

## О ЗАЩИТЕ ЛИНИИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ПРОВОДОВ

*В.А. Корнев\**, *А.В. Шмойлов\*\**

\* – ЗАО «ЭлеСи», Россия, г. Томск

\*\* – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск

### Введение

Получение высоких показателей качества при построении релейной защиты высоковольтных линий остается актуальной задачей на всем протяжении развития электроэнергетики и возрастает в связи с усложнением электрических сетей. По-прежнему требуются высокие чувствительность, селективность, быстродействие и надежность аппаратуры и систем релейной защиты, в том числе и линий электрических сетей.

В современных отечественных цифровых дифференциально-фазных защитах линий требуемые высокие показатели названных свойств в определенной степени достигнуты за счет возможностей микропроцессорной техники. Однако погрешности насыщения и несогласованности динамических характеристик сигналов при трансформации высоковольтных токов во вторичные величины остаются. Устранение погрешности насыщения производится за счет загробления защиты, а несогласованность динамических характеристик первичных и вторичных величин можно обеспечить путем устранения свободных составляющих, что обеспечивает выделение вынужденных составляющих переходных процессов. Это, как правило, приводит к снижению быстродействия. Применение технологий цифровых подстанций [1] снижает естественный недостаток насыщения, однако не до конца, т.к. остаются первичные измерительные трансформаторы тока или датчики. Замена последних предложенными волоконно-оптическими преобразователями тока (ВОПТ), основанными на изменении поляризации контрольного лучистого потока при воздействии магнитного поля проводов [2, 3] весьма сложно, дорого и недостаточно надежно.

Хотя дифференциально-фазный принцип позволяет отстроиться от помех надежно по углу между токами на концах линии не только при коротких замыканиях (КЗ), но и в рабочих режимах, принятый опыт эксплуатации дифференциально-фазных защит предусматривает делать отстройку известным простым и надежным путем максимально-модульного превосходства над сигналами в рабочих режимах линии. Канал же обмена по проводам линии, который может обеспечить качественную угловую отстройку от рабочих режимов, при этом не используют и он содержится в неактивном состоянии. Дифференциально-фазные высокочастотные (ВЧ) защиты в режиме ожидания не работают, ждут запуска блокирующими измерительными релейными органами ВЧ передатчиков и приемников. После этого благодаря однотипному подключению комплектов защит на концах линии и передачи ВЧ несущей в

положительный полупериод промышленного тока с каждого конца возникает ситуация непрерывного ВЧ сигнала при сквозном промышленном токе (в том числе при внешнем КЗ), а при внутреннем КЗ – ситуация прерывистого ВЧ сигнала с паузой в один из полупериодов промышленного тока в комплектах защиты на каждом конце линии. Представленный принцип отстройки от сквозного тока может быть вполне распространен на рабочие режимы, например, с помощью способа [4].

Выделение вынужденных составляющих из электрических величин переходных процессов помимо естественного снижения быстродействия обнаружения аварийного повреждения в сигналах вторичных токов может обусловить существенное дополнительное уменьшение быстродействия вследствие несогласованности динамических характеристик вторичных величин относительно первичных. Поэтому естественное решение вопроса быстродействия релейных защит (РЗ) неизбежно приводит к необходимости отказаться от использования вторичных величин и перехода на применение первичных. Оказывается, такая возможность может быть вполне реализована, если всю аппаратуру комплектов РЗ пространственно разместить на потенциалах высоковольтных проводов, а логические сигналы отключения выключателей на концах линии передать на потенциал земли, где располагаются выключатели, по эфиру или оптоволоконным жилам. Датчиками первичных токов при этом могут быть безынерционные силовые шунты. Отличительной особенностью построения РЗ по данному предложению является отсутствие возможности построения фильтровых принципов РЗ и обязательное наличие блока питания аппаратуры на высоковольтном потенциале

### **Основная часть**

Далее проводится анализ возможности исполнения дифференциально-фазной защиты на высоковольтном потенциале с ВЧ обменом информацией комплектов защиты на концах защищаемой линии.

Прежде всего необходимо разделение линии на двухконцевые участки длиной, обеспечивающей однотипное построение защиты для всех видов линий, достаточно малое затухание ВЧ сигнала по проводам при передаче на противоположный конец, надежный информационный обмен между комплектами аппаратуры на концах каждого участка и тем самым гарантированное недействие защиты при сквозных токах.

Нецелесообразна установка ВЧ заградителей на каждом участке, т.к. ВЧ обмен по проводам линии необходим не только для выявления места КЗ на участках, но также для передачи кода поврежденного участка на концы линии для отключения линии и указания информации о поврежденном участке, что целесообразно делать также по проводам. При установке заградителей на концах участков возникнет необходимость установки удвоенного количества датчиков тока, появления мертвых зон между заградителями на границах участков. Требуется также разработка полной конструкции аппаратуры и процедур пере приема кодов поврежденного участка и передачи кодов на головные участки линии с выключателями. Хотя данные мероприятия весьма

ординарны, практически не слишком расточительны, а мертвые зоны между заградителями незначительны и ими можно пренебречь, либо разработать для них дополнительную защитную аппаратуру, однако возможна накачка энергии в передаваемый код на выбранной высокой частоте несущей передаваемого кода поврежденного участка на каждом датчике, разделяющим двухконцевые участки без пар заградителей. Благодаря разделению участков датчиками тока в виде силовых шунтов в каждом проводе фаз вместо заградителей, мертвые зоны исключаются. Но наряду с преимуществом исключения мертвых зон устранение заградителей приводит к распространению ВЧ несущих для контроля состояния каждого участка на соседние участки, что может вызвать влияние на правильность контроля этих участков. В связи с этим необходимы разные частоты ВЧ несущих соседних участков, чтобы с помощью резонансной фиксации частоты несущей каждого участка для контроля его состояния исключить влияние несущих частот соседних участков. Количество несущих частот для контроля состояний участков ограничено достаточным затуханием ВЧ несущих соседних участков с ростом длины распространения несущей данного участка. Расчеты показывают, что достаточным будет затухание несущей и соответственно возможность возобновления ее частоты через каждые 4 – 5 10-и километровых участков линии. При более длинных участках возобновление частоты несущей возможно через меньшее количество участков.

Поскольку для электропитания аппаратуры на концах участков линии необходимы блоки питания на высоковольтном потенциале, целесообразно их использовать также как источники энергии для восстановления затухания несущей кода поврежденного участка на концах каждого участка, через концы которых передается код поврежденного участка на головные участки линии. Импульсы кода заполнены колебаниями несущей для передачи кода. Данная несущая является единой для всех участков защищаемой линии с заданной частотой, отличной от частот несущих для выявления повреждения на участках. Итого, требуется 3 – 5 частот несущих для выявления повреждения на участках линии и частота для передачи сигнала отключения и информации о поврежденном участке.

Выявление повреждения на участке как в производимой аппаратуре дифференциально-фазных защит путем заполнения положительного полупериода промышленного тока колебаниями ВЧ несущей и контроля наличия непрерывных или с полупериодной паузой промышленного тока ВЧ колебаний на каждом комплекте аппаратуры РЗ линии невозможно, т.к. заградители на концах участков не предусмотрены. Кроме того, предлагаемая дифференциально-фазная защита предназначена для выявления КЗ как в установившихся режимах, так и в переходных процессах, Свободные составляющие переходных процессов существенно изменяют картину ВЧ колебаний и пауз, что не позволяет однозначно настроить быстродействующую защиту. Данный недостаток тем более возрастает из-за различия параметров переходных процессов в первичных и вторичных цепях. Поэтому построение быстродействующей защиты с использованием традиционного способа

взаимной передачи углов промышленного тока на концах каждого участка с помощью ВЧ несущей практически невозможно. В связи с этим требуется другой алгоритм выявления КЗ на участке.

Один такой алгоритм с контролем времени между точками перехода промышленного тока при внешнем КЗ относительно защищаемого участка линии и внутренним КЗ на участке ниже описывается с иллюстрацией на рис. 1 при сквозном токе рабочих режимов и внешнего КЗ и на рис. 2 при внутреннем КЗ на участке.

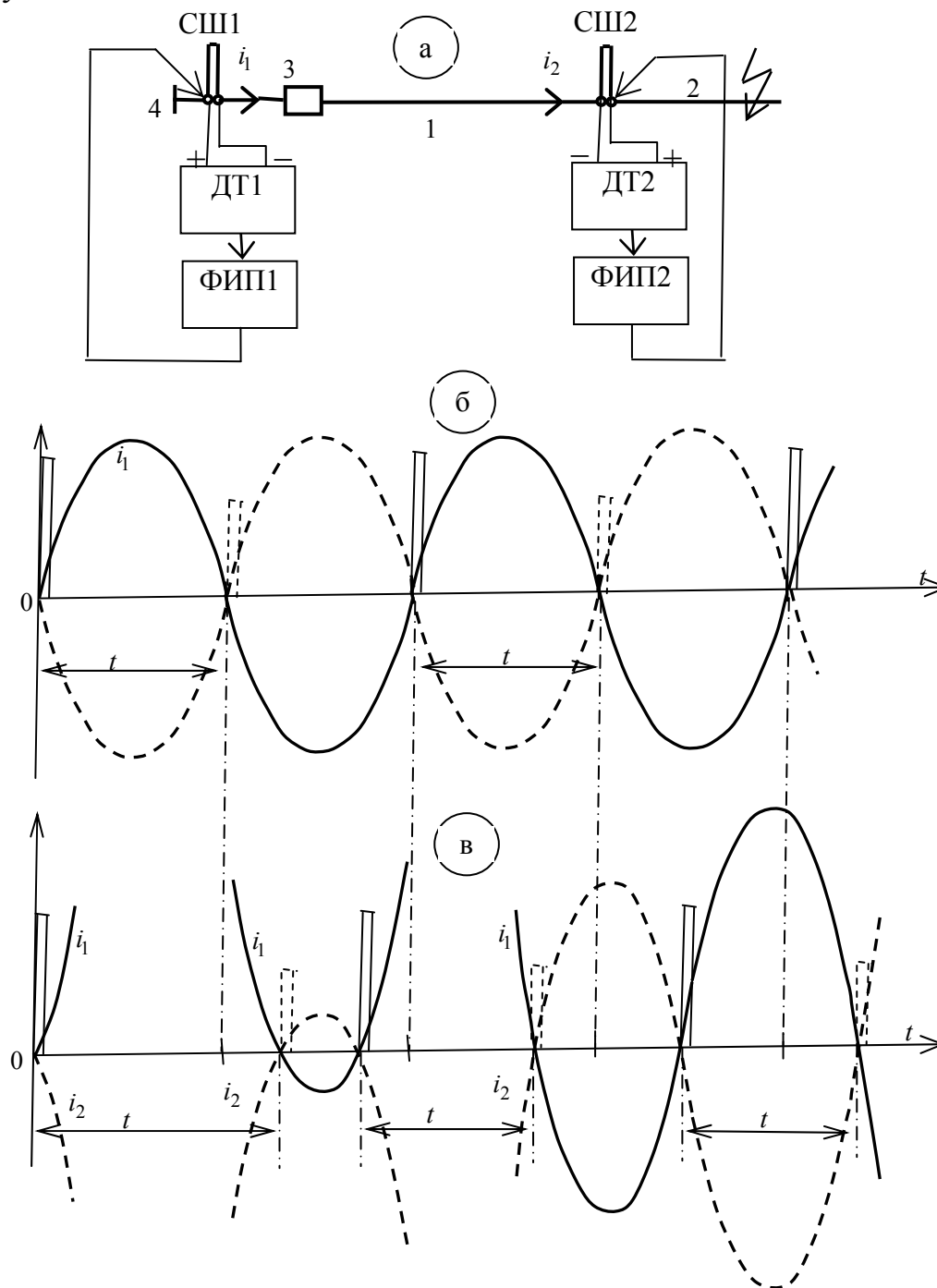


Рис. 1. Контроль времени между импульсами ВЧ колебаний в точках перехода промышленного тока от отрицательных к положительным значениям при сквозном токе (внешнем КЗ): а - в установившемся режиме, б - в переходном процессе

На рис. 1а и 2а показана схема формирования импульсов на концах каждого участка, в точках перехода мгновенных значений промышленного тока от отрицательных к положительным значениям. Цифрой 1 на фрагменте 1а рис.1 обозначен головной участок 1 с выключателем 3 на одном из концов линии, а цифрой 2 – следующий за головным участок линии. Цифра 4 отражает сборные шины. На одной границе головного участка 1 в высоковольтный провод, например, однопроводной фазы врезан мало-индуктивный П-образный силовой шунт 5, а на другой границе, разделяющей участки 1 и 2, – такой же мало-индуктивный П-образный силовой шунт 6. С помощью датчиков первичного высоковольтного тока ДТ1 и ДТ2 и присоединенных к ним соответственно преобразователей.

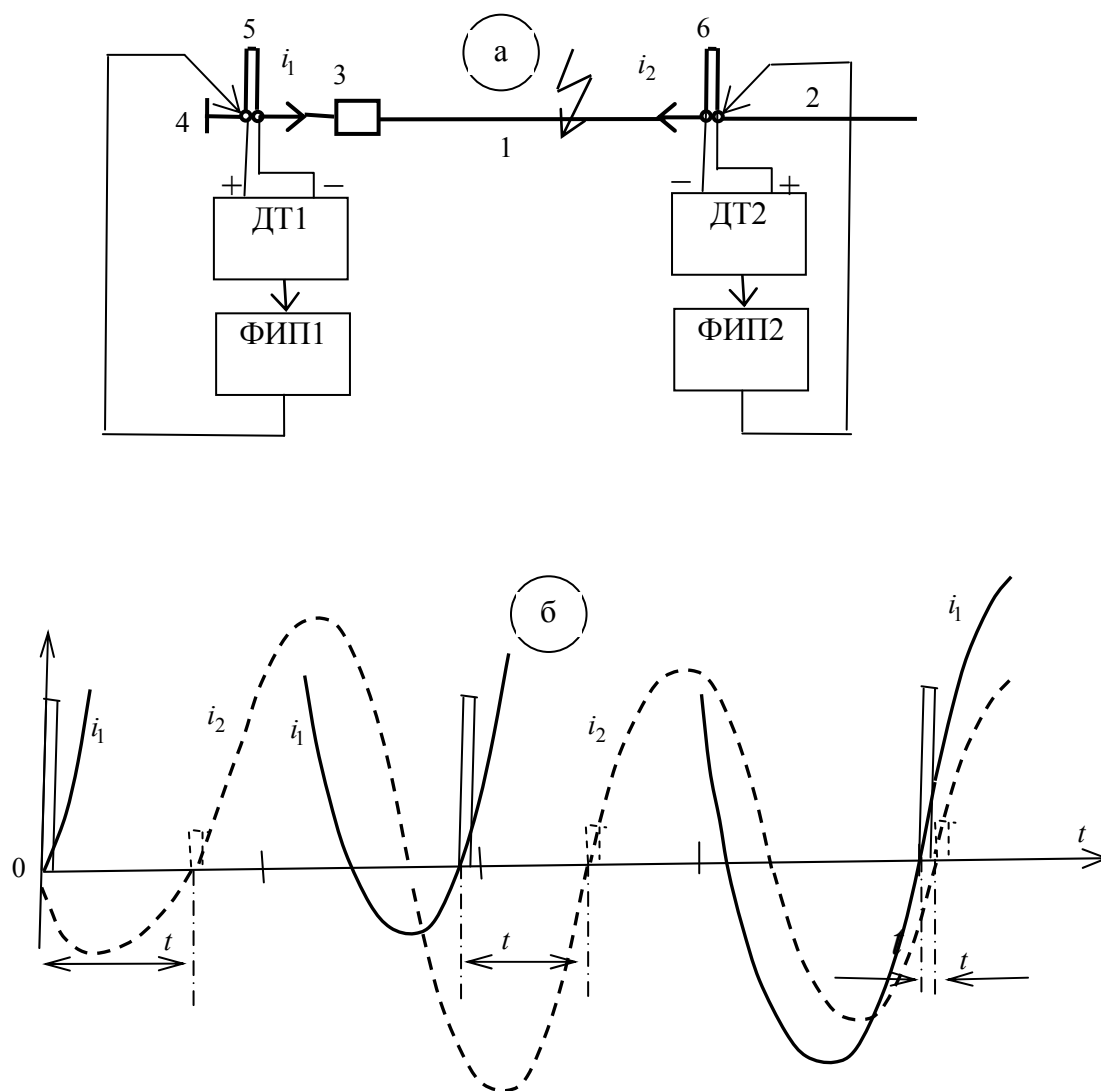


Рис. 2. Контроль времени между импульсами ВЧ колебаний в точках перехода промышленного тока от отрицательных к положительным значениям в переходном процессе КЗ на защищаемом участке (внутреннее КЗ)

ФИП1 и ФИП2 – формирователей импульсов перехода мгновенных токов на концах участка 1 – формируются короткие импульсы в моменты перехода мгновенных промышленных токов  $i_1$  (сплошные линии на одном конце участка

1) и  $i_2$  (пунктирные линии на противоположном конце участка 1) от отрицательных значений к положительным. Сформированные короткие импульсы, по месту протекания и измерения токов  $i_1$  и  $i_2$  на концах участка 1 обозначены также соответственно сплошными и пунктирными линиями на осциллограммах «б» и «в» рис. 1, на осциллограмме «б» рис. 2. Названные импульсы заполнены колебаниями ВЧ частоты заданной несущей, которую целесообразно назвать несущей переходов и выявления КЗ, и они внедряются через шунты силового тока СШ1 и СШ2 в высоковольтный провод. ВЧ колебания импульсов распространяются по проводу, в том числе на противоположные концы каждого участка.

На примерах осциллограмм сквозных токов по концам участка 1 можно усмотреть, что время  $t$  между импульсами в установившихся режимах (рис. 1б) всегда равно полупериоду промышленного тока или 10 мс, а в переходных процессах КЗ (рис. 1в) это время из-за свободных составляющих может кратковременно измениться в ту или другую сторону.

В примере рис. 1в это время увеличивается в начале переходного процесса, а по мере затухания свободных составляющих снова стремится к 10-и мс. Аналогично в переходном процессе внешнего КЗ с другими параметрами короткозамкнутой цепи в начальный момент время между импульсами из-за свободных составляющих может наоборот уменьшиться, но при затухании этих составляющих будет стремиться также к 10-и мс. На другом примере переходного процесса при внутреннем КЗ на участке 1 (рис. 2б) видно, что время  $t$  между импульсами перехода токов  $i_1$  и  $i_2$  на концах участка стремится от 10-и мс, которое было в начале переходного процесса в установившемся режиме, к нулю, т.к. свободные составляющие этих токов КЗ определяются однотипными мало различающимися активно-индуктивными соотношениями параметров короткозамкнутых цепей.

Причем индуктивная составляющая сопротивления, как правило, не меньше, а чаще всего заметно или существенно превышает активную составляющую. Поэтому углы роторов генераторных источников с обеих сторон от места КЗ выравниваются и углы токов относительно ЭДС источников также становятся близкими, если не равными. Задавая уставку времени между импульсами  $t$ , близкую к нулю, например, 3 мс, можно надежно различать время рабочих режимов 10 мс и время, характеризующее внутреннее КЗ, которое меньше 3 мс.

Однако импульсы с противоположной стороны могут быть небольшими для восприятия и сравнения аппаратурой на концах участка 1, т.к. передача импульса с противоположной стороны производится через место КЗ, которое вызывает затухание в среднем на 22 дБ. В связи с этим необходим дополнительный параллельный канал, гарантирующий надежность контроля КЗ на участке. Таким может быть канал, сформированный логикой отсутствия импульса с противоположной стороны участка в течение определенного времени периода промышленного тока. Отсутствие импульса с противоположной стороны в течение двух симметричных промежутков

времени относительно полупериода 10 мс в меньшую и большую стороны, например, 3 и 17 мс может гарантировать КЗ на участке.

Действительно, если это внешнее КЗ, то через каждые 10 мс (установившийся сквозной ток) или в установленном промежутке (3, 17) мс (переходный сквозной ток) будет гарантированно появляться импульс с противоположной стороны участка и свидетельствовать, что КЗ на участке нет. Если же будет зафиксирован противоположной импульс в пределах (0, 3) мс или (17, 20) мс, то это гарантированно КЗ на участке. Первый промежуток – это внутреннее КЗ в течение или за пределами времени выравнивания электромагнитных и электромеханических переходных процессов в левой и правой цепях относительно КЗ на участке, которое произошло ранее с началом переходного процесса. Второй промежуток – это маловероятное начало переходных процессов, сложившееся вследствие соответствующих значений параметров электромагнитных и электромеханических переходных процессов в левой и правой цепях относительно КЗ на участке. Проведенный анализ для одного периода промышленного тока показывает возможность обнаружения КЗ на участке в течение этого периода. В следующий период промышленного тока также возможно обнаружение КЗ на участке, которое подтвердит первоначальное более быстродействующее обнаружение КЗ.

Аппаратура на каждом конце участка должна содержать компоненты вноса энергии в код поврежденного участка, передаваемого на головные участки концов линии информацию об отключении выключателей, номера поврежденного участка и провода фазы на линии. Внесенная энергия позволит поддерживать ВЧ колебания кода поврежденного участка.

### **Заключение**

Предлагаемое построение защиты линий имеет все преимущества дифференциально-фазного принципа: абсолютную селективность, высокую чувствительность, быстродействие и надежность, отсутствие специального канала передачи информации между комплектами на концах участков. Дополнительно исключены высоковольтные конденсаторы связи, заградители. Используются в качестве датчиков высоковольтных токов безинерционные силовые шунты из константана, что позволяет обеспечить реагирование на динамику первичных токов и увеличить быстродействие обнаружения короткого замыкания. Предлагаемое разделение линии на участки и накачка энергии на концах каждого участка в передаваемый код информации о поврежденном участке позволяет уменьшить и даже исключить затухание высокочастотной несущей, заполняющей импульсы кодов, и тем самым снять ограничение длин линий, защищаемых дифференциально-фазной защитой, а также обеспечить жесткое обнаружение места короткого замыкания на линии.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» Презентация Цифровая подстанция: Официальный сайт. 2012. URL: [http://www.ntc-power.ru/media/files/Presentation\\_CPS.pdf](http://www.ntc-power.ru/media/files/Presentation_CPS.pdf) (дата обращения: 16.03.2015).

2. Alex Golovin Современные волоконно-оптические преобразователи тока // Цифровая подстанция: Электронный журнал. 2012. URL: <http://digitalsubstation.ru/blog/2012/12/04/sovremennyy-e-volonno-opticheskie-pr/> (дата обращения: 16.03.2015).

3. Alex Golovin Опыт применения оптических датчиков тока в электросетевой компании Transpower New Zealand: Электронный журнал. 2012. URL: <http://digitalsubstation.ru/blog/2013/01/10/opy-t-primeneniya-opticheskikh-datchikov/> (дата обращения: 16.03.2015).

4. Патент РФ № 2010136422/07, 30.08.2010. Шмойлов А.В., Прутик А.Ф. Способ построения и настройки релейной защиты с высокочастотным обменным блокирующим сигналом по проводам линии // Патент России № 2435267. 27.11.2011 Бюл. № 33.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ**

*В.О. Нагорный, А.В. Аристов А.М. Гаврилов*

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет,  
Россия, Томск

При создании импульсных преобразователей напряжения (ИПН) возникает потребность в применении новых законов управления и их отработке. Первоначальную отработку алгоритмов управления цифровыми системами управления наиболее целесообразно проводить на математических моделях ИПН, во избежание повреждения аппаратной части установки из-за возможных ошибок в алгоритме управления.

Можно выделить два подхода отработки алгоритмов управления ИПН с использованием математических моделей.

1. Запустить математическую модель ИПН внутри процессора системы управления вместе с самой системой управления [1].

2. Запустить алгоритм управления на персональном компьютере совместно с математической моделью ИПН [2].

При первом подходе создается математическая модель ИПН на том же языке программирования, на котором написан алгоритм работы системы управления. Затем код системы управления совместно с моделью загружается в микропроцессор управляющий ИПН.

При втором же подходе алгоритм работы системы управления переносится на персональный компьютер, где и осуществляется его отладка совместно с математической моделью.

У обоих подходов есть свои достоинства и недостатки. Во втором случае, при запуске алгоритма управления на персональном компьютере он будет выполняться на процессоре с архитектурой отличной от той, которая