

Инд. № 03.00003

Открытое акционерное общество «Системный оператор  
Единой энергетической системы» (ОАО «СО ЕЭС»)

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ЕДИНОЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ» (ОАО «НТЦ ЕЭС»)

УДК 621.314

Арх. № 737-КТ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор,  
к.т.н.



О.В. Фролов

28 декабря 2012 г.

М.П.

ОТЧЕТ

о работе на оказание научно-технических услуг

Проведение сравнительных испытаний образцов векторных измерителей на  
цифро-аналого-физическом комплексе ОАО «НТЦ ЕЭС»

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ВЕКТОРНЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ПАРМА», ЗАО «ИНЖЕНЕРНЫЙ  
ЦЕНТР «ЭНЕРГОСЕРВИС», ООО «ПРОСОФТ-СИСТЕМЫ»  
НА ЦИФРО-АНАЛОГО-ФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ОАО «НТЦ ЕЭС»  
(заключительный)

Экспериментально-исследовательский центр  
Отдел электроэнергетических систем (НИО-3)

Договор № 614-03-3-12

Заместитель генерального директора –  
научный руководитель ОАО «НТЦ ЕЭС»,  
д.т.н., профессор

Л.А. Кошеев

Заместитель генерального директора –  
руководитель ЭИЦ, к.т.н., доцент

А.С. Герасимов

Руководитель работы, зав.  
лабораторией НИО-3, к.т.н., доцент

А.Х. Есипович

Санкт-Петербург, 2012

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. лабораторией



А. Х. Есипович  
(Руководство испытаниями,  
введение, редактирование отчета)

Старший научный  
сотрудник

Т. А. Гущина  
(Проведение испытаний,  
разработка программы испытаний,  
составление отчета)

Зам. зав.  
сектором

Н. А. Мичурин  
(Руководство настройкой и наладкой  
элементов и запуском физической  
модели)

Ведущий инженер



М. А. Булыгина  
(Разработка схем стыковки СМПР с  
физической моделью)

Инженер



С. Р. Богданова  
(Участие в проведении  
экспериментов и подготовка  
материалов к отчету)

Инженер



Д. А. Кабанов  
(Участие в проведении  
экспериментов, анализе результатов  
и оформлении отчета)

Инженер



Д. С. Никифорова  
(Подготовка материалов к отчету)

Инженер



М. Е. Екимова  
(Подготовка материалов к отчету)

Нормоконтролер  
зав. НТО к.т.н., доцент

А.Г. Курбатов

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 288 с., 421 рис., 7 табл., 5 ист., 2 прил.

ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАТОР, ЭНЕРГОСИСТЕМА, ГЕНЕРАТОР, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ, ЦИФРО-АНАЛОГО-ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, РАСЧЕТНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ, АБСОЛЮТНЫЙ УГОЛ, СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

На цифро-аналого-физическом комплексе (ЦАФК) ОАО «НТЦ ЕЭС» проводились сравнительные испытания образцов векторных измерителей параметров электрических режимов цифровыми регистраторами различных типов. Испытания проводились в тестовой схеме, обеспечивающей возможность воспроизведения аварийных возмущений и переходных процессов в энергосистеме.

Для испытаний были представлены векторные измерители производства ООО «ПАРМА», ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис», ООО «Прософт-Системы».

По результатам проведенных испытаний приведен технический отчет и протокол технического совещания по итогам испытаний.

## ВВЕДЕНИЕ

Система мониторинга переходных режимов (далее – СМНР), использующая технологию синхронизированной векторной регистрации параметров электрического режима электроэнергетической системы, дает возможность получать более детальную информацию о параметрах установившихся и, главным образом, переходных режимов ЕЭС/ОЭС, возникающих вследствие технологических нарушений или аварий. Изучение этой информации дает новые сведения о динамических свойствах системы, позволяет совершенствовать расчетные модели, решать другие задачи по повышению качества и надежности управления режимами. Одним из основных элементов СМНР является векторный измеритель параметров, определяющий точность регистрации и достоверность информации о режиме.

В настоящее время в качестве векторных измерителей в СМНР используются многофункциональные измерительные преобразователи МИП-01 и МИП-02 компании РТСофт. Эти векторные измерители в 2005 году проходили испытания на цифро-аналого-физическом комплексе (ЦАФК) ОАО «НТЦ ЕЭС» (бывший НИИПТ) в схеме сложного многочастотного объединения и после проведенной по результатам испытаний коррекции программного обеспечения были рекомендованы для применения в ЕЭС России [1].

В 2006 году на ЦАФК в этой же схеме по согласованной и утвержденной Системным оператором программе проводились сравнительные испытания на функционирование отечественных и зарубежных векторных измерителей различных компаний: МИП-01 (РТСофт), *RES-521 (ABB)* и терминалов *N60* с функцией синхронизированного измерения векторов *PMU (GE)* [2], а в 2008 году – сравнительные испытания регистраторов МИП-02 компании РТСофт и *Power Sentinel* модели *1133A (Arbiter Systems)* [3].

Сравнительные испытания, проводившиеся в ОАО «НТЦ ЕЭС» в 2006 году, позволили сделать вывод о том, что регистраторы МИП-01 и МИП-02 не уступают западным векторным измерителям и имеют аналогичные характеристики [4].

В настоящее время целый ряд российских компаний также выпускает векторные измерители. Однако эти устройства не проходили проверки в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, и не имеют рекомендаций Системного оператора по применению в ЕЭС России. В связи с этим ОАО «СО ЕЭС» инициировало проведение сравнительных испытаний

образцов векторных измерителей этих производителей на ЦАФК ОАО «НТЦ ЕЭС» (Приложение 1).

В сравнительных испытаниях принимали участие цифровые регистраторы аварийных процессов ПАРМА РП4.11 (ООО «ПАРМА»), векторные измерители ЭНИП-3 (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»), регистраторы переходных режимов РЭС-3 СМНР и ТПА-02 (ООО «Прософт-Системы») и многофункциональные измерительные преобразователи МИП-0-10 и МИП-02А-40.01 (ЗАО «РТСофт»).

Испытания проводились по программе динамических испытаний векторных регистраторов, разработанной ОАО «НТЦ ЕЭС» по заказу ОАО «СО ЕЭС» для представления на сессии *VLPGO* (объединение системных операторов крупнейших энергосистем мира) [5].

Программа включает 26 опытов и обеспечивает оценку правильности функционирования векторных регистраторов в эксплуатационных режимах и при расчетных и нерасчетных аварийных возмущениях (Приложение 2).

В настоящем отчете приведены результаты испытаний в полном объеме упомянутой программы и протокол технического совещания, состоявшегося по их завершению (Приложение 3).

В отчет также включены результаты нескольких опытов, проведенных по инициативе ОАО «НТЦ ЕЭС» в дополнение к утвержденной программе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительные испытания векторных измерителей проведены 17–19 декабря 2012 г. на ЦАФК ОАО «НТЦ ЕЭС» в схеме модели сложного энергообъединения по согласованной программе (Приложение 2). В испытаниях принимали участие цифровые регистраторы аварийных процессов ПАРМА РП4.11 (ООО «ПАРМА»), векторные измерители ЭНИП-3 (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»), регистраторы переходных режимов РЭС-3 СМНР и ТПА-02 (ООО «Прософт-Системы») и многофункциональные измерительные преобразователи МИП-01-10 и МИП-02А-40.01 (ЗАО «РТСофт»). При проведении всех опытов согласованной программы в качестве эталонных векторных измерителей в соответствии с Техническим заданием использовались регистраторы МИП-02А-40.01 (ЗАО «РТСофт»).

Испытания обеспечили комплексную проверку функционирования перечисленных векторных измерителей в широком диапазоне схемно-режимных и аварийных ситуаций, характерных или возможных в сложном энергообъединении, а именно:

- в предельных электрических режимах при различном составе сети, вплоть до достижения границы апериодической или колебательной устойчивости с ее последующим нарушением;
- при расчетных и тяжелых нерасчетных возмущениях в энергосистеме, вызывающих отключение сетевых элементов, возникновение небалансов активной и реактивной мощности;
- при значительных искажениях формы напряжения электрической сети;
- в послеаварийных режимах при работе энергосистемы с пониженной (повышенной) частотой.

По результатам испытаний проведено Техническое совещание и составлен и утвержден многосторонний Протокол (Приложение 3).

Оценка функционирования векторных измерителей выполнялась путем сравнения:

- действующих значений напряжения прямой последовательности в узлах 1 и 3<sup>1</sup>;
- действующих значений токов прямой последовательности по связям 1-5 и 3-1;
- перетоков активной и реактивной мощности по связям 1-5 и 3-1;
- частоты напряжения в узлах 1 и 3;
- относительных углов между векторами напряжения фазы А в узлах 1 и 3.

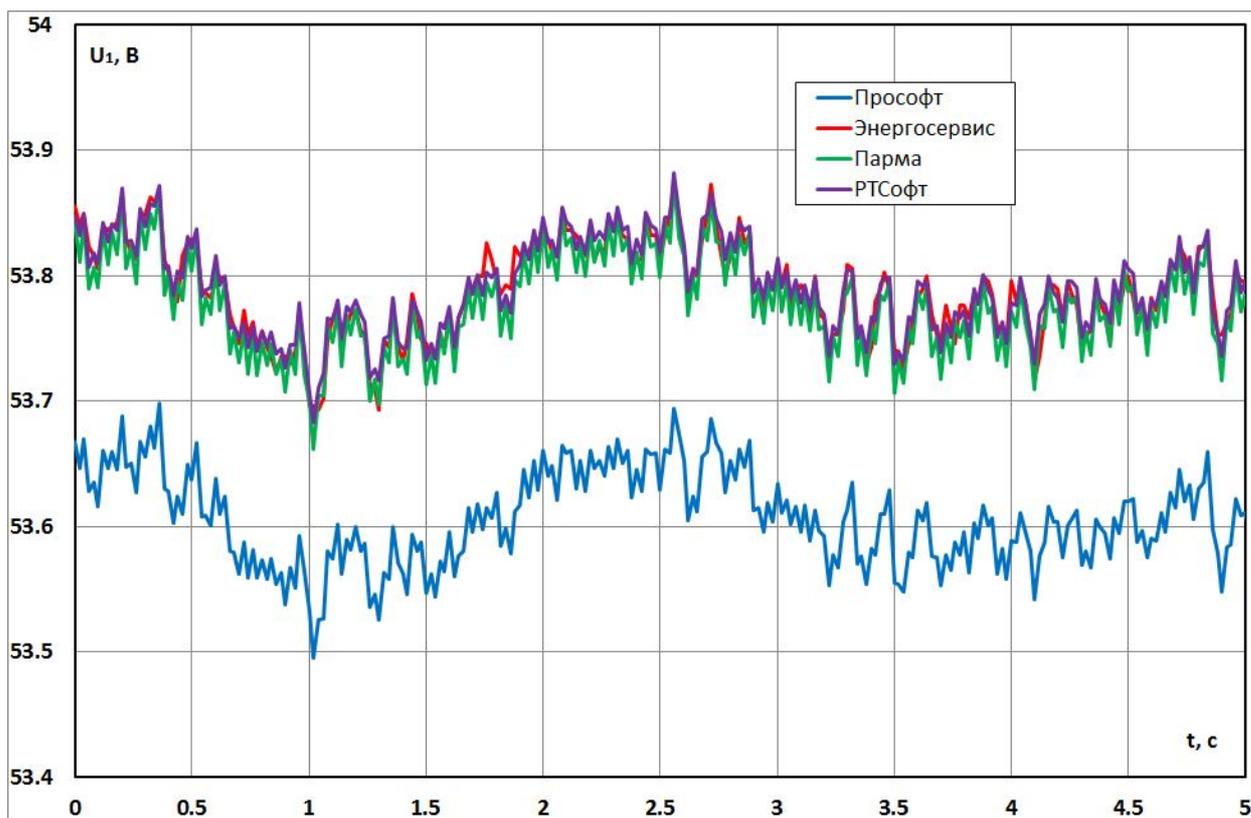
---

<sup>1</sup>Здесь и далее имеются ввиду обозначения, принятые для схемы физической модели (рис. 1)

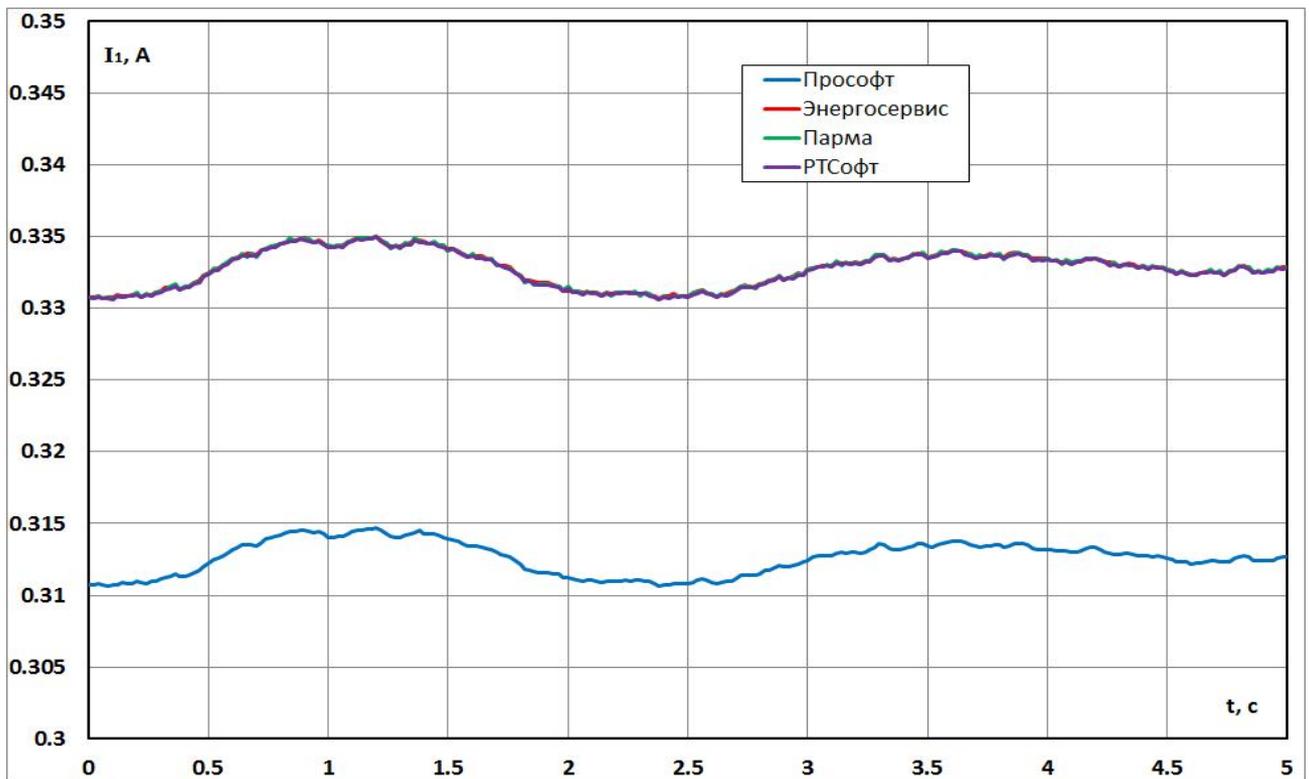
Сравнительный анализ, выполненный по всем перечисленным параметрам электрического режима, позволяет сделать следующие выводы:

1. При всех рассмотренных в процессе реализации программы испытаний схемно-режимных и аварийных условиях показания регистраторов аварийных процессов ПАРМА РП4.11 (ООО «ПАРМА») и векторных измерителей ЭНИП-3 (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис») практически не отличаются от показаний многофункциональных измерительных преобразователей МИП-02А-40.01 (МИП-01-10) компании «РТСофт», принятых в качестве эталонных.

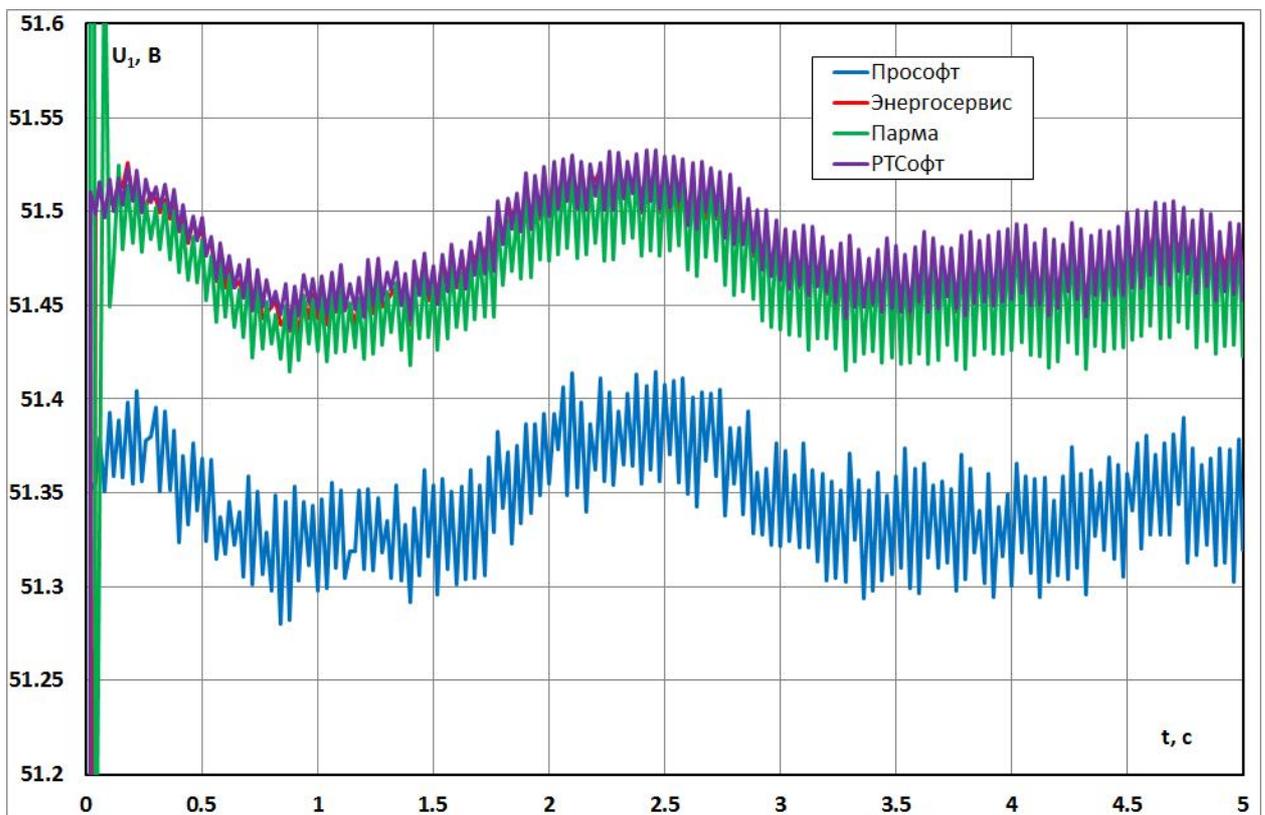
2. Регистраторы переходных режимов РЭС-3 СМРР и ТПА-02 (ООО «Прософт-Системы») осуществляют измерение токов по линиям 1-5 и 3-1, а также напряжений в узлах 1 и 3 с заметной погрешностью как по отношению к векторным измерителям, принятым в качестве эталонных, так и к остальным векторным измерителям. Этот вывод дополнительно проиллюстрирован на рисунках 409-412, где приведены записи электрического режима в ходе опыта 1 рабочей программы (абсолютное время начала фрагмента 38 мин 05 с 360 мс).



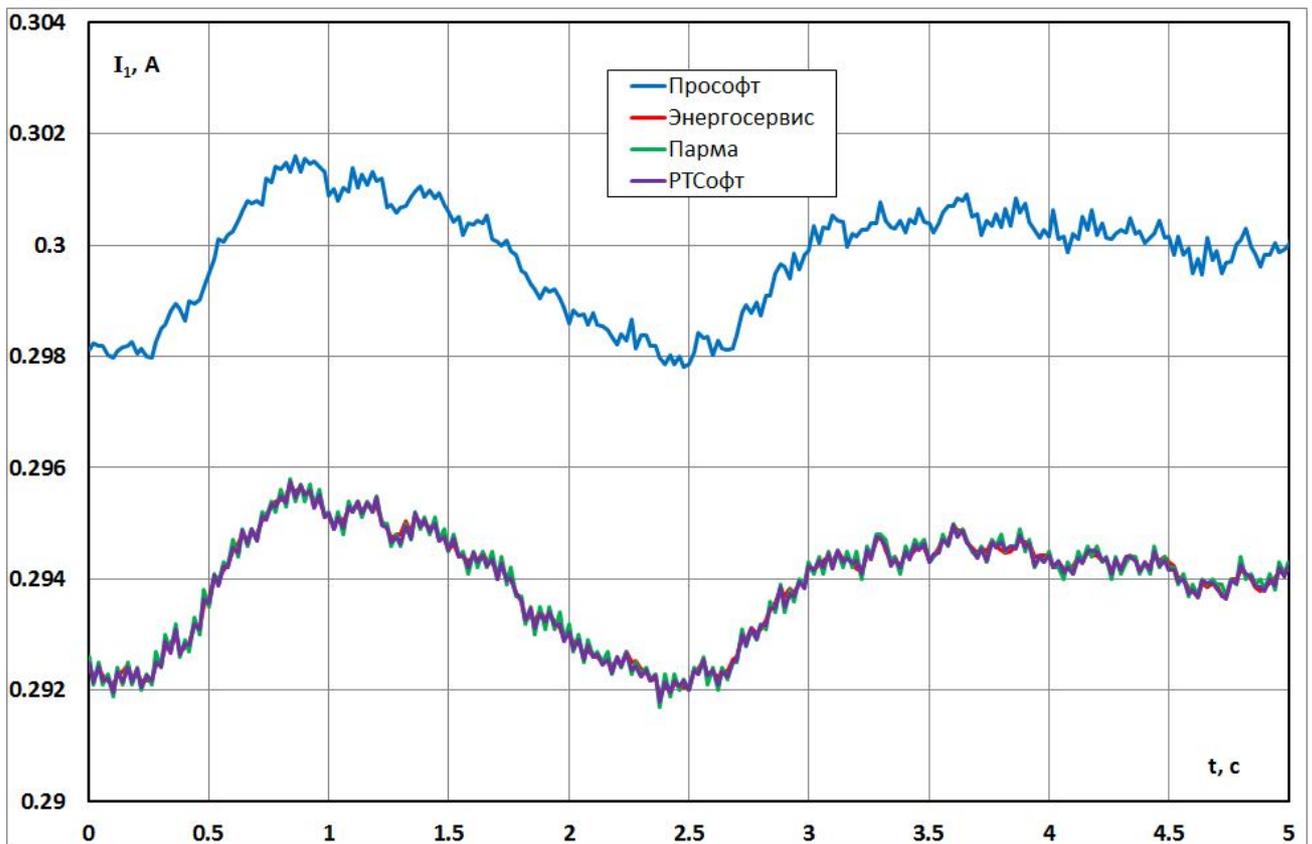
**Рисунок 409 – Действующее значение напряжения прямой последовательности в узле 1**



**Рисунок 410 – Действующее значение тока прямой последовательности по связи 1-5**

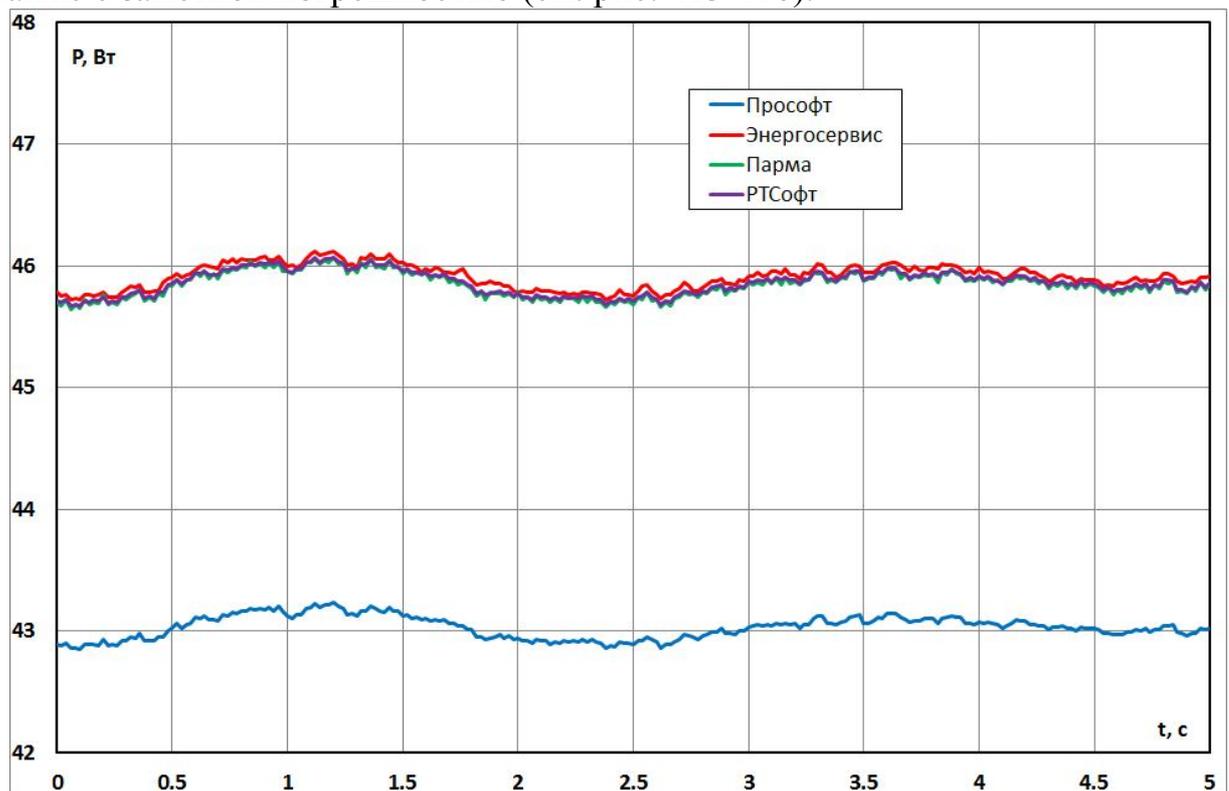


**Рисунок 411 – Действующее значение напряжения прямой последовательности в узле 3**

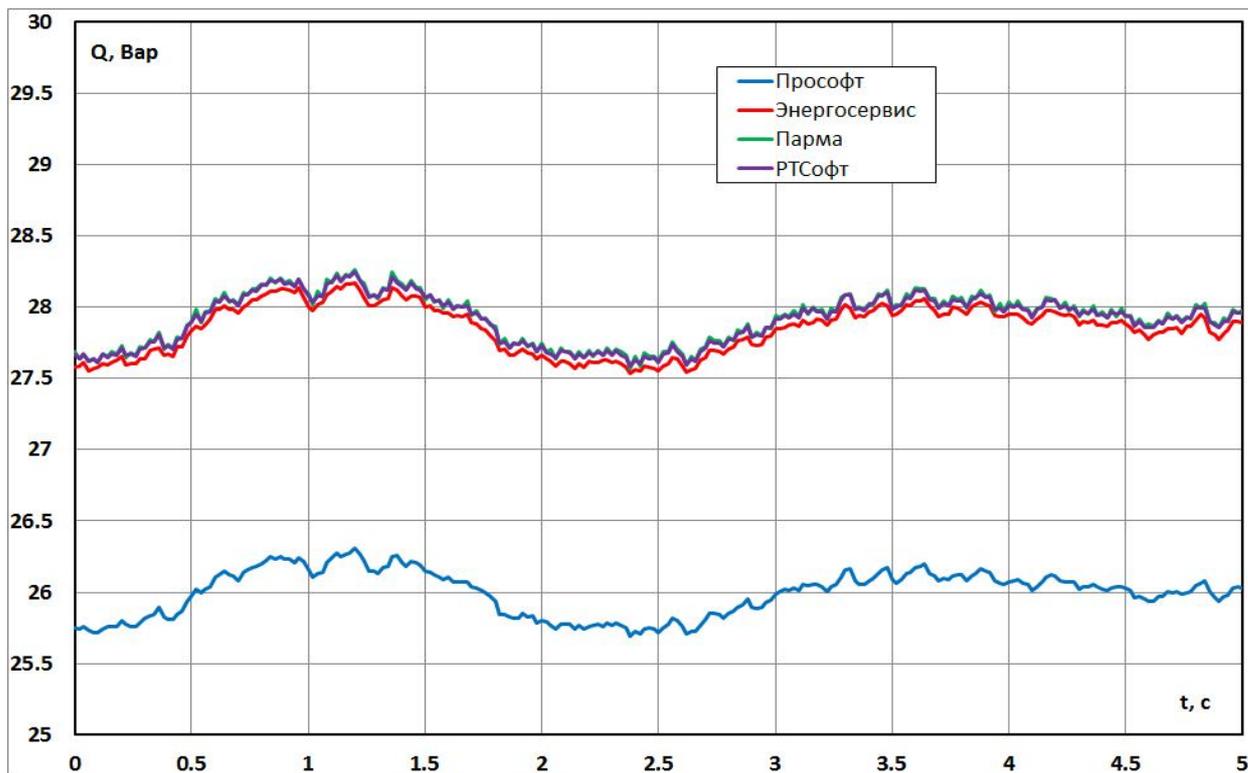


**Рисунок 412 – Действующее значение тока прямой последовательности по связи 3-1**

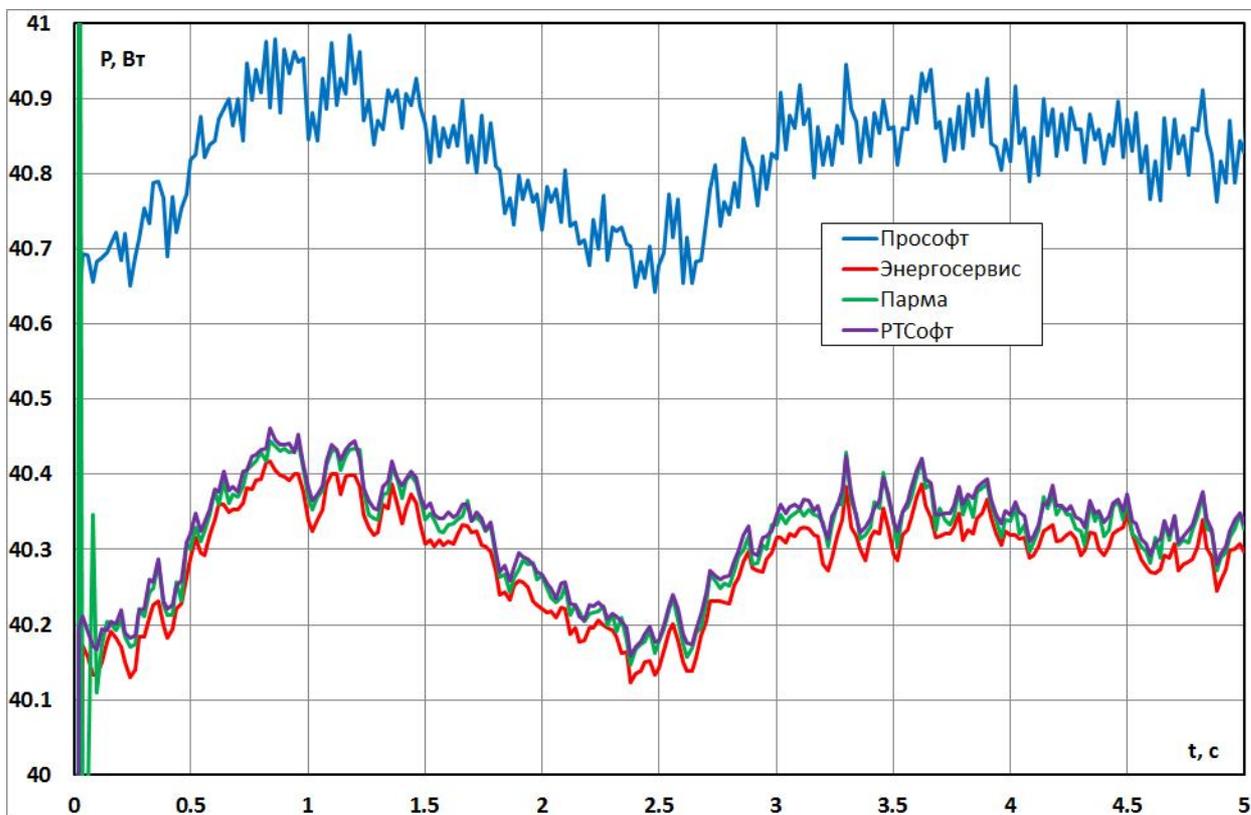
3. Указанная в п.2 погрешность измерений токов и напряжений является причиной того, что перетоки активной и реактивной мощности определяются регистраторами переходных режимов РЭС-3 СМНР и ТПА-02 также с заметной погрешностью (см. рис. 413-416).



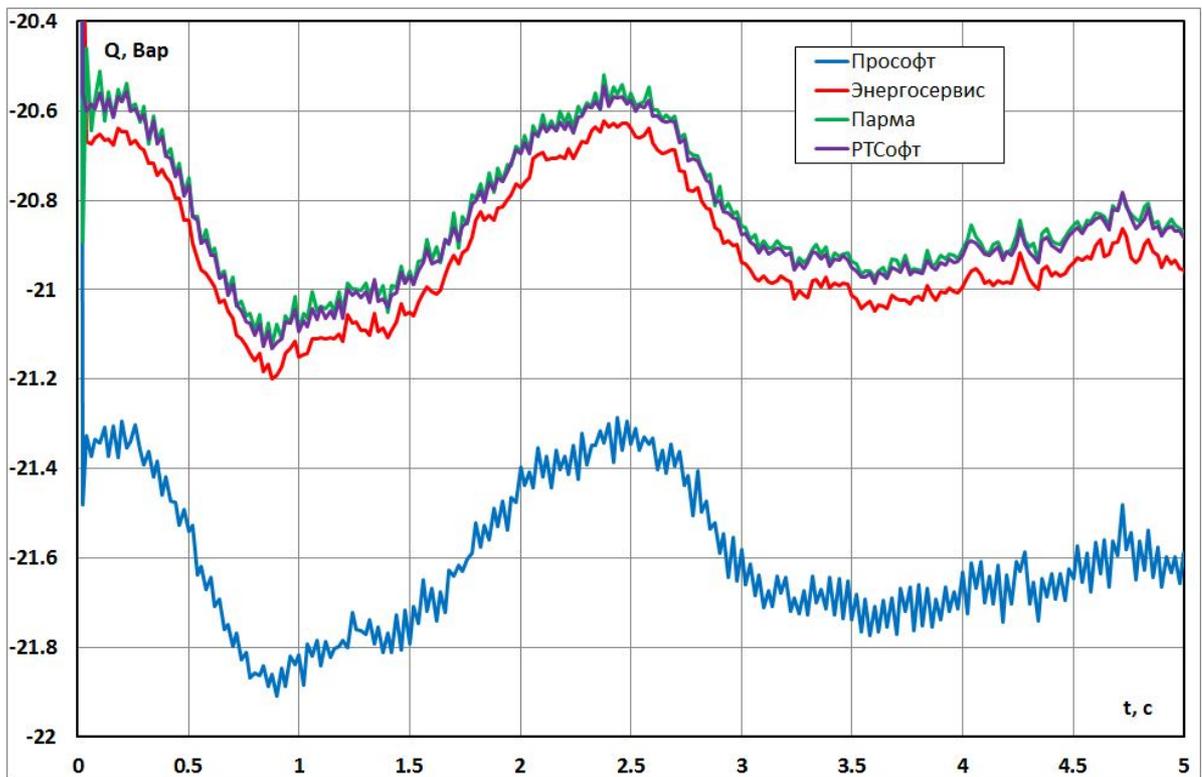
**Рисунок 413 – Переток активной мощности по связи 1-5**



**Рисунок 414 – Переток реактивной мощности по связи 1-5**

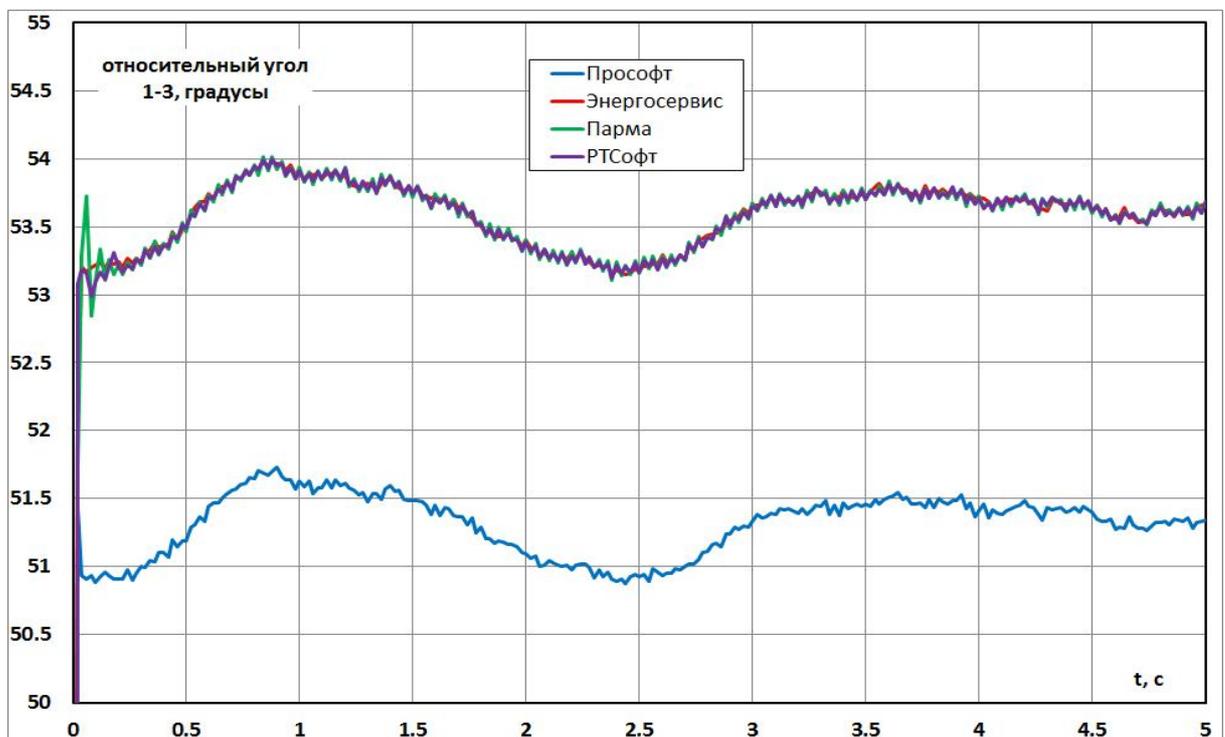


**Рисунок 415 – Переток активной мощности по связи 3-1**



**Рисунок 416 – Переток реактивной мощности по связи 3-1**

4. Относительный угол между векторами напряжения фазы А, вычисленный как разность абсолютных углов, измеренных в узлах 1 и 3 регистраторами переходных режимов РЭС-3 и ТПА-02, также заметно отличается от углов, вычисленных по показаниям остальных векторных измерителей, включая эталонные (рис. 417).



**Рисунок 417 – Изменение относительного угла между векторами напряжения фазы А в узлах 1 и 3**

5. Регистратор переходных режимов ООО «Прософт-Системы», подключенный к узлу 3, некорректно измеряет частоту напряжения в узле 3 при нарушении статической устойчивости (в опытах 1-7). Во всех этих опытах нарушение устойчивости вызывает снижение частоты напряжения генератора в узле 3 относительно 50 Гц. При этом регистратор переходных режимов

ООО «Прософт-Системы» фиксирует (в отличие от остальных векторных регистраторов, подключенных к узлу 3), увеличение частоты, что не соответствует действительности (см. пример на рис. 418, опыт 1). Это же происходит во всех опытах, сопровождающихся нарушением динамической устойчивости (см. пример на рис. 419, опыт 9).

6. Выполнение опыта 25 сопровождается монотонным увеличением частоты в узле 3 после отключения связи. В то же время регистратор переходных режимов ООО «Прософт-Системы» не реагирует на это увеличение частоты: по его показаниям частота не изменяется и остается равной 50 Гц (см. рис. 420, опыт 25).

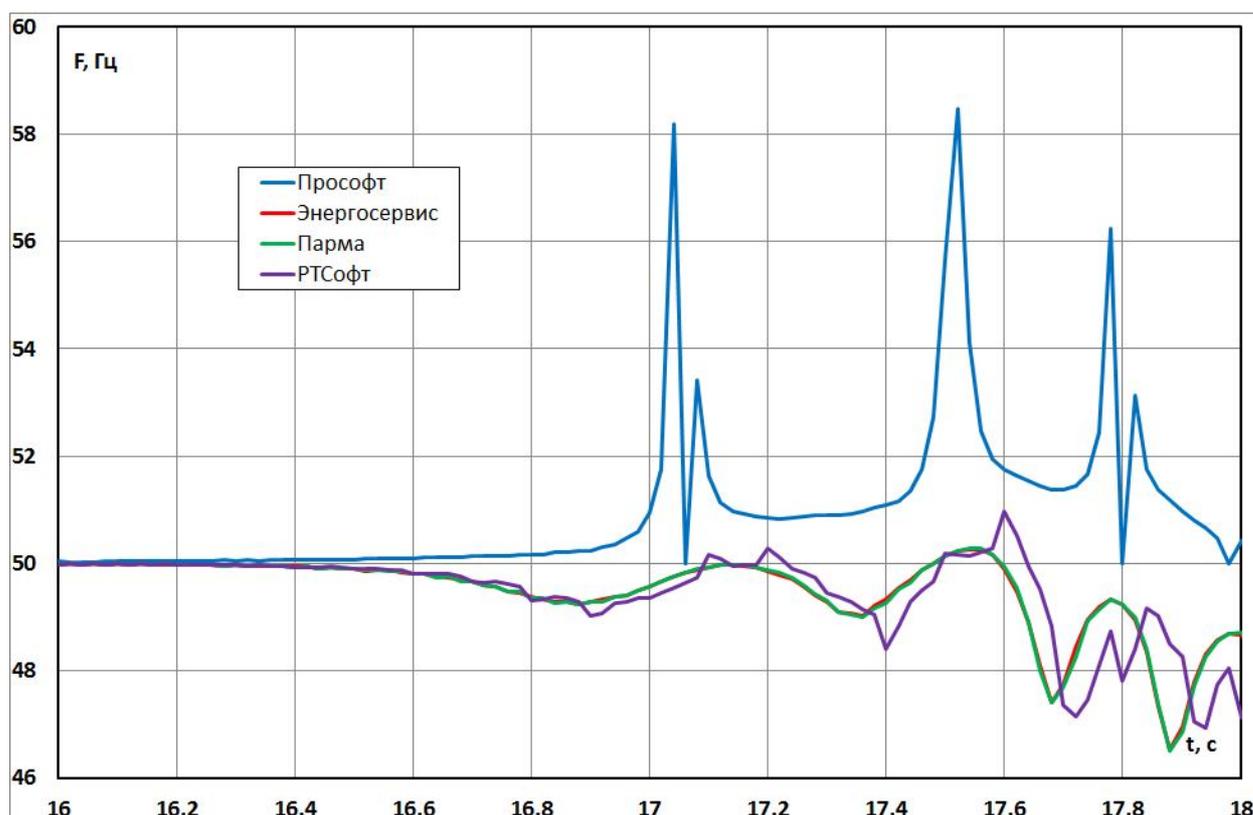


Рисунок 418 – Частота напряжения в узле 3. Опыт 1.

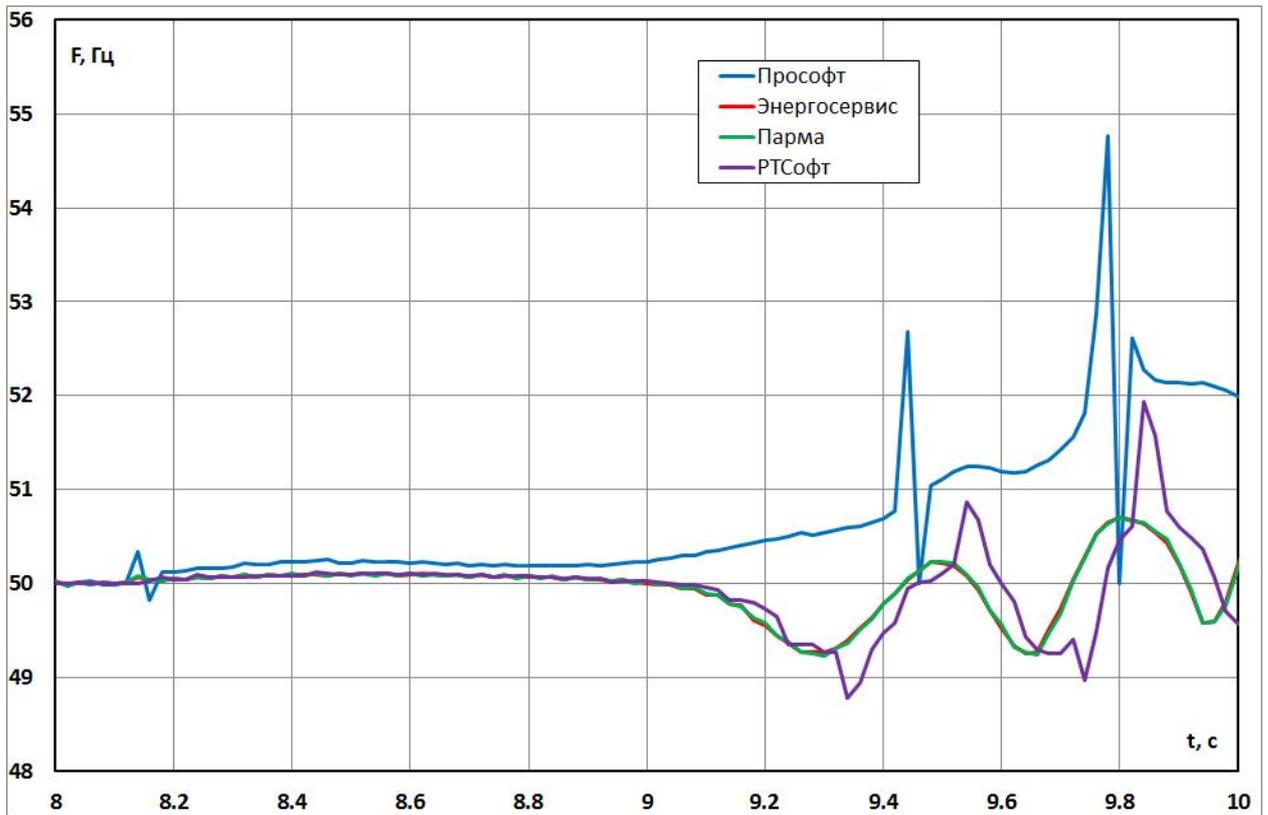


Рисунок 419 – Частота напряжения в узле 3. Опыт 9.

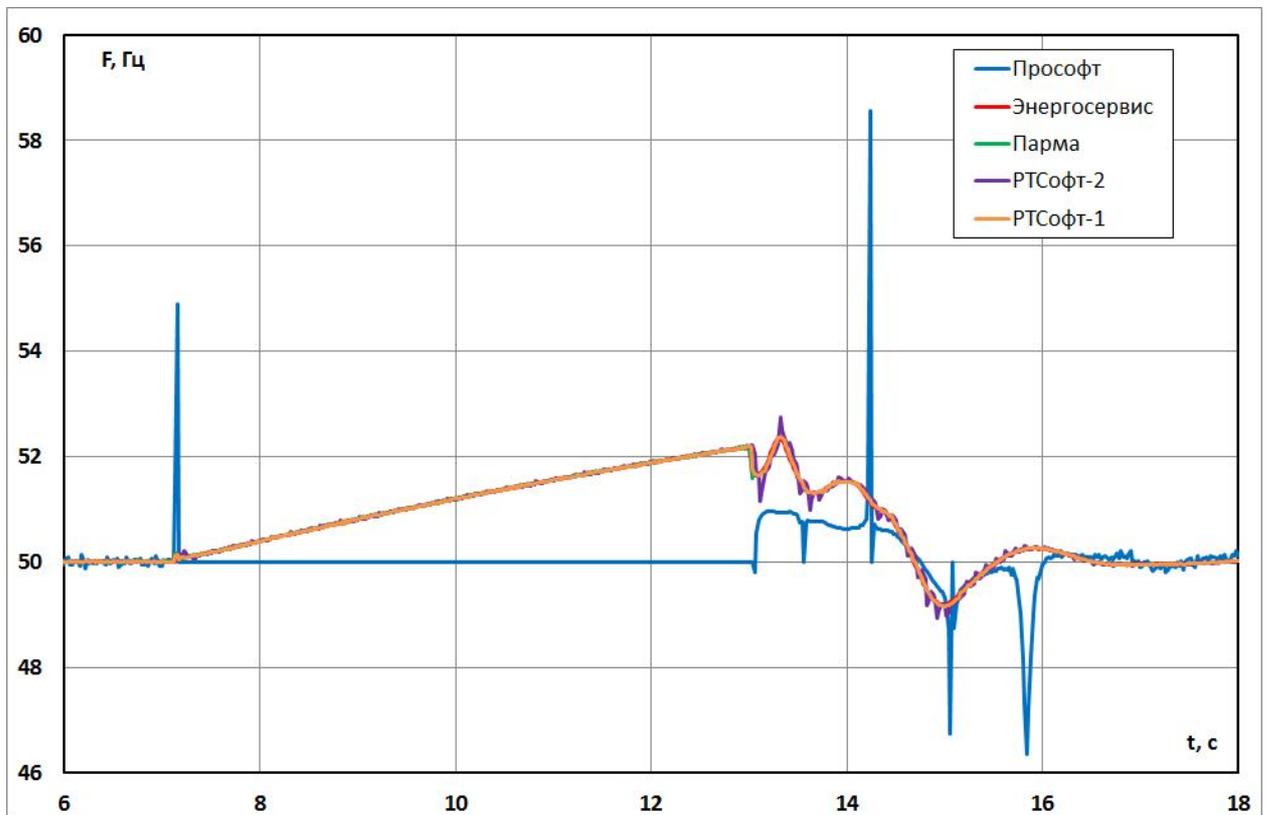
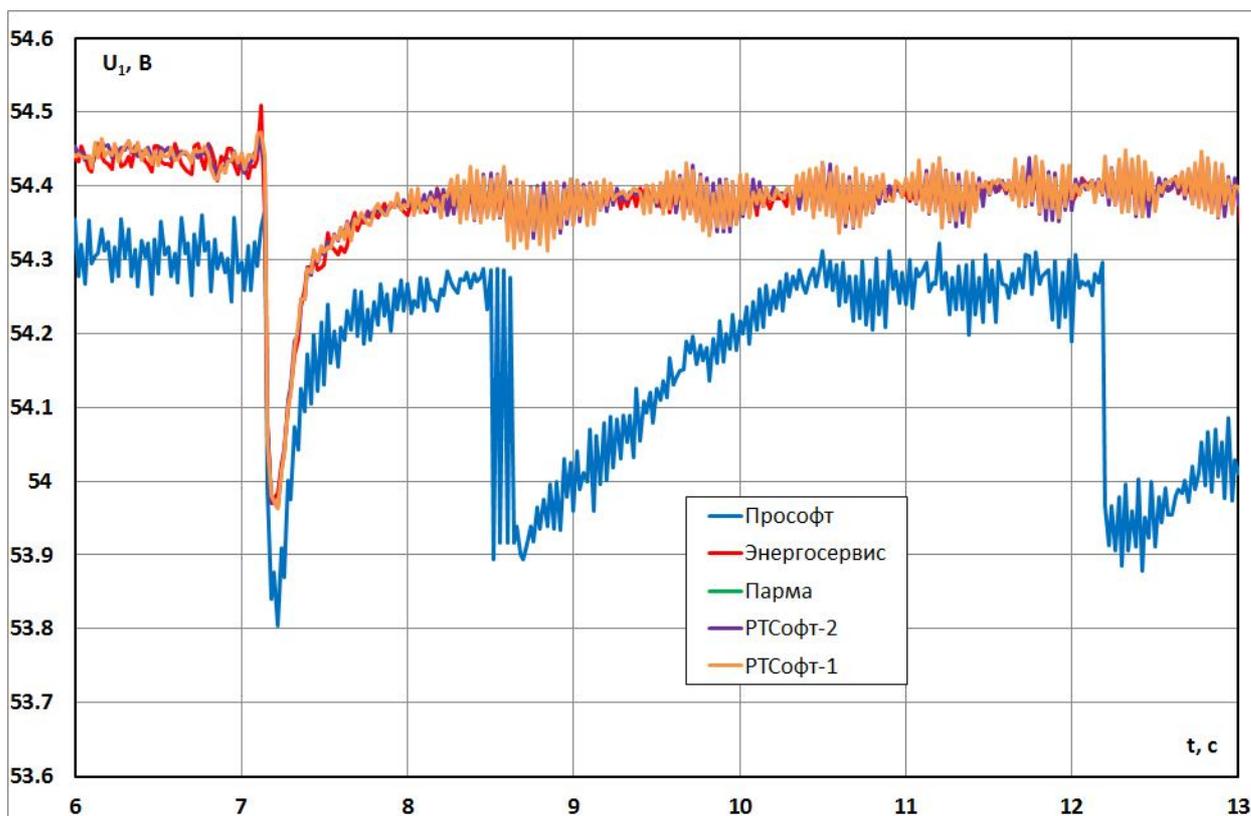


Рисунок 420 – Частота напряжения в узле 3. Опыт 25.

7. При выполнении опыта 25 после отключения связи в показаниях регистратора переходных режимов ООО «Прософт-Системы»,

подключенного к узлу 3, зафиксированы необъяснимые скачки в измерении напряжения прямой последовательности (см. рис. 421, опыт 25).



**Рисунок 421 – Действующее значение напряжения прямой последовательности в узле 3. Опыт 25.**

Результаты дополнительных опытов, проведенных по инициативе ОАО «НТЦ ЕЭС», позволяют сделать вывод о том, что показания регистраторов аварийных процессов ПАРМА РП4.11, векторных измерителей ЭНИП-3 и многофункциональных измерительных преобразователей МИП-01-10 и МИП-02А-40.01 практически совпадают.

С учетом задач, возлагаемых на систему мониторинга переходных режимов, в качестве векторных измерителей кроме многофункциональных измерительных преобразователей ЗАО «РТСофт» могут использоваться регистраторы аварийных процессов ПАРМА РП4.11 (ООО «ПАРМА») и векторные измерители ЭНИП-3 (ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»).

Регистраторы переходных режимов РЭС-3 СМНР и ТПА-02 (ООО «Прософт-Системы») могут применяться в системах мониторинга переходных режимов только в случае успешной проверки на функционирование.