвинов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 9. — С. 53—58.
6. **Будко П. А.** Методы контроля технического состояния сложных технологических объектов на основе бесконтактного способа диагностирования / П. А. Будко, В. Ю. Ткаченко, Б. Абуилы, А. Е. Жолдасова // Сборник трудов научно-технической конференции «Интегрированные системы управления». — Ульяновск: ФНПЦ АО «НПО «Марс», 2016. — часть 1. — С. 71—80.
7. **Будко П. А.** Бесконтактный контроль и идентификация технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов / П. А. Будко, А. И. Литвинов // Датчики и системы. — 2014. — № 8. — С. 5—11.
8. **Будко Н. П., Будко П. А., Литвинов А. И., Винограденко А. М.** Способ и устройство автоматизированного контроля технического состояния электрооборудования: патент на изобретение 2548602 РФ: МПК G01R19/00; заявитель и патентообладатель СПб.: ВАС. — 2014106259; заявл. 19.02.2014; опубл. 20.04.2015, бюл. № 11. — 24 с.: ил. 9.
9. **Винограденко А. М.** Способ мониторинга предаварийного состояния контролируемых объектов / А. М. Винограденко, П. А. Будко, А. С. Юров, А. И. Литвинов // Датчики и системы — 2014. — № 9. — С. 8—14.
10. **Будко П. А.** Метод бесконтактного мониторинга технического состояния электрооборудования систем электроснабжения промышленных комплексов / П. А. Будко, А. И. Литвинов // Двенадцатое всероссийское совещание по проблемам управления 2014. Москва, 16—19 июня 2014 г.: труды. [Электронный ресурс]. М.: Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 7001—7011.
11. **Будко П. А.** Модель неразрушающего контроля технического состояния сложных технологических объектов / П. А. Будко, А. И. Литвинов, В. Ю. Ткаченко, Б. Абуилы // Сборник трудов научно-технической конференции «Интегрированные системы управления». Часть 1. — Ульяновск: ФНПЦ АО «НПО «Марс», 2016. — С. 81—90.
12. **Панин В. В.** Измерение импульсных магнитных и электрических полей / В. В. Панин, Б. М. Степанов. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 120 с.
13. **Тихонов В. И.** Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. — М.: Сов. радио, 1977. — 488 с.
14. **Филиппов Е.** Нелинейная электротехника. — М.: Энергия; 1968. — 504 с.