

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство  
о регистрации СМИ  
ПИ №ФС 77-29963  
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:  
А.Г. Бабак, к.т.н.

**Редакционный совет:**  
С.С. Булгаков, д.т.н.,  
Н.А. Володина, д.т.н., профессор,  
В.Н. Дианов, д.т.н., профессор,  
С.Г. Драгомиров, д.т.н., профессор,  
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор,  
К.Л. Ковалев, д.т.н., профессор,  
Л.В. Кожитов, д.т.н., профессор,  
А.В. Левин, д.т.н., профессор,  
А.С. Мазнев, д.т.н., профессор,  
В.А. Нестерин, д.т.н., профессор,  
И.Б. Пешков, д.т.н., профессор,  
В.П. Феоктистов, д.т.н., профессор,  
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор.

**Выпускающий редактор:**  
Н.А. Климчук.

**Редакция:**  
140070, Московская область,  
Люберецкий район, п. Томилино,  
ул. Гаршина, д. 11  
Тел./факс: (495) 500-40-20,  
(495) 557-23-95  
E-mail: npptez@mail.ru  
Сайт: www.npptez.ru

**Подписано в печать:**  
25.04.2013 г.

**Отпечатано:**  
ГУП МО «Коломенская типография».  
140400, г. Коломна,  
ул. III Интернационала, д. 2а  
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,  
бумага мелованная, объем 7 п.л.,  
тираж 1000 экз., заказ 574.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

**Коняхин С.Ф., Резников С.Б., Бочаров В.В.,  
Сыроежкин Е.В., Харченко И.А.**

*Критерии оптимальности и примеры синтеза структуры комбинированной системы электроснабжения переменного-постоянного тока для перспективных летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием . . . . . 2*

**Сарбаев В.И., Гармаш Ю.В.**

*Эффективная схема управления системой охлаждения автомобильного двигателя . . . . . 11*

**Герман Л.А., Бакеев Е.Е., Кишкурно К.В.**

*Оценивание режимов тягового электроснабжения для управления напряжением и реактивной мощностью . . . . . 14*

**Антонов А.С., Султан-Заде Т.Т., Шкляев А.А.**

*Электродинамическое моделирование влияния расположения антенн на диаграммы направленности . . . . . 19*

**Самарин А.В., Масалов В.В.**

*Синхронизация измерений в системе мониторинга воздушных ЛЭП. . . . . 23*

**Феоктистов В.П., Паршин А.Н., Раюмов А.Х.**

*Режим движения поезда на участке с ограничениями скорости . . . . . 27*

### МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Люминарская Е.С., Дианов В.Н.**

*Применение тестовых кодов для обнаружения сбоев в исполнительных механизмах при кодоимпульсном управлении . . . . . 31*

**Доманов В.И., Доманов А.В., Муллин И.Ю., Холявко А.О.**

*Регулирование асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре . . . . . 35*

**Калинин И.М., Махонин С.В., Титов В.В.**

*Сравнительное исследование скалярного и векторного способов управления гребным электродвигателем. . . . . 38*

### ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ

**Лебедев С.В., Флегонтов В.Е., Глазов В.М., Рыгалин Д.Б.**

*СБИС класса «система на кристалле» для мониторинга состояния линий электропередач. . . . . 45*

# Критерии оптимальности и примеры синтеза структуры комбинированной системы электроснабжения переменного и постоянного тока для перспективных летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием

// Criteria of an optimality and examples of synthesis of the combined AC-DC electrical power supply system structure for perspective aircraft with all electrified equipment //

Коняхин С.Ф.,  
ОАО «АЭРОЭЛЕКТРОМАШ», г. Москва

Резников С.Б., д.т.н., профессор,  
Бочаров В.В., к.т.н., Сыроежкин Е.В., к.т.н.,  
Харченко И.А., к.т.н.,  
МАИ, г. Москва

*В работе предложены, обоснованы и сопровождаются конкретными примерами основные критерии оптимальности оценки главных свойств бортовых систем электроснабжения (СЭС) для перспективных летательных аппаратов (ЛА) с полностью (или преимущественно) электрифицированным оборудованием. Предложены и подробно описаны примеры возможных структур одного канала СЭС, удовлетворяющие этим критериям. Ключевые слова: комбинированная система электроснабжения летательных аппаратов, синтез структуры, критерии оптимальности, полностью электрифицированный самолет*

*The basic criteria of an optimality of an estimation the main properties of onboard electrical power supply systems (EPS) for perspective airplane with completely (or mainly) electrified equipment are offered, proved and accompanied by concrete examples. Examples of satisfying to these criteria one EPS channel possible structures are offered and described. Keywords: combined system of power supply of aircraft, structure synthesis, criteria of the optimality, completely electrified airplane.*

Современные требования снижения эксплуатационных расходов и повышения топливной эффективности летательных аппаратов (ЛА) и, в первую очередь, самолетов гражданской авиации в значительной мере стали влиять на технический облик многих бортовых систем и агрегатов.

Это сказалось и на самолетной электроэнергетике, где наметился ряд тенденций, существенно определивших характер организации и построения современных бортовых систем электроснабжения (СЭС), а именно:

- перевод на электропитание ряда,

а впоследствии и всех бортовых систем, традиционно имеющих неэлектрическую (гидравлическую, пневматическую, механическую и др.) природу энергоснабжения;

- преимущественный отказ от имеющего, как правило, гидромеханическую основу привода постоянных оборотов и вращения первичных генераторов непосредственно от коробки силовых агрегатов (коробки приводов);

- увеличение установленной мощности СЭС и, соответственно, увеличение мощности первичных генераторов.

Сегодня эти тенденции уже вопло-

щаются в действительность в перспективных разработках путем реализации концепции так называемого «полностью электрифицированного» (ПЭС) или «более электрифицированного» (БЭС) самолета, которую, на взгляд авторов, правильной было бы назвать концепцией «преимущественно электрифицированного самолета» или «самолета с преимущественно электрифицированным оборудованием» (ПЭО).

Очевидно, что новые подходы к построению нового электроэнергетического комплекса летательного аппарата требуют и разработки новых критериев оценки его эффективности и оптимизации.

В настоящее время для оценки оптимальности бортовых систем широко используется критерий минимизации полетной (или стартовой) массы. Это критерий, учитывающий не только масса-энергетические показатели собственно устройств и агрегатов, но и добавление массы части планера и топлива для их транспортировки, а также принятие связанных с их эксплуатацией дополнительных мер охлаждения, весьма громоздок, требует знания точных данных по всем бортовым системам, а потому, по мнению авторов, практически неприменим.

Поэтому для оптимизации таких сложных и разветвленных систем, как системы электроснабжения летательных аппаратов, наиболее приемлемым и адекватным представляется многокритериальный подход.

С учетом актуальности упомянутой выше концепции ПЭС представляется целесообразным рассмотреть и сфор-

мулировать основные критерии оптимизации для синтеза структуры СЭС тока перспективных ЛА с ПЭО.

### Требования к видам систем электроснабжения

Вид и качество электроэнергии бортовых систем электроснабжения нормируется требованиями ГОСТ Р 54073 – 2010 [1].

В соответствие со стандартом на борту летательного аппарата могут использоваться, в том числе и одновременно, четыре вида СЭС:

- трехфазного переменного тока нестабильной частоты 360-800 Гц с номинальным фазным напряжением 115 В;
- трехфазного переменного тока стабильной частоты 400 Гц с номинальным фазным 115 В;
- постоянного тока повышенного напряжения 270;
- постоянного тока низкого напряжения 27 В.

СЭС постоянного тока должны использовать корпус ЛА в качестве обратного отрицательного провода. В технически обоснованных случаях допускается использовать двухпроводные системы.

Следует отметить, что один из описываемых ниже вариантов структуры двуполярной системы постоянного тока повышенного напряжения 270 В с использованием корпуса ЛА для организации среднего вывода источника питания (так называемая СЭС постоянного повышенного напряжения СППН  $0 \pm 135$  В) в принципе не противоречит ГОСТ, но требует отдельного согласования. При этом в качестве технического обоснования целесообразности её использования можно отметить следующее [2]:

- расширение функциональных возможностей системы, а именно – непосредственное питание нагрузок постоянного тока напряжением 135 В любой полярности, а также полумостовых преобразователей (инверторов и конверторов), что позволяет в том числе минимизировать применение электролитических конденсаторов, наличие которых является одним из основных факторов, ограничивающих надежность и долговечность составляющих бортового электроэнергетического комплекса;

- существенный выигрыш в масса-габаритных, надежностных, стоимостных показателях электромеханической коммутационной аппаратуры (реле, контакторов и автоматов защиты) благодаря упрощению устройств дугогашения и в аналогичных показателях полупроводниковой коммутационной аппаратуры благодаря применению низковольтных транзисторных ключей;

- более медленное старение изоляции проводов кабелей и обмоток под воздействием постоянных и переменных высокочастотных составляющих напряжения провода относительно корпуса объекта;
- существенно большая электробезопасность и меньшая вероятность пробоя изоляции на корпус;
- более простое, надежное, компактное, легкое и дешёвое резервное оборудование (менее высоковольтные аккумуляторные батареи или электроёмкие конденсаторы, подключаемые в параллель непосредственно, без вспомогательного повышающего конвертора).

### Критерий энерго- и топливной экономичности и надежности для первичной подсистемы

Общий критерий энерго-топливной экономичности по существу сводится к минимизации тепловых потерь в подсистемах генерирования (включая привод генератора), распределения (центральных и периферийных кабелях, коммутационной аппаратуре) и вторичного преобразования (трансформаторно-выпрямительных устройствах, преобразователях частоты, инверторах, конверторах и др.), а также к способности указанных подсистем обеспечивать рекуперацию энергии торможения электродвигателей приводов различного назначения в накопители, в сеть или, в пределе, обратно в авиадвигатель.

С точки зрения энерго-топливной экономичности становится очевидной упомянутая выше тенденция отказа от применения привода постоянной частоты вращения (ППЧВ) для магистральных бортовых синхронных генераторов. ППЧВ, преобразующие всю или основную потребляемую бортовым электроэнергетическим ком-

плексом мощность, имеют относительно низкий КПД и требуют больших эксплуатационных затрат из-за частых регламентных работ с вынужденными простоями ЛА. Кроме того, они практически не могут обеспечить надежную параллельную работу синхронных генераторов переменного тока из-за частых сбросов, набросов и перекоммутаций нагрузок [3].

Эти обстоятельства приводят к необходимости выбора в качестве базы системы генерирования электроэнергии одного из следующих видов генераторов:

а) бесконтактный синхронный генератор:

- магнитоэлектрический – с вращающимися постоянными магнитами;
- с каскадным электромагнитным возбуждением, в частности, с синхронным возбудителем и вращающимся выпрямителем.

• индукторный – с пульсирующим знакопостоянным потоком возбуждения и двойным воздушным зазором;

- комбинированный (например, с коммутацией потока, со смешанным магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением и др.) [4];

б) асинхронный генератор (с малым скольжением) с устройством якорного возбуждения на базе электромашинного синхронного компенсатора и (или) инвертора напряжения [4, 5];

в) машина двойного питания, например, двухкаскадная асинхронная машина с фазными противовключенными роторами или асинхронизированный синхронный генератор (АСГ) с каскадным возбуждением [2, 5, 6].

Учитывая более чем двукратный диапазон изменения частоты вращения вала генератора и пропорциональную зависимость реактивной мощности возбуждения от скольжения, а также современные достижения в области силовой преобразовательной техники, можно констатировать, что из перечисленных выше электрических машин одной из наиболее перспективных по функциональной надежности и масса-габаритным показателям является высокооборотный асинхронный генератор с якорным самовозбуждением от транзисторного преобразователя частоты и синхронным компенсатором.

В этой связи остается открытым и подлежит исследованию вопрос о целесообразности применения и выбора мощности параллельно подключенных к первичной подсистеме генерирования электромашинных синхронных компенсаторов (СК), т.е. перевозбужденных синхронных двигателей с бесконтактным электромагнитным возбуждением и мощным роторным демферным контуром (типа беличьей клетки или омеднения) для собственного асинхронного электрозапуска и повышения качества электроэнергии в переходных режимах. Применение СК позволяет существенно разгрузить статический преобразователь частоты, повысив его надежность и улучшив массогабаритные показатели. Существенным является тот факт, что в качестве СК с успехом можно применить уже давно разработанные и широко применяемые в существующих бортовых СЭС бесконтактные синхронные генераторы с каскадным возбуждением от вращающегося выпрямителя или выпускаемые промышленностью двухпакетные бесконтактные индукторные генераторы [4].

**Критерий максимума  
общего КПД для  
подсистемы распределения  
и преобразования  
электроэнергии с учетом  
ограничительных требований  
по функциональной  
надежности и живучести**

Для удовлетворения этому критерию следует так распределить и сгруппировать вторичные преобразователи электроэнергии (централизованные, групповые и периферийно-индивидуальные), а также шины соответствующих распределительных устройств, чтобы минимизировать число последовательных преобразовательных каскадов с соответствующими КПД ( $\eta_{1,2,3}$ ) на пути от первичной подсистемы генерирования до каждого из потребителей (т.е. повысить КПД каждого канала  $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$ ).

При этом накладываемые ограничительные требования по функциональной надежности и живучести, связанные с обеспечением безопасности полетов и с необходимостью выполнения полетных заданий, заставляют предус-

мотреть перекрестные взаимосвязи питающих каналов, а также наличие резервных каналов (иногда многократное резервирование). Кроме того, следует учитывать, что параллельная работа питающих каналов не только обеспечивает «горячий резерв», но и позволяет улучшить качество электроэнергии в переходных режимах за счет увеличения общей установленной мощности объединенной системы питания (снижения её внутреннего импеданса).

Поскольку наиболее просто осуществить параллельную работу каналов постоянного напряжения, то в качестве основной первичной бортовой сети наиболее рационально выбрать выше упомянутые СППН  $0 \pm 135$  В или 270 В.

**Критерий максимальной  
преемственности по  
отношению к современной,  
широко распространенной  
номенклатуре защитно-  
коммутационной  
и преобразовательной  
аппаратуры**

Относительно указанного критерия из перечисленных выше СЭС наименее приемлемой по причине практически полной неприменимости в ней существующих реле, контакторов и автоматов защиты является СППН 270 В, переход на двуполярную систему  $0 \pm 135$  В не может радикально изменить ситуацию. Активно разрабатываемая сегодня бесконтактная аппаратура защиты и коммутации [7] еще не может покрыть весь диапазон токов (нагрузок) современного бортового электроэнергетического комплекса. В этой связи оптимальным способом размыкания цепей СППН 270 В (или  $0 \pm 135$  В) представляется применение комбинированных полупроводниково-электромеханических защитно-коммутационных аппаратов [2, 8].

Сложность проблемы бездугового размыкания цепей питания с повышенным напряжением часто недооценивается. Поскольку размыкаемую индуктивную нагрузку легко зашунтировать обратным диодом, то многие разработчики часто ошибочно считают, что энергоемкость  $W_n$  поглощающего звена (резистивного, емкостного, полупроводникового или

смешанного) определяется только энергией  $\frac{LI_0^2}{2}$ , накопленной в предвключенной индуктивной цепи (с суммарной индуктивностью  $L$  выходной цепи источника питания и паразитной индуктивностью подводящего кабеля). При этом не учитывается энергия

$$A_{ucm} = \int_0^{t_p} U_n I(t) dt,$$

потребляемая поглощающим звеном от источника питания с напряжением  $U_n$  при спадающем токе  $I(t)$  за время полного размыкания  $t_p$ . В [2, 8] показано, что величина  $A_{ucm}$  может в несколько раз превы-

шать величину  $\frac{LI_0^2}{2}$  и существенно определяется величиной перенапряжения, возникающего на размыкателе из-за ЭДС самоиндукции предвключенной индуктивной цепи и искусственно ограниченного поглощающим звеном. Проще говоря, энергоемкость поглощающего звена

$$\left( \frac{LI_0^2}{2} \times \frac{k_U}{(k_U - 1)} \right)$$

тем меньше, чем выше кратность перенапряжения  $k_U = U_{max}/U_n$ , формируемого им и по возможности стабилизируемого в процессе поглощения. Поэтому при  $U_n = 135$  В (вместо 270 В) указанная энергоемкость будет существенно ниже при том же допустимом значении  $U_{max}$ .

**Критерий  
удовлетворительного  
качества электроэнергии  
на входах потребителей  
и преобразователей**

Этот критерий предусматривает минимизацию запасов величин показателей качества электроэнергии, оговоренных ГОСТ, на входах потребителей. По отношению к преобразователям электроэнергии (централизованным, групповым и периферийно – индивидуальным) это означает максимальное приближение их входных и выходных импедансов к «квазилинейно-резистивно-постоянному», т.е. обеспечивающему при линейно-резистивной нагрузке максимальное совпадение временных диаграмм токов и напряжений в относительных единицах (по отношению к периферийно-индивидуальным преобразователям это относится только к их входному импедансу).

В качестве наглядного примера для пояснения критерия удовлетворительного качества электроэнергии рассмотрим попытку оценки свойств преобразователя частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного напряжения или тока. В состав ПЧ входят управляемый выпрямитель, питаемый от первичной сети переменного тока (115/200 В, 360-800 Гц), промежуточный емкостный сглаживающий накопитель со средней точкой и трехфазный инвертор с выходным синусоидальным напряжением стабильной частоты (115/200 В, 400 Гц) и фильтром низкой частоты.

Допустим ПЧ имеет три группы внешних выводов, подключенных к соответствующим распределительным устройствам (РУ) комбинированной СЭС переменного-постоянного тока с напряжениями: 115/208 В, 360-800 Гц ( $PY_{f-var}$ );  $0 \pm 135$  В ( $PY_{пнн}$ ) и 115/208 В, 400 Гц ( $PY_{f-const}$ ). Первая группа внешних выводов (включая вывод силовой нейтрали) соединена со входом выпрямителя, вторая – с емкостным накопителем, а третья – с выходом инвертора (включая вывод нейтрали). Ко всем трем РУ подключены потребители (нагрузки) с номинальными мощностями и удовлетворяющие нормам ГОСТ по своим входным параметрам. Записав осциллограммы токов и напряжений в цепях всех трех пар внешних выводов ПЧ в относительных единицах с одинаковыми базовыми масштабами, сравниваем попарно осциллограмму каждого тока с осциллограммой соответствующего напряжения и измеряем максимальные отклонения одной от другой (в установившемся и переходных режимах). Критерием оценки свойств ПЧ могут являться указанные максимальные отклонения во всем допустимом диапазоне изменения параметров нагрузок и первичного питающего напряжения и, в частности, величины излишних запасов этих отклонений по сравнению с нормируемыми ГОСТом.

Рассмотренный критерий косвенно характеризует излишние запасы по масса-габаритным, энергетическим и стоимостным показателям, заложенным при проектировании данного преобразователя (в частности его фильтровых эле-

ментов или сложных цепей регулирования). Так, например, в рассматриваемом случае вместо обычной схемы мостового неуправляемого выпрямителя целесообразно установить выпрямитель с корректором коэффициента мощности (ККМ), например, по схеме Виенна-выпрямителя, рассмотренного ниже.

### Критерий минимума удельной добавленной резервной массы

Критерий характеризует минимальное отношение массы  $\Delta G$  устройств, добавленных к каждому из питающих каналов СЭС для его резервирования, к кратности этого резервирования  $\Delta \dot{G} = \Delta G / k_{рез}$  и относится к каждому из 4-х каналов комбинированной СЭС переменного-постоянного тока. Чтобы наилучшим образом удовлетворить данному критерию ( $\Delta \dot{G} \rightarrow \min$ ), нужно постараться на ранних стадиях синтеза структуры и проектирования узлов СЭС использовать схемотехнические решения, обеспечивающие перекрестные взаимосвязи каналов и цепей питания, не требующие добавления громоздких, малонадежных и дорогих вспомогательных устройств. В качестве наглядных примеров рациональных способов взаимного резервирования каналов электропитания можно привести уже рассмотренную структуру ПЧ с добавлением в неё выходного канала постоянного низкого напряжения 27 В, подключенного к  $PY_{пнн}$ , который связан с резервной аккумуляторной батареей. Взаимная связь каналов повышенного ( $0 \pm 135$  В) и низкого (27 В) напряжений осуществляется с помощью обратимого расщепленного двухключевого конвертора. Таким образом, все 4 канала питания оказываются снабженными резервным источником – аккумуляторной батареей. При этом предполагается, что в случае отказа в первичном источнике  $PY_{f-var}$  переводится на питание от  $PY_{f-const}$  с ещё более высоким качеством электроэнергии. При сравнении этого варианта структуры СЭС с вариантом на базе высоковольтной аккумуляторной батареи с напряжением 136 В нетрудно убедиться, что при той же кратности резервирования для каждого из 4-х каналов добавленная масса аккумуляторной батареи G будет существен-

но меньше в первом варианте, т.к. при одинаковых электроемкостях батарей (а точнее – величинах запасенных зарядов  $q = It$ , в [А·ч]) низковольтная батарея на 28 В имеет существенно меньшую массу за счет меньшего конструктивного коэффициента (14 гальванических элементов вместо 68). Следовательно, по критерию минимума удельной добавленной резервной массы явно выигрывает вариант с низковольтной аккумуляторной батареей, даже если обратимый двухключевой конвертор подстраховать аналогичным вторым, включенным в параллель с первым (горячий резерв).

### Структуры бортовых систем электроснабжения

Вышеперечисленные критерии оценки главных свойств бортовых систем электроснабжения позволяют на ранних стадиях их проектирования обеспечить если не оптимальность, то, по меньшей мере, рациональность синтезируемой структуры СЭС для перспективных ЛА с полностью (или преимущественно) электрифицированным оборудованием.

В качестве первого примера синтеза структуры СЭС, удовлетворяющей рассмотренным критериям, можно предложить комбинированную систему, структура одного канала генерирования которой представлена на рис. 1. Система базируется на асинхронном стартер-генераторе (1) и синхронном компенсаторе (48) нестабильной частоты (360-800 Гц), инверторе синусоидального напряжения (5), обратимом преобразователе частоты (30), трансформаторно-выпрямительном устройстве (2, 16) со звеном повышенной частоты и с корректором коэффициента мощности (31).

Канал электропитания содержит асинхронный стартер-генератор переменного тока 1, мостовой выпрямитель повышенного напряжения 2 с выходным конденсаторным фильтром 3-4, инвертор 5 синусоидального напряжения стабильной частоты, распределительные устройства 6, 7 переменного тока нестабильной (360-800 Гц) и стабильной частоты (400 Гц), распределительные устройства 8, 9 постоянного повышенного ( $0 \pm 135$  В) и низкого (27 В) напряже-

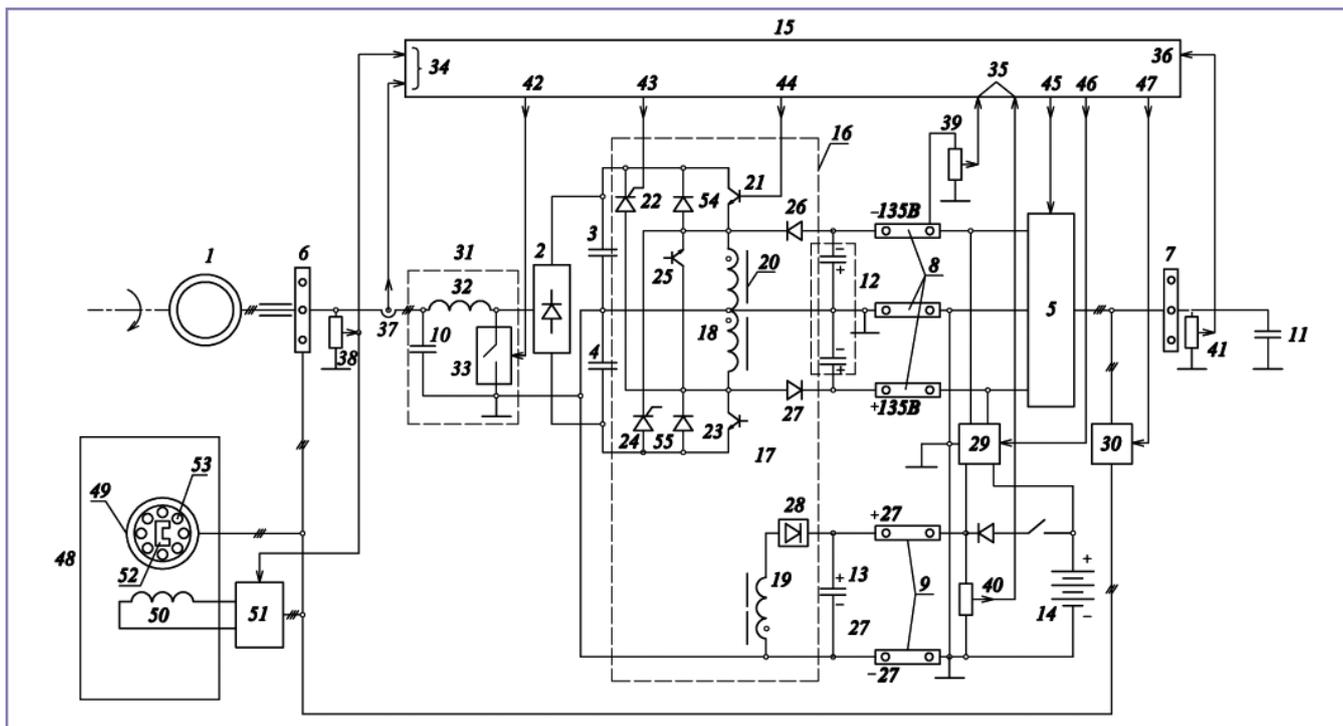


Рис. 1. Структура канала комбинированной СЭС переменного-постоянного тока на базе синхронного компенсатора 48 с нестабильной частотой.

ния с общим заземленным выводом, зашунтированные фильтровыми конденсаторами 12, 13, а также блок управления 15, импульсный преобразователь 16 постоянных напряжений, состоящий из трансреактора 17 с первичной 18 и вторичной 19 обмотками, имеющими общий магнитопровод 20, двух однонаправленных двухключевых электронных стоек 21 – 22 и 23 – 24, однонаправленного электронного ключа 25, пары выходных диодов 26, 27 и выходного выпрямителя низкого напряжения 28.

Система содержит также обратимый импульсный конвертор 29, обратимый преобразователь частоты 30 и импульсный корректор коэффициента мощности 31, состоящий из балластных дросселей 32, образующих с конденсаторами 10 Г-образный емкостно-индуктивный фильтр, и выходных электронных ключей 33 переменного тока, управляющие выходы которых подключены к корректирующим выходным выводам 42 блока управления. Последний выполнен с цепями 34 обратных связей, содержащими датчики 37 и 38 тока и напряжения, установленные во входных цепях емкостно-индуктивного фильтра.

Если в качестве первых электронных ключей 21 и 23 двухключевых

стоек 21-22 и 23-24, соединенных с выводами первичной обмотки 18 трансреактора 17, использованы не полевые, а биполярные транзисторы, не имеющие внутренних обратных диодов, то они могут быть зашунтированы обратными диодами 54 и 55.

Для разгрузки обратимого преобразователя частоты и повышения качества электроэнергии в канале переменного тока нестабильной частоты установлен электромашинный синхронный компенсатор 48 с электромагнитным возбуждением. Выходные выводы якорных обмоток генератора 1 подключены к распределительному устройству 6 переменного тока нестабильной частоты. Инвертор 5 своими входными выводами подключен к распределительному устройству 8 повышенного напряжения, а выходными – к распределительному устройству 7 переменного тока стабильной частоты.

Вторичная обмотка 19 трансреактора 18 через выпрямитель 28 подключена к выводам фильтрового конденсатора 13 низкого напряжения.

Обратимый импульсный конвертор 29 включен между распределительными устройствами 8 и 9 постоянного повышенного и низкого напряжения. Обратимый преобразователь частоты 30 включен между распределительными

устройствами 6 и 7 переменного тока нестабильной и стабильной частоты.

В качестве двунаправленных электронных ключей 33 корректора коэффициента мощности 31 могут использоваться встречно – последовательно включенные МДП-транзисторы с внутренними обратными диодами или однофазные выпрямительные мосты, зашунтированные по выходу транзисторами.

В качестве преобразователя частоты 30 могут быть использованы непосредственный преобразователь – циклоконвертор или преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока (напряжения) с двумя обратимыми выпрямительно – инверторными блоками.

Блок управления 15 выполнен с возможностью широтно-импульсного регулирования сигналов на своих выходных выводах в зависимости от сигналов в его цепях обратных связей по входным и выходным токам и напряжениям трансформаторно-выпрямительного устройства, а также сигналов на своих корректирующих выводах 42 в зависимости от формы и фазового сдвига сигналов датчиков 37 и 38 тока и напряжения во входных цепях емкостно-индуктивного фильтра.

Канал электропитания работает следующим образом.

Ротор асинхронного стартер-генератора I вращается, в общем случае – с нестабильной угловой скоростью  $\omega - var$ , в результате чего к шинам распределительного устройства 6 подводится трехфазное переменное напряжение нестабильной частоты (115/208 В, 360-800 Гц), питающее нагрузки, некритичные к качеству электроэнергии. Это же напряжение питает мостовой выпрямитель 2 через емкостно-индуктивный фильтр 10-32. На выходных выводах постоянного тока выпрямителя 2 имеется пульсирующее напряжение, частично сглаженное выходным емкостным фильтром 3, 4, подключенным, в частности, по схеме удвоения фазного напряжения со средним выводом. При наличии импульсного корректора коэффициента мощности 31 указанная схема выпрямления с входным и выходным фильтрами в литературе называется схемой «Винна-выпрямителя». Благодаря широтно-импульсному регулированию модулирующих ключей переменного тока 33 с отрицательной обратной связью по форме и фазовому углу потребляемого тока блок управления обеспечивает синусоидальность фазных токов и их синфазность с фазными напряжениями, т.е. приближает значение коэффициента потребляемой от генератора мощности к единице, снижая тепловые потери и потери напряжения в подводящих проводах и обмотках генератора и сохраняя синусоидальную форму напряжений на распределительном устройстве 6. При этом также стабилизируется среднее значение пульсирующего выпрямленного напряжения на фильтре 3, 4.

Преобразователь 16 постоянных напряжений (расщепленный инвертирующий и обратногоходовой конвертер) функционирует в высокочастотном широтно-импульсном модуляторном режиме. После очередного включения электронных ключей 21 и 23 происходит нарастание тока и потокосцепления в секциях первичной обмотки 18 трансреактора 17 по цепям 3-21-18-3 и 4-18-23-4 и одновременная подзарядка конденсатора стойки 3-4 с меньшим напряжением с помощью ЭДС индукции, трансфор-

мируемой в соответствующей секции, с токами по цепям обратных диодов 54 и 55 (самовыравнивание напряжений на конденсаторах 3 и 4). Эти процессы занимают заданный интервал времени импульса  $\Delta t_u$  и сопровождаются частичной разрядкой конденсаторов 3, 4 и запасанием электромагнитной энергии трансреактором.

После выключения ключей 21, 23 и одновременного включения ключей 25, 24 и 22 происходит закорачивание первичной обмотки 18 с сохраняющимся током в цепи 18-25 в течение интервала времени паузы  $\Delta t_n$ , необходимого для обеспечения статической устойчивости процесса регулирования.

После дальнейшего выключения ключа 25 происходит передача дозы электромагнитной энергии, накопленной в трансреакторе 17, в нагрузки, подключенные к распределительным устройствам 8 и 9, с токами в цепях 18-27-8-нагрузка-8-26-18 и 19-28-9-нагрузка-9-19, а также рекуперация дозы энергии индуктивностей рассеяния секций обмотки 18 обратно в емкостный фильтр 3-4 с токами в цепях 18-4-24-18 и 18-22-3-18. Этот заключительный этап периода T модуляторного цикла имеет остаточную длительность  $(T - \Delta t_u - \Delta t_n)$ .

Далее перечисленные этапы циклически повторяются, осуществляя питание нагрузок постоянного повышенного и низкого напряжения. При этом обеспечивается непрерывность суммарного потокосцепления обмоток 18 и 19 трансреактора 17, выполняющего функции расщепления потоков электроэнергии в нагрузки постоянного повышенного и низкого напряжения, а также промежуточного фильтрового накопителя энергии, компенсирующего при его достаточной энергоемкости провалы пульсирующего выходного напряжения выпрямителя 2 и позволяющего вместо энергоемких нетермостойких и ненадежных электролитических конденсаторов в качестве емкостного фильтра 3-4 применить более термостойкие и надежные пленочные конденсаторы с относительно небольшой энергоемкостью.

Питание распределительного устройства 7 переменного тока стабильной частоты обеспечивается ин-

вертором 5 синусоидального напряжения, а также обратимым преобразователем частоты 30, который способен также выполнять функцию рекуперации энергии индуктивных и электродвигательных нагрузок переменного тока стабильной частоты в электромагнитную и механическую энергию генератора I. Помимо этого преобразователь частоты 30 способен вместе с генератором I осуществлять режим стартерного запуска силовой приводной установки, а также асинхронный запуск синхронного компенсатора.

Обратимый импульсный конвертер 29 способен осуществлять взаимное резервное питание распределительных устройств 8 и 9 постоянного повышенного и низкого напряжения, а также обеспечить питание наиболее важных нагрузок от аккумуляторной батареи 14, подключаемой для этого к распределительному устройству 9 низкого напряжения.

На рис. 2 приведена структура канала СЭС переменного-постоянного тока на базе асинхронного стартер-генератора (АС-Г) с нестабильной частотой (с малым скольжением), синхронных компенсаторов (СК) с нестабильной ( $f-var$ ) и стабильной (400 Гц) частотой, а также регулируемых инверторов синусоидального напряжения и синусоидального тока (РИСН и РИСТ), обратимого импульсного конвертера (ОИК), зарядного устройства (ЗУ) и безтрансформаторного или трансформаторного выпрямительного устройства (ВУ или ТВУ) с корректором коэффициента мощности (ККМ). Указанная структура с двумя СК и возможностью электрозапуска от розетки аэродромного питания (РАП) в большей степени удовлетворяет всем рассмотренным выше шести критериям оптимальности и вполне может быть использована для реализации концепции ПЭС.

Реализация обоих рассмотренных вариантов комбинированных СЭС, как указывалось выше, требует согласования частных технических условий на заземление средней нулевой шины РУ  $0 \pm 135$  В. В связи с этим предлагается третий вариант структуры СЭС, полностью соответствующий пункту 5.2.2. ГОСТ Р 54073 – 2010: СЭС постоянного тока должны использовать

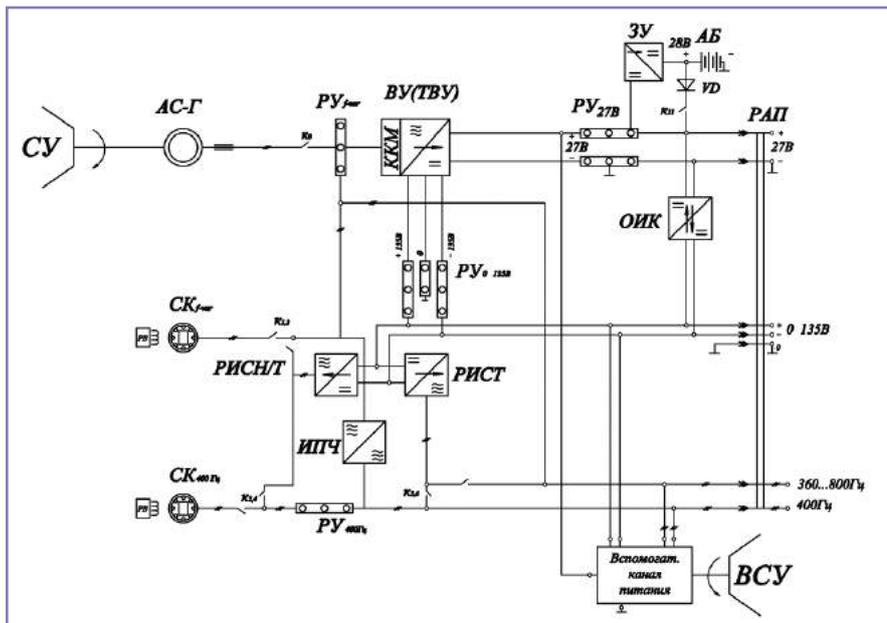


Рис. 2. Структура канала комбинированной СЭС переменного-постоянного тока для перспективных ЛА с ПЭО.

корпус ЛА в качестве обратного отрицательного провода (допускается использовать двухпроводные системы).

На рис. 3 приведен канал комбинированной СЭС переменного-постоянного тока на базе асинхронного стартер-генератора (АС-Г), Виенна-выпрямителя с корректором коэффициента мощности (В-В с ККМ), развязывающего трансформаторного конвертора (РТК) с инвертором прямоугольного напряжения (ИПН), двух инверторов синусоидального напряжения (ИСН),

а также резервных устройств: аккумуляторной батареи (АБ), вспомогательной силовой установки (ВСУ), розетки аэродромного питания (РАП) и обратимого непосредственного преобразователя частоты (ОНПЧ).

Рассмотрим два взаимно-альтернативных варианта структуры инверторов синусоидального напряжения (ИСН), используемых в рассматриваемых комбинированных СЭС (рис. 1, 2, 3):

- ИСН на базе однофазных мостовых ШИМ-инверторов с нулевой пау-

зой (МИ), подробно описанных в [9];

- ИСН на базе нетрадиционных однофазных полумостовых обратимых конверторных делителей (ОКД) однополярных пульсирующих напряжений с балластно-защитными трансформаторами, предложенных в [2].

На рис. 4а и рис. 4б приведены две рациональные схемы питания указанных ИСН от сети переменного тока нестабильной частоты через Виенна-выпрямитель с корректором коэффициента мощности (В-В с ККМ) и развязывающий трансформаторный конвертор (РТК) с инвертором прямоугольного напряжения (ИПН) повышенной частоты.

К недостаткам первой схемы (рис. 4а) относятся:

- низкая надежность из-за необходимости использования энергоемких входных фильтровых конденсаторов ( $C_{ф\text{A,B,C}}$ ) и наличия цепей для сквозных сверхтоков через транзисторные стойки при воздействии электромагнитных помех;
- относительно большие масса и габариты выходных L-C-фильтров низкой частоты с большой реактивной мощностью;
- большие коммутационные потери в транзисторных ключах из-за нерегулируемого постоянного уровня рабочего напряжения, в частности – при максимальных токах.

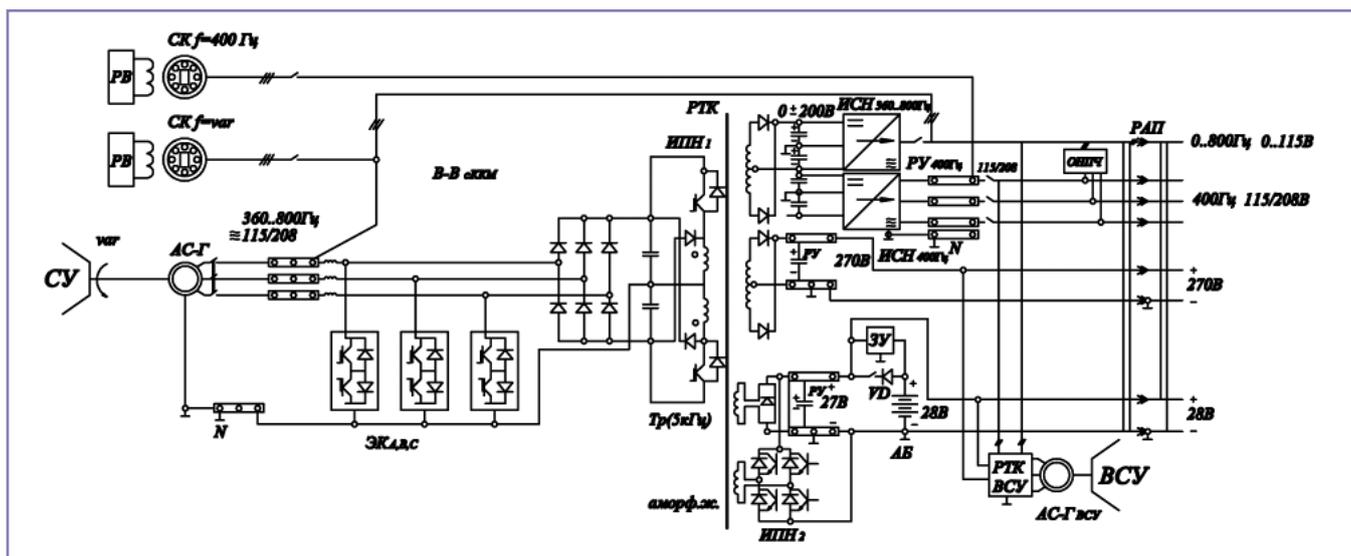


Рис. 3. Канал комбинированной СЭС переменного-постоянного тока на базе: силовой установки (СУ), асинхронного стартер-генератора (АС-Г), Виенна-выпрямителя с корректором коэффициента мощности (В-В с ККМ), развязывающего трансформаторного конвертора (РТК) с инверторами прямоугольного напряжения (ИПН 5 кГц), двух инверторов синусоидального напряжения (ИСН), а также резервных трактов: аккумуляторной батареи (АБ), вспомогательной силовой установки (ВСУ), розетки аэродромного питания (РАП) и обратимого непосредственного преобразователя частоты (ОНПЧ).

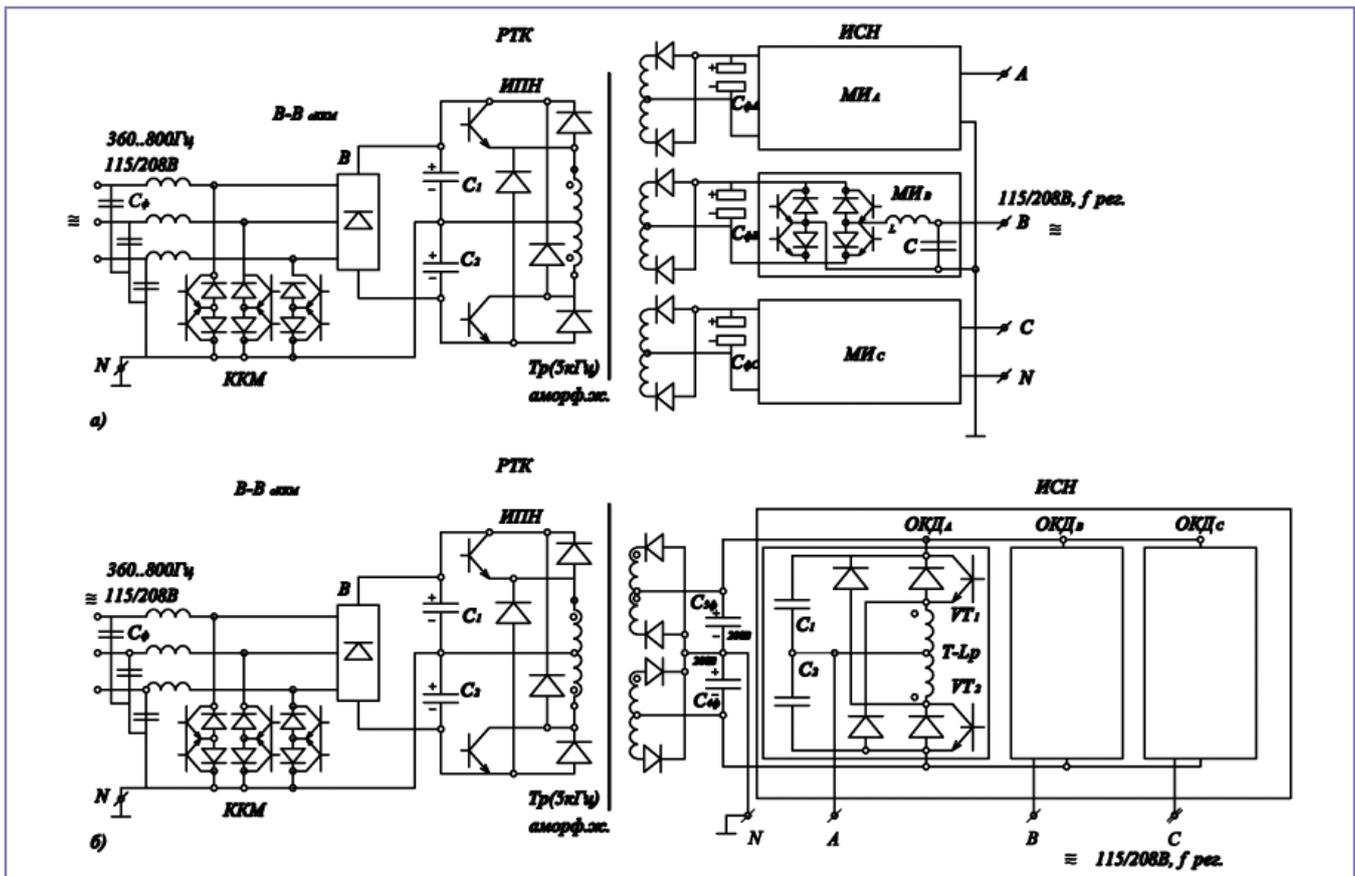


Рис. 4. Схемы питания трехфазного инвертора синусоидального напряжения (ИСН) от сети переменного тока нестабильной частоты через Виенна-выпрямитель с корректором коэффициента мощности (В-В с ККМ) и через развязывающий трансформаторный конвертор (РТК) с инвертором прямоугольного напряжения (ИПН5кГц):

а) ИСН на базе однофазных мостовых ШИМ-инверторов с нулевой паузой (МИ<sub>А,В,С</sub>);

б) ИСН на базе однофазных полумостовых обратимых конверторных делителей однополярных пульсирующих напряжений (ОДК<sub>А,В,С</sub>) с балластно-защитными трансреакторами Т-Лр.

Последняя схема (рис.4б) свободна от указанных недостатков, а потому представляется наиболее рациональной для реализации структуры СЭС перспективных ЛА с ПЭО, представленной на рис. 3.

Помимо удовлетворения всем перечисленным ранее критериям СЭС, приведенная на рис. 3 и 4б, имеет ряд дополнительных достоинств, среди которых повышенная надежность и относительно малый уровень помехоизлучений в ИСН ввиду отсутствия в них цепей для сквозных токов при несанкционированных одновременных включениях ключей одной стойки, а также параметрическое симметрирование вольт-секундных параметров импульсов, исключаяющее насыщение трансформатора.

#### Выводы:

Наиболее приемлемым и адекватным способом оценки структуры

системы электроснабжения для перспективных ЛА с полностью или преимущественно электрифицированным оборудованием представляется многокритериальный подход к их синтезу. Рассмотренные в работе основные критерии оценки главных свойств таких СЭС позволяют на ранних стадиях их проектирования обеспечить если не оптимальность, то, по меньшей мере, рациональность синтезируемой структуры СЭС, что достаточно наглядно продемонстрировано в рассмотренных примерах синтеза структуры одного канала комбинированной СЭС переменного-постоянного тока для перспективных ЛА, реализующих концепцию ПЭС.

#### Литература:

1. ГОСТ Р 54073 – 2010 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. Москва, Стандартинформ, 2011.

2. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. – М.: изд-во МАИ – ПРИНТ, 2010. – 512 с.
3. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах / под ред. С.А. Грузкова. – М.: изд-во МЭИ, 2005. – Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – 2005. – 568 с.
4. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – М.: высш. шк., 1990. – 416 с.
5. Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. Для электромех. спец. вузов / Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Под ред. И.П.Копылова – М.: Высш шк., 1988 – 328 с.
6. Шапиро Л.Я. Машины двойного питания. – М.: МЭИ, 1983. – 60 с.
7. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Транзисторные аппараты защиты и коммутации для авиационных систем распре-

деления энергии. – М.: Изд-во МАИ–ПРИНТ, 2009. – 188 с.

8. Резников С.Б., Бочаров В.В., Коняхин С.Ф., Соловьев И.Н., Ермилов Ю.В. Комбинированный электронно-механический аппарат защиты и коммутации для систем распределения постоянного повышенного напряжения. Практическая силовая электроника, № 47, 2012 г.

9. С.В. Аверин., Т.В. Анисимова., В.С. Коняхин, В.В. Крючков, Ю.Г. Следков Моделирование процессов в трехфазном транзисторном инверторе при возникновении межфазных коротких замыканий. Практическая силовая электроника, №3 (43), 2011 г., с. 21-25.

**Коняхин Сергей Федорович** – родился в 1959 году. В 1984 году окончил Московский Энергетический институт по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Кандидат технических наук. Защитил диссертацию на темк: «Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом». Опыт работы – 29 лет. В настоящее время работает главным конструктором систем преобразования электроэнергии ОАО «АЭРО-ЭЛЕКТРОМАШ», г. Москва. Имеет 114 печатных работ, в том числе 55 патентов и авторских свидетельств на изобретения и полезные модели.

**Резников Станислав Борисович** – родился в 1941 году. Окончил Московский авиационный институт. Доктор технических наук, профессор. В 2004 году защитил диссертацию на тему: «Обеспечение электроэнергетической совместимости транспортного электрооборудования с высоковольтным питанием». Опыт работы – 47 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института. Имеет 120 научных трудов, из них 90 изобретений и патентов.

**Бочаров Владимир Владимирович** – родился в 1939 году. Окончил Московский энергетический институт. Кандидат технических наук, доцент. В 1976 году защитил диссертацию

на тему: «Импульсные источники вторичного питания при работе от самолетной сети ограниченной мощности». Опыт работы – 53 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института. Имеет 90 научных трудов, из них 70 изобретений и патентов.

**Сыроежкин Евгений Викторович** – родился в 1948 году. В 1971 году окончил Горьковский государственный университет по специальности «Радиофизика». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. В 1980 году защитил диссертацию на тему: «Исследование динамических режимов работы электромеханических преобразователей с распределенными параметрами». Опыт работы – 42 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института. Имеет 65 печатных научных трудов и 5 авторских свидетельств.

**Харченко Игорь Александрович** – родился в 1958 году. Окончил Киевское высшее военное авиационное училище. В 1997 году окончил мехмат МГУ. Кандидат технических наук, доцент. В 2006 году защитил диссертацию на тему: «Формирование 3-х мерной модели местности». В настоящее время работает зам. нач. отдела Минобороны РФ и доцентом кафедры «Теоретическая электротехника» Московского авиационного института. Имеет 52 научных труда.

**Konyahin Sergey** – was born in 1959. In 1984 he graduated from Moscow Energy Institute, speciality is «Aircraft electrical equipments». He is a candidate of Engineering. He defended a thesis, the theme is: «Research and development of on-board transformer-rectifier devices with multi-channel conversion route». He has 29 year work experience. At present he works as the energy conversion systems chief designer in ОАО «AEROELEKTROMASH», Moscow. He has 114 printed works, including 55 patents and inventor's certificates.

**Reznikov Stanislav** – was born in 1941. He graduated from Moscow Aviation Institute. He is a Doctor of Technical Sciences, Professor. In 2004 he defended a thesis on «Ensuring the compatibility of transport electricity with high-voltage power.» His experience is 47 years. Currently he is a professor of the department «Theoretical electrical engineering» at Moscow Aviation Institute. He has 120 scientific publications, including 90 patents and inventions.

**Bocharov Vladimir** – was born in 1939. He graduated from Moscow Power Engineering Institute. He is a Candidate of Engineering Sciences, associate professor. In 1976 he defended a thesis on «Switching secondary power supplies using the airborne network of limited capacity.» He has 53 years' experience. Currently he works as an assistant Professor of the Department «Theoretical Electrical Engineering» at the Moscow Aviation Institute. He has 90 scientific papers, including 70 patents and inventions.

**Syroezhkin Evgeny** – was born in 1948. In 1971 he graduated from Gorky State University with a degree in «Radio Physics.» He is a candidate of Technical Sciences, Senior Researcher. In 1980 he defended a thesis «The study of dynamic operation modes of electromechanical converters with distributed parameters». He has 42 years' experience. Currently he is an assistant Professor of the Department «Electric power, electromechanical and biotechnical systems» at the Moscow Aviation Institute. He has 65 published scientific papers and five certificates of authorship.

**Kharchenko Igor** – was born in 1958. He graduated from Kiev Higher Military Aviation School. In 1997 he graduated from Moscow State University, mechanical-mathematical faculty. He is a candidate of Technical Sciences, associate professor. In 2006 he defended a thesis on «Formation of a three-dimensional terrain model.» At present he works as a deputy director of the Russian Defense Ministry and associate professor of the Department «Theoretical Electrical Engineering» at the Moscow Aviation Institute. He has 52 scientific papers.

# Эффективная схема управления системой охлаждения автомобильного двигателя

// The effective circuit of management of system of cooling of the automobile engine //

**Сарбаев В.И.**  
д.т.н., профессор,  
Московский государственный индустриальный университет, г. Москва

**Гармаш Ю.В.**  
к.т.н., профессор,  
Современный технический институт, г. Рязань

*Предложена инновационная система охлаждения автомобильного двигателя внутреннего сгорания с пропорциональным управлением по разности заданной и реальной температур охлаждающей жидкости.*

*Ключевые слова:* система охлаждения двигателя внутреннего сгорания, широтно-импульсная модуляция, вольтдобавка, пропорциональное регулирование, электродвигатель вентилятора системы охлаждения.

Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания – это совокупность устройств, обеспечивающих поддержание в требуемых пределах теплового состояния двигателя при различных режимах и условиях работы.

Температура влияет на процесс смесеобразования в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, а следовательно, на его коэффициент полезного действия, токсичность отработавших газов и ресурс работы [1, 2]. Очевидно, что она зависит от климатических условий, режима работы двигателя и условий его охлаждения. Обычно поддерживаемая температура охлаждающей жидкости должна находиться в пределах  $95 \pm 5^\circ\text{C}$  [1,2]. Если температура охлаждающей жид-

*The innovational system of cooling of the automobile engine of internal combustion with proportional management on a difference of the given and real temperatures of cooling liquid is offered.*

*Keywords:* system of cooling of the engine of internal combustion, width – pulse modulation, Increase of a voltage, proportional regulation, the electric motor of the fan of system of cooling.

кости  $102^\circ\text{C}$  – это уже аварийный режим [3]. Для ускоренного охлаждения радиатора применяют принудительный обдув вентилятором системы охлаждения. В автомобилях коммутация электродвигателя вентилятора системы охлаждения осуществляется автоматически при достижении границ заданного диапазона температуры двигателя. Электрическая схема стандартной системы охлаждения показана на рис. 1.

Для обеспечения автоматической регулиров-

ки применяют биметаллический выключатель 6, контакты которого замыкаются и размыкаются при заданных температурах. При замыкании контактов на обмотку электромагнитного реле 4 подается питание и в результате его срабатывания через контакты 5 включается электродвигатель 7 вентилятора системы охлаждения. После снижения температуры охлаждающей жидкости до температуры отпущения биметаллического выключателя 6 его контакты размыкаются и электромагнитное реле 4 отключает питание электродвигателя вентилятора [1,2,3]. Подобное построение схемы отличается простотой конструкции, однако имеет основной недостаток: электро-

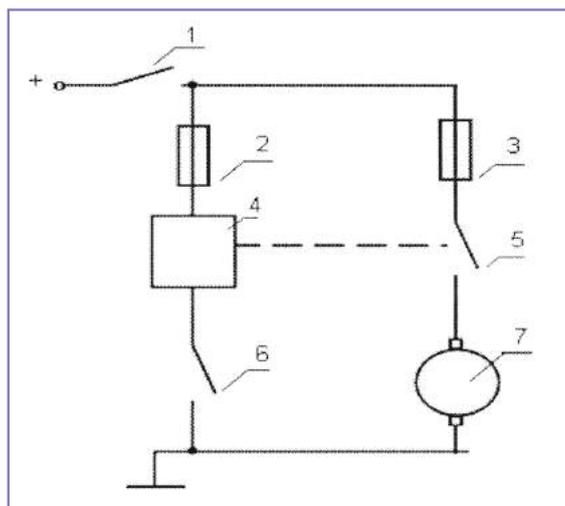


Рис. 1. Схема управления вентилятором системы охлаждения двигателя:

1 – выключатель зажигания, 2, 3 – предохранители, 4 – обмотка электромагнитного реле, 5 – контакты электромагнитного реле, 6 – термобиметаллический датчик, 7 – электродвигатель вентилятора.

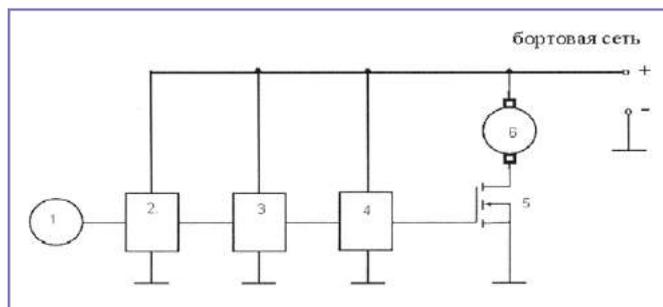


Рис. 2. Функциональная схема системы управления электродвигателем вентилятора охлаждения ДВС:  
1 – датчик температуры охлаждающей жидкости; 2 – усилитель; 3 – схема получения ШИМ сигнала; 4 – ключи управления; 5 – силовой ключ; 6 – электродвигатель вентилятора системы охлаждения.

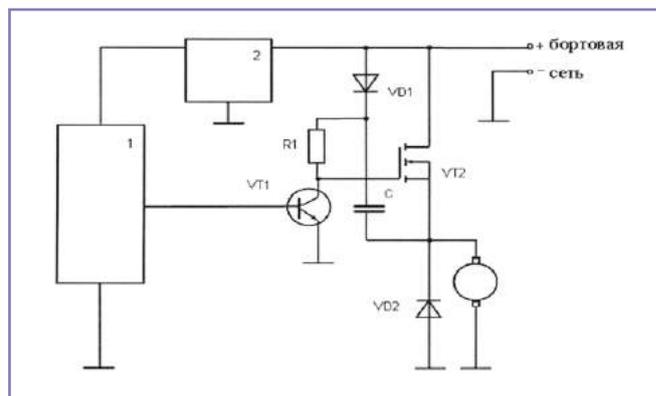


Рис. 3. Регулятор частоты вращения с электродвигателем, подключенным к корпусу:  
1 – ШИМ – модулятор, 2 – стабилизатор напряжения.

двигатель вентилятора дискретно включается на полную мощность и выключается при температурах, определяемых гистерезисом биметаллического датчика. Это обуславливает погрешности в установке температуры порядка 10 градусов [3], а подобные погрешности приводят как к избыточному перерасходу топлива, так и к снижению ресурса работы ДВС.

Таким образом, актуальной задачей является разработка инновационной схемы управления системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания с уменьшенной погрешностью поддержания температурного режима работы.

Данная проблема может быть решена с помощью широтно-импульсной модуляции. Способ получения ШИМ сигнала состоит в сравнении с помощью компаратора модулирующего напряжения с напряжением пилообразной формы. Если напряжение модулирующего сигнала превышает напряжение пилообразного напряжения, то на выходе компаратора устанавливается высокий уровень напряжения; если ситуация обратная – то низкий. Длительность импульса прямо пропорциональна модулирующему напряжению. Если период следования импульсов  $T$  остается постоянным, а длительность импульса  $t_u$  изменяется, то постоянная составляющая  $U_{cp}$  (среднее напряжение) всей последовательности импульсов тоже будет изменяться, и это переменное  $U_{cp}$  можно использовать для питания двигателя. Широтно-импульсная модуляция характеризуется коэффициентом заполнения

$$\gamma = t_u / T \quad (1)$$

где  $t_u$  и  $T = f^{-1}$  – длительность импульса управления и период повторения импульсов, с.

Как следует из этого выражения, коэффициент заполнения изменяется в пределах 0-1. Соответственно, среднее напряжение на потребителе, например, на двигателе постоянного тока (ДПТ)

$$U = U_{\text{бат}} \frac{t_u}{T} \quad (2)$$

где  $U_{\text{бат}}$  – напряжение бортовой сети автомобиля, В.

Следовательно, возможно плавное изменение скорости вращения якоря двигателя [4]. При этом следует иметь в виду, что электродвигатель – это механическая система с довольно большим моментом инерции. С повышением частоты двигатель вследствие инерционности на отдельные импульсы реагировать уже не успевает и начинает реагировать только на среднее значение напряжения, что наблюдается уже при частотах  $f > 100$  Гц. Следовательно, возможно применение способа широтно-импульсного регулирования. Он позволяет включать вентилятор с небольшой скоростью вращения еще до достижения двигателем рабочей температуры и увеличивать ее по мере прогрева ДВС. Такой способ реализует не только плавный выход на заданную температуру, но и более высокую точность ее поддержания. Функциональная схема подобного устройства представлена на рис. 2.

Устройство состоит из штатного датчика температуры, усилителя, схемы получения ШИМ сигнала, ключей управления, ключа и электродвигателя

вентилятора системы охлаждения. По мере прогрева двигателя внутреннего сгорания после его пуска температура охлаждающей жидкости увеличивается и сопротивление датчика 1 температуры уменьшается. Напряжение усилителя 2 после достижения некоторого порогового значения сопротивления начинает возрастать. При этом на выходе формирователя 3 ШИМ сигнала появляется последовательность импульсов, коэффициент заполнения которой увеличивается по мере возрастания температуры охлаждающей жидкости. Ключи управления 4 переключают силовой ключ 5 в соответствии с управляющим сигналом, вырабатываемым схемой 3 получения ШИМ сигнала. На электродвигателе 6 вентилятора системы охлаждения ДВС появляется последовательность импульсов, постоянная составляющая которой возрастает при увеличении температуры охлаждающей жидкости.

Однако, «нижний» по схеме вывод двигателя подключен, как обычно, к корпусу автомобиля. В таком случае коммутирующий элемент (полевой транзистор) должен быть подключен к верхнему выводу двигателя. Однако для надежного отпираания полевого транзистора нужно, чтобы напряжение на его затворе было выше напряжения на истоке на 7-8 В. Чтобы решить выявленную проблему, нужно получить некоторую «вольтодобавку» к напряжению бортовой сети. Решение, реализующее эту идею, представлено на рис. 3.

При закрытом полевом транзисторе конденсатор  $C$  заряжается до напряжения бортовой сети через диод

VD1 и электродвигатель вентилятора. При поступлении импульса от схемы I ШИМ через усилитель на транзисторе VT1 на затвор полевого транзистора VT2 он начинает открываться, напряжение на электродвигателе вентилятора (истоке транзистора VT2) возрастает и, следовательно, будет повышаться потенциал на нижнем по схеме выводе конденсатора. Напряжение на емкости не может измениться мгновенно, поэтому возрастает потенциал и на верхнем по схеме выводе С. Следовательно, напряжение на усилителе VT1 увеличивается практически до удвоенного напряжения бортовой сети. Диод VD1 предотвращает быстрый разряд С. Заряда конденсатора С хватает для такого «динамического» удержания VT2 в открытом состоянии во время действия импульса. После окончания импульса (транзистор VT2 закрыт) происходит подзаряд конденсатора С до напряжения бортовой сети.

### Выводы

Применение ШИМ по такой схеме позволяет существенно снизить мощность рассеивания на регулирующем силовом элементе схемы, особенно если в качестве такого элемента применить мощный полевой транзистор [5-8]. Устройство имеет небольшие размеры и может быть размещено около датчика температуры двигателя с целью снижения уровня наводок.

При открытом транзисторе мощность рассеивания на транзисторе невелика из-за небольшого напряжения, а при закрытом транзисторе – из-за малого протекающего через него тока. В случае коротких переднего и заднего фронтов импульсов (~10 нс) средняя мощность, рассеиваемая при переключениях, также невелика. И транзистор может работать с небольшим радиатором охлаждения.

Стоимость комплектующих элементов мала, а эффект от применения – значительный. Подключается устройство к электродвигателю системы охлаждения, сигнал управления поступает от штатного датчика температуры системы контрольно-измерительных приборов и не

требует внесения в штатную схему электрооборудования каких-либо изменений (штатная система охлаждения двигателя выполняет роль резервной).

При подобном построении системы охлаждения оптимизируется температурный режим ДВС автомобиля и улучшаются его эксплуатационные характеристики.

### Литература:

1. Данов, Б.А. Электрооборудование военной автомобильной техники [Текст]/Б.А. Данов – М.: Военное издательство, 1988. – 332 с.
2. Ютт, В.Е. Электрооборудование автомобилей [Текст]/ В.Е. Ютт – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.
3. Акимов, С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей [Текст]: Учебник для ВУЗов/ С.В. Акимов, Ю.П. Чижков – М.: ЗАО «КЖИ «Зарулем», 2004. – 384 с.
4. Общая электротехника [Текст]/Под ред. А. Т. Блажжина. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 591 с.
5. Гармаш Ю.В., Панов Д.А. Система охлаждения двигателя внутреннего сгорания с прямо пропорциональным управлением. 16-я междунар. научно-техническая конференция. Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. [Текст]: - Материалы конференции – Рязань, 2010. С. 201-203.
6. Система управления электровентилятором охлаждения двигателя внутреннего сгорания [Текст]: Пат. 2247036 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> В 60 К 11/02 F 01 Р 3/20 / Ясевич В.И., Карабанов С.М., Гармаш Ю.В., Соломенко А.Н., Андрук М.Ю.; Заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Рязанский завод металлокерамических приборов»; № 2003118956; заявл. 14.06.2003; опубл. 27.02.2005, Бюл. 6.
7. Система управления электровентилятором охлаждения радиатора двигателя с плавной регулировкой скорости вращения [Текст]: Пат. 2229985 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> В 60 К 11/02/ Карабанов С.М., Ясевич В.И., Соломенко А.Н., Гармаш Ю.В., Андрук М.Ю.; Заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Рязанский завод металлокерамических приборов»; № 2002103143; заявл. 04.02.2002; опубл. 27.10.2007, Бюл. 23.
8. Гармаш Ю.В., Сарбаев В.И. Управление электроприводом постоянного тока [Текст]: Lambert academic publishing. – GmbH Saarbrücken, Germany. ISBN: 978-3-659-15763-9. – 2012.

**Сарбаев Владимир Иванович** – родился в 1949 году. В 1971 году окончил Ленинградский институт водного транспорта по специальности «Экономика, организация и планирование водного транспорта». Доктор технических наук, профессор. В 2005 году защитил диссертацию по теме: «Научные основы обеспечения экологической безопасности автомобильного транспорта». Опыт работы – 41 год. В настоящее время работает заведующим кафедрой эксплуатации транспортных средств Московского государственного индустриального университета. Имеет 350 научных трудов, 1 патент. Награжден Медалью «В память 850-летия Москвы», почетный работник транспорта РФ.

**Гармаш Юрий Владимирович** – родился в 1957 году. В 1979 году окончил Рязанский государственный радиотехнический институт по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков». Кандидат технических наук, профессор. Защитил диссертацию по теме: «Релаксационная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниках». С 1984 года на преподавательской работе в ВУЗах. В настоящее время работает заведующим кафедрой энергетики НОУ ВПО Современный технический институт. Имеет около 200 научных и методических трудов, из них около 50 патентов.

**Sarbayev Vladimir** – was born in 1949. In 1971 he graduated from Leningrad Water Transport Institute, speciality is «Water transport economics, organization and planning». He is a Doctor of Engineering, a professor. In 2005 he defended a thesis; the theme is «Scientific basis of ensuring of automobile transport ecological safety». He has 41 year work experience. At present he works as a head of a vehicles operation chair of Moscow State Industrial University. He has 350 scientific works, 1 patent. He is awarded with Medal «In memory to 850 years of Moscow», honourable worker of Russian Federation transport.

**Garmash Yuriy** – was born in 1957. In 1979 he graduated from Ryazan State Institute of radio engineering, speciality is «Semiconductors and dielectrics physics». He is a candidate of Engineering, a professor. He defended a thesis; the theme is «Deep level relaxation spectroscopy in semiconductors». He worked as a lecturer in institutes of higher education since 1984. At present he works as a head of an energetics chair in NOU VPO Modern technical university. He has about 200 scientific and methodological works, including about 50 patents.

# Оценивание режимов тягового электроснабжения для управления напряжением и реактивной мощностью

// The evaluation of regimes of traction power supply for control voltage and reactive power //

Герман Л.А., д.т.н., профессор,  
Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),  
г. Нижний Новгород

Бакеев Е.Е., к.т.н., Кишкурно К.В.,  
Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва

*Предложен новый принцип управления напряжением и реактивной мощностью в тяговой сети переменного тока. Рассмотрены задачи оценивания режима тяговой сети. Приведена система сбора информации СДТП НИИЭФА – ЭНЕРГО и схема передачи оперативной информации о поездной ситуации.*

*Ключевые слова:* напряжение и реактивная мощность; принцип управления; оценивание режима; сбор и передача информации.

*There was proposed a new management discipline of voltage and reactive power in electric traction network. There were considered the evaluation problems of regimes of traction power supply. In this paper performs the information accumulation system – SDTP NIIIEFA – ENERGO and scheme of transfer of immediate information about train situation.*

*Keywords:* voltage and reactive power; management discipline; the evaluation of regime; the accumulation and transfer of information.

## Принцип управления напряжением и реактивной мощностью с использованием теории чувствительности

Основное требование к режиму напряжения и реактивной мощности в тяговой сети переменного тока заключается в обеспечении надежной и экономичной работы электроподвижного состава (ЭПС) и в целом системы электроснабжения. Для этого необходимо наиболее полно использовать и совершенствовать существующие способы регулирования напряжения с помощью компенсирующих установок и регулирующих устройств, а также продолжать разработки новых устройств повышения качества и экономичности электроэнергетики.

Сложность задач оптимизации и управления режимом тяговой сети обусловлена прежде всего тем, что они нелинейны относительно искомым переменных. Для решения подобных задач в электроэнергетических системах интенсивно развиваются методы, основанные на теории чувствительности [1, 2], которые позволяют в явной форме получить зависимость в процессе оптимизации контролируемых параметров режима от оптимизируемых переменных. При таком подходе непосредственные расчеты выполняются не в абсолютных величинах, а в их отклонениях от некоторого первоначального (исходного) режима, заранее рассчитанного известными методами. В этом случае могут быть полу-

чены линейные зависимости между отклонениями функций и отклонениями искомым переменных. Методы теории чувствительности позволяют решать задачи вида «Что будет, если...». Именно в таких расчетах имеется наибольшая потребность в практике. Принимая решения, надо оценить возможные последствия, для этого нужна серия вариантных расчетов.

Линеаризация соответствующих функций  $F$  зависимых (переменных) параметров (функций напряжения, потерь мощности), приведенных затрат и т.д. в зависимости от оптимизируемых переменных ( $\Pi$ ) в отклонениях от некоторого начального режима осуществляется с помощью разложения Тейлора. Тогда линейное приближение отклонения указанных функций имеет вид в матричной форме

$$\Delta F = S_n \Delta \Pi \quad (1)$$

где  $\Delta F$  – вектор-столбец отклонений зависимых параметров (размерность  $M \times 1$ );

$\Delta \Pi$  – вектор-столбец отклонений оптимизируемых переменных (размерность  $n \times 1$ );

$S_n$  – матрица чувствительности изменений зависимых параметров режима сети к изменению оптимизируемых переменных (размерность  $M \times n$ ).

Матрица чувствительности определяется как матрица частных производных [1]

$$S_n = \frac{\partial F}{\partial \Pi} \rightarrow \Delta F = \frac{\partial F}{\partial \Pi} \Delta \Pi \quad (2)$$

Расчет матриц чувствительности стал возможным после разработки метода совместного расчета систем

тягового и внешнего электроснабжения [3].

Абсолютное значение линеаризованной функции равно

$$F = F_0 + Sn\Delta\Pi \quad (3)$$

Где  $F_0$  – вектор-столбец зависимых параметров в исходном режим.

Применение методов и алгоритмов теории чувствительности позволяет определить чувствительность режима системы тягового электроснабжения к изменению регулируемых параметров, определить количественные показатели, характеризующие чувствительность исследуемой системы к этим вариациям. Эффективность применения методов теории чувствительности для задачи управления режимом электроэнергетической системы по напряжению и реактивной мощности показана в работе [1], что целесообразно использовать и для системы тягового электроснабжения.

Применительно к системе тягового электроснабжения основные параметры режима: значения напряжения, тока, коэффициента реактивной мощности, топология сети и её сопротивляемость, коэффициенты «п» трансформации силовых трансформаторов и токи установок поперечной емкостной компенсации КУ в рассматриваемый момент, потери мощности в элементах тягового электроснабжения, характеристики сетей системы внешнего электроснабжения и т.д. В качестве оптимизируемых параметров могут быть: коэффициенты трансформации «п», ток КУ, параметры УПК, управляющие коммутационные аппараты и т.д.

В общем случае необходимо контролировать параметры режима по участку электроснабжения с несколькими подстанциями, число которых определяется заранее расчетным путём.

Зная состояние системы в данный момент времени с использованием выражения (3), можно определить измененные параметры системы. В этом случае по специально разработанным алгоритмам определяются оптимальные значения оптимизируемых параметров. Таким образом формируется многокритериальная оптимизационная задача управлением режимом: требуется нормализовать уровни напряжения, загрузку трансформаторов,

коэффициент реактивной мощности, снизить уравнильные токи, потери мощности и т.д.

На начальном этапе её решения следует определить параметры исходного режима.

Цель статьи – наметить пути формирования и организацию системы сбора информации для оценивания параметров текущего режима для его оптимизации.

### Задачи оценивания режима

Для управления режимами необходимо иметь надежную и достаточную по объему информацию. Часть данных измеряется, но чаще всего этих данных недостаточно, чтобы сформировать алгоритм управления системой. Поэтому дополнительно к измеренным данным необходимо использовать накопленный статистический материал, который позволяет выявить зависимость между отдельными параметрами.

Сбор данных для статистики осуществляется в автоматическом режиме методом циклического опроса устройств телемеханики:

- положение переключаемых объектов по каналам ТС;
- измерение напряжений и токов по каналам ТИ.

О текущем состоянии системы тягового электроснабжения обычно судят по данным телеизмерений, в качестве которых выступают передаваемые по телеканалам от соответствующих датчиков сведения о значениях параметров режима: токов и напряжений.

Контроль текущего состояния тяговых подстанций и тяговой сети выполняется по элементам с заданной нормативными документами периодичностью или непрерывно. В системе диагностики должны быть предусмотрены датчики и устройства контроля, устанавливаемые в оборудование тяговых подстанций, постов секционирования, контактной сети и в вагонах-лабораториях тяговой сети, на высоковольтных линиях автоблокировки, у потребителей, связанных с движением поездов на диспетчерском пункте. Система диагностики должна обеспечивать систематический контроль показателей текущего состояния; ав-

томатический сбор и обработку этих показателей; сигнализацию энергодиспетчеру в случае нарушения допустимых норм [4].

Ошибки телеизмерений возникают из-за ошибок датчиков и погрешностей аналого-цифрового преобразования [5]. Повышение точности, достоверности и надежности получения информации необходимо для оценивания состояния тяговой сети. Термин оценивания используется в статистическом смысле. Он означает, что полученный в результате измерений и накопленного статистического материала параметр будет его статистической оценкой, отражающей истинное значение параметра состояния системы, то есть оценивание – это получение информации о режимах тяговой сети по измерениям и статистике.

В общем случае система оценивания решает следующие задачи [6]:

1. Обработка контрольных измерений с целью их сбалансированности (уравновешенности) в случаях появления ошибок измерений. Дополнительно определяются соотношения между отдельными параметрами системы, что позволяет при необходимости находить по активной нагрузке ее реактивную составляющую.

2. Прогнозные значения параметров, по которым отсутствуют телеизмерения. Прогноз используют в качестве псевдоизмерений. Модель прогнозирования должна иметь адаптивную подстройку при сличении прогнозного значения с наблюдаемым. Для прогнозирования выстраиваются корреляционные связи между параметром и временем.

3. Псевдоизмерения. Те же значения нагрузки можно получить как псевдоизмерения, используя корреляцию нагрузки участка электроснабжения с общей нагрузкой. Прогнозное значение может давать большую погрешность, чем корреляция. В расчетах следует использовать среднее значение между прогнозом и псевдоизмерением. При осреднении можно учитывать разные веса прогноза и псевдоизмерения в зависимости от их достоверности. Модель псевдоизмерений может иметь адаптивную подстройку.

4. Формирование расчетной схемы по данным телесигнализации. По этим данным коммутационной аппаратуры

(положение переключаемых объектов по каналам ТС) формируется расчетная схема электрических соединений. В схеме могут наблюдаться «темные пятна» – участки, не обеспеченные достаточным числом устройств телемеханики или вышедшими из строя.

5. Расчет и оптимизация режима. После получения всей необходимой информации могут быть проведены предварительные расчеты и оптимизация режима. Для этого используют стандартные или специально созданные методы расчета режима. Рассчитанный и полностью сбалансированный режим можно сохранить в памяти компьютера и использовать впоследствии как опорный режим системы. Его применение поможет отбраковать некачественные измерения.

В организации оценки параметров целесообразно использовать при управлении режимами кроме телеизмерений всю доступную для управления информацию.

Задача статического оценивания состояния позволяет использовать информацию о взаимосвязях между параметрами для минимизации ошибок в оценках измерений и повышения надежности исходной информации.

При рассмотрении последовательных моментов времени появляются дополнительные возможности для увеличения достоверности получаемой информации, что приводит к так называемому динамическому оцениванию состояния.

Если рассматривается один момент времени, когда все измерения получены одновременно, то говорят о статическом оценивании состояния. Если же под измерением понимают получение векторного набора графиков изменения контролируемых величин во времени, то можно разбить весь рассматриваемый период на  $n$  интервалов времени, считая в каждом из них параметры режима неизменными, и  $n$  раз решить задачу получения статической оценки состояния. Но такой подход действует только в том случае, когда между параметрами режима или их измерениями в отдельные интервалы времени нет никакой физической или статистической связи.

Оценивание состояния при наличии уравнений динамики объекта

будет называться динамическим. Как уже указывалось, можно свести задачу динамического оценивания к задаче статического оценивания, увеличив размерность в  $n$  раз и добавив к уравнениям, связывающим параметры в отдельные интервалы времени, уравнения динамики. Отсюда ясны значимость и общность задачи статического оценивания. Но в таком сведении динамической задачи к статической увеличенного размера есть существенный недостаток. Суть его сводится к тому, что после решения задачи для  $n$  интервалов времени необходимо заново рассматривать все предшествующие интервалы для  $(n+1)$ -го интервала, и размерность задачи линейно растет с течением времени. Естественно, это неэффективно, поэтому важнейшей особенностью динамической задачи следует считать необходимость использования результатов оценивания, полученных в предыдущие моменты времени. При этом строятся так называемые рекуррентные соотношения, в которых оценки  $n$ -ого момента используются при получении оценок в  $(n+1)$ -й момент времени.

Динамическое оценивание может рассматриваться в трех временных аспектах: может производиться оценивание параметров режима в текущий момент времени – такая задача называется задачей фильтрации; полученные измерения могут использоваться для получения оценок в предстоящие моменты времени – задача предсказания, прогноза; полученные измерения позволяют уточнить полученные ранее оценки, в частности, уточнить начальное состояние объекта – задача сглаживания.

Основой информационного обеспечения, как и для АСУЭ, используется база данных – это централизованно формируемые и однообразно описываемые массивы данных, обслуживающие все задачи системы управления, которые могут решаться в диалоговом режиме. Базы данных позволяют централизовать информацию, получаемую независимо от разных источников, обеспечивают многократное использование информации при ее однократном вводе, сокращают время доступа к информации без изменения обслуживающих программ,

допускают использование данных из различных массивов в различных сочетаниях и т.п.

Базу данных необходимо заполнять измеренными и рассчитанными параметрами тяговой подстанции, участков, как предшествующих тяговой подстанции, на которой происходит регулирование, так и последующих: мощность, нагрузку, напряжение в контролируемых точках участка электроснабжения (узлах), уравнивательные токи, протяженность участков, материал проводов тяговой сети, уставки срабатывания устройств регулирования, коэффициенты трансформации трансформаторов с РПН, потоки активной и реактивной мощности, а также токи контролируемых участков, реактивные мощности генерируемых источников, в которых задано напряжение, и т.п.

### Система сбора и хранения информации СДТП НИИЭФА-ЭНЕРГО

Для характеристики текущего состояния режима в настоящее время целесообразно использовать как базовый вариант разработанную в НИИЭФА-ЭНЕРГО систему диагностирования оборудования тяговых подстанций (СДТП), которая выполняет следующие операции:

- сбор, обработка и накопление измерительной и диагностической информации по оборудованию ТП;
- архивация и хранение измерительной и диагностической информации;
- представление измерительной и диагностической информации пользователям СДТП.

Архитектура и принципы реализации такой системы приведены в рекомендациях Протокола МЭК 61850, они реализуются как в зарубежных, так и в отечественных энергосистемах. Один из возможных вариантов функциональной схемы СДТП, соответствующей перечисленным требованиям, приведен на рис. 1 [7].

СДТП является иерархической распределенной системой, состоящей из аппаратуры сбора измерительной и диагностической информации на уровне объектов диагностирования (нижний уровень), аппаратуры сбора измерительной и диагностической информации на уровне ТП (средний уро-

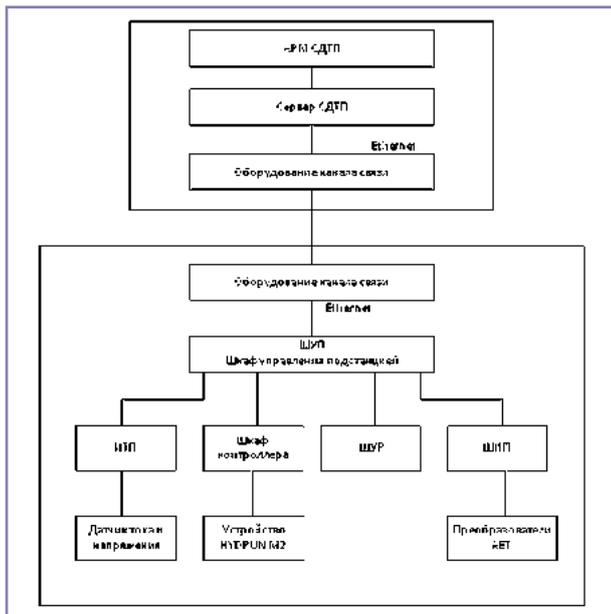


Рис. 1. Функциональная схема СДТП:  
 ШИП – шкаф измерительных преобразователей;  
 ШУП – шкаф управления подстанцией;  
 ШУР – шкаф управления реле;  
 ИТП – интеллектуальные терминалы присоединения.

вень), сервера системы и рабочего места пользователя (верхний уровень).

Структурная схема СДТП для участка, состоявшего из двух энергодиспетчерских кругов, приведена на рис. 2.

При отсутствии высокоскоростного канала связи для передачи диагностической информации на верхний уровень используется канал передачи сигналов ТС, но нужно учитывать, что на верхний уровень может быть передана только статусная информация. Нижний уровень СДТП построен на базе интеллектуальных терминалов

Контроль параметров электрических цепей трехфазного тока в цепях РУ 110 (220) кВ обеспечивает шкаф измерительных преобразователей.

Средний уровень СДТП включен в конструкцию шкафа управления подстанцией (ШУП), на этом уровне осуществляется сбор телеизмерительной и диагностической информации с интеллектуальных терминалов, а также ее передача по цифровому каналу на верхний уровень СДТП.

Верхний уровень СДТП включает в себя диагностический сервер (один или несколько), центральный сервер

присоединений (ЦЗА-27,5 кВ, ЦЗАФ-3,3 кВ, ИнТер, БМРЗ и др.), к которым подключаются первичные преобразователи и устройства первичной регистрации. В состав этих устройств входят:

- измерительные трансформаторы тока и напряжения на вводах трансформаторов (понижающих, тяговых);
- измерительные трансформаторы тока и напряжения на присоединениях РУ 27.5 кВ, РУ 10 кВ и РУ 10 кВ, ВЛ АБ, РУ 3,3 кВ;
- реле системы сигнализации защиты и автоматики.

и необходимое количество АРМ диагностики оборудования.

Для пользователя СДТП требуется разработать АРМ диагностики оборудования, обеспечивающие представление измерительной и диагностической информации на экране мониторов. На среднем и нижнем уровнях пользователю организован доступ к измерительной и диагностической информации соответствующего уровня [7].

Таким образом, реализация системы диагностики и управления тяговых подстанций по разработкам НИИ-ЭФА-ЭНЕРГО позволит не только получить данные для перехода на их обслуживание по фактическому остаточному ресурсу, но и для наполнения базы данных в системе управления режимами тягового электроснабжения по напряжению и реактивной мощности.

### Структурная схема передачи оперативной информации

В настоящее время на дорогах осуществляется переход от традиционной системы телемеханики МСТ-95 к новой цифровой системе АМТ, которая работает по общей цифровой сети СПД ОТН, которая обслуживает все предприятия инфраструктуры ОАО РЖД. Соединение с сетью типа INTRANET позволяет помимо телеизмерений получать дополнительную информацию о поездной ситуации из системы АСОУП на участке и прогнозировать её ближайшее развитие. Структурная схема представлена на рис. 3.

Здесь показан один из вариантов подключения телемеханики АМТ к оптоволоконной линии дорожной связи SI через модемы xDSL и устройства доступа к каналам G.703 Zelah, которые входят в состав аппаратуры АМТ. Передача данных в цифровом потоке E1 осуществляется со скоростью 2 Мбит/сек.

На энергодиспетчерском пункте наряду с АРМ ЭЧЦ следует установить рабочую станцию, которая будет обрабатывать как данные ТИ, так и данные о поездной ситуации, а результаты решений воплощать в команды ТУ.

В этом случае имеется возможность построения адаптивной системы регулирования режимов тягового электроснабжения.

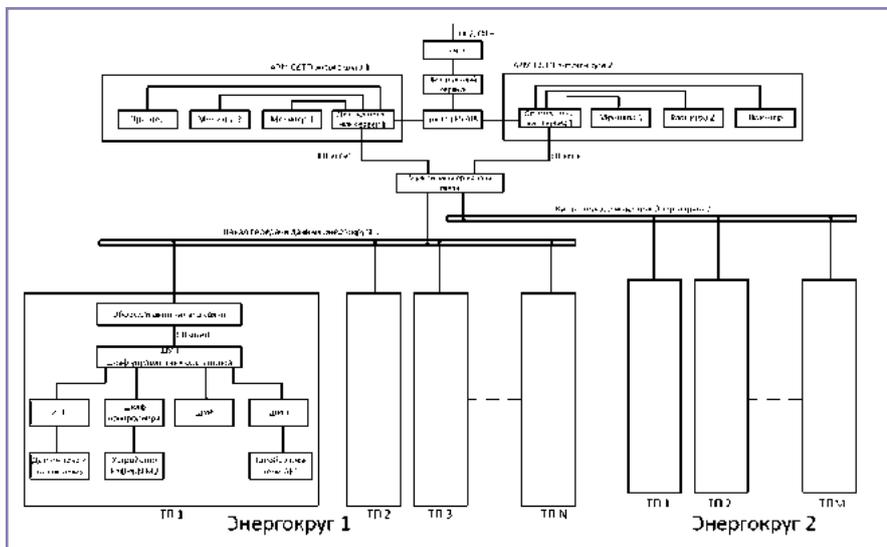


Рис. 2. Структурная схема СДТП.

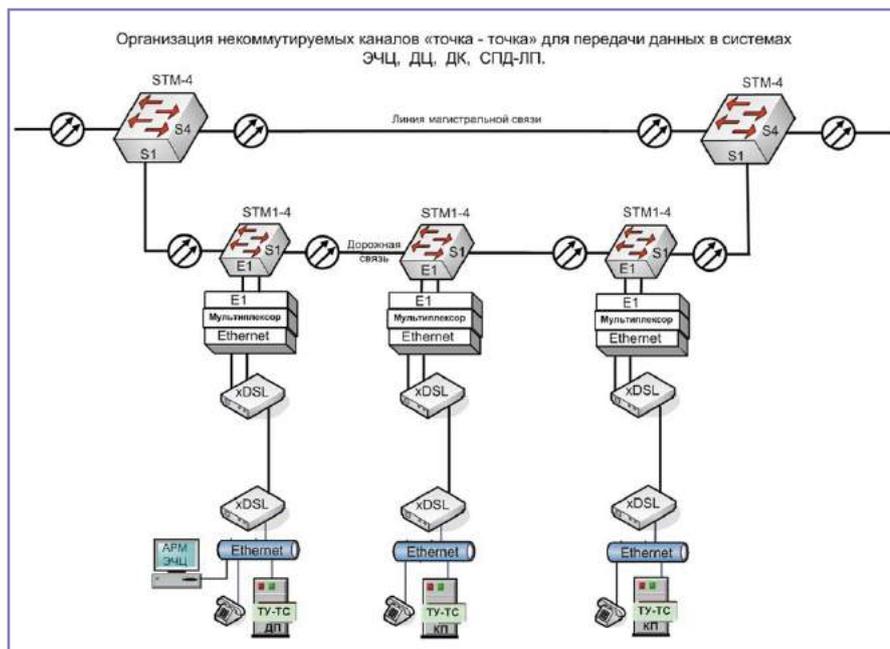


Рис. 3. Структурная схема передачи оперативной информации по цифровой сети СПД ОТН.

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Новые принципы управления напряжением и реактивной мощностью с использованием теории чувствительности позволяют наиболее полно использовать существующие способы регулирования напряжения с помощью компенсирующих установок и регулирующих устройств для обеспечения надежной и экономичной работы электроподвижного состава (ЭПС) и в целом системы электроснабжения.

2. Оценивание режима даст возможность получения информации о режимах тяговой сети по измерениям и статистике, что позволит повысить точность, достоверность и надежность получения информации.

3. Разработки СДТП НИИЭФА-ЭНЕРГО с использованием новых систем телемеханики и информационных возможностей цифровой сети СПД ОТН могут стать базовым вариантом для реализации новых принципов управления напряжением и реактивной мощностью тяговой сети переменного тока железных дорог.

4. Использование оперативной информации наряду с телеизмерениями создаст предпосылки для создания адаптивной системы управления режимами тягового электроснабжения.

#### Литература:

1. Веников В.А., Головицын В.И., Лисеев М.С. Вопросы управления режимами электроэнергетических систем // Электричество, 1972 – №10. С. 1-6.
2. Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления.. М.: Энергоатомиздат, 1990 – 440 с.
3. Герман Л.А. Тензорный метод расчета системы электроснабжения железных дорог.// Вестник ВНИИЖТ.– 1988 №2, С. 24–26.
4. Мирошниченко Р.И., Сухопрудский Н.Д., Палей Д.А. Основные принципы автоматической системы контроля учета. Труды ВНИИЖТа №580, М.: «Транспорт», 1977 – 158 с.
5. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем – Наука, 1976. – 220 с.
6. Филиппова Т.А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем. Учебник. Новосибирск Изд-во НГТУ, 2005 – 300 с.
7. Грачев В.Ф., Кондаков А.Д., Саморуков А.В. Комплексный подход к задаче диагностирования оборудования и управления тяговыми подстанциями постоянного и переменного тока.// Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте. Материалы пятого международного симпозиума «Элтранс-2009», с. 376 – 386.

**Герман Леонид Абрамович** – родился в 1937 году. Окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик» (1959 г.). Защитил докторскую диссертацию на тему: «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрификации и

электроснабжения» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения. Является членом-корреспондентом Российской Академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

**Бакеев Евгений Евгеньевич** – родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Опыт работы – свыше 52 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электроснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения. Имеет 60 печатных работ, из них 19 авторских свидетельств СССР на изобретения. Награжден Медалью «Изобретатель СССР», медалями ВДНХ.

**Кишкурно Константин Вячеславович** – родился в 1991 году. В 2012 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Электроснабжение железных дорог». В настоящее время является аспирантом кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения. Имеет 2 статьи, 1 патент.

**German Leonid** – was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty «Engineer routes – electrician» (1959). He has defended the dissertation by the theme: «Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation». He is a Doctor of Technical Sciences, Professor of dept. «Electrification and Utilities» at The Nizhny Novgorod branch of the Russian State University of transport communications. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. Has 2 government awards.

**Bakeyev Yevgeniy** – was born in 1937. In 1959 he graduated from Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT), speciality is «Railway engineer – electrician». He is a candidate of Engineering, senior staff scientist. He has more than 52 year work experience. At present he works as an associate professor of « Electric railway roads power supply» chair of Moscow state railway university. He has 60 printed works, including 19 inventor's certificates of USSR. He is awarded with medal «Inventor of USSR», medals of VDNH.

**Kishkurno Konstantin** – was born in 1991. In 2012 he graduated from Moscow Institute of Transport Engineers (MIIT), speciality is «Railway roads power supply». At present he is an advanced student of « Electric railway roads power supply» chair of Moscow state railway university. He has 2 articles, 1 patent.

# Электродинамическое моделирование влияния расположения антенн на диаграммы направленности

// Electromagnetic simulation of influence of antenna location on radiation patterns //

**Антонов А.С., д.ф.-м.н., профессор,  
ЗАО «МЭК», г. Москва**

**Султан-Заде Т.Т., Шкляев А.А.,  
ЗАО «Импеданс», г. Москва**

*В работе расчетными и экспериментальными методами исследовано влияние местоположения антенн на индикатрисы излучения для типичного измерительного устройства, используемого для мониторинга линий электропередачи (ЛЭП).*

*Ключевые слова:* мониторинг в ЛЭП, беспроводная связь, СВЧ-антенна, индикатриса излучения.

Системы мониторинга в линиях электропередач предусматривают беспроводную связь между измерительными устройствами, устанавливаемыми непосредственно на токонесущих проводах и диспетчерскими пунктами. Кроме того, необходим канал связи для технического обслуживания в непосредственной близости от устройства. В дополнение, как правило, измерительное устройство содержит навигационную систему, одним из основных назначений которой является привязка измерений к абсолютному времени. Эти виды связи обеспечиваются на стандартных частотах GSM (900, 1800 МГц), ZigBee (868 МГц), GPS/ГЛОНАСС (1575 МГц). К каждому виду связи накладываются условия к индикатрисе и поляризации излучения.

Одна из проблем обеспечения функционирования систем связи обусловлена размещением антенн внутри измерительного устройства, которое, к тому же, имеет внешнее токопро-

*In the paper, by numerical and experimental methods influence of antennas location on radiation patterns for a concrete example of the measuring device is studied.*

*Keywords:* monitoring power line, wireless, microwave antenna, radiation indicatrix.

водящее покрытие для выравнивания потенциала. Материал корпуса измерительного устройства, в котором сосредоточены металлические платы, экраны и т.п., геометрические параметры и покрытие, влияют на индикатрисы излучения. Направленность излучения на разных видах связи влияет на качество и дальность приема-передачи.

В данной работе расчетными и экспериментальными методами исследовано влияние расположения антенн на индикатрисы излучения выбранных стандартов для разрабатываемого универсального многофункционального измерителя параметров ЛЭП (далее УМИПЛ).

## Постановка эксперимента

Для моделирования был изготовлен макет УМИПЛ, в котором можно было размещать различные конфигурации антенных устройств в соответствии с условиями приёма-передачи для разных стандартов. Макет изго-

товлен из композитного материала в реальном масштабе. Трехслойные пластины толщиной 1 см, образующие конструкцию, содержали тонкие поверхностные слои из стеклопластика, разделенные наполнителем с малой ( $\epsilon = 2$ ) диэлектрической проницаемостью [1]. Конструкция содержала также две металлические пластины в форме диска, которые моделировали экраны трансформаторов. Длина и радиус цилиндра устройства составляли 28 см и 14 см соответственно. Расстояние между экранами варьировалось, оставаясь вблизи 14 см. На внутреннюю поверхность макета на определенном этапе эксперимента наносилось графитовое покрытие определенной толщины для выравнивания статического потенциала.

Дипольные антенны с генератором размещались в заданных положениях внутри макета. В эксперименте можно было использовать четыре дипольные антенны с соответствующими генераторами частот 868 МГц, 900 МГц, 1.575 ГГц и 1.8 ГГц

Все конфигурации предварительно рассчитывались на программном пакете FEKO [2]. Результаты расчета сравнивались с экспериментально полученными индикатрисами. Подробно проведение эксперимента описано в [3].

## Диаграммы направленности

Для приема спутникового сигнала GPS/ГЛОНАСС ось дипольной антенны ориентировалась параллельно оси измерительного устройства. Этим обеспечивается оптимальная «видимость» спутников в вертикальном на-

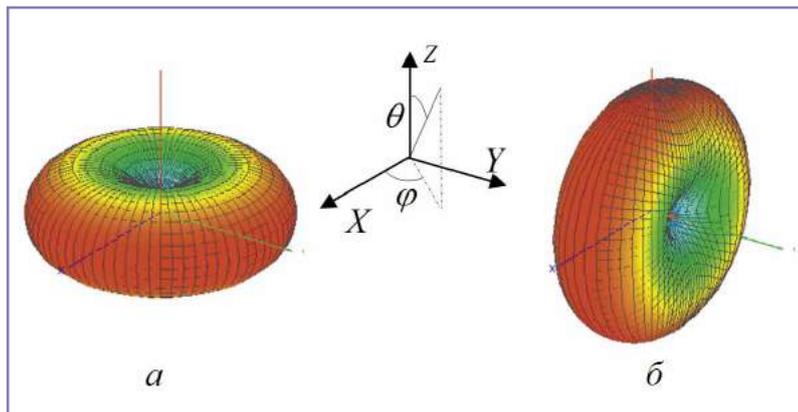


Рис. 1. Диаграммы направленности дипольной антенны и направления осей.

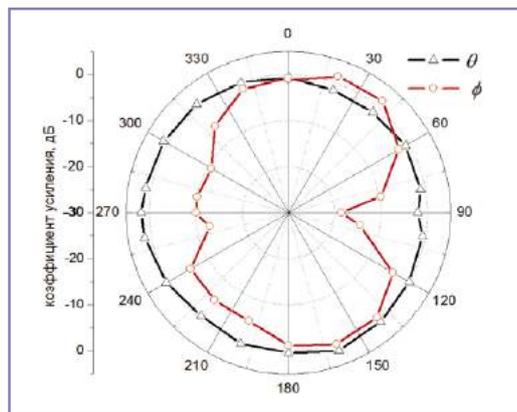


Рис. 2. Диаграммы направленности экспериментальной антенны на частоте 1.575 ГГц (GPS/ГЛОНАСС).

правлении (ось Z на рис. 1). Заметим, что ось измерительного устройства горизонтальна.

В случаях GSM и ZigBee ось антенн направлена вдоль радиуса УМИПЛ. В этом случае невозмущенная диаграмма направленности имеет форму тора с большой плоскостью в горизонтальном направлении (плоскость X-Y на рис. 1).

На рис. 2 показаны исходные круговые диаграммы направленности одной из применяемых антенн, снятые в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Характер диаграмм показывает, что индикатриса в основном соответствует приведенной на рис. 1 расчетной. Небольшое отличие связано с несимметричностью антенны, отличающей ее от классической дипольной. Можно утверждать, что погрешности измерений, связанные с отражением от окружающих стен, а также с возможной круговой поляризацией излучения антенны, невелики.

### GPS/ГЛОНАСС (1575 МГц)

Наиболее просто решается проблема размещения антенны внутри корпуса измерительного устройства для спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. В этом случае прием сигнала обеспечивается в вертикальной плоскости, а поляризация принимаемого сигнала круговая [4]. Вектор Пойнтинга близок вертикали, поэтому влияние экранов в УМИПЛ минимально.

На рис. 3а и 3б показаны измеренные диаграммы при размещении антенны вблизи внутренней поверхности устройства с дипольной осью, направ-

ленной вдоль его оси. Видно, что в направлении зенита ( $\theta \approx 0$ ) экраны, как и ожидалось, практически не искажают диаграмму.

Расчеты, сделанные на программном продукте FEKO, качественно совпадают с экспериментом. На рис. 4а и 4б показаны результаты расчета, которые демонстрируют направленность диаграммы в широком телесном угле вокруг оси Z (вертикальное направление). Экраны и графитовое покрытие

хотя и влияют на диаграммы, но это влияние минимально в соответствии со сделанными в начале параграфа предположениями.

### ZigBee, GSM (868, 900, 1800 МГц)

Для этих стандартов поляризация антенн должна быть направлена поперек оси устройства, чтобы обеспечивать максимальную видимость в горизонтальном направлении – в пло-

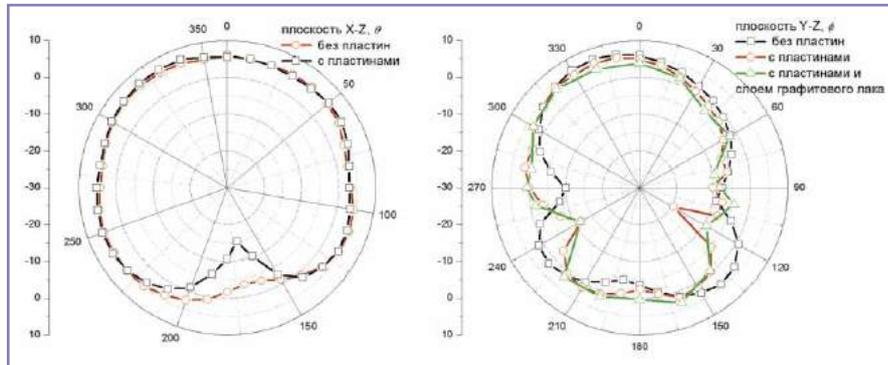


Рис. 3. Измеренные диаграммы направленности для случая антенн на частоте 1.575 ГГц.

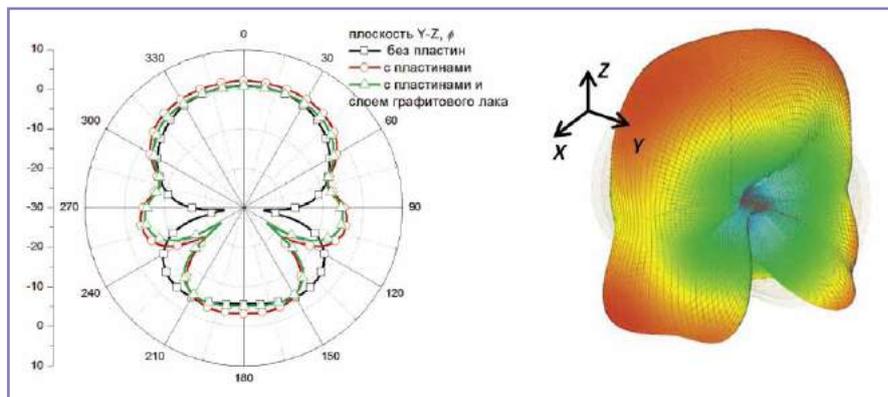


Рис. 4. Рассчитанные FEKO диаграммы на частоте 1.575 ГГц: а) – круговая, в плоскости Y-Z; б) – полная диаграмма.

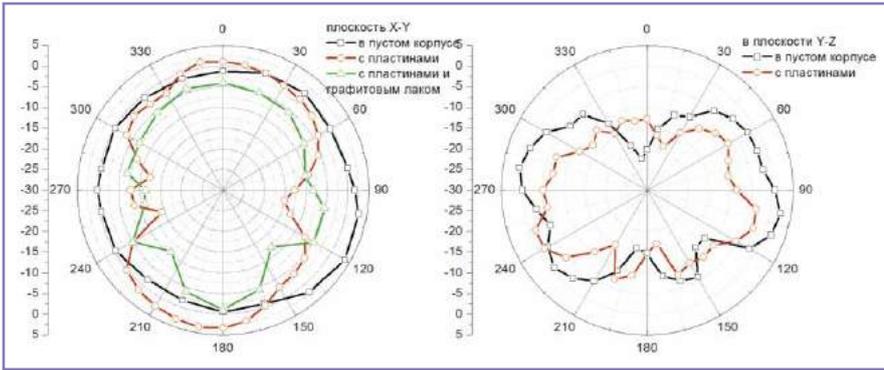


Рис. 5. Измеренные диаграммы направленности в плоскостях X-Y и Y-Z для антенны, работающей на частоте 1.8 ГГц.

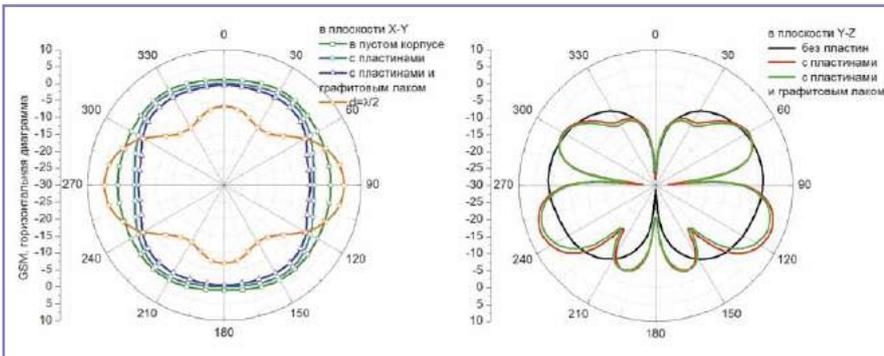


Рис. 6. Рассчитанные программой FEKO диаграммы направленности для условий рис. 7.

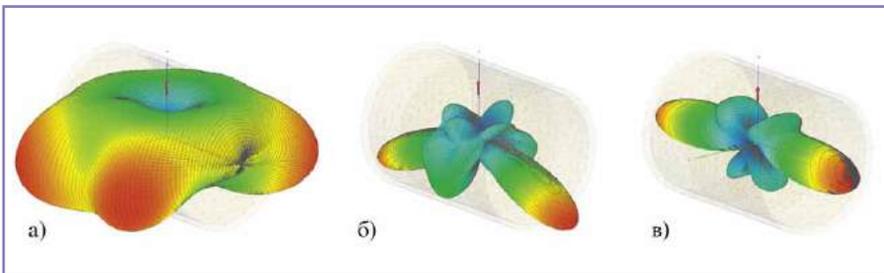


Рис. 7. Излучение антенны на частоте 1.8 ГГц в дальней зоне:  
а) антенны установлены в корпусе устройства без пластин-экранов;  
б) с экранами, с расстоянием между пластинами 14 см ( $0.8 \lambda/2$ );  
в) с экранами, с расстоянием между пластинами 16.7 см ( $\lambda/2$ ).

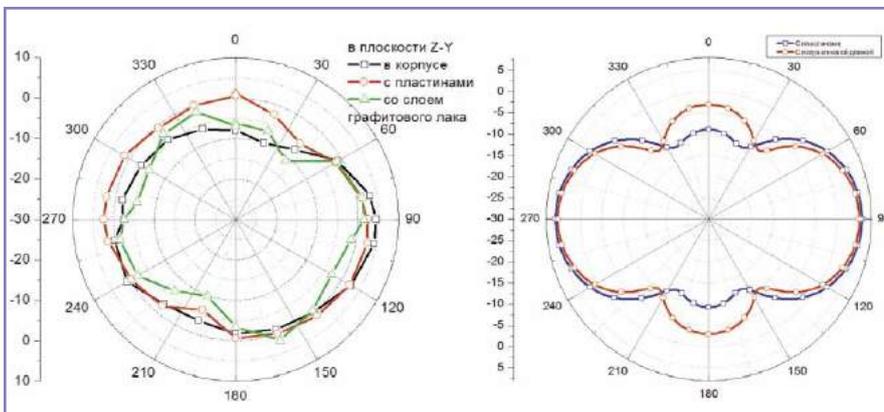


Рис. 8. Измеренные а) и рассчитанные б) диаграммы на частоте 868 МГц в плоскости Z-Y.

кости X-Y. Здесь роль металлических экранов, представляющих собой диски с осью, совпадающей с осью устройства, становится значительной, так как напряженность электрического поля излучения параллельна плоскости проводящих экранов.

На рис. 5 показаны измеренные диаграммы направленности в двух ортогональных плоскостях X-Y и Y-Z для антенны, работающей на частоте 1.8 ГГц. Представлены исходные диаграммы, полученные при размещении радиально ориентированной антенны с центром на половине радиуса корпуса, в отсутствии экранов, с двумя экранами с расстоянием 14 см между ними, а также с покрытием внутренней поверхности цилиндра устройства проводящей графитовой краской. На рис. 6 показаны диаграммы, рассчитанные программой FEKO для условий, в которых проводился эксперимент. Видно качественное совпадение расчета и эксперимента. Более наглядное представление дают картинки излучения в дальней зоне на рис. 7. Видно, что экраны существенно меняют диаграмму, образуя «мертвые зоны» видимости. Так как центр дипольной антенны смещен относительно оси симметрии устройства, лепестки ориентированы под углом к горизонту, что уменьшает дальность связи. Однако если расстояние между экранами близко к полуволновому, диаграммы становятся более симметричными, при этом существенно, примерно на 5дБ возрастает коэффициент усиления в осевом направлении (рис. 6)

Представленные результаты для частоты 1.8 ГГц в главных чертах характерны для частот 868 и 900 МГц. Этому есть простое объяснение. Оно

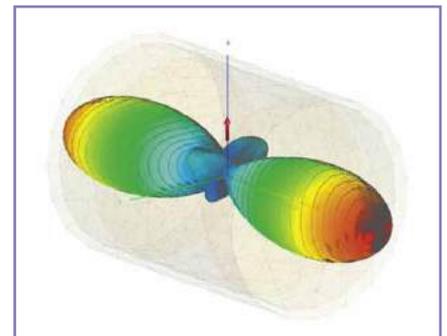


Рис. 9. Рассчитанное на FEKO излучение антенны на частоте 868 МГц в дальней зоне.

состоит в том, что все резонансные и интерференционные проявления следуют из примерной кратности длины волны на частотах 1800 МГц, 900 МГц и близкой к последней 868 МГц частот. Как следствие, в осевом направлении для этих частот также происходит усиление, что демонстрируют измеренные и расчетные диаграммы на рис. 8а и 8б и рис. 9.

### Выводы

Результаты моделирования показали, что главным условием размещения антенн в конструкции является соблюдение необходимой поляризации в соответствии с требованиями выбранных стандартов. Экраны внутри конструкции могут не ухудшать приемопередачу в нужных направлениях для оптимальных мест размещения антенн. Более того, для частот связи стандартов ZigBee и GSM наблюдалось усиление сигнала в направлении оси устройства, то есть в необходимом направлении.

При расчетах и проектировании устройств, функционирующих в условиях плохого приема, например, при работе на максимальной дальности необходимо учитывать взаимное расположение элементов конструкции устройства, в котором располагаются антенны. Наиболее эффективным методом учета влияния элементов конструкции на диаграммы направленности антенн является компьютерное моделирование с последующей экспериментальной проверкой полученных результатов.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки. Государственный контракт от «10» мая 2012 г. № 12.527.11.0002. Шифр «2012-2.7-12-527-0006-011».

### Литература:

1. И.Г. Гуртовник, В.И. Соколов, Н.Н. Трофимов, С.И. Шалгунов, Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков, Издательство МИР. М. 2003 г. 368 стр.
2. <http://www.feko.info/>
3. А.С. Антонов, Т.Т. Султан-Заде, А.А. Шкляев. Электродинамическое моделирование влияния токопроводящего покрытия на диаграммы направленности антенн. Журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» №1-2013 г., 27 стр.
4. <http://www.telesputnik.ru/>.

**Антонов Анатолий Сергеевич** – родился в 1946 году. В 1969 году окончил Московский физико-технический институт по специальности «Инженер-физик». Доктор физико-математических наук, профессор. В 2003 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоимпеданс ферромагнитных микропроводов, тонких пленок и мультислоев при высоких частотах». Опыт работы – 45 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником ЗАО «Межрегиональная энергосберегающая компания». Имеет 3 монографии, 2 патента, 90 статей.

**Султан-Заде Тимур Тофикович** – родился в 1968 году. В 1991 году окончил Московский физико-технический институт по специальности «Инженер-физик». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает ведущим инженером ЗАО «Импеданс».

**Шкляев Алексей Анатольевич** – родился в 1966 году. В 1989 году окончил Московский институт электронной техники. Опыт работы – 27 лет. В настоящее время работает заместителем директора по технической политике ЗАО «Импеданс». Автор 11 статей.

**Antonov Anatoliy** – was born in 1946. In 1969 he graduated from Moscow Physicotechnical Institute, speciality is «Engineer-physicist». He is a Doctor of physico-mathematical science, a professor. In 2003 he defended a thesis, the theme is: «Magnetic impedance of ferromagnetic microwires, thin films and multilayers at high frequencies». He has 45 years work experience. Currently he works as a senior staff scientist of « Inter-regional energy-saving company » CC. He has 3 monographs, 2 patents, 90 articles.

**Sultan-Zade Timur** – was born in 1968. In 1991 he graduated from Moscow Physicotechnical Institute, speciality is «Engineer-physicist». He has 20 years work experience. Currently he works as a lead engineer of «Impedance» CC.

**Shklyayev Alexey** – was born in 1966. In 1989 he graduated from Moscow Institute of electronic engineering. He has 27 years work experience. Currently he works as a Deputy technological policy director of «Impedance» CC. He is an author of 11 articles.

**Shklyayev Alexey** – was born in 1966. In 1989 he graduated from Moscow Institute of electronic engineering. He has 27 years work experience. Currently he works as a Deputy technological policy director of «Impedance» CC. He is an author of 11 articles.

# Синхронизация измерений в системе мониторинга воздушных ЛЭП

// Measurement's synchronization in Overhead Line Monitoring System //

**Самарин А. В., Масалов В. В.,  
ЗАО «МЭК», г. Москва**

*Анализ аварийных событий в современных энергосистемах позволяет выявлять причины аварий и нестабильности энергосистемы. При анализе используются архивы данных, полученных как от датчиков различных систем, в частности от регистраторов аварийных осциллограмм, расположенных на самих подстанциях, так и от сети распределенных датчиков системы мониторинга проводов воздушных ЛЭП. Рассмотрение истории аварии основано на анализе изменения ключевых параметров энергосистемы, в частности, изменения тока и напряжения до и после аварии. В статье рассмотрены особенности синхронизации измерений в системе мониторинга состояния воздушных ЛЭП.*  
**Ключевые слова:** воздушные ЛЭП, аварийный процесс, аварийная осциллограмма, энергосистема, приемник GPS, передача информации, синхронизация событий, абсолютное время, метка времени 1pps, локальные часы.

## Структура системы мониторинга воздушных ЛЭП

Система мониторинга состоит из сети измерительных блоков, связанных через канал связи с АПК-ТСМ (аппаратно-программный комплекс телеметрической системы мониторинга) на диспетчерском пункте. Измерительные блоки обеспечивают измерение следующих ключевых параметров: ток и напряжение провода,

*Analysis of emergency events in modern power systems can identify the causes of crashes and instability power system. Used in the analysis of the data files from sensors of different systems, in particular the emergency waveform recorders located at substations themselves and on a network of distributed sensors monitoring wires overhead lines. Examination of the history of the accident based on the analysis of changes in key parameters of the power system, such as current and voltage before and after the accident. In the article features synchronization measurement system monitoring overhead lines.*

**Keywords:** Overhead Lines, emergency procedure, emergency waveform, the power system, a receiver GPS, communication, synchronization of events, absolute time, time stamp 1pps, the local clock.

температуру провода ЛЭП, температуры окружающей среды, угол провеса провода, частоту и амплитуду вибрации провода. Измерительные блоки распределены вдоль трассы ЛЭП и монтируются либо на опорах, либо непосредственно на высоковольтных проводах. Ключевые технологии измерительного блока: автономная работа устройства, питание электронных узлов от тока провода, бесконтактное измерение тока и напряжения, кон-

троль провеса провода и температуры провода, цифровое управление и обработка измеряемых параметров в самом устройстве измерения, использование радиоканала для передачи данных. Для передачи измеренных параметров используются беспроводные каналы связи, в частности GSM или ZigBee. На рис. 1 показан структура подсистемы мониторинга проводов ЛЭП с передачей данных через беспроводную сеть ZigBee.

ИБК диспетчерского пункта системы мониторинга производит прием данных от сети датчиков, архивирование данных и отображение трендов на экране монитора оператора. Для правильной интерпретации информации система сбора данных должна обеспечивать передачу последовательных значений информации от объектов в правильном хронологическом порядке.

## Обеспечение синхронизированных измерений

В современных условиях важным требованием к цифровым измерительным преобразователям является обеспечение синхронизированных измерений параметров электрической сети, т.е. обеспечение сбора данных с большого количества устройств телеизмерений, «привязанных» к единой метке времени. При этом устройства должны или по запросу от АПК-ТСМ, или самостоятельно обеспечивать фиксацию («замораживание») текущих измерений по внутренним часам. Во втором случае возникает необходимость в поддержании высокой точности хода

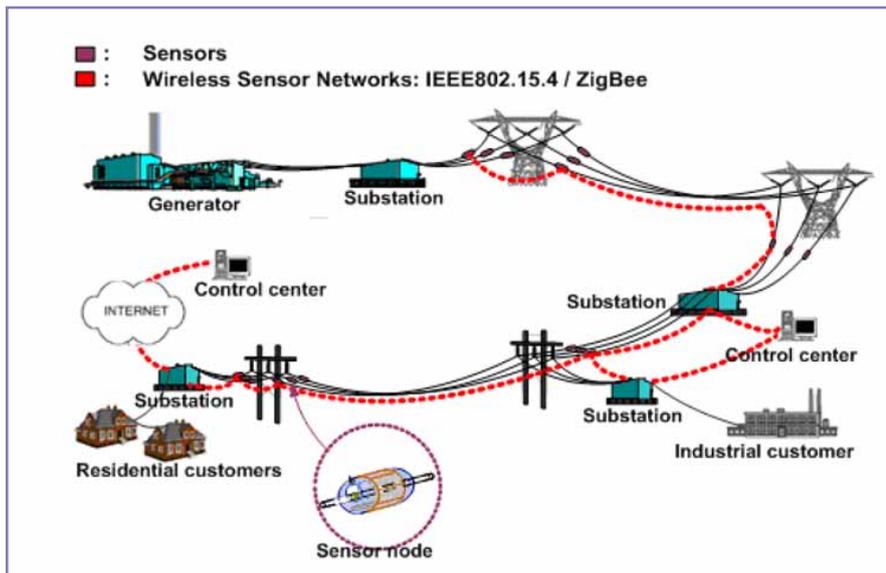


Рис. 1. Структура системы мониторинга воздушных ЛЭП с беспроводным каналом передачи данных ZigBee.

часов реального времени в измерительном устройстве. Обеспечение синхронности телеизмерений напрямую связано с быстродействием цифрового измерительного преобразователя и отсутствием задержек в передаче телеизмерений. Существуют различные подходы к решению задачи синхронизации времени: можно синхронизировать локальные часы узлов сети, а можно транслировать временные метки при передаче их от узла к узлу во временную шкалу узла приемника. Последний подход получил название метода трансляции временных шкал.

### Точность синхронизации событий в системах автоматики и телемеханики

Требования к точности синхронизации событий в системах автоматики и телемеханики варьируются в широких пределах, от сотен миллисекунд

до микросекунды, в зависимости от класса решаемых задач (таблица 1).

В задачах систем автоматизации на электроподстанциях, согласно стандарту IEC 61850 «Сети связи и системы в подстанциях», предусмотрено пять классов точности (таблица 2).

В промышленности применяются различные протоколы синхронизации, которые можно разделить на категории в зависимости от используемого способа передачи сигналов и сообщений.

### Оценка точности синхронизации

Для практического применения какого-либо алгоритма синхронизации необходимо оценить его точность. Точность – это величина, которая неявно связана с ошибкой синхронизации. Точность – скалярная агрегированная величина, характеризующая всю сеть, ошибка синхронизации –

это функция времени для одного узла. Параметры синхронизации событий в системе мониторинга определяются точностью синхронизации событий измерительных блоков и точностью синхронизации времени в АСУ-ТСМ. В конечном счете оценивается точность синхронизации событий (измерений) по отношению к всемирному времени (UTC). В качестве эталонного источника синхронизации в измерительных блоках системы мониторинга воздушных ЛЭП, а также в АСУ-ТСМ используется навигационный приемник NV08С-МСМ, обеспечивающий точность привязки сигнала эталонной секундной метки 1pps по отношению к UTC не хуже 25 нс.

### Точность синхронизации АСУ-ТСМ

Синхронизация локальных часов всех устройств АСУ-ТСМ осуществляется по локальной сети Ethernет. Точность синхронизации времени с использованием только последовательных протоколов связи определяется двумя составляющими: дискретностью и стабильностью внутренних часов устройств, а также точностью выдачи меток времени управляющей системой (компьютера), т.е. свойствами АСУ ТСМ. Для подстанционных устройств дискретность внутренних часов составляет 866 мкс, а их стабильность 50 ppm. Такая стабильность дает уход часов на 3 мс за 1 минуту, что определяет необходимую периодичность выдачи меток времени управляющей системой. Реально в существующих АСУ оборудования подстанций энергосистем обеспечивается точность синхронизации событий по отношению к мировому времени не выше 1 мс.

Таблица 1. Требования к точности синхронизации событий в системах автоматики и телемеханики.

Диапазон	Применение
> 100(мс)	Системы вывода визуальной информации
100(мс) – 10(мс)	Системы сбора и конечной обработки некритичных ко времени данных
10(мс) – 1(мс)	Системы сбора данных, управление электромеханическими устройствами
1(мс) – 1(мкс)	Комплексные приводные системы, распределённые беспроводные системы. Точное измерительное оборудование.
<1(мкс)	Высокоскоростное измерительное оборудование

Таблица 2. Классы точности согласно стандарту IEC 61850 «Сети связи и системы в подстанциях».

Класс точности	Диапазон
T1	1(мс)
T2	0.1(мс)
T3	25(мкс)
T4	4(мкс)
T5	1(мкс)

Существующие АСУ построены на базе систем SCADA и ориентированы на обработку низкоскоростных потоков событий от системы датчиков на уровне нескольких событий (измерений) в секунду. Соответственно, вычислительные ресурсы, интерфейсы и память системы не способны поддерживать большие потоки данных от измерительных устройств, входящих в систему.

### Регистрация аварийных событий

В настоящее время на подстанциях ЛЭП широко используются цифровые регистраторы локальных аварийных процессов. Регистраторы передают информацию в сервер через проводные сети для хранения и обработки. Промышленные проводные сети обладают высокой пропускной способностью. Синхронизация регистраторов также осуществляется по сети. Для этого используются стандартные протоколы. Стационарные регистраторы питаются от сети 50 Гц 220 В, используя бесперебойные источники питания. Для сетевых регистраторов нет ограничений на потребление.

### Особенности работы измерительных блоков системы мониторинга ЛЭП

Система мониторинга параметров ЛЭП использует для передачи данных беспроводные интерфейсы (GSM или ZigBee). В отличие от измерительных устройств, питающихся от сети 220В 50Гц, в измерительных блоках системы мониторинга используется индукционный преобразователь питания от провода ЛЭП, энергетический ресурс которого ограничен. Следовательно, ограничен и бюджет энергопотребления структуры измерителя параметров ЛЭП. Самое большое потребление энергии в режиме передачи данных. Потребление в режиме передачи по GSM порядка 1-3 ватт, ZigBee (865МГц) – не более 10 мВт. Для экономии энергии передача данных в АСУ-ТСМ диспетчерского пункта производится с заданным периодом. Для организации согласованных сеансов связи для всех измерительных блоков сети системы мониторинга ЛЭП используется временная синхро-

низация. Относительно низкая пропускная способность каналов передачи данных (GSM или ZigBee) не может обеспечить пересылку больших объемов данных от множества измерителей, связанных через беспроводную сеть. Поэтому при регламентированных сеансах связи базового режима мониторинга используется передача массива параметров, накопленных за период времени между сеансами связи. Данные аварийных осциллограмм тока и напряжения передаются от узлов измерительных блоков системы мониторинга по запросу от сервера АСУ-ТСМ.

### Синхронизация измерений от приемника систем спутниковой навигации

Синхронизации измерений от каналов приемника ГЛОНАСС/GPS используется как для задач, требующих жесткой привязки систем сбора информации к общемировому времени, так и для задач, в которых требуется синхронизация удаленных объектов системы между собой, а также при работе в автономном режиме. Введение в структуру измерительного блока системы мониторинга воздушных ЛЭП модуля навигационного приемника обеспечивает получение опорных временных сигналов для привязки событий (измерений). Через последовательный интерфейс данных (UART) производится считывание навигационных данных. Для обмена с управляющим процессором измерительного блока используются протоколы IEC1162 (NMEA 0183), RTCM SC 104 или BINR. В составе навигационных данных присутствует метка времени, содержащая часы, минуты и секунды времени UTC. Эта информация используется измерительной системой для создания временных штампов при фиксации в памяти измеренных параметров. Штампы времени сохраняются в памяти вместе с измеренными параметрами измерительных блоков, а затем передаются по беспроводным каналам связи в диспетчерский пункт. Основное назначение временной синхронизации – гарантирование сортировки измерений от множества измерительных узлов, обеспечивающей восстановление временного порядка следования

событий. Для временной привязки медленно изменяемых во времени параметров, таких как температура провода, температура окружающей среды, вес провода достаточно использовать штампы времени с точностью привязки до секунды. Для привязки ко времени вычисленных среднеквадратичных значений переменного тока в проводе также достаточно использовать временной штамп с секундной точностью. Для временной синхронизации аварийных осциллограмм используется сигнал секундной метки 1pps, поступающий с выхода навигационного приемника. Точность привязки фронта сигнала 1pps к секунде времени UTC для современных навигационных приемников составляет от 20 до 100 нсек. Использование аппаратного сигнала 1pps секундной метки для синхронизации измерительных треков может обеспечить точность привязки на уровне 1мкс. В измерительных блоках системы мониторинга используются модули навигационных приемников типа NV08C-CSM.

### Особенности навигационного приемника NV08C-MCM

NV08C-CSM – это малогабаритный встраиваемый модуль, предназначенный для приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, GNSS). Ключевой особенностью устройства является его способность работать как по сигналам уже существующих ГНСС ГЛОНАСС и GPS (включая системы функционального дополнения SBAS), так и по сигналам вновь разворачиваемых ГНСС: GALILEO и COMPASS. Для минимизации энергопотребления в модуле реализован импульсный режим работы TTTF (Time-to-Time Fix) – режим периодического определения координат с программируемым пользователем интервалом между определениями, обеспечивающий эффективное снижение энергопотребления. В этом режиме аналоговый тракт модуля включается только периодически на короткий интервал времени, достаточный для перезахвата сигналов и определения их текущих параметров. После этого напряжение с аналогового тракта, а также активной антенны (при ее использовании) снимается, а цифровая СБИС вычисляет

координаты, выдает их во внешнюю систему и переходит в режим пониженного энергопотребления. Для обеспечения быстрого высокочувствительного поиска сигнала в сложных условиях приема в модуль встроен генератор 26 МГц (ТСХО) с высокой термостабильностью ( $\pm 0.5$  ppm).

### Синхронизация аварийных осциллограмм в измерительных блоках системы мониторинга ЛЭП

Для современных систем мониторинга точность привязки измерений (событий) к времени UTC не регламентирована. Для совмещения нескольких осциллограмм, относящихся к одному аварийному событию и полученных от разных регистраторов, важно обеспечить не точность абсолютной синхронизации отсчетов измерений к времени UTC, а точность привязки к единой локальной временной метке для всех измерительных узлов. Особенностью системы синхронизации, использованной в измерительных блоках системы мониторинга ЛЭП, является то, что в ней синхронизируется поток данных от АЦП.

Временная синхронизация потока данных от АЦП осуществляется программно-аппаратно ресурсами 32-разрядного микроконтроллера STM32. Для измерения временных интервалов, определяющих привязку потока данных от АЦП, используются два внутренних таймера микроконтроллера и программа управления таймерами.

Цикл преобразования обоих АЦП, измеряющих ток и напряжение в проводе ЛЭП, составляет 400 нсек (2.5 кГц).

По фронту сигнала метки 1pps производится установка первого таймера. По сигналу готовности принятых данных от АЦП производится фиксация на таймере 1 интервала смещения первого отсчета АЦП относительно метки 1pps. Полученное смещение записывается вместе с данными первого отсчета АЦП в память и будет использоваться в формате выходных данных аварийной осциллограммы. Далее каждое значение потока данных от АЦП записывается в память вплоть до прихода следующего импульса 1pps.

Синхронизация работы АЦП осуществляется от кварцевого генерато-

ра. Температурная и временная нестабильность типового кварцевого генератора составляет порядка  $10^{-6}$  сек. Типовой кварцевый генератор имеет разброс частоты от номинальной на уровне 30-50 ppm. Следовательно, в такой же степени будет иметь разброс и период преобразования АЦП. Чтобы устранить эту неопределенность частоты, измеряем частоту кварцевого генератора, используя в качестве эталонного источника все тот же опорный интервал секундной метки 1pps. Для измерения частоты используется 2-й таймер микроконтроллера в режиме счетчика. Измерив частоту, можно рассчитать реальную длительность периода отсчетов АЦП. Таким образом, массив данных аварийной осциллограммы с временной синхронизацией состоит из пакетов данных 1 секундного интервала, дополненных штампом относительной привязки времени. Штамп представлен двумя временными параметрами, актуальными для текущего 1 секундного интервала: смещением первого отсчета АЦП относительно 1 pps метки и периодом АЦП, измеренным на текущем интервале. Кроме этого, в пакет данных входит и число циклов АЦП в текущем секундном интервале. Число циклов измеряется программно.

Предложенный метод синхронизации измерений позволяет обеспечить точность привязки на уровне 1мкс при использовании микроконтроллеров с АРМ архитектурой работающих на частоте свыше 70МГц.

### Выводы

Применение технологии синхронизации измерений для датчиков системы мониторинга воздушных ЛЭП от навигационных приемников систем позволяет реализовать высокую точность временной привязки событий, соответствующую стандартам и требованиям современных систем управления и мониторинга энергосистем. Использование синхронизации измерений с точностью 1мкс позволяет внедрять принципиально новые методы анализа аварийных сигналов, основанные на измерениях углов напряжений в различных точках энергосистемы, что необходимо для повышения надежности и устойчивости ра-

боты энергосетевого оборудования.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки по госконтракту № 12.527.11.0002.

### Литература:

1. ГОСТ Р МЭК 60870-5-101-2006 Устройства и системы телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи.
2. Иерархическая система передачи и просмотра аварийной информации от разнородных распределенных источников. Принципы построения и алгоритмы обработки данных. Асанбаев Ю.А., Горелик Т.Г., Лобанов С.В., Муравьев П.А. Материалы конференции «Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems». (Cheboksary, September 9-13, 2007)
3. **Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП2** с функциями синхронных измерений параметров режима электрической сети. Журнал «ИСУП» № 3(39) 2012г.
4. Интегрированная автоматизированная система управления крупными подстанциями: новые технические решения и опыт внедрения. Асанбаев Ю.А., Горелик Т.Г., Филатов В.Г. Материалы конференции «Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems». (Cheboksary, September 9-13, 2007)
5. Аппаратура и методика измерения фазы гармонического сигнала в кнч-снч диапазонах. Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. (Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН) «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XXXIV Annual Seminar, Apatity, pp. 166 – 169 2011.

**Самарин Александр Викторович** – родился в 1952 году. В 1976 году окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) по специальности «Электроника и автоматика». В настоящее время работает ведущим инженером в ЗАО «Межрегиональная энергосберегающая компания» (ЗАО «МЭК»). Автор более 200 статей, книги «Жидкокристаллические дисплеи» (2004 г. Изд. Солон-Р), 8 авторских свидетельств, патента на изобретение.

**Масалов Василий Владимирович** – родился в 1976 году. В 2010 году окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника». В настоящее время работает ведущим инженером в ЗАО «Межрегиональная энергосберегающая компания» (ЗАО «МЭК»).

**Samarin Alexander** – was born in 1952. In 1976 he graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology (MIET), with a degree in «Electronics and Automation.» At present he works as a senior engineer in «Interregional Energy Saving Company» CJSC. He is an author of more than 200 articles, a book «LCDs» (2004, edition Solon-R), 8 certificates of authorship, a patent of invention.

**Masalov Vasily** – was born in 1976. In 2010 he graduated from Moscow Institute of Electronic Technology (MIET), with a degree in «Microelectronics and Solid State Electronics.» Currently he works as a senior engineer in «Interregional Energy Saving Company» CJSC.

# Режим движения поезда на участке с ограничениями скорости

// Mode of movement of the train on a site with speed restrictions //

**Феокистов В.П., д.т.н., профессор,  
Московский государственный университет  
путей сообщения (МИИТ), г. Москва**

**Паршин А.Н., к.т.н.,  
Московская железная дорога, г. Москва**

**Раюмов А.Х.,  
Московская Дирекция тяги – филиал ОАО «РЖД»,  
г. Москва**

*Рассмотрены режимы движения поездов на участках между ограничениями скорости. Система нормирования и учета энергозатрат оказывает существенное влияние на энергосбережение в тяге поездов и, соответственно, на железнодорожный транспорт в целом, но эту систему необходимо дополнить методикой расчета и статистической оценки потерь энергии и времени из-за ограничений скорости.*

*Ключевые слова: скоростное движение, ограничения скорости, потери времени и энергии, безопасность движения поездов, энергосбережение, техническая и участковая скорость.*

В Стратегической программе инновационного развития ОАО «РЖД» (утверждена президентом ОАО «РЖД» от 26.10.2010 года) предусмотрено регулярное повышение технической скорости пассажирских поездов дальнего сообщения.

Вопрос о целесообразности и возможности повышения скорости пассажирских поездов на железных дорогах возник с момента организации пассажирских перевозок. Реальные возможности появились при переходе

*Modes of movement of trains on sites between restrictions of speed are considered. The system of rationing and the accounting of energy consumption makes essential impact on energy saving in draft of trains and respectively on railway transport as a whole, but it is necessary to add this system with a design procedure and a statistical assessment of losses of energy and time because of restrictions of speed.*

*Keywords: high-speed movement, restrictions of speed, time and energy loss, traffic safety of trains, energy saving, technical and local speed.*

на электрическую и тепловозную тягу. Поскольку проблема носит комплексный характер, то ведущие научные центры страны (ВНИИЖТ, ЛИИЖТ, МИИТ, ИКТП) выполнили фундаментальные исследования [1, 2, 3].

Реально этот процесс на основных магистралях ОАО «РЖД» происходит в условиях наличия постоянных ограничений скорости, главным образом, по состоянию пути, станционных устройств (включая стрелочные переводы) и искусственных сооружений

(мосты, тоннели, пассажирские платформы и т.д.).

Безусловное выполнение этих ограничений скорости хотя и создает организационные трудности для ввода в эксплуатацию скоростных поездов, а также для работы локомотивных бригад, но оно является абсолютно необходимым условием для обеспечения безопасности движения. В то же время ликвидация или даже смягчение указанных постоянных ограничений скорости обычно связаны со значительными капитальными затратами на реконструкцию пути. Поэтому соответствующие работы по ликвидации или смягчению ограничений скорости далеко не всегда могут быть признаны экономически целесообразными, даже в условиях повышения технической скорости в графике движения, хотя их количество постепенно снижается.

Поэтому при задании повышения технической скорости на конкретном тяговом плече следует в первую очередь выделить наиболее длинные промежутки между смежными ограничениями и путем тягового расчета [4, 5] установить возможности реализации повышенной скорости в каждом из них. Желательно распределить задачу реализации скоростного режима между возможно большим количеством длинных промежутков. При этом не обязательно стремиться к достижению максимальной скорости, например, 140 или 160 км/ч в каждом из них. Минимальное увеличение энергозатрат получается, если задание по повышению скорости на тяговом плече

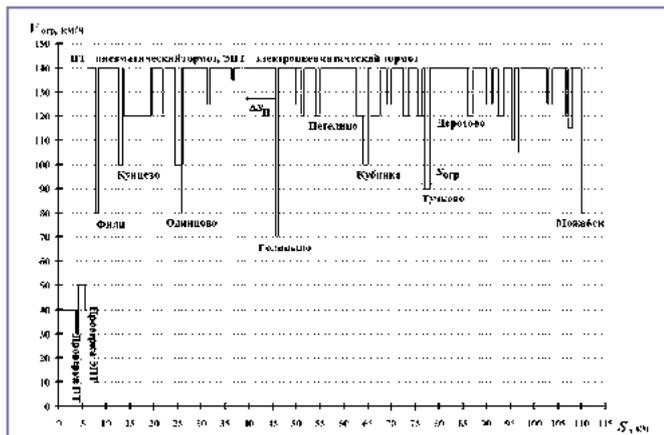


Рис. 1. Диаграмма распределения ограничений скорости и длин этих ограничений на участке Москва-Можайск.

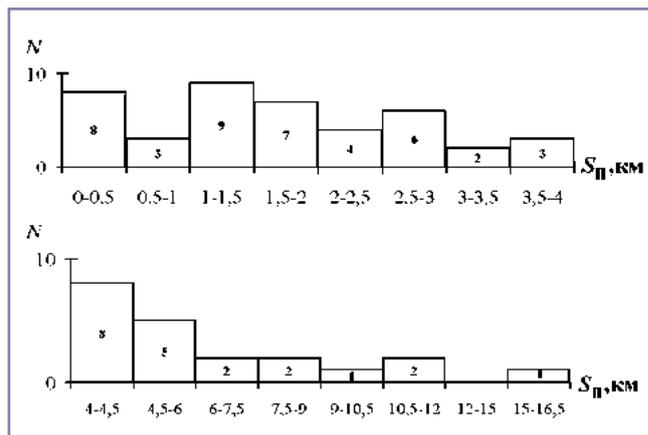


Рис. 2. Гистограмма протяженности промежутков между ограничениями скорости (а, б – соответственно малые и большие промежутки).

раскладывается на возможно большее число промежутков. Практический опыт показывает, что целесообразное повышение скорости в каждом из промежутков примерно пропорционально его длине. При этом короткие промежутки проезжают без повышения скорости.

В качестве примера по постановке проблемы на рис. 1 представлена диаграмма распределения ограничений скорости и длин этих ограничений на головном участке Москва-Можайск тягового плеча Москва-Вязьма. На рис. 2 показано статистическое распределение длин промежутков пути между соседними (смежными) ограничениями. Возможности повышения технической скорости даже в этих условиях вполне реальны, поскольку электровозы пассажирского движения ЧС2, ЧС2Т, ЧС7, ЧС4Т, ЧС8, ЭП10, ЭП2К [6, 7] имеют конструктивную скорость 160 км/ч. Такую же конструктивную скорость имеет основной парк пассажирских вагонов.

Но эти возможности зависят в значительной мере от условий реализации скоростного режима по фактическому состоянию пути и искусственных сооружений. Соответствующие трудности скоростного режима четко видны на рис. 1, 2.

Большое значение имеет расстояние между соседними ограничениями скорости, т. е. конкретный промежуток  $S_{\Pi}$ , на котором поезд может реализовать максимальную разрешенную скорость, например 140 км/ч. Эта ситуация показана на рис. 3. Рассмотрен участок  $S_{\Pi}$ , на котором допускается скорость 140 км/ч. Он расположен между двумя локальными ограничениями скорости  $V_{огр}$ ; в рассматриваемом примере эти смежные ограничения  $N_i$  и  $N_{i+1}$  для упрощения анализа приняты одинаковыми; их возможные значения указаны на рис. 3. Там же указаны координата  $S_{i,K}$  выхода из ограничения  $N_i$  и координата  $S_{i+1,H}$  входа в ограничение  $N_{i+1}$ . Далее в конкретных

реализации максимально разрешенной (конкретно на тяговом плече Москва-Вязьма) эксплуатационной скорости 140 км/ч, а именно:

- зависимость реально реализуемого приращения средней технической скорости  $\Delta V_T$  на участке  $S_{\Pi}$  в функции его длины и значений  $V_{огр}$  (за базовый вариант принят наиболее простой и медленный способ проезда участка  $S_{\Pi}$  с постоянной скоростью  $V = V_{огр}$ );
- увеличение энергозатрат на тягу поезда  $\Delta \Theta(S_{\Pi}, V_{огр})$  по сравнению с базовым вариантом (при условии разгона поезда до скорости 140 км/ч или до максимально возможной при коротких  $S_{\Pi}$ ) [3].

При этих расчетах учтены практические особенности реализации скоростного движения, указанные ниже.

Разгон поезда после прохода участка  $S_{\Pi}$  ограничения возможен, если из ограничения вышел последний вагон состава, аналогичным образом и при торможении поезда перед ограничением должен быть некоторый запас, который необходим для гарантированного входа на участок  $S_{\Pi}$  с заданным ограничением скорости  $V_{огр}$ . Эта величина условно принята одинаковой при выходе из ограничения  $N_i$  и при входе в следующее ограничение  $N_{i+1}$ . По статистике и на основе экспертных поездок этот запас  $L_3 = 3D/2$ , где  $D$  – длина поезда с электровозом.

На рис. 3 обозначены также длины участков разгона  $L_p$  и торможения  $L_T$ . Первый из них связан с дополнительными затратами энергии  $\Delta \mathcal{E}_p$  и времени  $T_p$ , что показано на рис. 4 в функции веса состава  $Q = mM$ ,

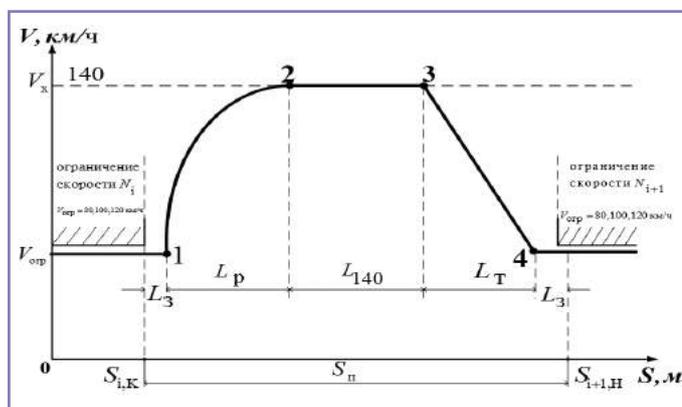


Рис. 3. Диаграмма протекания промежутка  $S_{\Pi}$  между смежными ограничениями скорости  $V_{огр}$ .

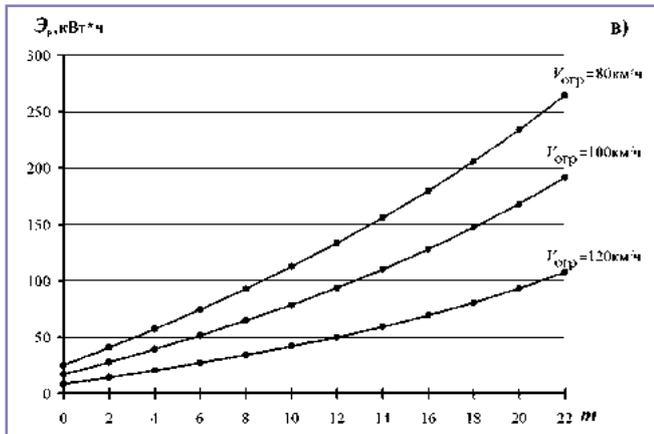
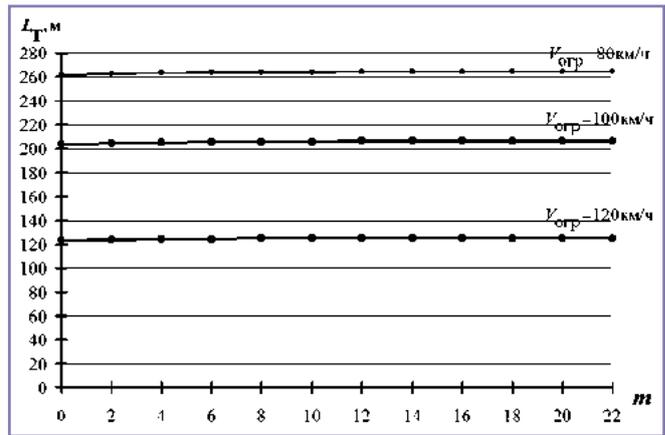
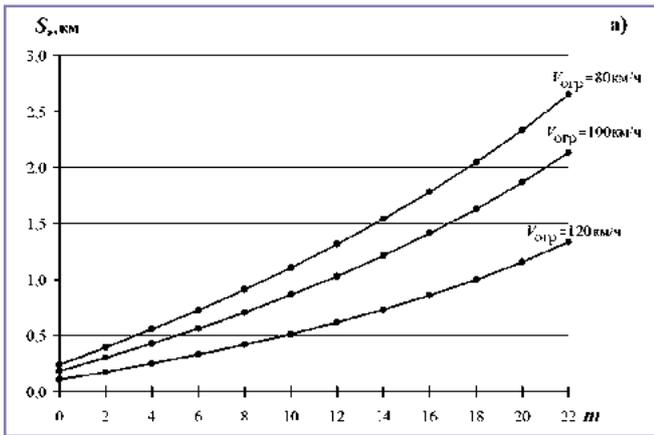
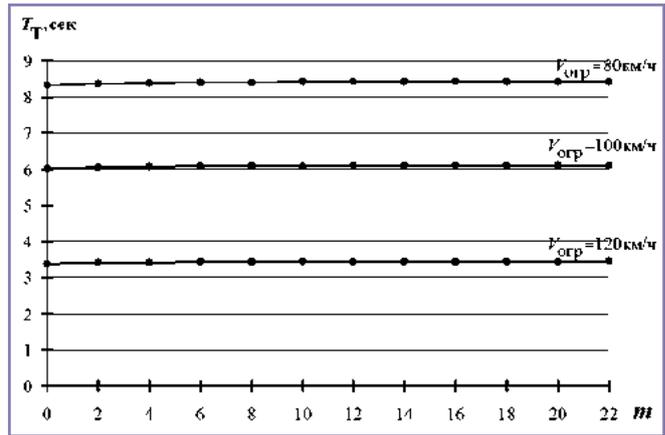
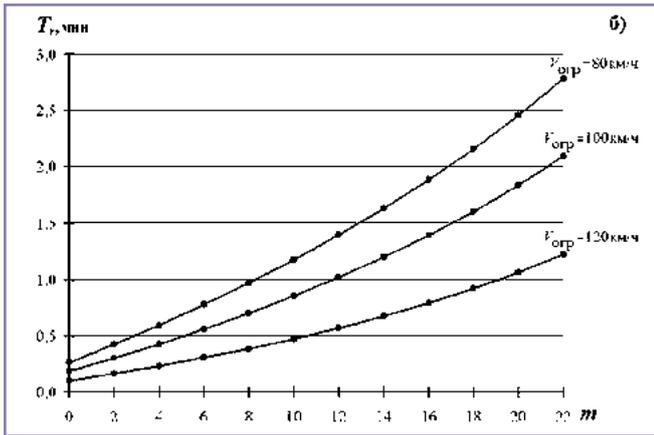


Рис. 4. Характеристики разгона поезда с числом вагонов  $m$  до 140 км/ч после проезда ограничения скорости (а-путь разгона, б-время разгона, в-затраты электроэнергии на разгон).

где  $m$  – число вагонов в составе поезда,  $M$  – расчетная масса пассажирского вагона. При этом электровоз работает по типовой пусковой диаграмме в диапазоне скоростей от  $V_{огр}$  до 140 км/ч.

Торможение поезда на участке  $L_T$  может быть реализовано реостатным тормозом электровоза, но в этом случае тормозной путь, т.е. фактически величина  $L_T$ , и время торможения существенно зависят от количества  $m$

значительной вариабельности величины  $L_T$  и соответственно времени торможения  $T_T$  [5]. С практической точки зрения более приемлем классический вид торможения – электропневматическое [8], как обеспечивающее стабильность  $L_T$  независимо от  $m$  и  $Q$  (рис. 6). При этом целесообразно совместное торможение электровоза и состава, что позволяет стабилизировать тормозной путь независимо от количества вагонов в составе.

Рис. 5. Зависимость времени торможения от числа вагонов  $m$  и тормозного пути при реостатном торможении.

вагонов в составе поезда, т.е. от веса состава  $Q = mM$  (рис. 5) [4]. Поскольку это количество вагонов в практике эксплуатации может варьироваться в достаточно широких пределах 7-22, то с этой точки зрения реостатный тормоз является неудобным ввиду

С учетом исходной диаграммы по рис. 3 возможное повышение технической скорости в промежутке  $S_{II}$  может быть рассчитано по формуле

$$\Delta V_{техн} = \frac{S_{II}}{\frac{2L_3}{V_{огр}} + T_p + T_{140} + T_T} \quad (1)$$

где  $T_{140}$  – время движения поезда на участке  $l_{140}$  ( $T_{140} = \frac{L_{140}}{140}$ );

$$l_{140} = S_{II} - 2L_3 - L_p - L_T \quad (2)$$

Соответствующие зависимости, рассчитанные по этому выражению, представлены на рис. 7. Они вполне могут быть использованы при технико-экономических расчетах по повышению технической скорости на линиях старой постройки. При этом нужно отметить, что основные магистрали Октябрьской, Горьковской, Юго-Восточной и Московской жд., для которых актуальна задача повышения скорости движения, были введены в эксплуатацию во второй половине XIX века, когда вопрос повышения

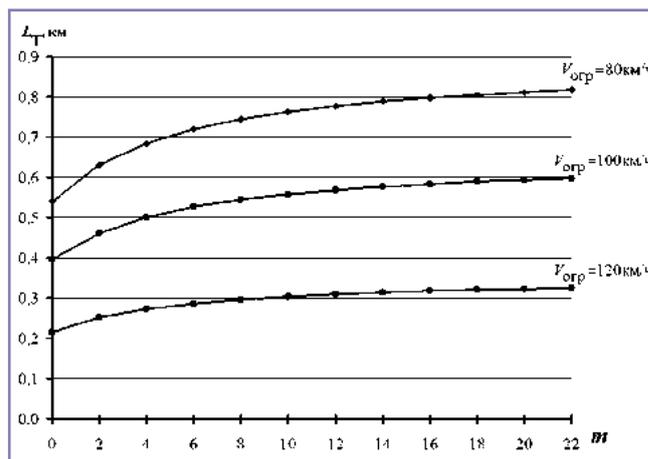
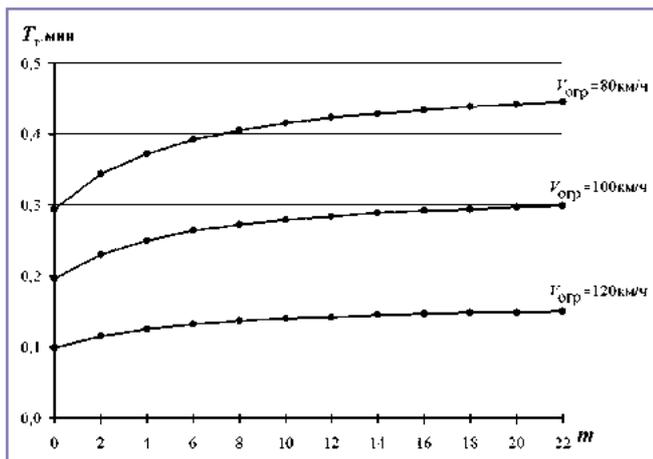


Рис. 6. Характеристики электропневматического торможения поезда с числом вагонов  $t$  от скорости 140 км/ч до ограничения  $V_{огр}$  ( $a$  – время торможения  $T_T$ ;  $b$  – тормозной путь  $L_T$ ).

скорости еще не ставился. Последующие реконструкции не изменили в принципе существующего положения с ограничениями скорости, кроме Октябрьской железной дороги ввиду ее особого значения [6].

Но для технико-экономических расчетов нужны еще и данные по дополнительным затратам на повышение технической скорости, а именно:

- дополнительный расход электроэнергии на проследование участка  $S_i, K \div S_{i+1}, H$  длиной  $S_{II}$  с повышенной технической скоростью (до 140 км/ч);

$$\Delta \mathcal{E} = 2\mathcal{E}(L_3) + \mathcal{E}_p + \mathcal{E}(V = L_{140}) - \mathcal{E}(S_{II}; V_{огр}) = \mathcal{E}_p + a_{140} L_{140} Q - a_{огр} Q(S_{II} - 2L_3) = \mathcal{E}_p + Q[a_{140} L_{140} - a_{огр}(S_{II} - 2L_3)] \quad (3)$$

- в перспективе капитальные затраты хотя бы на смягчение ограниче-

ний  $V_{огр}$  по концам рассматриваемого участка.

**Литература:**

1. Баранов А.М. Требования к скорости и весу пассажирских поездов, В сб. «Вопросы повышения скоростей движения на транспорте», Издательство АН СССР, М., 1957.
2. Лисицын А.Л., Мугинштейн Л.А. Нестандартные режимы тяги, Интекст, Москва, 2003.
3. Черномордик Г.И. Повышение скоростей движения поездов, М.: Транспорт, 1964. – 202 с.
4. Осипов С.И., Осипов С.С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги, // Москва, 2006. – 294 с.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы, – М.: Транспорт, 1985, 227 с.
6. Раба Ф., Кир Л., Гончарук И. Электродинамический тормоз электровозов ЧС2Т и ЧС200 (электронное оборудование), «Транспорт», 1978 – 80 с.
7. Иньков Ю.М., Жуликов В.Н., Козлов Л.Г. Электроподвижной состав с электрическим торможением, // Москва, 2008. – 412 с.
8. Иноземцев В.Г. Тормоза железнодорожного подвижного состава, – М.: Транспорт, 1987, – 207 с.

Заслуженный работник Высшей школы. Имеет 4 монографии (в соавторстве), свыше 100 авторских свидетельств и патентов, более 300 научных трудов.

**Паршин Андрей Николаевич** – окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). Кандидат технических наук. В настоящее время работает начальником топливно-энергетического центра Московской железной дороги. Автор 2 научных статей.

**Раюмов Алексей Харисович** – окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). В настоящее время работает начальником эксплуатационного локомотивного депо имени Ильича – структурного подразделения Московской дирекции тяги – структурного подразделения Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД» Автор 1 научной статьи.

**Feoktistov Valeriy** – was born in 1939. In 1961 he graduated from Moscow State Railway University (MIIT). He is a Doctor of Engineering, professor. At present he works as a professor of «Electric traction» chair of Moscow State Railway University (MIIT). He is an honoured worker of higher school. He has 4 monographs (co-authorship), more than 100 author’s certificates and patents, more than 300 scientific works.

**Parshin Andrey** – graduated from Moscow State Railway University (MIIT). He is a candidate of Engineering. At present he works as the head of fuel-energy centre of Moscow Railway Road. He is an author of 2 scientific articles.

**Rayumov Alexey** – graduated from Moscow State Railway University (MIIT). He is a candidate of Engineering. At present he works as the head of operating locomotive shed named after Il'ich – organisation department of Moscow traction directorate – organisation department of traction directorate – branch of public corporation «RZD.» He is an author of 1 scientific article.

**Феоктистов Валерий Павлович** – родился в 1939 году. В 1961 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). Доктор технических наук, профессор. В настоящее время работает профессором кафедры «Электрическая тяга» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).

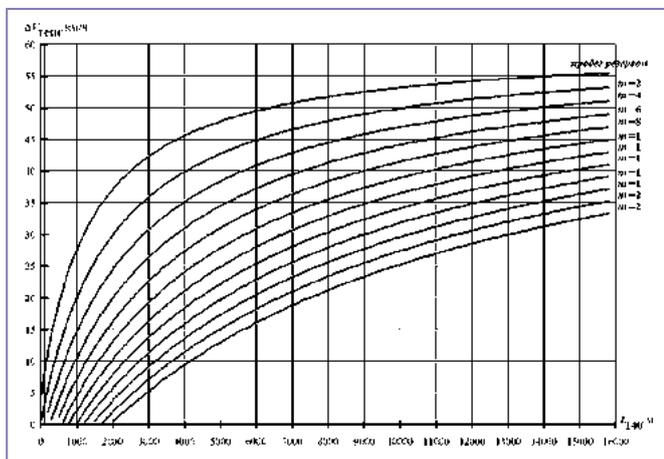


Рис. 7. Возможности повышения технической скорости  $V_{техн}$  в промежутке  $L_{140}$  между смежными ограничениями скорости.

# Применение тестовых кодов для обнаружения сбоев в исполнительных механизмах при кодоимпульсном управлении

// Application of the test code to detect failures  
in the actuator at code-pulse control //

Люминарская Е.С., Дианов В.Н., д.т.н., профессор,  
ФГБОУ ВПО МГИУ, г. Москва

*Предложен новый критерий для обнаружения сбоев методом тестовых кодов. Критерий основан на вычислении нормы разности выходного и эталонного сигналов. Рекомендуемый критерий может быть использован для обнаружения сбоев в исполнительных механизмах с кодоимпульсным управлением.*

*Ключевые слова: сбой, кодоимпульсная модуляция, норма функции.*

*A new criterion for failure detection method of test code. This criterion is based on the calculation of the norm of the residual of the output and the reference signal. The new criterion can be used to detect failures in actuators with code-pulse control.*

*Keywords: failure, code-pulse modulation, rate function.*

Для управления надежностью радиоэлектронной аппаратуры необходим постоянный контроль и анализ появляющихся сбоев. Под сбоем понимается кратковременное самоустранившееся нарушение нормального функционирования аппаратуры. После сбоя аппаратура может работать нормально длительное время. Но сбои приводят к нарушению правильности функционирования систем из-за искажения передаваемой информации.

Причинами сбоев и предсбойных состояний могут быть скрытые дефекты, не фиксируемые современными методами контроля, и внешние воздействия. К внешним воздействиям можно отнести электрические перегрузки проводов, воздействия тепловых и электромагнитных полей, механические вибрации.

Для обнаружения и регистрации сбоев применяются различные контактные и бесконтактные методы. Контактные методы подразделяются на амплитудно-частотные и времен-

ные методы. Первый метод основан на изменении амплитудно-частотной характеристики сбойного участка, второй – на изменении во времени подаваемого сигнала. Бесконтактный метод основан на приеме и регистрации электромагнитных волн, излучаемых сбойным участком.

Для обнаружения ошибок в цифровых машинах применяются методы, основанные на использовании различных кодов. К этим кодам можно отнести коды Хемминга, Боуза-Чоудхури-Хоквингема, Рида-Соломона и другие [1]. Все коды можно разделить на самоконтролирующиеся и самокорректирующиеся. Самоконтролирующиеся коды позволяют автоматически обнаруживать ошибки при передаче данных, но не могут их исправлять (коды Хемминга). Самокорректирующиеся коды

позволяют автоматически исправлять ошибки. Данные коды позволяют обнаруживать и исправлять информацию, заданную в виде цифр. Одним из недостатков указанных кодов является невозможность их использования для диагностирования датчиков и исполнительных механизмов.

В работе [2] для исполнительных механизмов с прямым цифровым управлением (без цифро-аналогового преобразователя) для обнаружения сбоев предложен метод тестовых кодов (кодов Вьюшкова-Дианова). Этот метод основан на подаче электрических сигналов (например, напряжения), имеющих вид прямоугольных или синусоидальных импульсов в моменты времени, предусмотренные числовым кодом. Наличие сбоя определяется по среднему значению выходного сигнала на сбойном участке (напряжения или силы тока). Если среднее значение выходного сигнала для данного кода

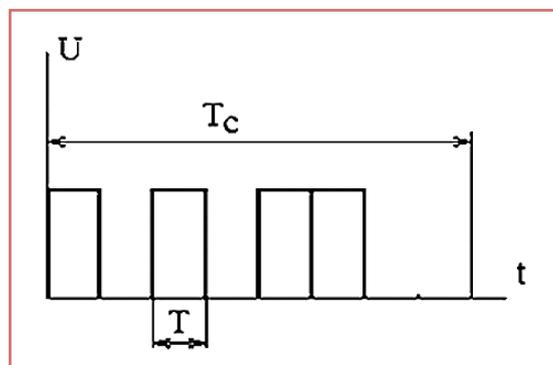


Рис. 1. Напряжение, имеющее код 10101100:  
 $T_c$  – период повторения кодовой последовательности;  
 $T$  – время элементарного импульса;  
 $f = 1/T$  – тактовая частота.

Таблица 1. Возможные варианты кодов для 8-разрядной ЭВМ К 580.

N кода	код	N кода	код	N кода	код
1	10100000	9	11101000	17	11110100
2	10010000	10	11100100	18	11110010
3	10001000	11	11011000	19	11101100
		12	11001100	20	11100110
4	11010000	13	11010100	21	11011010
5	11001000	14	11010010	22	11101010
6	11000100	15	11001010		
7	10101000	16	10101010	23	11111010
8	10100100			24	11110110
				25	11101110

отличается от эталонного значения, то фиксируется сбой.

В общем случае код ЭВМ представляется в виде совокупности единиц (импульсов) и нулей (отсутствия импульсов). Например, для восьмиразрядной ЭВМ сигнал с кодом 10101100 представлен на рис. 1.

Возможные варианты кодов для 8-разрядной ЭВМ (например, процессор К580) приведены в таблице 1 [2]. Все восьмиразрядные коды сгруппированы по относительной длительности кода  $\tau$ . Относительная длительность кода  $\tau$  равна отношению времени действия импульсов в периоде кодовой последовательности  $T_C$  к этому периоду. Для примера, приведенного на

$$\text{рис. 1, } \tau = \frac{4T}{T_C} = \frac{4T}{8T} = 0.5.$$

В работе [2] рассмотрена эффективность применения тестовых кодов

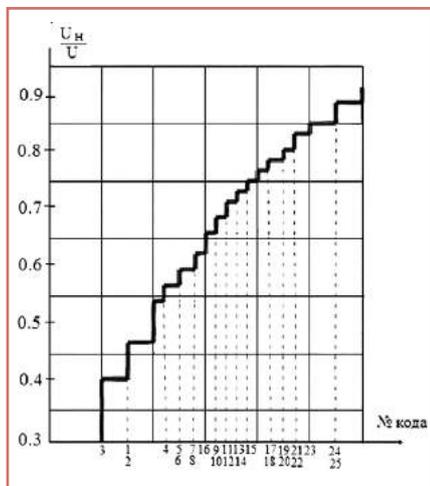


Рис. 2. Средние значения выходного параметра.

для обнаружения сбоев в объектах, работа которых описывается дифференциальными уравнениями первого порядка. В указанной работе получены оптимальные значения длительности элементарного импульса  $T = 2,1 \cdot T_1$ , где  $T_1$  – постоянная времени объекта управления при действии единичного импульса. На рис. 1 приведен полученный в [2] график зависимости среднего относительного напряжения  $\frac{u_n}{U}$  объекта от номера кода.

Из приведенного графика видно, что кодовые последовательности с одинаковыми значениями  $\tau$  могут иметь различные средние значения выходного параметра  $\frac{u_n}{U}$ . Например, кодовые последовательности с номерами 3 и 1 (см. табл. 1) имеют одинаковые значения относительной длительности  $\tau$ , но при этом имеют различные средние значения выходного параметра.

Однако не все коды с одинаковыми значениями  $\tau$  имеют разные средние значения выходного параметра. Например, коды с номерами 5 и 6 имеют практически одинаковые значения  $\frac{u_n}{U}$ . Следовательно, по среднему значению параметра объекта невозможно отличить все входные кодовые последовательности и определить все сбои, возникающие в системах управления с кодоимпульсной модуляцией сигнала.

Зависимость, представленная на рис. 1, получена для параметра объекта, который описывается дифференциальными уравнениями первого по-

рядка с различными значениями постоянных времени при действии импульса  $T_1$  и отсутствии его  $T_2$  ( $T_1 = 0,5 \cdot T_2$ ). При других соотношениях  $T_1$  и  $T_2$  ступеньки получаются не такими равномерными.

В настоящей статье предлагается определять сбои в системе не по среднему значению выходного параметра, а по норме разности выходного параметра  $U_i$  и эталонной функции

$$\Delta_i = \| U_i(t) - U_i^*(t) \| \quad (1)$$

где  $U_i(t)$  – реакция системы от действия на систему  $i$ -ой кодоимпульсной последовательности;  $U_i^*(t)$  – эталонная функция, т.е. реакция идеальной системы от действия на неё  $i$ -ой кодоимпульсной последовательности.

Здесь под идеальной системой понимается система, которая работает без сбоев и имеет значения параметров, установленные нормативно-технической документацией. Идеальная функция может быть получена либо расчетным путем, либо экспериментальным путем на исправном объекте, работающем без сбоев.

В дальнейшем в статье используется следующая формула для вычисления нормы функции

$$\Delta_i = \sqrt{\int_{t_0}^{t_0+T_C} [U_i(t) - U_i^*(t)]^2 dt} \quad (2)$$

Начальное значение времени  $t_0$  выбирается таким, чтобы процессы  $U_i(t)$ ,  $U_i^*(t)$  были установившимися.

Для количественной оценки отклонения выходного параметра системы от эталонного процесса при заданном кодоимпульсном сигнале удобнее использовать не норму их разности  $\Delta_i$ , а относительную величину, определяемую по формуле

$$\Delta_i^* = \frac{\| U_i(t) - U_i^*(t) \|}{\| U_i^*(t) \|} \cdot 100\% \quad (3)$$

Величина  $\Delta_i^*$  в дальнейшем называется относительной погрешностью выходного параметра системы.

Рассмотрим применение предложенной функции  $\Delta_i^*$  для определения сбоев в системе, работа которой описывается дифференциальными уравнениями первого порядка. На рис. 3 представлен замкнутый контур, в который входит сопротивление  $R$ , индуктивный элемент  $L$  и источник

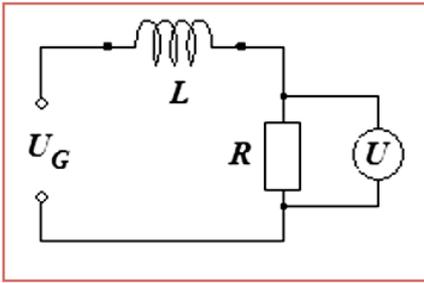


Рис. 3. Схема, моделирующая объект первого порядка.

напряжения  $U_G$ . Источник напряжения  $U_G$  генерирует напряжение, имеющее форму кодоимпульсного сигнала. Падение напряжения  $U$  на сопротивлении определяется из дифференциального уравнения первого порядка

$$T \cdot \frac{dU}{dt} + U = U_G \quad (4)$$

где  $T = \frac{L}{R}$  – постоянная времени объекта.

На рис. 4 приведена программа в Matlab Simulink решения дифференциального уравнения (4) при кодоимпульсном изменении напряжения  $U_G$  и определения относительной погрешности входного параметра  $U$  по формуле (3). Блоки generator-Gain-Controlled Voltage Source моделиру-

ют напряжение  $U_G$ , имеющее форму кодоимпульсного сигнала, с номером  $N$  (табл. 1) и периодом кодоимпульсной последовательности  $T_C$ . Блок From File считывает из файла эталонную реакцию системы для данного кодоимпульсного сигнала. Блок *norma* вычисляет относительную погрешность напряжения  $U$  на интервале времени  $t \in (a, b)$ .

При решении дифференциального уравнения (4) были приняты следующие параметры системы и внешнего воздействия  $L = 0,01$  Гн,  $R = 3,1$  Ом (постоянная времени  $T = 0,0032$  с), период кодоимпульсной последовательности  $T_C = 2,1 \cdot T = 0,0068$  с, амплитуда прямоугольных импульсов  $U_{G0} = 5$  В.

На рис. 5 представлен график изменения выходного напряжения  $U_1^*(t)$  при подаче кодоимпульсного сигнала  $U_{G1}$  с номером 1 (см. табл. 1). Представленный процесс является эталонным для данной последовательности. Пусть в результате сбоя изменился код последовательности, например, цифра 1 переместилась с шестого разряда на пятый. Тогда кодоимпульсная последовательность кодом 10100000 преобразовалась в последовательность

с кодом 10010000. Реакция системы  $U_1$  на сбившуюся кодоимпульсную последовательность и квадрат разности этого сигнала и эталонного сигнала  $(U_1 - U_1^*)^2$  также показаны на рис. 5.

Норма  $\|U_1(t) - U_1^*(t)\|$  равна площади под кривой, изображенной на рис. 5в. В результате расчета относительная погрешность выходного параметра составила  $\Delta_1^* = 25,3$  %. Необходимо отметить, что функции  $U_1(t)$  и  $U_1^*(t)$  имеют одинаковые средние значения 1,25 В. Поэтому по среднему значению выходного параметра рассматриваемый сбой обнаружить не удастся.

Рассмотрим другой пример. Пусть при подаче кодоимпульсного сигнала 11001000 (№5 по табл. 1) в результате сбоя значение активного сопротивления  $R$  уменьшились на 50%. Тогда выходной сигнал  $U_5(t)$  будет отличаться от эталонного сигнала  $U_5^*(t)$ . Квадрат разности указанных сигналов указанных приведен на рис. 6. Относительная погрешность выходного параметра в этом случае составила  $\Delta_5^* = 10,7$  %. Отличие средних значений рассматриваемых сигналов 0.27%.

Предложенный критерий можно использовать, например, для обнару-

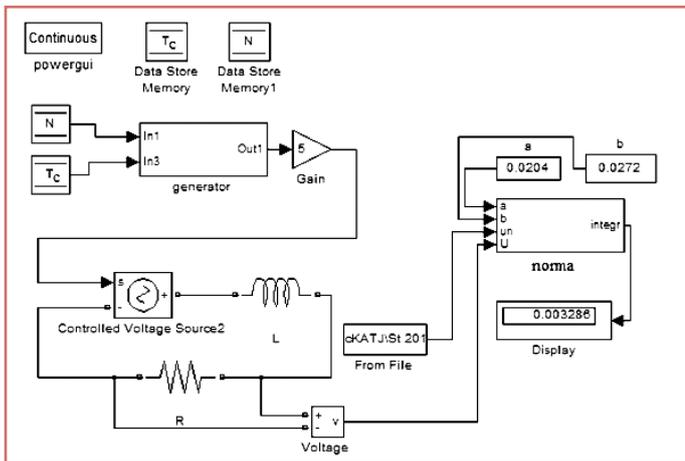


Рис. 4. Программа в Matlab Simulink.

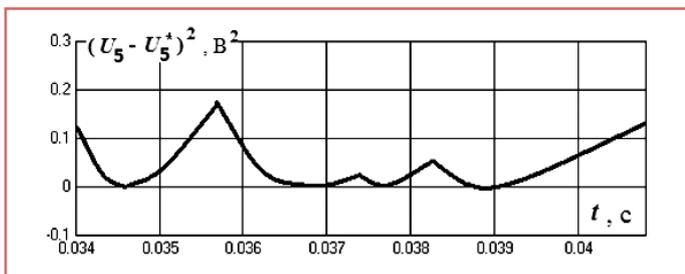


Рис. 6. Квадрат разности выходного и эталонного сигналов.

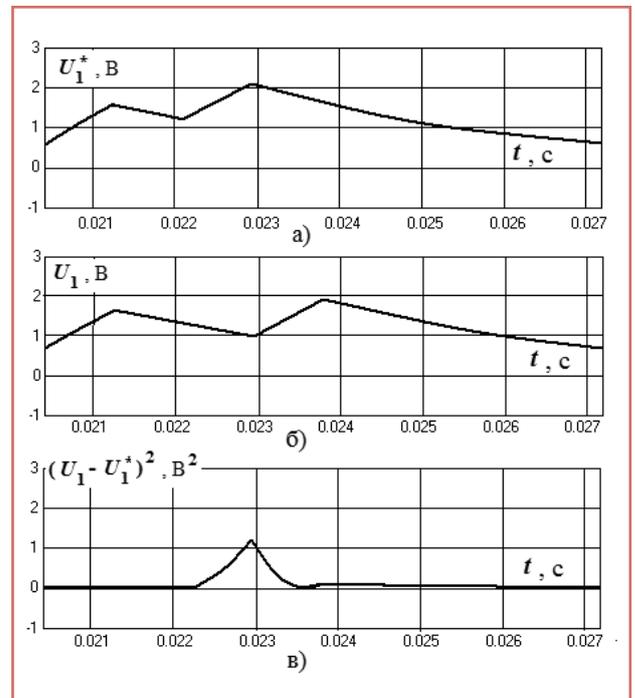


Рис. 5. Выходная  $U_1$  и эталонная  $U_1^*$  функции.

жения количества замкнутых витков в электромагнитных форсунках, используемых в импульсной системе топливоподачи дизельного двигателя повышенной надежности [3]. Для применения метода тестовых кодов необходимо к форсункам подключить генератор кодоимпульсных сигналов и определить реакции исправной форсунки на различные кодоимпульсные сигналы (эталонные сигналы). В качестве выходного сигнала можно использовать падение напряжения на сопротивлении, которое дополнительно вводится в цепь прохождения кодоимпульсных сигналов. С помощью математического моделирования работы форсунки с замкнутыми витками определить зависимость относительной погрешности выходного параметра системы (3) от номера кода и количества замкнутых витков. Полученные зависимости и эталонные сигналы записываются в память электронного блока управления. Для обнаружения сбоев в работе форсунок необходимо на них периодически подавать кодоимпульсные сигналы и по относительной погрешности выходного сигнала определять количество замкнутых витков.

### Выводы:

Предложен новый критерий для определения сбоев методом тестовых кодов – относительная погрешность выходного сигнала.

Проведенные расчеты показали, что новый критерий является более эффективным, чем используемый ранее критерий – среднее значение выходного параметра.

Предложенный критерий рекомендуется для использования при обнаружении сбоев в исполнительных механизмах, например, электродвигателях, электромагнитных форсунках и катушках зажигания двигателей внутреннего сгорания и других электромеханизмах.

Новый критерий рекомендуется для расчета переходных и установившихся процессов в электрических и электронных цепях транспортных средств.

### Литература:

1. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. М.: Мир, 1976, 600 с.
2. Дианов В.Н. Диагностика сбоев в электронной аппаратуре // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение". – 2007. – №2. – С. 16–47.
3. Дианов В.Н., Володина Н.А., Гевондян Т.А., Люминарская Е.С., Белоусов И.М., Золин М.В. «Импульсная система топливоподачи дизеля повышенной надежности». Патент РФ на полезную модель № 119396. Опубл. 20.08.2012г. Бюл.№23.

**Люминарская Екатерина Станиславовна** – родилась в 1988 году. Аспирантка кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета (ФГБОУ ВПО МГИУ). Является автором 6 статей и 6 патентов РФ.

**Дианов Вячеслав Николаевич** – родился в 1940 году. В 1964 году окончил Рязанский радиотехнический институт по специальности «Инженер-электрик по автоматике и телемеханике». В 2002 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Методы и средства обнаружения и регистрации источников сбоев в системах и устройствах с кодоимпульсной модуляцией

сигналов». Длительное время работал на предприятиях военно-промышленного комплекса (ВПК). В настоящее время профессор кафедры «Автоматика, информатика и системы управления» Московского государственного индустриального университета (ФГБОУ ВПО МГИУ). Автор 231 научного труда, из них 1 научное открытие в области теории надежности, теории безопасности «Свойство пассивных элементов радиоэлектронной аппаратуры увеличивать количество считываемой информации о системе под воздействием электрических сигналов» 2 монографии, 5 учебных пособий, 22 авторских свидетельства СССР, 25 патентов РФ.

**Lyuminarskaya Yekaterina** – was born in 1988. She is an advanced student of «Automation, Informatics and control systems» chair of Moscow State Industrial University (FGBOU VPO MGIU). She is an author of 6 articles and 6 patents of RF.

**Dianov Vyacheslav** – was born in 1940. In 1964 he graduated from Ryazan Radio technical Institute, speciality is «Electrical engineer of automation and telemechanics». In 2002 he defended a DPhil, the theme is «Methods and means of detection and registration of failure sources in systems and devices with code pulse signals modulations». He worked for a long time for enterprises of military-industrial complex. At present he works as a professor of «Automation, Informatics and control systems» chair of Moscow State Industrial University (FGBOU VPO MGIU). He is an author of 231 scientific works, including 1 scientific discovery in the sphere of reliability theory, safety theory «Feature of electronic radio equipment passive elements to increase the amount of readout information about the system under influence of signals» 2 monographs, 5 tutorials, 22 author's certificates of USSR, 25 patents of RF.

# Регулирование асинхронного двигателя изменением напряжения на статоре

// Regulation of the induction motor by varying the voltage on the stator //

Доманов В. И., к.т.н.,  
Доманов А. В., к.т.н.,  
Муллин И.Ю., Холявко А.О.,  
ГОУ ВПО «УлГТУ», г. Ульяновск

*Рассматриваются различные варианты асинхронных электроприводов с регулированием напряжения на статоре. Проведен анализ гармоник для тиристорных и транзисторных схем регулирования. Сравниваются чувствительности механических характеристик для этих вариантов электроприводов. Предлагается транзисторный регулятор с расширенными функциональными возможностями.*

*Ключевые слова:* регулятор напряжения, механическая характеристика, пусковой момент, чувствительность, широтно-импульсный преобразователь.

Широкое применение асинхронных двигателей (АД) в различных областях позволяет решать вопросы автоматизации многих объектов (грузоподъемные механизмы, насосы, вентиляторы и т.д.). Требования к управлению АД существенно различаются в зависимости от области применения. В ряде случаев (обеспечение плавного пуска или небольшой диапазон регулирования скорости) возможно применение регулирования напряжения (РН) на статоре АД.

Существуют различные схемы РН. Наиболее распространена схема тиристорного регулятора напряжения (ТРН) [1, 2]. Для такого режима работы уравнение механической характеристики имеет вид [2]

$$M_1 = \frac{m U_H^2 r_2^2 \gamma^2}{\omega_0 S \left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (1)$$

где  $M_1$  – момент АД с ТРН;

$S$  и  $U_H$  – скольжение и номинальное напряжение на статоре;

$m$  и  $\omega_0$  – число пар полюсов и синхронная частота поля статора;

$r_1$  и  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивление статора;

$r_2$  и  $x_2$  – активное и индуктивное сопротивление ротора;

$\gamma$  – коэффициент регулирования.

Регулирование напряжения на статоре АД возможно также с помощью транзисторного регулятора напряжения (ТрРН), приведенного на рис. 1 [5].

*Investigated different variants of induction motor drives with voltage regulation on the stator. The analysis of the harmonics for thyristor and transistor circuits regulation. Compared sensitivity of the mechanical characteristics of these drives. Offered transistor regulator with enhanced functionality.*

*Keywords:* voltage regulator, mechanical characteristics, torque, sensitivity, pulse-width converter.

Для этого регулятор предлагается выполнить в виде трехфазного выпрямительного моста, к которому подключены концы обмоток статора АД выполняющие соединение «звезда». Полярные выходы трехфазного выпрямительного моста через транзисторы подключены к нулевому проводу питающего напряжения. Точки подключения обмоток статора к трехфазному выпрямительному мосту подключены также к нулевому проводу через RC-цепи. Для замыкания реактивных токов полярные выходы соединены через сопротивление  $r_x$ .

Сущность работы схемы поясняется чертежами, где на рис. 1 приведена

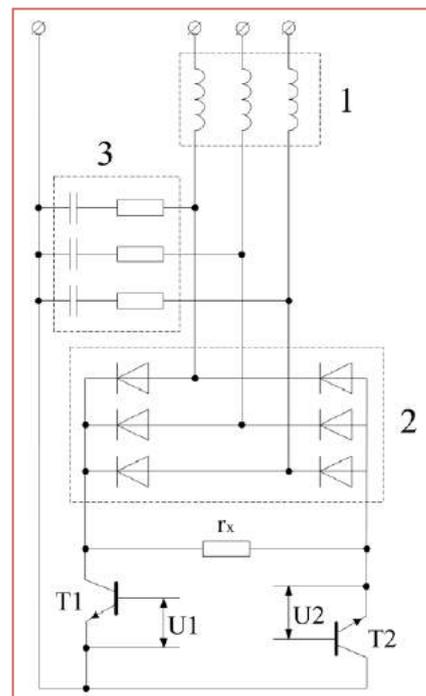


Рис. 1. Транзисторный регулятор напряжения ТрРН.

схема асинхронного электропривода, оснащенного предлагаемым устройством, на рис. 2 показаны диаграммы сигналов на транзисторах.

Входное переменное напряжение поступает через обмотки статора АД (1) на трехфазный выпрямительный мост (2), полярные выходы которого через транзисторы Т1 и Т2, работающие в ШИМ-режиме, подключены к нулевому проводу питающего напряжения. Точки подключения обмоток статора к трехфазному выпрямительному мосту подключены так же к нулевому проводу через РС-цепи (3). Предлагаемый ТрРН уменьшает бросок тока за счет плавного наращивания напряжения статорных обмоток по любому возможному закону его изменения во времени.

Устройство работает следующим образом. При подключении обмотки статора двигателя (1) к питающему напряжению на выходных точках трехфазного выпрямительного моста (2) появляется постоянное напряжение, прикладываемое к двум транзисторам (Т1 и Т2), которые управляются ШИМ сигналами U1 и U2.

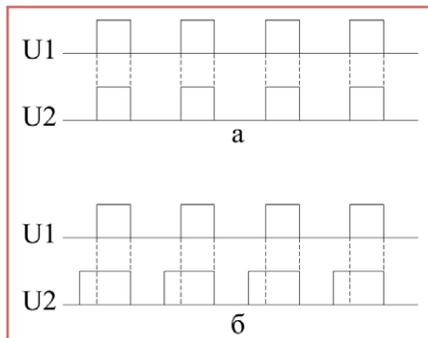


Рис. 2. Управляющие сигналы ключей ТрРН для различных режимов работы.

При синхронных и равных по длительности сигналах ШИМ осуществляется плавный пуск (рис. 2а).

При синхронных и не равных по длительности сигналах осуществляется динамическое торможение (рис. 2б).

Сравним работу ТРН и ТрРН. Форма выходного напряжения при фазовом управлении удовлетворяет условию  $f(x) = -f(x+p)$  и на основном периоде описывается следующей функцией [3]

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \in (0, (1 - K_p)\pi) \\ \sin x, & x \in ((1 - K_p)\pi, \pi) \end{cases}$$

Эту функцию можно разложить в ряд Фурье на гармонические составляющие с коэффициентами, которые определяются по формулам

$$a_q = \begin{cases} -\frac{1}{\pi} \sin^2 \pi K_p, & q = 1 \\ -\frac{1}{\pi} \left[ \frac{1 - \cos(1 - q)\pi K_p}{1 - q} - \frac{1 - \cos(1 + q)\pi K_p}{1 + q} \right], & q \neq 1 \end{cases}$$

$$b_q = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \left[ \pi K_p + \frac{\sin 2\pi K_p}{2} \right], & q = 1 \\ \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\sin(1 - q)\pi K_p}{1 - q} - \frac{\sin(1 + q)\pi K_p}{1 + q} \right], & q \neq 1 \end{cases}$$

где  $T = 2p; q = 1, 3, \dots, 2n - 1$ .

Зависимости амплитуд гармоник для фазового управления находятся в соответствии с выражением

$$Y_q = \sqrt{a_q^2 + b_q^2}$$

а для широтно-импульсного управления по формуле

$$Y_q = \frac{4}{\pi q} \sin\left(\frac{\pi q}{2} K_p\right)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и рис. 4.

Применение в качестве регулирующего параметра коэффициента регулирования позволяет сравнить между собой изменения спектрального состава при различных формах опорного напряжения.

Анализ графиков (рис. 3, 4) показывает, что:

- амплитуда гармоник в ШИП приблизительно в  $\sqrt{2}$  раза выше, чем в ТРН;

- в ШИП минимум суммы амплитуд высших гармоник достигается при  $K_p \approx 1/\sqrt{2}$ , при этом  $Y_1 = 1,15$ ;

- в ТРН минимум суммы амплитуд высших гармоник достигается при  $K_p = 1$ , при этом  $Y_1 = 1$ .

Необходимо учитывать, что при фазовом управлении частота первой гармоники составляет 50 Гц, а при ШИП она гораздо выше – 1-10 кГц. Поэтому для фильтрации (сглаживания) высших гармоник в ШИП можно использовать фильтры с меньшими весогабаритными показателями.

Анализ работы ТрРН позволил получить уравнение механической характеристики для этого режима

$$M_2 = \frac{mU_H^2 r_2 \left( \frac{r_1 + r_X \gamma^2}{r_1 + r_X} \right)}{\omega_0 S \left[ \left( r_1 + r_X (1 - \gamma) + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]} \quad (2)$$

где  $M_2$  – момент АД с ТрРН;

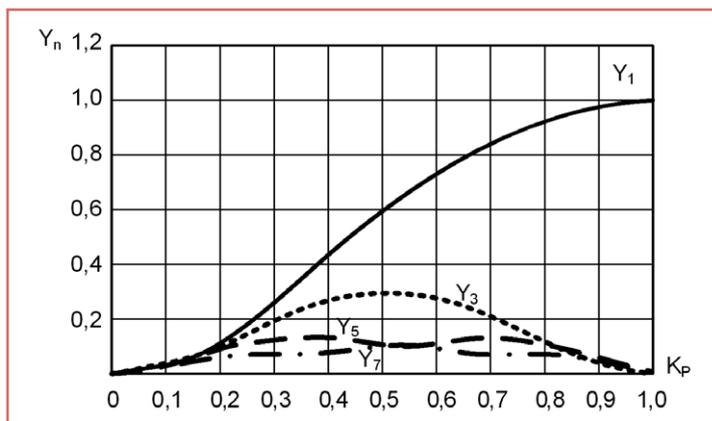


Рис. 3. Амплитудный спектр фазового управления.

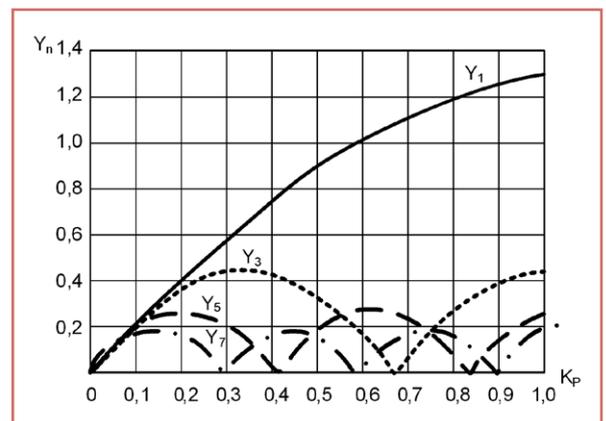
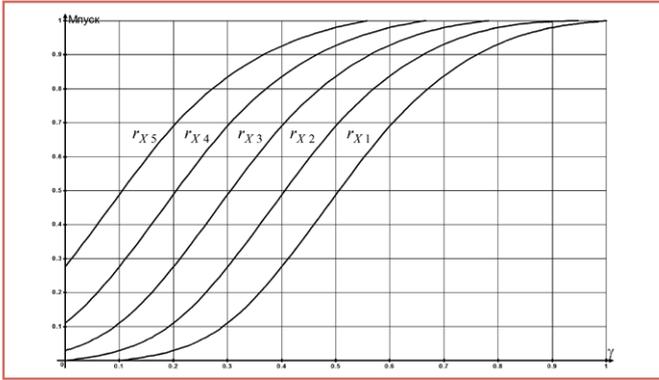
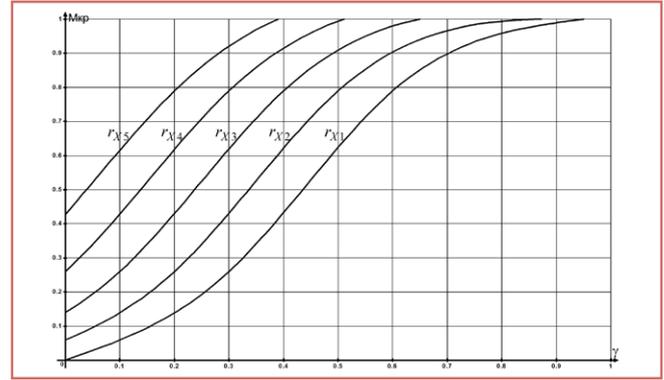


Рис. 4. Амплитудный спектр широтно-импульсного управления.

Рис. 5. Зависимости  $M_{\text{Пуск}} = f(\gamma, r_X)$ .Рис. 6. Зависимости  $M_{\text{KR}} = f(\gamma, r_X)$ .

$r_X$  – сопротивление нагрузки моста. Оценим чувствительности выражений (1, 2) к вариациям параметров  $\gamma$  и  $r_X$  [4]. Чувствительность функции  $F(x, y, \dots, z)$  к варьируемому параметру  $(x, y, \dots, z)$  определяется выражением

$$S_F^x = \frac{dF}{dx} \frac{x}{F} \quad (3)$$

Определим чувствительности  $S_{M_1}^y$ ,  $S_{M_2}^y$ ,  $S_{M_3}^x$ . В соответствии с формулами (1, 2, 3) получаем

$$S_{M_1}^y = 2 \quad (4)$$

если  $r_X > r_1$ , то

$$S_{M_2}^y \approx 2 + \frac{2\gamma r_X \left[ r_X(1-\gamma) + \frac{r_2}{S} \right]}{\left( r_1 + r_X(1-\gamma) + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (5)$$

$$S_{M_2}^{r_X} \approx - \frac{2r_X^2 \gamma^2 (1-\gamma) \left[ r_X(1-\gamma) + \frac{r_2}{S} \right]}{\left( r_1 + r_X(1-\gamma) + \frac{r_2}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (6)$$

Анализ выражений (4-6) показывает, что:

- чувствительность  $S_{M_1}^y$  постоянна и не меняется от режима работы;
- чувствительности  $S_{M_2}^y$  и  $S_{M_2}^{r_X}$  являются функциями переменных;
- чувствительность  $S_{M_2}^y$  больше, чем  $S_{M_1}^y$ .

В соответствии с выражениями (1, 2) были построены механические характеристики для различных значений  $\gamma$  и  $r_X$ . На основании этих характеристик были вычислены в относительных единицах зависимости  $M_{\text{KR}} = f(\gamma, r_X)$ ,  $M_{\text{Пуск}} = f(\gamma, r_X)$ , которые приведены на рис. 5 и 6, где  $r_{X1} > r_{X2} > r_{X3} > r_{X4} > r_{X5}$ .

Из графиков видно, что сопротивление  $r_X$  эффективно влияет на механические характеристики АД при регулировании с помощью ТрРН.

В частности, с помощью  $r_X$  можно ограничивать диапазон регулирования и задавать начальные значения  $M_{\text{Пуск}}$  и  $M_{\text{KR}}$ , что является важным при работе грузоподъемных механизмов и транспортных систем.

#### Литература:

1. Терехов В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М.: «Академия», 2005. – 304 с.
2. Ковчин С.А. Теория электропривода / С.А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.
3. Аверин С.В. Сравнение способов регулирования переменного напряжения с помощью коэффициента регулирования / С. В. Аверин, Ю.Г. Следков // Практическая силовая электроника. – 2002, №8.
4. Доманов В.И. Анализ чувствительности системы управления трехфазного регулятора напряжения / В.И. Доманов, А.В. Доманов, И.Ю. Муллин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010, №6.
5. Доманов В.И. Электропривод с трехфазным асинхронным двигателем / В.И. Доманов, А.В. Доманов, И.Ю. Муллин // Патент РФ на изобретение №2418356, зарегистрирован 10.05.2011.

**Доманов Виктор Иванович** – родился в 1950 году. Окончил в 1972 году Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». В 1980 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Методика расчета и исследования следящих систем с устройствами упреждающей коррекции для токарных станков с ЧПУ». Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 98 научных трудов, автор 10 изобретений.

**Доманов Андрей Викторович** – родился в 1976 году. Окончил в 1999 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Измерительно-вычислительные комплексы и системы». В 2002 году защитил кандидатскую диссертацию на тему: «Разработка и исследование электроусилителя рулевого управления легковых автомобилей на основе бесконтактных двигателей». Кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Научно-исследовательского технологического института УлГТУ. Имеет 67 научных трудов, автор 3 изобретений.

**Муллин Игорь Юрьевич** – родился в 1987 году. Окончил в 2009 году Ульяновский государственный технический университет по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». Ассистент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» энергетического факультета УлГТУ. Имеет 9 научных трудов, автор 2 изобретений.

**Холявко Артур Олегович** – родился в 1988 году. Студент Ульяновского государственного технического университета по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». Имеет публикации в области электромеханики и электроники.

**Domanov Viktor** – was born in 1950. In 1972 he graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute specializing in «Aircraft instrumentation». In 1980 has protected Ph. D. thesis by the theme «The method of calculation and research tracking systems with pre-emptive corrective devices for lathes numerically controlled». Ph. D., docent of sub-facility «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has 98 scientific publications, author of 10 inventions.

**Domanov Andrey** – was born in 1976. In 1999 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «The measuring-computing complexes and systems». In 2002 has protected Ph. D. thesis by the theme «Development and investigation of electrical power steering of passenger cars on the basis of contactless engines». Ph. D., docent, Deputy Director of Scientific-Research Technology Institute of Ulyanovsk State University. He has 67 scientific publications, author of 3 inventions.

**Mullin Igor** – was born in 1987. In 2009 he graduated from Ulyanovsk State Technical University specializing in «Electric drives and automation of industrial installations». Assistant of sub-facility «Electric drives and automation of industrial installations» in Ulyanovsk State Technical University. He has 9 scientific publications, author of 2 inventions.

**Kholiyavko Artur** – was born in 1988. Currently studies at the Ulyanovsk State Technical University specializing in «Electric drives and automation of industrial installations». He has published articles in electromechanics and electronics.

# Сравнительное исследование скалярного и векторного способов управления гребным электродвигателем

// Comparative study of scalar and vector modes of controlling the propulsion motor //

Калинин И.М., к.т.н.,  
Махонин С.В., Титов В.В.  
«ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский  
государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

*С использованием пакета прикладных программ MatLab на примере управления ГЭД-2500-8 ОМ4 промоделирован электропривод с асинхронным двигателем (АД) с короткозамкнутым ротором («белочья клетка») при скалярном и векторном способах частотного управления. Показано преимущество векторного управления по сравнению со скалярным по критерию энергетических затрат. Исследовано свойство подавления пульсаций электромагнитного момента АД, вызванных несинусоидальным распределением магнитной индукции в воздушном зазоре АД при векторном управлении гребным электроприводом (ГЭД).  
Ключевые слова: управление гребным электродвигателем, асинхронный двигатель, энергооптимальное управление, пульсации электромагнитного момента*

*The electric motor drive with squirrel-cage induction motor («squirrel-cage») with scalar and vector modes of frequency control was simulated using MatLab application software package on the example of the propulsion motor ГЭД-205-8 ОМ4 control. The advantage of vector control compared to scalar control was shown by power consumption criteria. The property of electromagnetic torque pulsation dampening of the induction motor caused by non-sinusoidal distribution of air-gap flux density of the induction motor with vector control of the propulsion motor was investigated.*

*Keywords: control of the propulsion motor, induction motor, energy-optimal control, electromagnetic torque pulsation.*

В современном мире все большую остроту приобретает глобальная проблема энергосбережения, обусловленная не только ростом потребления электроэнергии в промышленности и в быту и связанной с ним необходимостью строительства и ввода в эксплуатацию новых энергетических мощностей, но и ограниченностью мировых запасов природных ресурсов. Так как среди потребителей электрической энергии доминируют электромеханические преобразователи, главным

путем решения указанной проблемы является внедрение во все отрасли народного хозяйства систем регулируемого электропривода [1], которые признаны в мировой практике одной из наиболее эффективных энергосберегающих и ресурсосберегающих экологически чистых технологий.

Для судовых электроэнергетических систем задача энергосбережения заключается в оптимизации управления электроприводами и, в первую очередь, гребными электродвигате-

лями (ГЭД) систем электродвижения (СЭД) с целью снижения удельного расхода топлива. Для примера оптимальное управление при волнении, по расчетам [2], может позволить снизить удельный расход дизельного топлива на 5 % вследствие увеличения степени загрузки дизель-генераторов, увеличить на 7 % и более моторесурс дизелей и повысить скорость судна на волнении 6 баллов примерно на 1 уз.

Распространено мнение [8], что свойства электроприводов переменного тока как объектов экстремального управления исследованы недостаточно полно. Отсутствуют практически реализуемые алгоритмы, обеспечивающие энергооптимальные режимы ЭП в условиях малой априорной информации о параметрах силовой части. Известные алгоритмы управления требуют знания параметров электрической машины и не учитывают возможные параметрические изменения. Все это препятствует внедрению экстремальных законов в практику управления ЭП переменного тока, что, как показывает анализ, при сравнительно малых затратах на реализацию указанных алгоритмов с помощью современной микропроцессорной техники может дать дополнительный экономический эффект.

Существует два пути решения этой проблемы:

- автоматический поиск в процессе функционирования ЭП экстремума целевой функции технико-энергетического критерия, оцениваемой по результатам текущих измерений, что характеризуется низким быстродей-

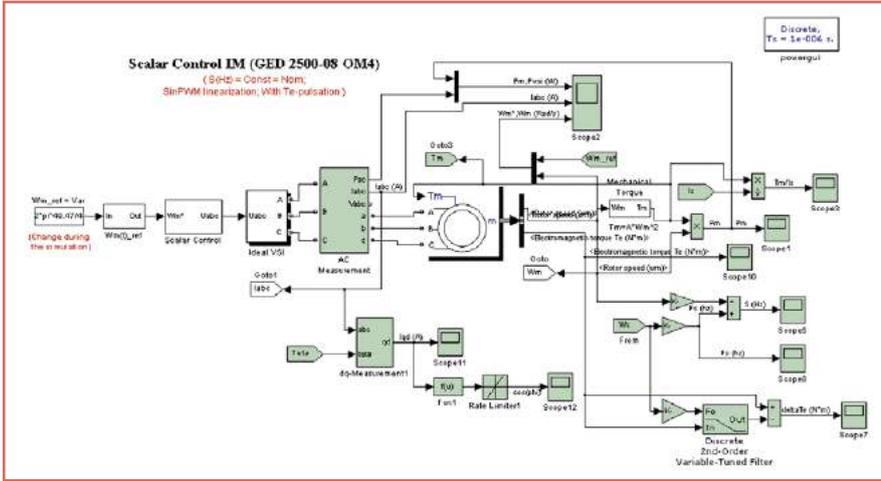


Рис. 1. Схема модели скалярного управления ГЭД с подчиненным токовым регулированием.

ствием и в настоящем исследовании не рассматривается;

- реализация заранее полученных оптимальных соотношений координат двигателя на основе текущей идентификации переменных параметров объекта управления, определяющих рассматриваемые соотношения.

Исследования [7] показывают идентичность известных критериев энергооптимального управления: по минимуму суммарных потерь в двигателе и по минимуму его статорного тока –  $\min [I_s/T_m]$ , где  $T_m$  – электромагнитный момент АД. В работах [3, 4] показывается возможность увеличения нагрузки АД сверх номинала при управлении двигателем при минимизации его потерь без повышения паспортной температуры АД.

В данном исследовании обсуждаются вопросы энергооптимального векторного управления АД по критерию минимума тока статора. Исследуется вопрос выбора обобщенного параметра оптимального управления, который бы не зависел или слабо зависел от параметрических изменений АД в процессе изменений режимов его работы. Что, в свою очередь, позволило бы относительно не сложно реализовать алгоритм оптимального управления АД практически.

Для проведения сравнительного анализа распространенных способов скалярного и векторного управлений АД в плане энергетических затрат управления и по возможностям подавления пульсаций электромагнитного момента, вызванных несинусоидаль-

ным распределением величины магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя, в работе представлены соответствующие результаты моделирования обоих способов управления.

Первоначально исследуется вопрос о подавлении пульсаций электромагнитного момента АД при скалярном и векторном управлении.

На рис. 1 представлена общая схема модели скалярного управления ГЭД с подчиненным токовым регулированием по модулю тока статора  $I_s$  при постоянном значении скольжения, равно номинальному  $s(\Gamma_u) = s_{ном}$  (затемненные блоки относятся к измерительной части схемы). С целью исключения влияния широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на достоверность проводимых исследований преобразователь частоты (ПЧ) представлен в виде управляемого идеального источника трехфазного напряжения “Ideal VSI”.

Управление блоком “Ideal VSI” осуществляется заданием с помощью блока скалярного регулирования “Scalar Control” по получаемому заданию частоты вращения вала АД  $W_m\_ref$ . При этом блок “ $W_m(t)\_ref$ ” служит для задания интенсивности изменений  $W_m$ .

Для моделирования ГЭД используется библиотечная модель АД пакета с учетом насыщения кривой намагничивания. Необходимый нагрузочный момент ГЭД создается блоком “Mechanical Torque”.

Структура блока “Scalar Control” (рис. 2) состоит из PI-регулятора частоты вращения  $W_m$  и подчиненного PI-регулятора модуля фазного тока  $I_s$ . Преобразование модуля фазного напряжения  $u_m$  в трехфазное управляющее напряжение  $u_a, u_b, u_c$  проводится в блоке “Vs to Uabc” в соответствии с выражением

$$\left. \begin{aligned} u_a &= u_m \cdot \sin \theta \\ u_b &= u_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_c &= u_m \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} (1)$$

Вычисления текущего углового значения аргумента  $\theta$  (Teta на рис. 2) осуществляется путем интегрирования в соответствии с выражением

$$\cos \varphi = \frac{I_q}{\sqrt{I_q^2 + I_d^2}} (2)$$

где  $p$  – количество пар полюсов АД;  $\omega_m$  – угловая частота вращения АД.

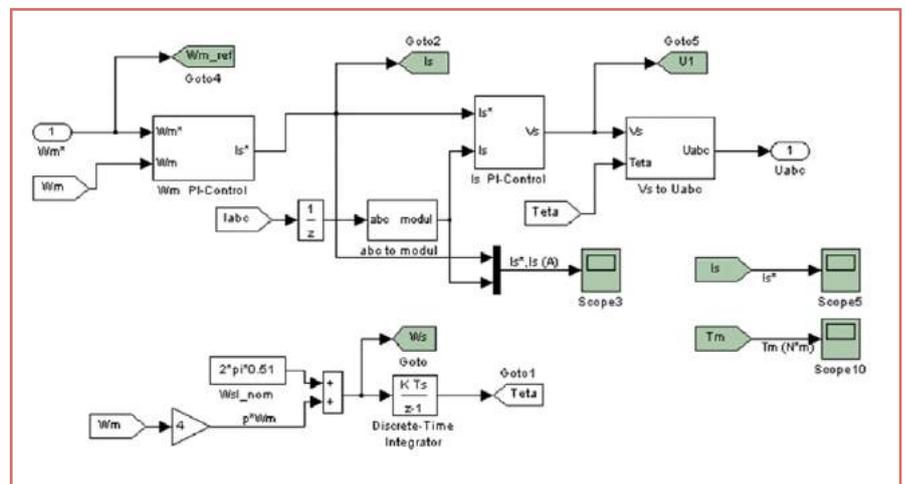


Рис. 2. Структура блока “Scalar Control” схемы скалярного управления ГЭД.

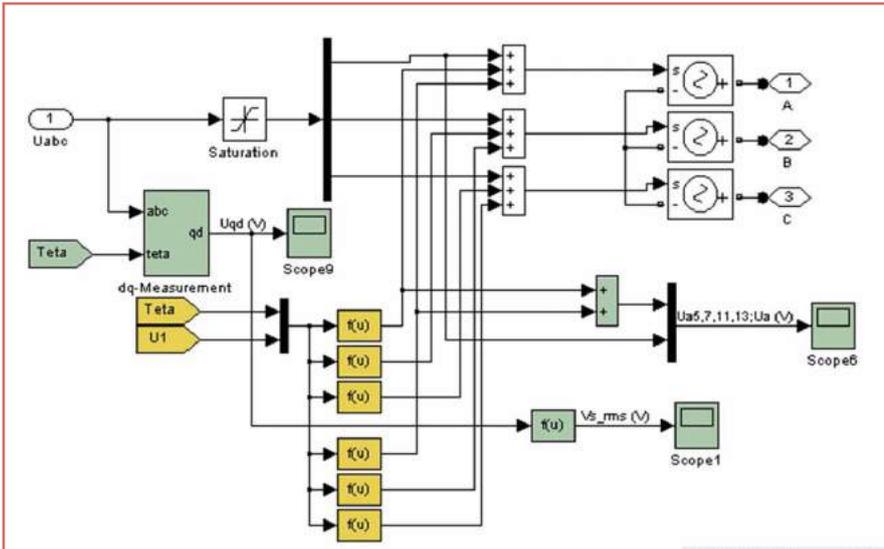


Рис. 3. Структура блока "Ideal VSI" модели скалярного управления ГЭД.

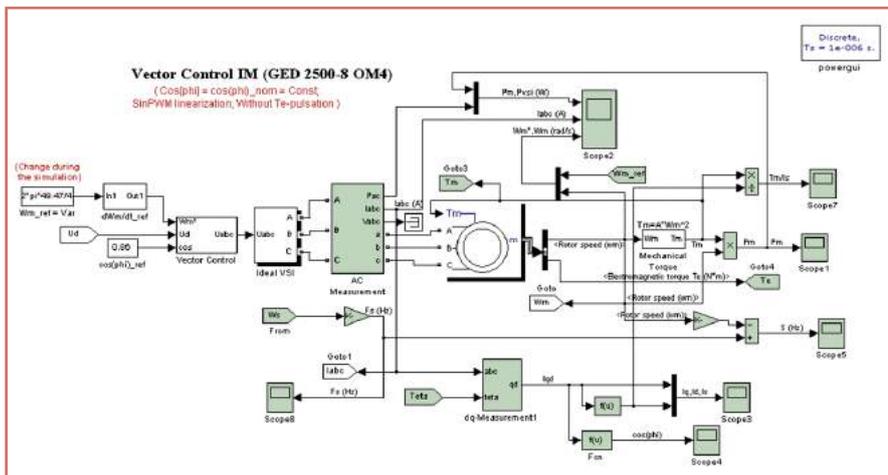


Рис. 4. Схема модели векторного управления при постоянном значении  $\cos\phi$ .

Библиотечная модель АД в программе MatLab базируется на допущении о синусоидальном распределении магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины [5]. Тем не менее, известно, что в реальных

электрических машинах вследствие влияния зубцов статора и ротора распределение магнитной индукции в воздушном зазоре несинусоидально. Обычно в кривой распределения магнитной индукции вращающегося

потока, создаваемого трехфазной обмоткой, имеется ряд высших нечетных гармонических составляющих, не кратных трем. При этом гармоники порядка 7-го, 13-го, 19-го и т.д. дают потоки, вращающиеся в положительную сторону, и гармоники 5-я, 11-я, 17-я и т.д. дают потоки, вращающиеся в сторону, противоположную вращению первой гармоники [6].

По рассмотренной причине электродвижущие силы (ЭДС), наведенные в обмотке статора, будут полигармоническими. Взаимодействие несинусоидальных магнитных полей и токов приведет к пульсациям электромагнитного момента АД. Поэтому в состав фазных контуров стандартной модели АД вводились дополнительные ЭДС пятой, седьмой и одиннадцатой, тринадцатой гармоник, параметры которых определялись амплитудой основной гармоники напряжения  $U_1$  и углом  $\theta$  (рис. 3) в соответствии с выражением

$$u_n = \frac{u_1}{n} \sin(n\theta + \gamma) \quad (3)$$

где  $u_1$  – мгновенное значение напряжения первой гармоники;  $n$  – порядковый номер гармонической составляющей;  $\gamma$  – фазовый угол.

На рис. 4 приведена схема модели векторного управления ГЭД при значении  $\cos(\phi) = \text{const}$  (рис. 4). Задающими воздействиями для блока векторного регулирования "Vector Control" являются  $Wm\_ref = \text{const}$ .

С целью обеспечения поддержания постоянства  $\cos\phi = \text{const}$  синхронная система координат (системе координат  $dq$ ) ориентирована по изображающему вектору напряжения статора  $U$  (рис. 5).

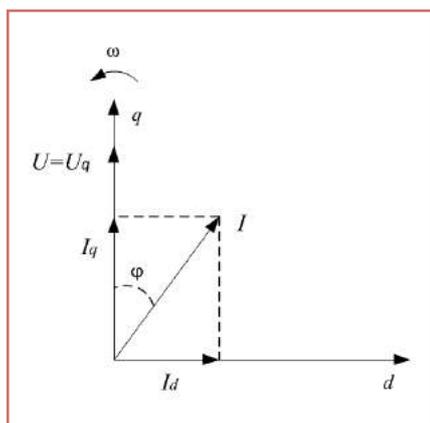


Рис. 5. Напряжения и токи АД в синхронной системе координат.

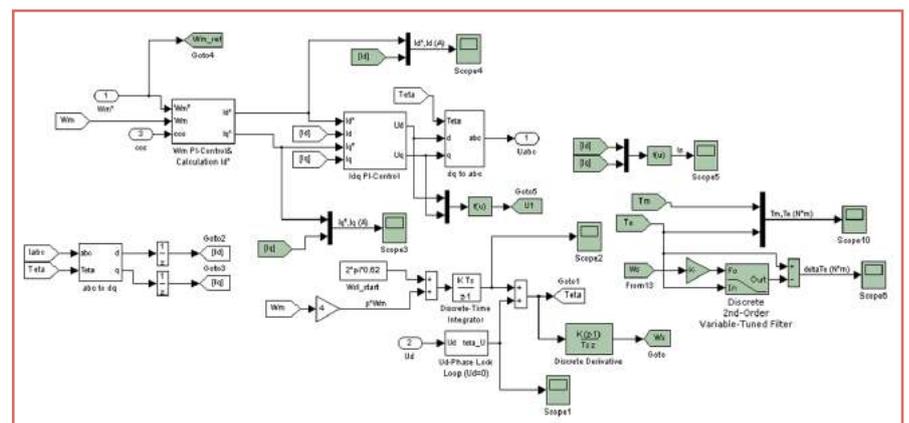


Рис. 6. Структура блока "Vector Control" модели векторного управления ГЭД.

Таблица 1. Параметры ГЭД-2500-8 ОМ4.

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, , кВт	2500
Номинальный ток, , А	569
Номинальное линейное напряжение, , В	3000
Номинальная частота тока статора, , Гц	50
Номинальная частота вращения ротора, , об/мин	746
Номинальный момент на валу, , кН·м	32,1
Номинальное скольжение, , о.е.	0,0053
Число пар полюсов,	4
Число фаз,	3
Коэффициент полезного действия, , о.е.	0,96
Коэффициент мощности,	0,86
Активное сопротивление фазы обмотки статора, , Ом	0,015
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, , Ом	0,0168
Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, , Ом	8,92
Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора, , Ом	0,332
Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора, , Ом	0,392

В этом случае  $U=U_q, U_d=0$  и коэффициент мощности АД

$$\cos\varphi = \frac{I_q}{\sqrt{I_q^2 + I_d^2}} \quad (4)$$

Схема модели блока векторного регулирования приведена на рис. 6 и состоит из двух основных блоков управления: блока PI-регулирования  $W_m$  – “ $W_m$  PI-control & Id-calculation” и блока “ $Idq$  PI-control” PI-регулирования составляющих тока статора  $I_d^*, I_q^*$ .

Структура блока “ $W_m$  PI-control & Id-calculation” в составе блока векторного регулирования представлена на рис. 7. Заданное значение составляющей тока  $I_d^*$  вычисляется из значения  $I_q^*$  по заданному  $= const$

$$I_d^* = \frac{I_q^*}{\cos\varphi} \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (5)$$

При этом значение  $I_q^*$  получено в результате PI-регулирования угловой частоты вращения  $\omega_m$ .

Для обеспечения заданной ориентации системы координат по вектору напряжения предусмотрен блок фазовой ориентации “ $U_d$ -Phase Lock Loop” (рис. 8), построенный по принципу I-регулятора составляющей напряжения  $U_d$  ( $U_d^* = 0$ ). В результате работы блока обеспечивается подстройка угла поворота синхронной системы координат для обеспечения требования  $U_d = 0$  в соответствии с выражением:

$$\theta = \int(\omega_m + \omega_{нач})dt + \frac{1}{T_u} \int U_d dt \quad (6)$$

где  $T_u$  – постоянная времени; – начальная угловая частота.

Для сравнения рассмотренных видов управления выполнены расчетные эксперименты при частотно-управляемом пуске ГЭД-2500-8 ОМ4, параметры которого приведены в таблице 1. Результаты расчетов по подавлению пульсаций электромагнитного момента приведены в таблице 2.

Анализ расчетных данных таблицы 2 показывает:

- наличие периодической составляющей напряжения по оси  $d$  при векторном управлении (компенсационные составляющие 5, 7, 11 и 13-ой гармоник) и равенство нулю данной составляющей при скалярном управлении;

Таблица 2. Результаты расчетного эксперимента.

Расчетные параметры	Скалярное управление	Векторное управление
Действующее значение модуля вектора линейного напряжения, В		
Напряжение фазы А и сумма 5, 7, 11 и 13 гармонических составляющих, В		
Составляющие $U_q$ и $U_d$ фазного напряжения, В		
Токи фаз, А		
Заданная и фактическая угловые частоты вращения, рад/с		
Электромагнитный момент, Нм		
Пульсации электромагнитного момента, Нм		

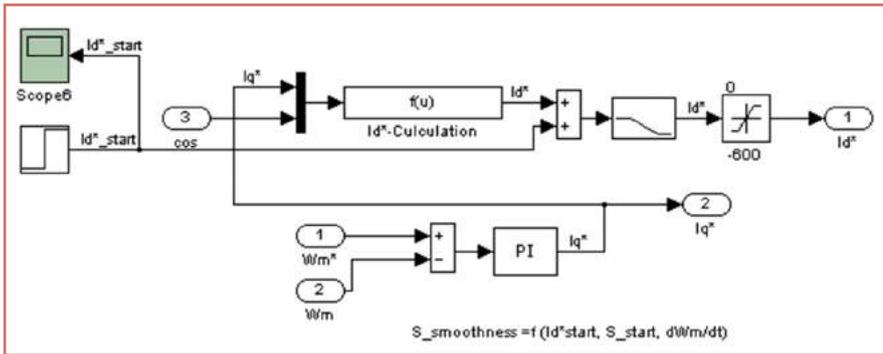


Рис. 7. Структура блока "Wm PI-Control & Id-Calculation".

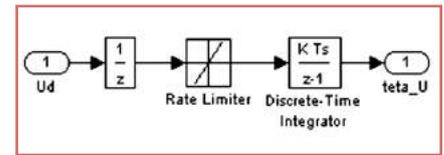


Рис. 8. Структура субблока "Ud-Phase Lock Loop".

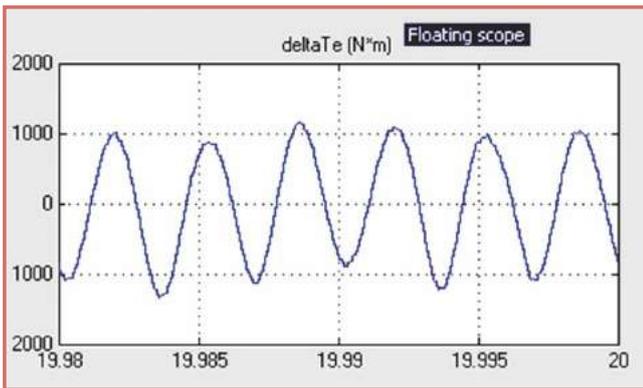


Рис. 9. Пульсации электромагнитного момента ГЭД-2500-8 ОМ4 в номинальном режиме работы при скалярном управлении по модулю тока  $I_s$  с постоянным значением  $s=s_{ном}$ .

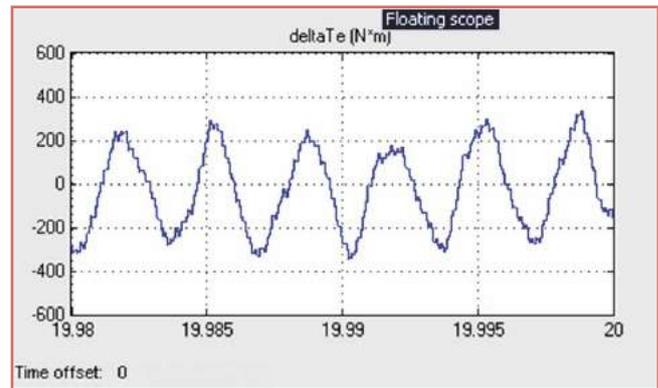


Рис. 10. Пульсации электромагнитного момента ГЭД-2500-8 ОМ4 в номинальном режиме работы при векторном управлении по  $\cos\varphi = \cos\varphi_{ном}$ .

- лучшую динамику разгона ГЭД при векторном управлении;
- пульсации электромагнитного момента ГЭД при скалярном управлении на три порядка больше, чем при векторном управлении.

Подавление пульсаций электромагнитного момента АД при вектор-

ном управлении обусловлено тем, что  $dq$ -составляющие токов и напряжений двигателя регулируются независимо. Тем самым создаются условия формирования компенсационных (противофазных) напряжений по 5, 7, 11 и 13-ой гармоникам по оси  $d$ . При скалярно-токовом управлении регулирование по модулю тока пытается создать упомянутые номера гармоник по оси  $q$  (по наименее инерционной оси управления), которые не являются по своему характеру компенсационными, а лишь усиливают колебания электромагнитного момента пропорционально коэффициентам токового регулятора.

Последним фактором объясняется повышенная инерционность скалярного способа управления по сравнению с векторным: при больших коэффициентах регулирования регулятора увеличиваются пульсации электромагнитного

момента и уменьшается инерционность регулирования частоты вращения двигателя, при малых – пульсации момента уменьшаются, но увеличивается инерционность регулирования частоты вращения.

В конечном счете следует иметь в виду, что на практике значение пульсаций электромагнитного момента в низкочастотной области его спектра ГЭД будут определяться не только несинусоидальным распределением величины магнитной индукции в зазоре, но и свойствами ШИМ, в особенности величиной несущей частоты вращения. Величина выигрыша по пульсациям электромагнитного момента при векторном способе управления может быть несколько меньше и зависит от конкретного значения несущей частоты ШИМ.

Результаты моделирования по влиянию способа управления ГЭД-2500-8 ОМ4 на величину пульсаций электромагнитного момента в низкочастотной области спектра (инжектированы 5-ая и 7-ая гармоники напряжения), когда в составе электропривода используется АИН с ШИМ, приведены на рис. 9, 10.

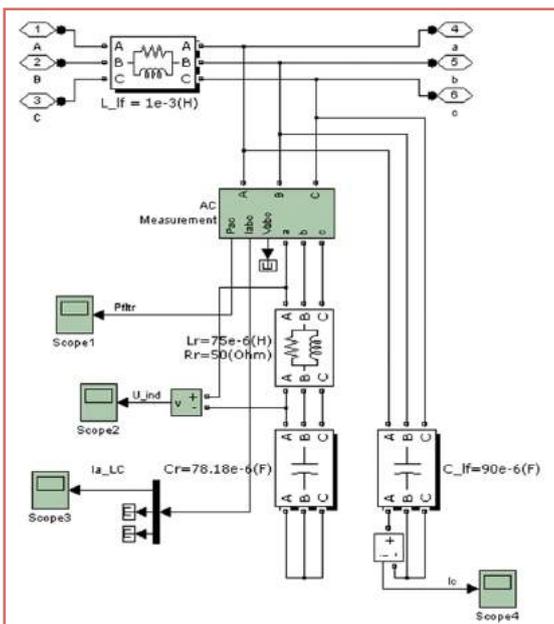


Рис. 11. Структура фильтра "Lowpass & Reject Filter".

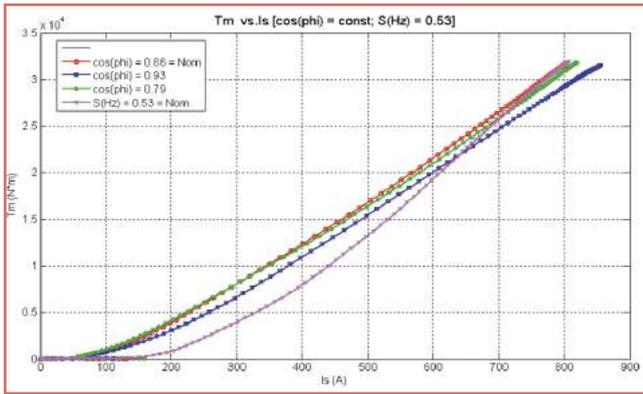


Рис. 12. Зависимости максимального момента на валу ГЭД-2500-8 OM4 от амплитуды фазного тока статора при векторном управлении с  $\cos\varphi = \text{const}$  и при скалярном управлении с постоянным  $S = S_{\text{НОМ}}$ .

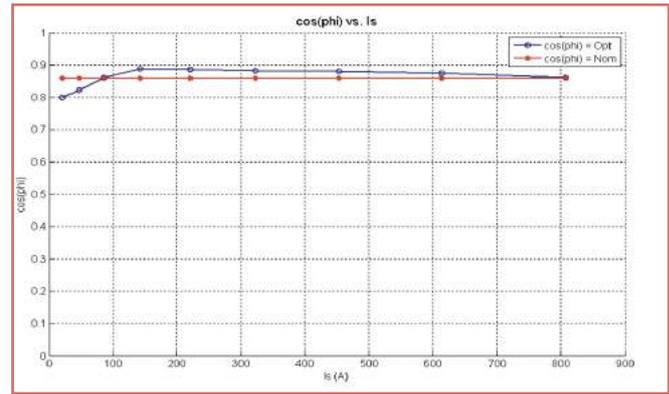


Рис. 13. Зависимость оптимального коэффициента мощности от амплитуды тока фазы при энергоэффективном векторном управлении ГЭД-2500-8 OM4.

Как видно из представленного, пульсации момента при векторном управлении ГЭД в 4-5 раз меньше, чем при скалярном управлении. Полученный результат по подавлению пульсаций обусловлен прежде всего заданным значением несущей частоты ШИМ  $f_{pwm} = 2400$  Гц и использованием на выходе АИН низкочастотного фильтра, конфигурация которого показана на рис. 11.

Для сравнения энергетической эффективности рассматриваемых способов управления по критерию из полученных временных зависимостей  $I_s(t)$  и  $T_m(t)$  (таблица 2) при разгоне ГЭД до номинальной частоты вращения были построены зависимости  $T_m = f(I_s)$  при различных значениях  $\cos\varphi$  и при постоянном значении абсолютного скольжения  $s$  – рис. 12.

Из представленного на рис. 12 видно, что наименьшее соотношение практически во всем диапазоне тока  $I_s$  достигается при векторном управлении ГЭД с  $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ . В нижней части диапазона тока  $I_s$

( $I_s < 0.3 I_{s_{\text{НОМ}}}$ ) минимальное значение параметра достигается при величине  $\cos\varphi < \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ . С целью нахождения оптимального значения  $\cos\varphi_{\text{opt}}$ , при котором параметр  $I_s/T_m$  достигает абсолютного минимума во всем диапазоне изменений статорного тока  $0 < I_s < I_{s_{\text{НОМ}}}$ , в работе был проведен отдельный эксперимент. В результате получена зависимость  $\cos\varphi_{\text{opt}} = f(I_s)$ , представленная на рис. 13. Для сравнения там же приведена величина  $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ .

Оценивая приведенные данные, можно сказать, что векторное управление при  $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{НОМ}}$  несущественно отличается от оптимального управления. С учетом того, что выявленное отличие параметра находится в диапазоне выходной мощности  $P < 0.1 P_{\text{НОМ}}$  для практических целей реализации энергоэффективного управления АД вполне подойдет векторное управление при  $\cos\varphi = \cos\varphi_{\text{НОМ}}$ .

При скалярно-токовом управлении с постоянным значением  $s = s_{\text{НОМ}}$  мини-

мальное значение параметра может быть получено только на номинальной частоте вращения вала ГЭД. При этом, как показано в работе [3], оптимальное значение скольжения меньше номинального и зависит от характера нагрузки АД.

В работе [7] показано, что энергетически оптимальное векторное управление по критерию минимума потерь в ПЧ и в АД совпадает с управлением по критерию минимума величины  $I_s/T_m$ . Однако на практике управление по критерию минимума потерь в ПЧ и АД существенно затруднено ввиду наличия известных проблем по изменению (расчету) потерь мощности при изменяющихся внутренних параметров ПЧ и АД.

Результаты настоящей работы показывают, что тех же результатов энергоэффективности управления приводом можно достичь, если управлять гораздо более простым способом векторного управления, с использованием обобщенного показа-

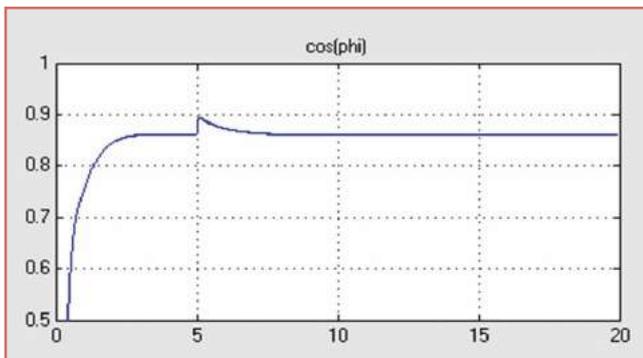


Рис. 14. Изменение  $\cos\varphi$  в процессе пуска ГЭД на номинальные обороты при квазиоптимальном векторном управлении и при значениях  $R_r = R_{r\text{НОМ}}$ ;  $R_s = R_{s\text{НОМ}}$ .

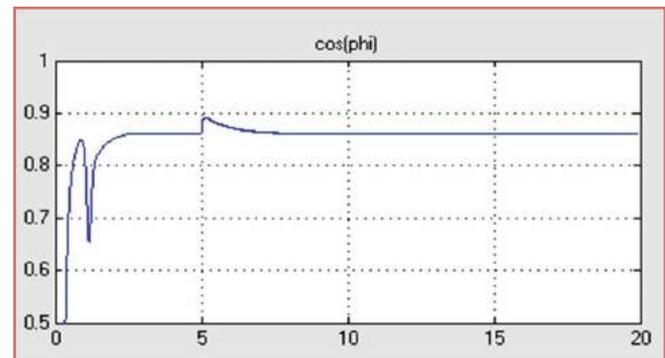


Рис. 15. Изменение  $\cos\varphi$  в процессе пуска ГЭД на номинальные обороты при квазиоптимальном векторном управлении и при значениях  $R_r = R_{r\text{НОМ}}/3$ ;  $R_s = R_{s\text{НОМ}}/3$ .

теля –  $\cos\varphi_{opt} = f(I_s)$ . Преимущество управления с использованием данного показателя заключается в том, что его величина практически не зависит от изменения внутренних параметров ПЧ и АД. Для примера на рис. 14, 15 представлены изменения величины  $\cos\varphi$  в процессе пуска ГЭД на номинальные обороты при квазиоптимальном ( $\cos\varphi = \cos\varphi_{ном}$ ) векторном управлении и при различных значениях активных сопротивлений ротора  $R_r$  и статора  $R_s$ .

### Выводы:

1. Энергетически оптимальное векторное управление ГЭД может быть достигнуто на основе задания зависимости коэффициента мощности двигателя от тока статора –  $\cos\varphi_{opt} = f(I_s)$ . При этом зависимость  $\cos\varphi_{opt} = f(I_s)$  практически не зависит от изменения внутренних параметров ПЧ и АД.

2. Низкочастотные пульсации электромагнитного момента ГЭД в предлагаемом векторном управлении двигателем подавляются автоматически. При скалярном управлении ГЭД для подавления рассматриваемых пульсаций необходимо введение специальных дополнительных алгоритмов.

### Литература:

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. «Энергосберегающий асинхронный электропривод», М.: Асадема, 2004 г.
2. Хайкин А.Б., Васильев В.Н., Полонский В.И. «Автоматизированные гребные электрические установки», М.: «Транспорт», 1986 г.
3. Калинин И.М., Хомяк В.А., Балабанов Б.А., Долгов В.А. Управление гребных асинхронным двигателем по критерию минимизации потерь. Журнал университета водных коммуникаций, выпуск 3, СПб, 2011 г.
4. Калинин И.М., Хомяк В.А., Балабанов Б.А., Долгов В.А. Основы управления асинхронным

гребным электродвигателем экономичной системы электродвижения. Электрофорум №2, СПб.: ФГУП «ЦНИИ СЭТ», 2011 г.

5. Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery, IEEE Press, 2002 г.

6. Шенфер К.И. Асинхронные машины. ГО НТИ редакция энергетической литературы, М.: 1938 г.

7. Energy Efficiency Optimization of Induction Motors, MAGISTER, University M'Named Bougara – Boumerdes (Algeria), Electronic Systems Engineering, Mr. Yassine YAKHELEF, 005. 12/02/2007.

8. Поляков В.Н. Состояние теории и практики оптимального управления стационарными режимами электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями. Труды 3 международной научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Нижний Новгород: «Вектор-ТиС», 2001 г.

**Калинин Игорь Михайлович** – родился в 1965 году. В 1987 году окончил ВВМИУ им. Дзержинского по специальности «Эксплуатация электроэнергетических систем подводных лодок». Кандидат технических наук, доцент. В 1977 году защитил диссертацию на тему: «Избирательный контроль изоляции корабельного электрооборудования с наложением постоянного напряжения». Педагогическая и научная деятельность – 16 лет. В настоящее время – руководитель инновационных проектов ФГУП «ЦНИИ СЭТ», профессор ВМИИ. Имеет 49 печатных работ, 20 рукописных, 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о регистрации программ.

**Махонин Сергей Васильевич** – родился в 1951 году. В 1980 году окончил ЛЭТИ по специальности ВФА. В течение 35 лет работает в области радиоэлектроники, микропроцессорной техники, силовой электроники. В настоящее время работает начальником отдела преобразовательной техники филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный

центр». Автор 8 статей, 11 изобретений, 2 патентов на изобретение.

**Титов Валерий Вячеславович** – родился в 1947 году. В 1972 году окончил СПбГПУ по специальности «Радиотехника». Опыт работы – 40 лет в области разработки силовых преобразовательных устройств для систем радиопередачи, электропривода. В настоящее время работает старшим научным сотрудником ФГУП «ЦНИИ СЭТ». Имеет 11 статей, 8 изобретений, 1 патент на изобретение.

**Kalinin Igor** – was born in 1965. In 1987 he graduated from VVMIU named after Dzerzhinskiy, speciality is «Operation of submarine power systems». He is a Candidate of Engineering, an associate professor. In 1977 he defended a thesis, the theme is: «Selective insulation control of ship electric equipment with direct voltage application». He deals with educational and scientific work for 16 years. At present he is the head of innovative projects in FGUP «CNII SET», a professor of VMII. He has 49 printed works, 20 handwritings, 2 patents for invention, 1 patent for useful model, 2 certificates of program registry.

**Makhonin Sergey** – was born in 1951. In 1980 he graduated from LETI with a degree in VFA. His work experience is 35 years in radio electronics, microprocessor technology, power electronics. Currently he works as a head of the converter equipment department of «Central research institute of naval electrical engineering and technology» Federal state unitary enterprise «Krylovskiy state scientific center». He is an author of 8 articles, 11 inventions, 2 patents of invention.

**Titov Valeriy** – was born in 1947. In 1972 he graduated from SPBGPU, speciality is «Radio electronics». He has 40 year work experience in the sphere of power transformative device development for transmission and electric drive systems. At present he works as a senior scientist in FGUP «CNII SET». He has 11 publications, 8 inventions, 1 patent for invention.

# СБИС класса «система на кристалле» для мониторинга состояния линий электропередач

// The VLSI class «system on a chip» for monitoring high-voltage lines //

Лебедев С. В., Флегонтов В.Е., Глазов В.М., к.т.н.,  
ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр» г. Москва

Рыгалин Д.Б., д.э.н.,  
ОАО «ЗИТЦ», г. Москва

*В статье рассмотрены базовые решения по созданию микромощной СБИС класса «система на кристалле» для мониторинга состояния высоковольтных линий электропередач. Ключевые слова: СБИС класса «система на кристалле», мониторинг воздушных линий электропередач, устройства первичного сбора (УПС).*

*The article describes the basic solutions about creation of a micropower VLSIC of «system on a chip» class to monitor the condition of high voltage power lines. Keywords: VLSI class SoC, power distribution line monitoring, smart grid acquisition devices.*

В настоящее время в Российской Федерации в эксплуатации находится более 200 000 км линий электропередач (ЛЭП) напряжением выше 110кВ, более 400 000 км ЛЭП напряжением 20-35 кВ и более одного миллиона километров ЛЭП напряжением 6-10 кВ.

Надежность работы воздушных линий электропередач обеспечивается посредством мониторинга их состояния и погодных условий вдоль них. У нас в стране такой мониторинг осуществляется, в основном, при помощи оперативно-выездных бригад и бригад службы линий. Контроль линий электропередач производится визуально и не может обеспечить объективную оценку уровня состояния проводов и изоляторов. При огромной протяженности линий и их высокой изношенности, а также при труднодоступности большого числа участков число аварийных ситуаций постоянно растёт [1].

За рубежом широко распространены информационные системы монито-

ринга ЛЭП, которые состоят из сети смонтированных на линии датчиков, связанных с аппаратно-программным комплексом для обработки и представления реальной обстановки на ЛЭП в диспетчерских пунктах. Датчики обеспечивают непрерывное измерение тока в проводе, температуры, а также параметров, характеризующих текущее состояние элементов пролетов ЛЭП (натяжение, провис проводов, качество изоляторов, наличие обледенения), климатических условий вдоль трассы (скорость ветра, температура, влажность). Подобные информационные системы начинают разрабатываться и у нас [1], однако эти системы не удовлетворяют современным требованиям, как по точности измерений, так и по эксплуатационным характеристикам.

В тоже время, современная элементная база микроэлектроники в состоянии устранить эти недостатки и вывести эти системы на более высокий качественный уровень:

- обеспечить высокую точность измерений;
- вести контроль не только количества потребленной энергии, но и качества производимой электроэнергии;
- использовать современные беспроводные средства взаимного обмена информацией;
- снизить цену приборов учета при массовом производстве.

Основным звеном в системе мониторинга состояния линий электропередач, определяющим характеристики всей системы в целом, является устройство первичного сбора информации (УПС), которое должно представлять собой многофункциональный измеритель параметров электрической сети. Один такой прибор должен полностью заменить измерительный щит и позволить измерять напряжения и токи по всем трем фазам, активную и реактивную составляющие мощности, а также их интегральную характеристику – энергию.

Современный уровень развития элементной базы микроэлектроники в состоянии существенно снизить стоимость и габаритные размеры данных устройств, а это в свою очередь позволит использовать большее число УПС в составе системы, что повысит её эффективность за счет увеличения числа точек контроля.

Применение так называемых «систем на кристалле» (СнК) при создании УПС, объединяющих все функции измерения и цифровой обработки электрических характеристик линий электропередач в одной интегральной схеме, позволит резко снизить их энергопотребление и себестоимость.

Работы по созданию современных микросхем для измерения и мониторинга параметров электросети ведут такие ведущие мировые компании, как: Analog Devices, Texas Instruments, Maxim Integrated Products, ST Microelectronics, ON Semiconductor и другие. Они выпускают широкую гамму компонентов для реализации приборов и систем учета и контроля энергоресурсов различного уровня, от бюджетного бытового счетчика электроэнергии до промышленного счетчика высокого класса точности [2-5]. Однако следует отметить, что, несмотря на широкую номенклатуру приборов для измерения параметров электросети, выбрать оптимальный вариант для УПС не представляется возможным. Существующие решения либо ограничены по функциям, что предполагает применение нескольких микросхем в УПС, либо имеют излишнюю универсальность для задач мониторинга ЛЭП, а как следствие, увеличенное энергопотребление. Кроме того, большинство из них обладают недостаточной точностью измерения параметров электросети.

Представленные на рынке многофункциональные измерители параметров электрической сети имеют большие габариты, потребляемую мощность и высокую цену. Для их питания требуется отдельный трансформатор, подключаемый к высоковольтным проводам, а сами они должны размещаться на опоре высоковольтной линии электропередач.

Создание УПС на основе «системы на кристалле» позволит исключить эти недостатки. Однако такие микросхемы, особенно в условиях России, должны удовлетворять ряду специфических требований:

- наличие всех необходимых функций для решения задач мониторинга ЛЭП;
- расширенный температурный диапазон для работы в условиях крайнего севера и юга России;
- микроразмерность;
- применение в малогабаритном УПС с автономным питанием;
- низкая цена.

УПС удовлетворяющие этим требованиям могут монтироваться непосредственно на проводах ЛЭП в любой точке.

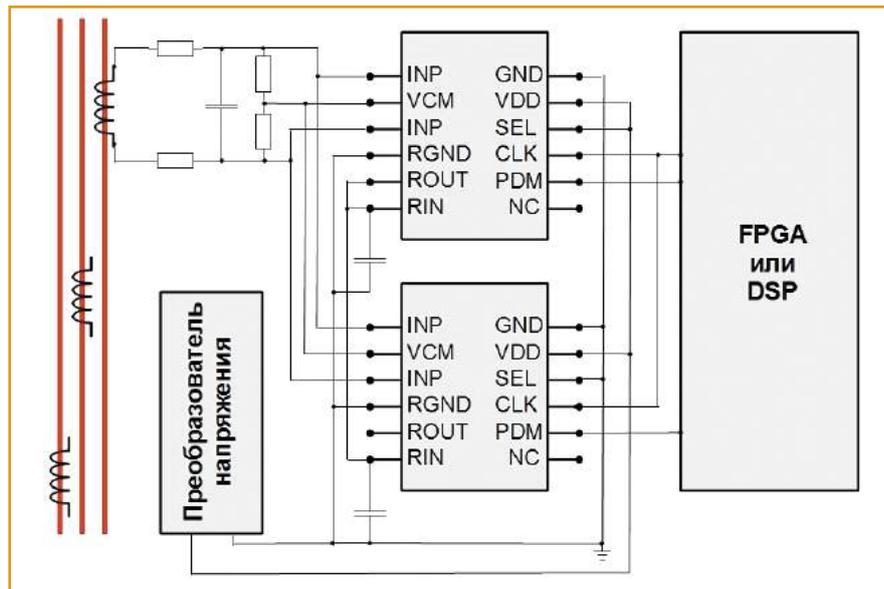


Рис. 1. Блок-схема макета СнК.

Появление таких малогабаритных, малопотребляющих, дешевых приборов с возможностью простого монтажа на высоковольтную линию между опорами и при этом обладающих высокой точностью измерений позволит ускорить внедрение в России автоматизированных систем мониторинга линий электропередач.

Нашим коллективом ведутся научно-исследовательские работы по созданию микро мощной СБИС класса «система на кристалле» для мониторинга состояния высоковольтных линий электропередач, базовые решения представлены ниже.

Схема включения разрабатываемой интегральной схемы (ИС) в составе макета представлена на рис. 1 (макет не включает в себя петлю Роговского). Напряжение, снимаемое с петли Роговского, пропорционально фазному току. После фильтрации и приведения уровня напряжения в допустимый диапазон сигнал поступает на высокоомный вход ИС. Один из каналов аналогово-цифрового преобразования ИС работает с минимальным усилением, второй – с максимальным. Уровень перекрытия оцифрованных 16-разрядных сигналов составляет 10 разрядов, что обеспечивает эффективный динамический диапазон 20 разрядов.

Последовательные цифровые потоки с двух сигма-дельта модуляторов фильтруются и обрабатываются во внешнем процессоре, в макете реализованы на FPGA или DSP.

Структурная схема низкопотребляющей СнК, представленная на рис. 2, включает в себя:

- предварительный усилитель;
- сигма дельта модулятор;
- источник опорного напряжения;
- цифровой фильтр.

Аналоговая часть СнК предназначена для усиления и оцифровки дифференциального сигнала, поступающего с петли Роговского. ИС содержит предварительный усилитель с переключаемым коэффициентом усиления, сигма-дельта модулятор АЦП и источник опорного напряжения.

Предварительный усилитель состоит из инструментального усилителя и дифференциального усилителя. Приведенный к входу допустимый уровень шума предварительного усилителя не должен превышать 57 нВ/ОГц. С целью уменьшения погрешности в инструментальном усилителе использован классический способ самокомпенсации напряжения смещения, одновременно уменьшающий 1/f шум усилителя.

Для получения температурно-стабильных характеристик СнК применен источник опорного напряжения с цифровой настройкой температурной зависимости опорного напряжения с погрешностью не более 10 ppm/°C.

Для преобразования аналогового сигнала в одноразрядный цифровой поток данных используется сигма-дельта модулятор второго порядка с частотой выборки от 1 до 4 МГц, к которому под-

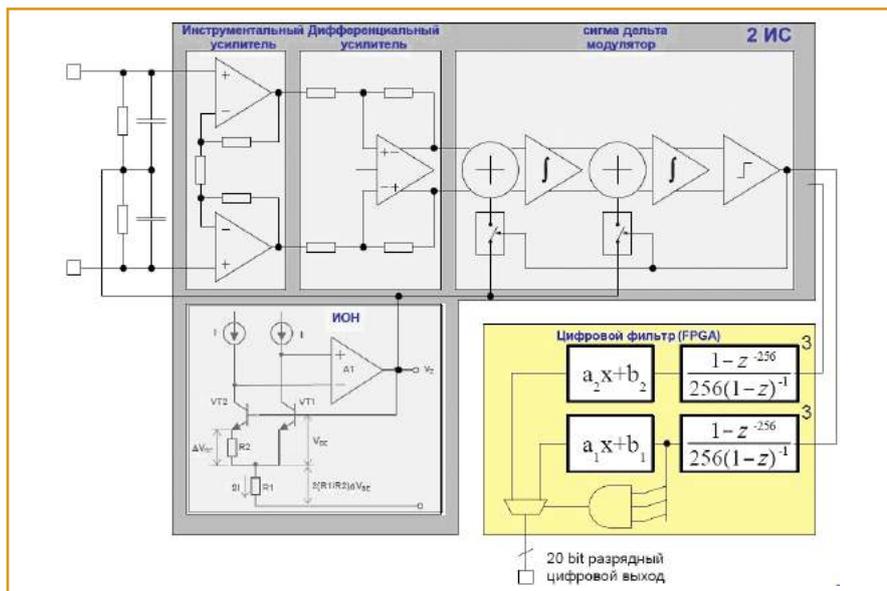


Рис. 2. Структурная схема СНК.

ключен цифровой фильтр третьего порядка с коэффициентом децимации 256. В СНК применяются два параллельных динамически переключаемых 16-разрядных канала, имеющих усиление, сдвинутое на 5 разрядов, что позволит расширить результирующий динамический диапазон АЦП еще на 4 разряда.

Выбранная архитектура СНК является достаточно универсальной и позволяет с минимальными затратами осуществлять адаптацию, в соответствии с требованиями потребителя, причем метрологическая часть может быть переконфигурирована в случае, если у заказчика возникнут специфические требования (например, расчет гармонических составляющих тока, напряжения или энергии).

К преимуществам данной архитектуры следует отнести:

- минимальная стоимость устройства благодаря использованию системы-на-кристалле (минимизированы как перечень дополнительных внешних компонентов, количество используемых корпусов, так и занимаемая площадь печатной платы);

- минимальная стоимость разработки и время выхода на рынок устройств на ее основе (полностью программируемая платформа, богатый набор периферии), минимальный риск разработки (программируемые метрологические алгоритмы, широкий динамический диапазон, различные опции размера встроенной флеш-памяти программ от 8 кбайт до 256 кбайт).

- лучшие в классе метрологические и точностные характеристики (компенсация зависимости от температуры и нагрузки, программируемые механизмы компенсации нелинейности датчиков).

Оценки показывают, что для полного оснащения всех ЛЭП системами мониторинга потребуется около восьми миллионов УПС и соответственно, такое же количество СНК.

Для мониторинга мощных переключателей и электромоторов количество СНК потребуется значительно больше.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по госконтракту № 16.426.11.0049.

#### Литература:

1. Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС», Москва, 2011.
2. «Smart grid distribution and smart meters». Energy-efficient solutions. [www.st.com/metering](http://www.st.com/metering)
3. «Высококачественный мониторинг линий электропередач с помощью многоканальных АЦП», Колм Слеттери, сборник статей «Электронные системы и устройства на основе элементов компании Analog Devices», выпуск 2, ДГТУ, Махачкала, 2008.
4. [www.maxim-ic.com/grid-monitoring](http://www.maxim-ic.com/grid-monitoring)
5. «A Miniature Energy Harvesting Device for Wireless Sensors in Electric Power System» Published in IEEE Sensors Journal, Volume 10, Issue 7, 2010, pages 699-702. [http://ewh.ieee.org/tc/sensors/SJ/Sensors\\_journal.htm](http://ewh.ieee.org/tc/sensors/SJ/Sensors_journal.htm)

Лебедев Сергей Валентинович – родился в 1951 г. В 1974 г. окончил Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва по специальности «Физик». В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором в Национальном исследовательском университете «МИЭТ». Имеет 2 патента на изобретения и 3 свидетельства о реги-

страции топологии интегральных схем. Награжден знаком «Почетный радист СССР».

**Флегонтов Вадим Евгеньевич** – родился в 1964 году. В 1988 году окончил Московский институт электронной техники по специальности «Радиоэлектронные устройства». Более 14 лет проработал в ОАО «НИИМЭ и Микрон». В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором в ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр». Имеет публикации по использованию компьютерной техники и программного обеспечения.

**Глазов Владимир Михайлович** – родился в 1944 году. Окончил Московский энергетический институт по специальности «Полупроводники и диэлектрики». Кандидат технических наук, доцент. В 1980 году защитил диссертацию на тему: «Исследование и разработка технологических методов управления пороговым напряжением МДП транзисторов при создании ИС». Опыт работы – 45 лет. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником в ОАО «Зеленоградский инновационно-технологический центр». Автор более 60 научных и научно-методических трудов, 10 авторских свидетельств.

**Рыгалин Дмитрий Борисович** – родился в 1976 году. В 1999 году окончил Московской институт электронной техники по специальности «Менеджмент». Доктор экономических наук. Защитил диссертацию на тему: «Управление развитием высокотехнологичных отраслевых кластеров на основе инновационно-технологических центров». Опыт работы – 13 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора ОАО «ЗИТЦ». Автор 85 научных трудов и патентов.

**Lebedev Sergey** – was born 1951. In 1974 he graduated from Mordovia State University named after N.P. Ogarev, speciality is «Physicist». At present he works as a leading design engineer in National Research University «MIET». He has 2 patents for invention and 3 certificates of integrated circuit topology record. He is awarded with the sign «Honourable radio operator of USSR».

**Flegontov Vadim** – was born in 1964. In 1988 he graduated from Moscow Electronic Engineering Institute, speciality is «Radioelectronic devices». He worked for public corporation «NIIME and Micron» for more than 14 years. At present he works as a leading design engineer in public corporation «Zelenograd technological innovation centre». He has publications about the use of computer technics and software.

**Glazov Vladimir** – was born in 1944. He graduated from Moscow Energy Institute, speciality is «Semiconductors and dielectrics». He is a candidate of engineering, an associate professor. In 1980 he defended a thesis, the theme is: «Research and development of technological control methods of MIS transistors threshold voltage during IC making». He has 45 years work experience. At present he works as the leading scientific worker at public corporation «Zelenograd technological innovation centre». He is an author of 60 scientific and scientific-methodological works, 10 author's certificates.

**Rygalin Dmitry** – was born in 1976. In 1999 he graduated from Moscow Electronic Engineering Institute, speciality is «Management». He is a Doctor of Engineering. He defended a thesis, the theme is: «Control of high tech sectorial clusters progress on the base of technological innovation centres». He has 13 years work experience. At present he works as deputy general director at public corporation «ZITC». He is an author of 85 scientific works and patents.

## Сведения об авторах

**К.Т.Н.**

**Коняхин Сергей Федорович**

**(495) 980-65-00**

**Д.Т.Н., профессор**

**Феоктистов Валерий Павлович**

**(495) 684-23-90**

**Д.Т.Н., профессор**

**Сарбаев Владимир Иванович**

**(495)-620-3894**

**Люминарская Екатерина**

**Станиславовна**

**8-905-508-92-14**

**Д.Т.Н., профессор**

**Герман Леонид Абрамович**

**8-908-769-94-26**

**К.Т.Н.**

**Доманов Виктор Иванович**

**(8422) 41-18-63**

**Д.Ф.-М.Н., профессор**

**Антонов Анатолий Сергеевич**

**(499) 720-69 79**

**К.Т.Н.**

**Калинин Игорь Михайлович**

**8-911-935-03-11**

**Самарин Александр Викторович**

**8-916-363-57-03**

**Лебедев Сергей Валентинович**

**8-499-720-89-21**

### ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

**Авторские материалы.** Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

#### СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **4 800 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95,

e-mail: [npptez@mail.ru](mailto:npptez@mail.ru);

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2013 г., индекс 59990.

#### СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей

4-я страница обложки – 30 000 рублей

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.