



**PS5 – S2-03**



## **Программа динамических испытаний цифровых регистраторов системы мониторинга в тестовой схеме физической модели энергосистемы**

**А.В. ЖУКОВ<sup>1</sup>, Ю.А. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, А.С. ГЕРАСИМОВ<sup>2</sup>, А.Х. ЕСИПОВИЧ<sup>2</sup>**  
**ОАО «СО ЕЭС»<sup>1</sup>, ОАО «НИИПТ»<sup>2</sup>**

**Россия**

**[esipovich\\_a@niipt.ru](mailto:esipovich_a@niipt.ru)**

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Векторные регистраторы, электродинамическая модель, динамические испытания, программа, тестовая схема.

### **1 ВВЕДЕНИЕ**

Новые цифровые устройства и системы управления, регулирования, защиты, режимной и противоаварийной автоматики российского и зарубежного производства перед установкой на энергообъектах ЕЭС России проходят проверку на функционирование в условиях, приближенных к условиям будущей эксплуатации. Для такой проверки используется цифро-аналого-физический комплекс (ЦАФК) ОАО «НИИПТ», являющийся уникальным испытательным полигоном Системного оператора [1].

В состав ЦАФК входит самая большая в мире электродинамическая модель, включающая физические модели всех силовых элементов энергосистемы (генераторов, синхронных компенсаторов, трансформаторов, линий электропередачи переменного и постоянного тока, шунтирующих реакторов, статических тиристорных компенсаторов, асинхронных двигателей и др.), а также аналоговые и цифровые модели устройств регулирования и управления и систему цифровой регистрации эксперимента.

Начиная с 2005 года ЦАФК использовался для испытаний и проверки на функционирование векторных регистраторов различных компаний.

Так в течение 2005 года на ЦАФК трижды проводились испытания головных образцов векторных регистраторов SMART-WAMS компании RTSoft [2]. В ходе испытаний алгоритмы регистраторов были значительно скорректированы, что позволило рекомендовать эти регистраторы к применению в ЕЭС России. В настоящее время на базе регистраторов SMART-WAMS создана и успешно функционирует система мониторинга переходных режимов (СМПР) энергосистемы ЕЭС/ОЭС [3].

В последующие годы ЦАФК неоднократно использовался для испытаний векторных регистраторов различных компаний. Так в 2006 году на ЦАФК проходили сравнительные испытания на функционирование векторные регистраторы SMART-WAMS модели 01 (RTSoft), векторные регистраторы RES-521 (ABB), терминалы N60 с функцией синхронизированного измерения векторов PMU (GE) [4], а в 2008 году – сравнительные испытания регистраторов SMART-WAMS модели 02 (RTSoft) и Power Sentinel модели 1133A (Arbiter Systems) [5].

Учитывая то, что испытания векторных регистраторов на функционирование в условиях электродинамической модели являются единственной альтернативой аналогичным испытаниям в условиях действующей энергосистемы, испытания, проводившиеся на ЦАФК, были направлены в основном на оценку точности измерения режимных параметров в динамических режимах.

Испытания показали, что в значительной области характерных аварийных и послеаварийных режимов, возникающих в результате различных технологических нарушений в энергосистемах, погрешность регистрации параметров режима значительно возрастает и заявленная разработчиками точность измерений не обеспечивается. Это касается, прежде всего, неполнофазных аварийных режимов и послеаварийных режимов, сопровождающихся значительным изменением частоты в энергосистеме. Увеличение погрешности измерений происходит у ряда регистраторов также при значительных скоростях изменения режимных параметров и искажениях формы кривой напряжения.

Вместе с тем представляется, что для организации прямого управления стационарными и, в особенности, аварийными режимами энергообъединений с использованием данных векторных регистраторов, заявленная точность измерений должна распространяться также на аварийные и послеаварийные режимы. Без этого решение задач в режиме on-line вряд ли окажется возможным.

Таким образом, для использования векторных регистраторов в системах автоматического управления энергообъектами необходимо сформулировать дополнительные требования к точности измерения режимных параметров в аварийных и послеаварийных режимах. Поэтому целью динамических испытаний векторных регистраторов является оценка точности получения регистраторами параметров стационарных и переходных электрических режимов при различных динамических возмущениях в энергосистеме.

Опыт перечисленных выше испытаний, проводившихся на ЦАФК в различных схемах и по различным индивидуальным программам, позволил определить структуру и характеристики универсальной тестовой схемы сложного многочастотного энергообъединения, обеспечивающей физически адекватное воспроизведение большинства характерных динамических режимов, возникающих в реальной энергосистеме, а также перечень экспериментов, позволяющих выполнить оценку погрешностей измерения в этих динамических режимах.

В докладе приведена и обоснована тестовая схема физической модели энергосистемы, предназначенная для динамических испытаний векторных регистраторов, а также представлена программа испытаний векторных регистраторов и критерии оценки качества их функционирования.

## **2 ТЕСТОВАЯ СХЕМА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЕКТОРНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ**

Для оценки точности получения векторными регистраторами параметров электрических режимов при различных динамических возмущениях в энергосистеме в ОАО «НИИПТ» разработана тестовая схема, представленная на рисунке 1.

Схема включает:

- 6 электрических генераторов, моделирующих электростанции различных типов (тепловую, атомную, гидравлическую);
- сеть сложной замкнутой структуры, включающую 7 линий электропередачи различной пропускной способности;
- 6 комбинированных электрических нагрузок, включающих промышленную (асинхронные двигатели) и бытовую (реостаты) нагрузку;
- элемент силовой электроники (автономный инвертор);
- батареи статических конденсаторов.

Физическая модель обеспечивает:

- моделирование широкого спектра стационарных электрических режимов энергосистемы, в том числе режимов, характеризующихся различным направлением потоков мощности по межсистемным связям;
- плавное изменение (утяжеление) стационарных электрических режимов до достижения режимов, предельных по условиям статической (апериодической или колебательной) устойчивости вплоть до ее нарушения;
- плавное регулирование и ступенчатое изменение напряжения на шинах электростанций, к которым подключаются векторные регистраторы;

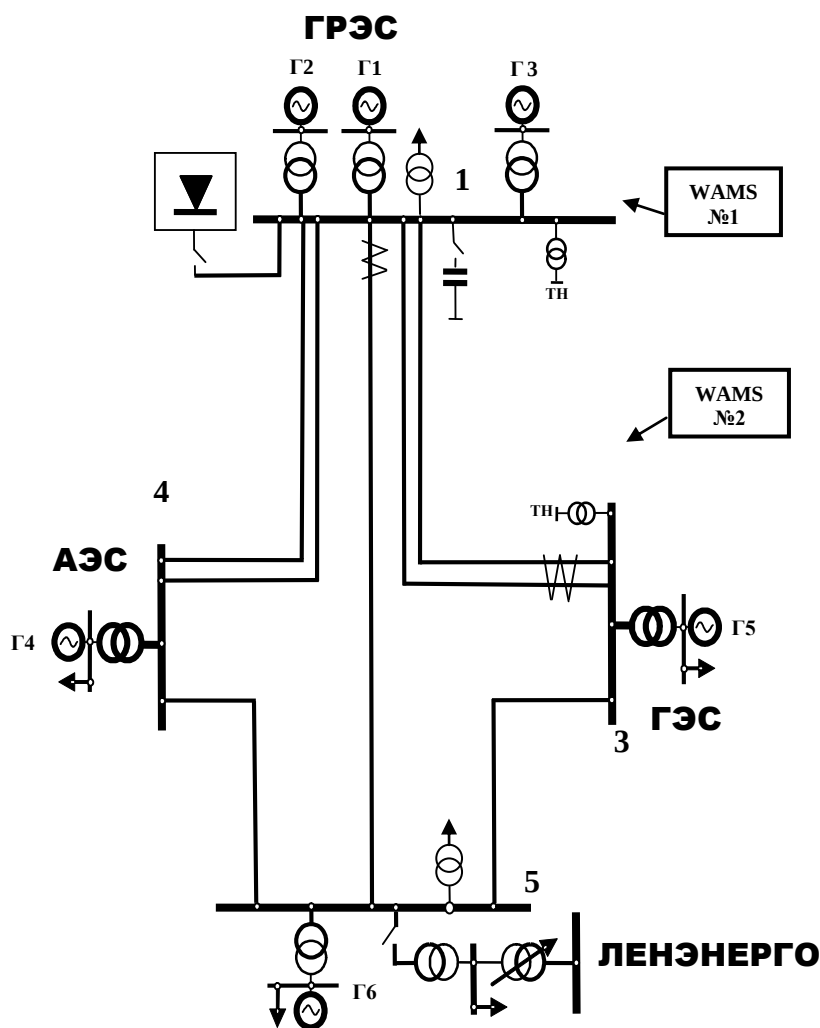


Рис. 1: Тестовая схема физической модели

- вывод в ремонт или аварийное отключение (действием релейной защиты) произвольного количества линий электропередачи;
- моделирование локальных и межзональных колебаний на частотах 0.2 – 1.5 Гц;
- адекватное моделирование всех характерных аварийных возмущений в энергосистеме, вызванных одно-, двух- и трехфазными короткими замыканиями на линиях электропередачи, приводящими к их отключению, успешному или неуспешному автоматическому повторному включению, а также возникновению неполнофазных электрических режимов произвольной продолжительности;
- моделирование отключения генераторов, крупных узлов нагрузки и пуска асинхронных двигателей;
- моделирование длительной работы при повышенной или пониженной частоте;
- моделирование значительных искажений формы напряжения электрической сети, возникающих в результате работы устройств на базе силовой электроники (при любых характерных аварийных возмущениях).

В двух узлах схемы установлено по четыре измерительных трансформатора тока (номинальный ток 1А) и по три измерительных трансформатора напряжения (номинальное фазное напряжение – 57.7 В), что обеспечивает адекватное подключение векторного регистратора (или нескольких регистраторов) к схеме путем подачи на него четырех токовых сигналов (токи каждой из фаз и ток нейтрали) и трех сигналов напряжения (напряжение каждой из фаз).

Физическая модель также оснащена:

- системой цифрового осциллографирования, обеспечивающей контроль хода эксперимента и запись его результатов;
- измерительными датчиками режимных параметров (напряжение, активная мощность, относительный угол, частота);
- приборами, позволяющими актуализировать требуемый предаварийный электрический режим;
- коммутационной аппаратурой, обеспечивающей моделирование характерных аварийных режимов;
- устройством, обеспечивающим автоматическое управление экспериментом.

Каждый из испытуемых векторных регистраторов должен быть снабжен индивидуальной антенной GPS (привязка к единому мировому времени).

### 3 ПРОГРАММА ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЕКТОРНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ

Программа состоит из 26 опытов, разделенных на 4 раздела.

**Первый** раздел посвящен оценке точности векторных регистраторов в предельных электрических режимах при медленном изменении параметров электрического режима вплоть до апериодического или колебательного нарушения устойчивости. При этом предельный режим достигается либо за счет изменения загрузки генераторов по активной мощности в приемной и передающей части энергосистемы, либо за счет снижения напряжения. Колебательный характер нарушения устойчивости достигается за счет отключения системных стабилизаторов. На рисунке 2 в качестве примера показано поведение энергосистемы при колебательном нарушении устойчивости.

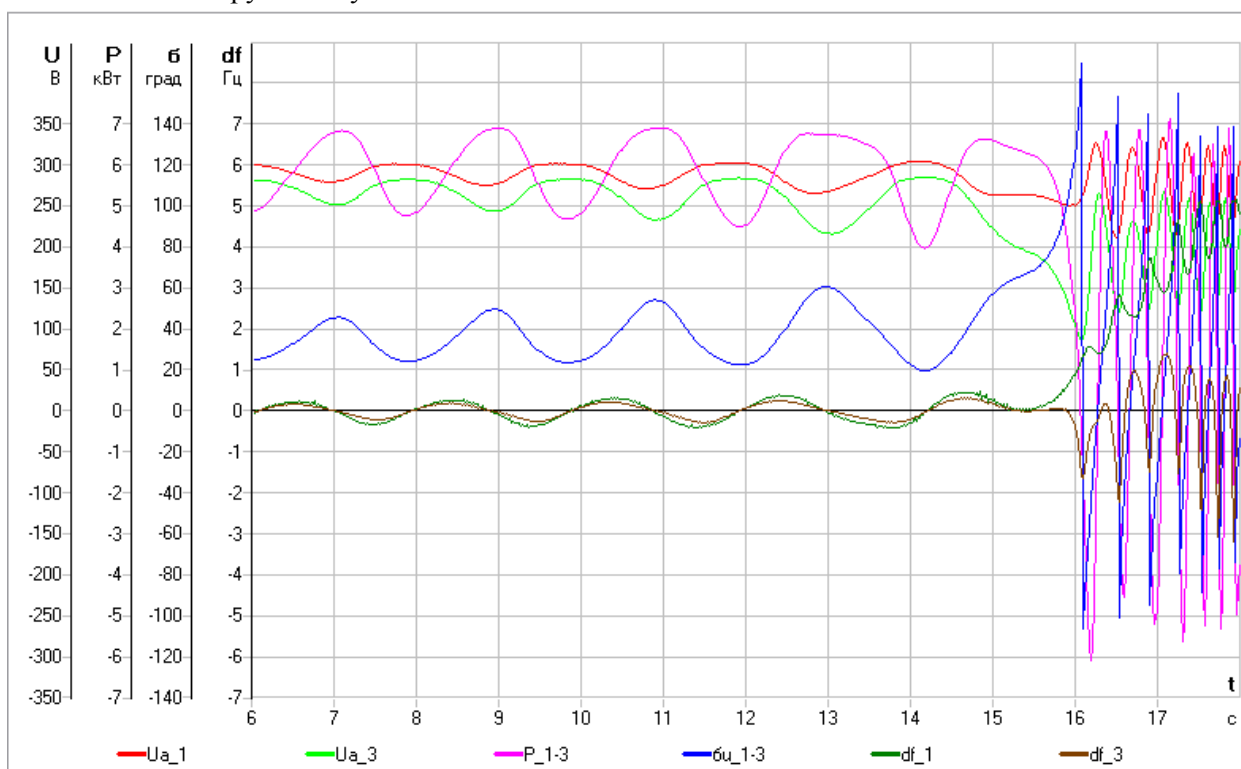


Рис. 2: Нарушение устойчивости при отключении системных стабилизаторов АРВ генераторов

Во **втором** разделе выполняется оценка точности векторных регистраторов при расчетных (нормативных) возмущениях в энергосистеме, возникающих в результате коротких замыканий (симметричных и несимметричных) и вызывающих отключение поврежденных линий или их успешные повторные включения. Все опыты этого раздела программы повторяются дважды – с включенным и отключенным автономным инвертором, что обеспечивает проверку влияния на точность измерений искажений формы напряжения.

На рисунках 3 и 4 в качестве примеров приведено поведение системы при отключении линии с последующим нарушением устойчивости и при успешном ОАПВ линии.

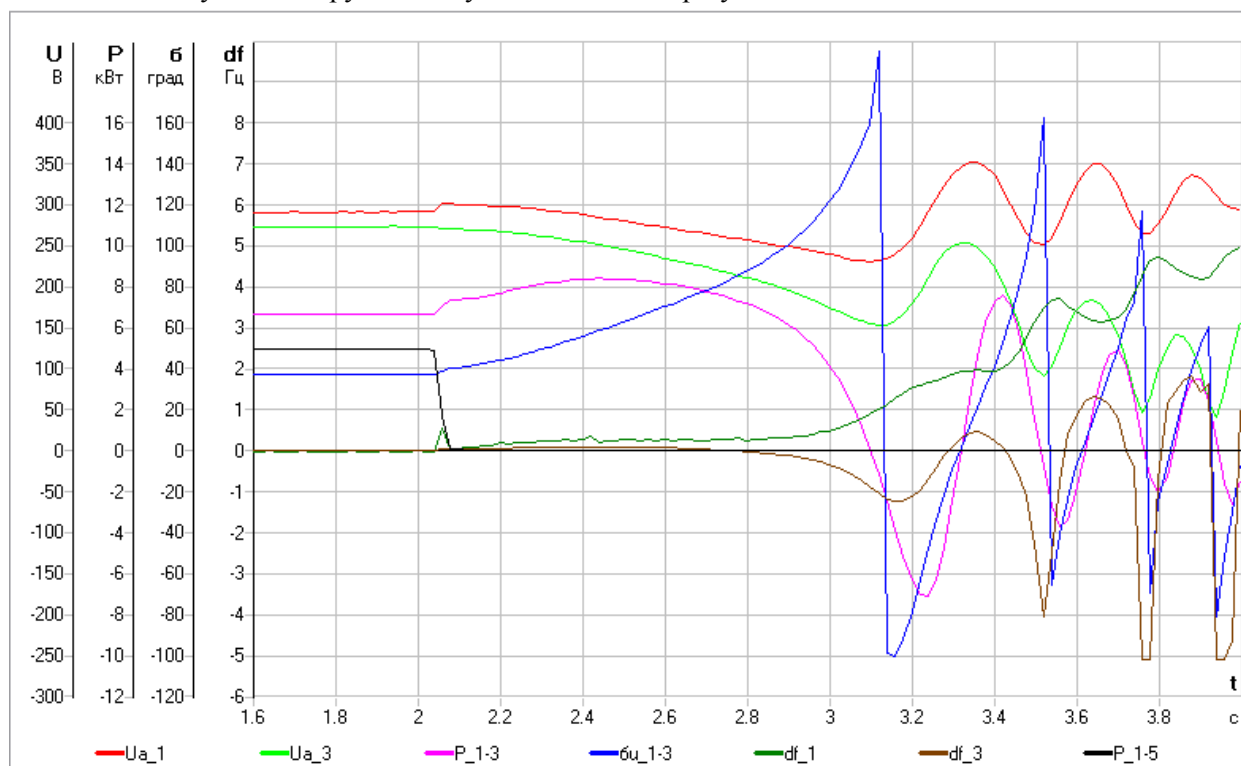


**Рис. 3:** Внезапное отключение ВЛ 1-5 с последующим нарушением устойчивости.

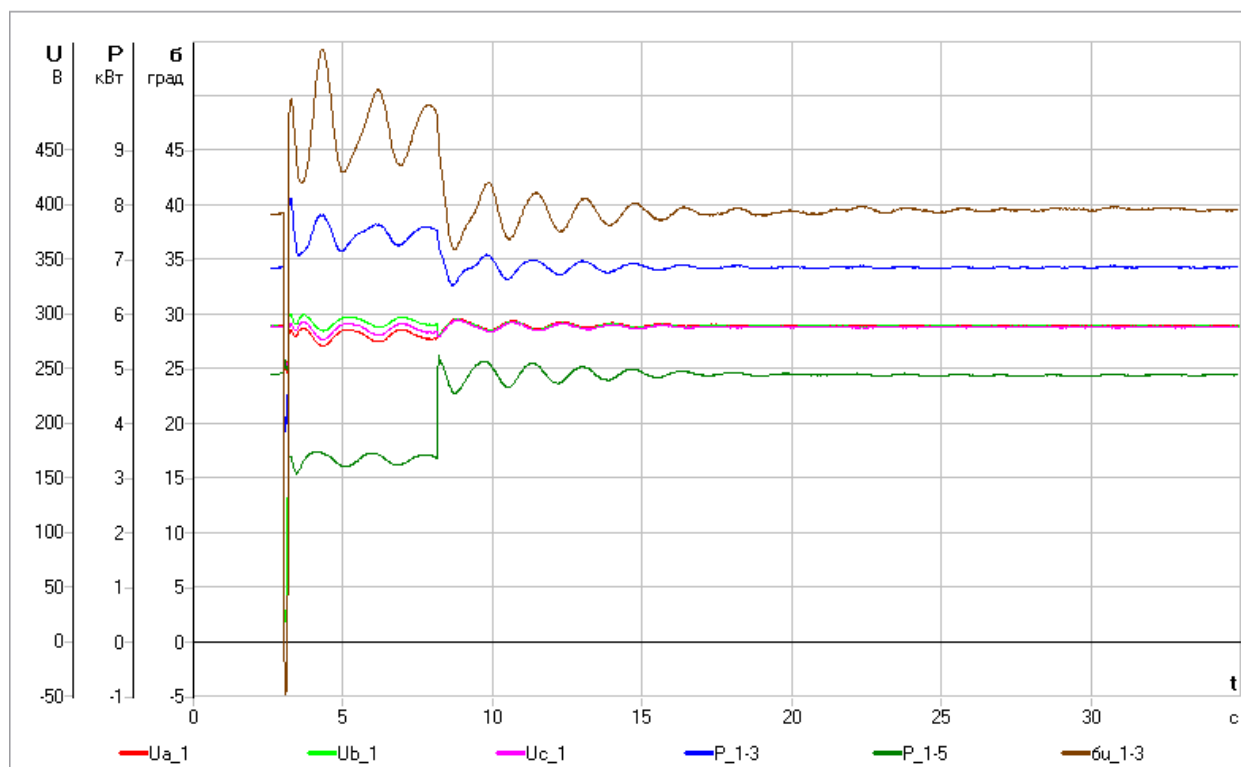


**Рис. 4:** Однофазное короткое замыкание на линии с ее успешным ОАПВ

Третий раздел программы посвящен оценке точности векторных регистраторов при возникновении аварийных небалансов активной и/или реактивной мощности, приводящих в том числе к установлению в энергосистеме частоты, значительно отличающейся от номинальной. На рисунке 5 в качестве примера показан переход системы к новому установившемуся значению частоты при отключении части генераторов.

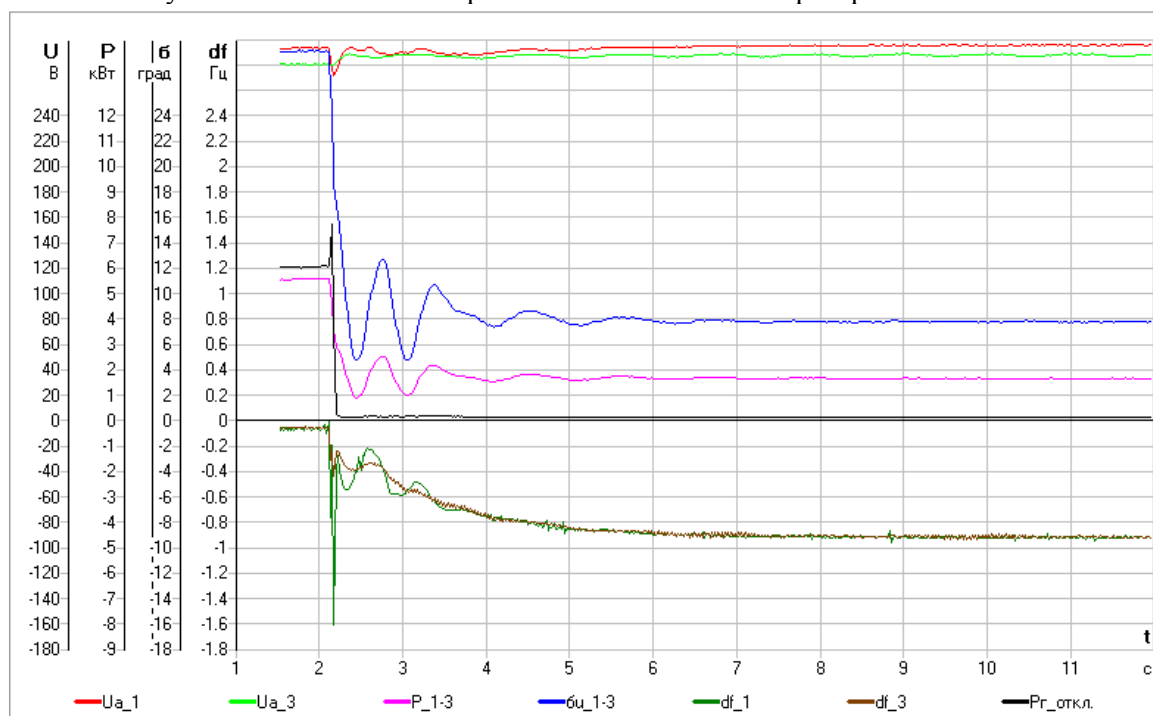


Рис. 5: Отключение генератора

И, наконец, в четвертом разделе программы выполняется оценка точности работы векторных регистраторов при возникновении тяжелых нерасчетных возмущений, вызывающих мгновенное значительное изменение относительных углов между различными точками энергосистемы. Пример такой нерасчетной аварии приведен на рисунке 6.

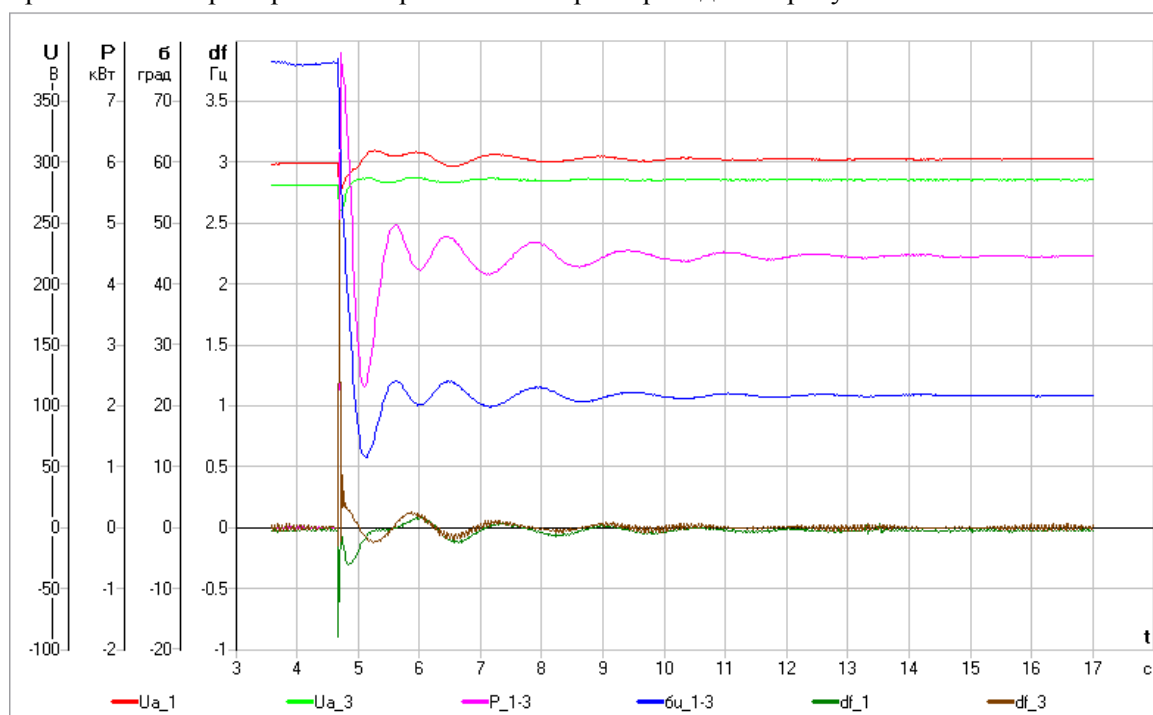


Рис. 6: Замыкание цепочечной схемы в кольцо

#### 4 ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ И ЕЕ КРИТЕРИИ

С учетом известного международного опыта в качестве эталонных приборов в большинстве опытов могут использоваться векторные регистраторы Macrodyne 1690M или ABB RES521. Вместе с тем регистраторы RES521, как показали испытания на ЦАФК [4], не обеспечивают заявленной точности измерений в несимметричных режимах и при работе энергосистемы с ненормальной частотой. Поэтому они должны быть дополнены быстродействующими аналоговыми датчиками взаимного угла и активной мощности, имеющимися в составе системы измерений ЦАФК. Эталонный векторный регистратор и быстродействующие аналоговые датчики углов и активной мощности ЦАФК подключаются параллельно с испытываемыми векторными регистраторами.

Для проверки работоспособности GPS приемников и синхронности привязки измерений PPS сигналам всех векторных регистраторов в схему дополнительно включается подготовленный ОАО «НИИПТ» цифровой многоканальный осциллограф на базе промышленного контроллера с функцией привязки к единому мировому времени (антенна GPS). Для синхронизации показаний аналоговых датчиков с векторными регистраторами перед началом каждого эксперимента от программирующего устройства ЦАФК, осуществляющего автоматический запуск программы эксперимента, подается специальный импульс, являющийся универсальной меткой времени.

Обработка результатов каждого эксперимента выполняется путем сравнения записей эталонного векторного регистратора, аналоговых датчиков угла и мощности и показаний испытываемых векторных регистраторов, которые представляются в табличном виде, например, в формате CSV, или в формате Comtrade.

Требования к точности измерений параметров аварийных и послеаварийных (в том числе и асинхронных) режимов, которым должны удовлетворять векторные регистраторы, на сегодняшний день еще не сформулированы и не формализованы ни в одном из известных стандартов. В настоящее время эти требования только начинают формироваться по мере актуализации задач управления, которые предполагается решать с применением векторных регистраторов.

Поэтому целью динамических испытаний является оценка точности измерений каждого из испытываемых регистраторов во всем многообразии динамических режимов. Эту оценку предлагается выполнять по величине погрешности в измерении параметров электрического режима, определяемых в результате цифровой обработки, а именно:

- активной мощности;
- частоты напряжения;
- абсолютного угла напряжения.

Выполнение этой оценки предлагается проводить по результатам каждого опыта Программы.

Это позволит для каждого векторного регистратора определить область динамических режимов, в которой обеспечивается заявленная точность измерений, а также определить величины погрешностей измерения перечисленных выше режимных параметров в тех динамических режимах, в которых эта точность не обеспечивается.

#### 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифро-аналого-физический комплекс ОАО «НИИПТ», включающий самую большую в мире электродинамическую модель, является единственной альтернативой испытаниям устройств регулирования и управления на функционирование в реальной энергосистеме.

Программа динамических испытаний векторных регистраторов в условиях физической модели энергосистемы и тестовая схема для ее реализации подготовлена на основе опыта испытаний векторных регистраторов различных компаний, проводившихся на ЦАФК ОАО «НИИПТ» в 2005–2008 гг.

Испытания различных векторных регистраторов в тестовой схеме энергосистемы в объеме предлагаемой программы позволят определить область применения каждого векторного регистратора и выработать общие требования к точности работы векторных регистраторов в динамических режимах.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gerasimov A., Guschina T., Esipovich A., Zekkel A., Kiriyyenko G., Michurin A.. Electrodynamics Power System Simulator for Bulk Power Systems Investigations and for Testing, Debugging and Adjustment of Various Digital Control and Automation Systems. 2005 IEEE St. Petersburg PowerTech Proceedings.
- [2] Gerasimov A., Esipovich A., Kiriyyenko G., Korolev M., Kulikov U., Mogilko R. The registrator of parameters of the transient states «SMART-WAMS» and its testing. International Scientific Conference «Monitoring of Power System Dynamic Performance» Moscow. 25-27 April, 2006.
- [3] Ayuev B., Erokhine P., Kulikov Y. IPS/UPS WIDE AREA MEASURING SYSTEM. Session CIGRE Proceedings, Paris, 2006. C2-211.
- [4] Gerasimov A.S., Esipovich A.H. (JSC «NIPT»), Demchuk A.T., Ghukov A.V. (JSC «SO-CDU EES»). Records of system of monitoring of transition regimes, their comparative characteristics and tests on electrodynamics simulator. International conference «Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems», Cheboksary, September 9-13, 2007 .
- [5] Edlin M.A. , Gushina T.A. , Zukov A.V. , Demchuk A.T. Electrodynamics Simulator Application for Working Out of New Requirements for WAMS for UPS Control Tasks Solving. Monitoring of Power System Dynamics Performance. 28-30 April 2008, Saint Petersburg.