

# МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРКОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Т.Г. КЛИМОВА, В.А. РЕВЯКИН (Национальный Исследовательский Университет “Московский энергетический институт”, Москва),  
П.Н. КАЗАКОВ, А.С. СИЗОВ (АО “Искра Технологии”, Москва)**

**МОИ** | НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**ИСКРА**  
ТЕХНОЛОГИИ

В электроэнергетической системе (ЭЭС) как в сетях высшего напряжения, так и в сетях среднего и низкого напряжений помимо основной гармоники могут присутствовать гармонические составляющие, некратные номинальной частоте. Этим составляющим присвоен специальный термин – интергармоники, которые подразделяются на субсинхронные и суперсинхронные частотные составляющие.

Дается краткий обзор причин возникновения и области распространения интерколебаний, а также способов определения их параметров.

Мониторинг параметров интерколебаний при использовании синхронизированных векторных измерений иллюстрируется при оценке векторов напряжения и тока, измеряемых на статоре синхронного генератора при наблюдении в течение трех лет.

**Ключевые слова:** синхронизированные векторные измерения; мгновенные измерения; диагностика оборудования; интергармоники.

В ЭЭС России, в сетях высокого, среднего и низкого напряжений, помимо основной гармоники, присутствуют гармонические составляющие, некратные основной частоте сети. Эти гармоники могут быть вызваны как штатной работой, так и различными неисправностями оборудования электроэнергетических объектов. В статье представлен анализ сигнатуры<sup>1</sup> тока синхронного генератора на основе синхронизированных мгновенных измерений и измерений векторов режимных параметров электрической сети.

## ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНТЕРКОЛЕБАНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

В отечественной литературе частотным составляющим, некратным основной частоте сети, присвоен специальный термин – интер-

гармоники. В зарубежной науке понятие “интергармоники” подразделяются на субсинхронные и суперсинхронные частотные составляющие [1, 2]. Субсинхронные колебания (субгармоники) возникают на одной или нескольких собственных частотах объединённой системы ниже синхронной частоты системы.

Под суперсинхронными колебаниями (супергармониками) подразумеваются частоты, которые находятся выше номинальной частоты сети и ниже второй гармоники, при этом частота суперсинхронной составляющей может быть симметрична субсинхронной составляющей относительно первой гармоники.

Из определения субсинхронных колебаний следует, что процесс опасен как для турбинных генераторов, так и для всей сети в целом, поскольку синхронные колебания не только могут происходить между машинами, но и вовлекать в процесс всю систему, распространяясь на жизненно важные элементы электрической сети.

<sup>1</sup> Сигнатура обозначает определенные количественные и качественные характеристики чего-либо.

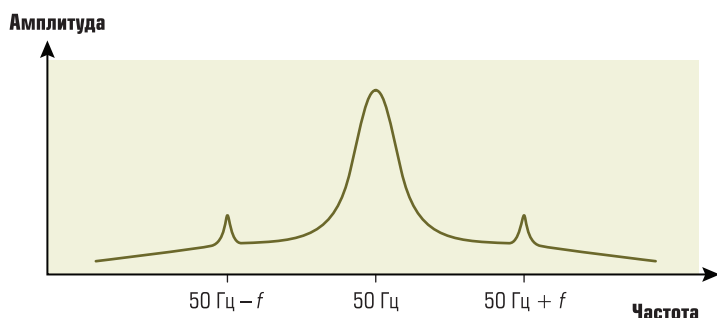


Рис. 1. Проявление низкочастотной составляющей в спектре выходного сигнала

Подключение ветряных турбин к энергосистеме создает новые проблемы для её стабильности, например, сверх- и субсинхронные колебания, которые возникают из-за того, что в энергосистеме преобладают последовательно компенсированные линии и преобразователи мощности. Было обнаружено, что основными причинами колебаний являются субсинхронное взаимодействие (SSI) типичной системы механических валов турбогенератора с линиями передачи с последовательной компенсацией (SC) или устройствами быстрого управления, такими как FACTS, контроллеры постоянного тока высокого напряжения и системные стабилизаторы (PSS).

Большинство механических повреждений генераторов сопровождается появлением характерных гармоник в выходных напряжениях и токах. Анализ спектрального состава этих сигналов позволяет делать выводы о появлении и развитии тех или иных отклонений [1-5]. Обычно для анализа в данном случае используют мгновенные измерения, получаемые с объектов. Но применение данной технологии, во-первых, требует наличия соответствующей сетевой инфраструктуры, и, во-вторых, является избыточным, поскольку можно использовать результаты работы измерительных устройств векторов режимных параметров в каждой необходимой точке.

В настоящее время контроль состояния генераторов проводится при помощи специализированных систем диагностики с использованием специальных датчиков (вибрации, электромагнитного излучения, измерения зазора, температуры и др.) и соответствующего программного обеспечения. Внедрение таких систем сопряжено со значительными затратами, что, в ряде случаев, не оправдано. В то же время развитие электроники, в частности, технологии синхронизированных измерений и разнообразных методов анализа, позволяет обнаруживать признаки развивающихся аварий без больших материальных затрат.

В частности, для анализа интергармоник использовались УСВИ производства компании “Искра Технологии” серии МИП-02А. Устройства, кроме стандартных синхронизированных векторных измерений, выполняли измерения мгновенных значений напряжений и токов трехфазной сети с частотой 200 Гц. Результаты измерений передавались по протоколу С37.118 в виде аналоговых параметров.

В линейке устройств представлены две модели. Модель МИП-02А-40.01М рассчитана на два присоединения (по три фазы напряжения и тока). Модель МИП-02А-40.05М устанавливается на генераторы и, кроме измерений напряжений и токов с выхода генератора, обеспечивает резервированное измерение напряжения и тока обмотки возбуждения.

Поведение интергармоник в составе режимных параметров как правило иллюстрируется при рассмотрении сигнатуры тока статора [5].

#### ВОЗМОЖНЫЕ НАРУШЕНИЯ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В ВЫХОДНЫХ СИГНАЛАХ ГЕНЕРАТОРОВ

При анализе выходных сигналов генераторов следует учитывать, что источники низкочастотных колебаний могут быть внешние, что также можно определить по данным мгновенных измерений УСВИ. Для выделения внешних колебаний желательно на отходящих линиях станции установить УСВИ типа МИП-02А-40.01М.

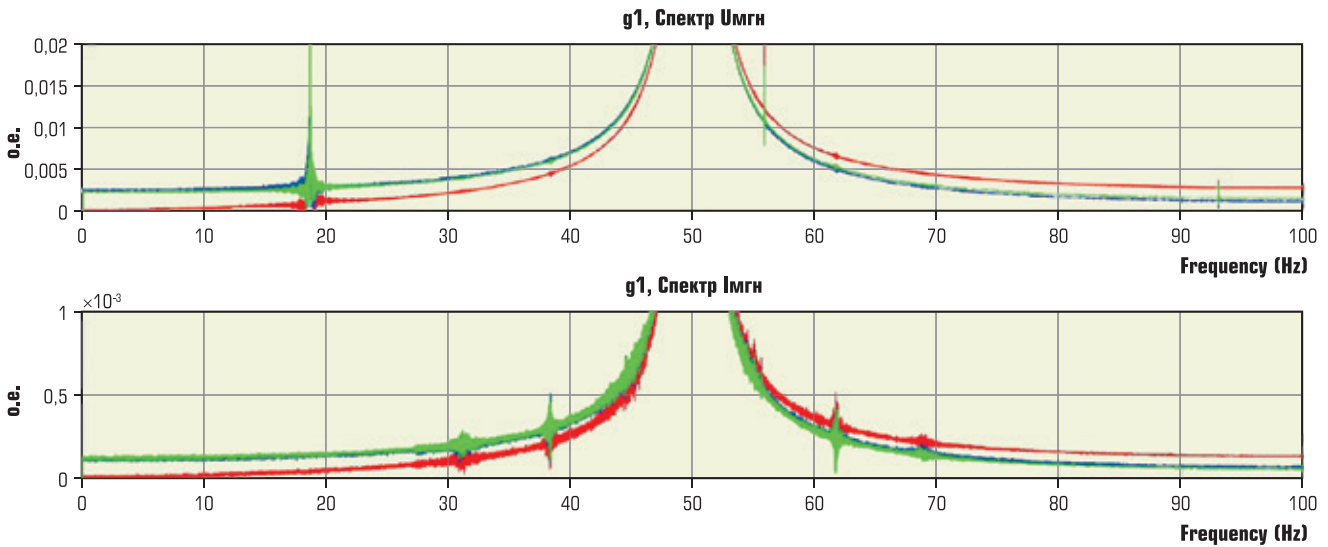
Возможные нарушения генераторов, вызывающие появление дополнительных гармоник в выходных сигналах:

- обрыв стержней ротора;
- эксцентриситет воздушного зазора;
- нарушение изоляции обмотки ротора;
- крутильные колебания вала генератора.

Если в генераторе появляются какие-либо низкочастотные механические колебания с частотой  $f$ , то в выходных сигналах напряжения и тока появляются гармоники с частотами  $F - f$  и  $F + f$ , где  $F$  — основная частота сети (рис. 1).

На рис. 2 представлены различные виды подсинхронных колебаний в фазных напряжениях и токах генератора Г1 (экспериментальные данные, полученные на одной из станций, 2021 г.).

Рассматривается спектральный состав исследуемого сигнала и по соотношению составляющих спектра основной частоты и частоты интергармоник делается вывод о состоянии объекта. Однако при малых зна-



▲ Рис. 2. Различные виды подсинхронных колебаний в фазных напряжениях и токах генератора Г1 (экспериментальные данные, полученные на одной из станций (2021 г.).

чениях амплитуд интергармоник по отношению к амплитуде сигнала основной частоты возможны большие ошибки при оценке состояния объекта. Существенно точнее характеристики интергармоник определяются при использовании векторного представления исследуемых сигналов.

Параметры суммы двух векторов можно найти математически, при этом суммарные параметры вычисляются нелинейными выражениями:

$$A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + A_s \sin(2\pi f_s t + \varphi_s) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) + A_s \sin(2\pi f_0 t + \varphi_2(t)) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi(t)),$$

где  $\varphi_2(t) = 2\pi(f_s - f_0)t + \varphi_s$ , а параметры эквивалентного колебания вычисляются по формулам:

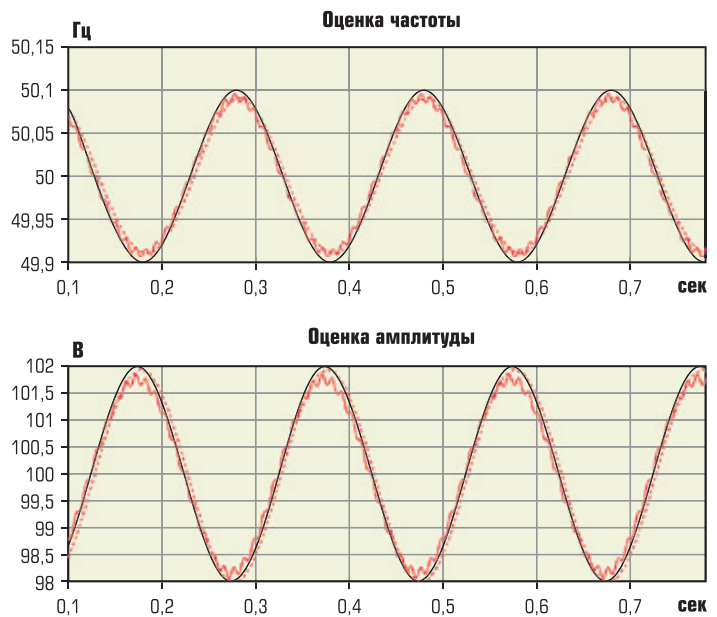
$$A^2 = A_0^2 + A_s^2 + 2A_0 A_s \cos(\varphi_0 - \varphi_2(t)),$$

$$\varphi(t) = \arctg \frac{A_0 \sin(\varphi_0) + A_s \sin(\varphi_2(t))}{A_0 \cos(\varphi_0) + A_s \cos(\varphi_2(t))}.$$

Видно, что параметры результирующего (суммарного) вектора являются переменными, их значения зависят от характеристик интергармонического колебания. Именно параметры суммарного вектора оцениваются измерительными устройствами. А точность оценки этих параметров зависит от применяемых измерительных устройств. Например, по Стандарту [6] УСВИ класса “Р” должно определять эквивалентную частоту в пределах ее колебаний  $50 \pm 5$  Гц с точностью 5 мГц. УСВИ,

сертифицированные по указанному стандарту, в ситуациях, соответствующих требованиям стандарта, позволяют достаточно точно определить параметры субгармонических колебаний (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что амплитуда колебания вектора номинальной частоты вычисляется по формуле  $A_0 = \frac{\max(A(t)) + \min(A(t))}{2}$ , оценка частоты также является средним значением оценок частоты суммарного вектора



▲ Рис. 3. Оценка параметров суммарного вектора  $A \sin(2\pi f_0 t + \varphi(t))$  при выполнении условий стандарта. Частота субгармонических колебаний  $f_s = 45$  Гц. Черная кривая – теоретическая зависимость параметров суммарного вектора, красные кривые получены при использовании алгоритмов УСВИ [7]

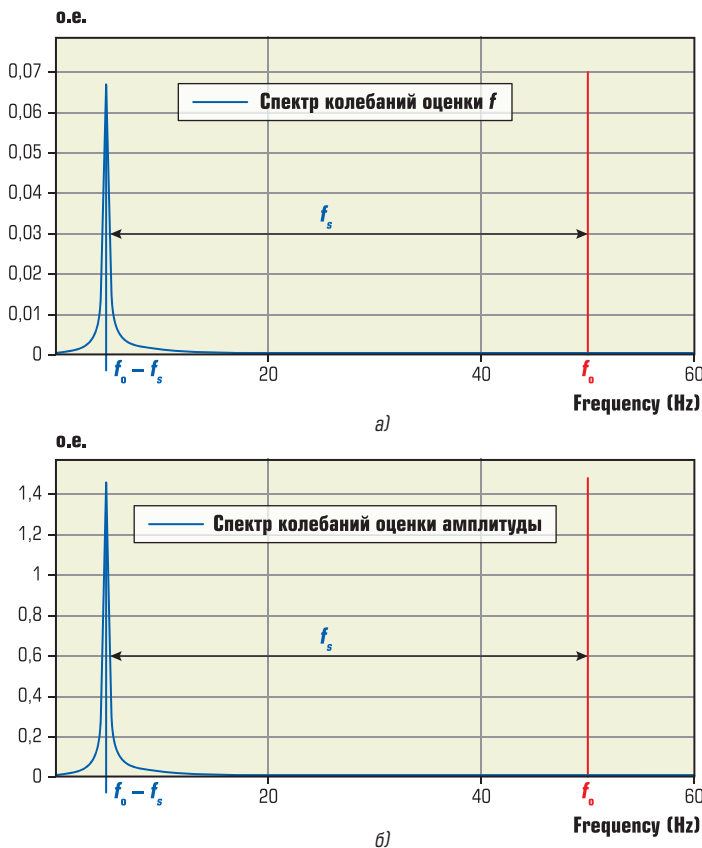


Рис. 4. Спектр колебаний оценок частоты (а) и амплитуды (б) суммарного вектора

$f_0 = \frac{\max(f(t)) + \min(f(t))}{2}$ . Оценка амплитуды субгармонического колебания равна

$A_s = \frac{\max(A(t)) - \min(A(t))}{2}$ , а частота обратно пропорциональна периоду наблюдаемых колебаний (рис. 3). Максимальное время оценки для расчета параметров субгармонических колебаний определяется периодом субгармонических колебаний.

Точность полученных оценок частоты субгармонических колебаний подтверждается при анализе спектров этих оценок (рис. 4).

При отклонении условий от требований стандарта условий работы УСВИ точность оценок ухудшается, но пропорциональность изменений параметров происходит

в соответствии с изменениями параметров анализируемых сигналов.

Далее рассматривается возможность определения параметров интергармонических колебаний при использовании измеренных или рассчитанных характеристик наблюдаемого суммарного вектора сигналов режимных параметров.

**МОДЕЛЬНАЯ ИЛЛЮСТРАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УСВИ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕРГАРМОНИК**

Модельный тестовый сигнал формируется по данным таблицы 1.

Для получения спектра сигнала используется быстрое преобразование Фурье (FFT), а для вычисления параметров векторов используется алгоритм, проверенный по стандарту [6] и предназначенный для УСВИ распределительных сетей [7]. Сопоставляется частота дискретизации равная 1000 Гц, т.е. берется 20 выборок на период и частота дискретизации равная 6400 Гц (128 выборок на период). Эти параметры часто используются в терминалах релейной защиты. Длительность окна обработки сигналов для получения спектра равна 5 сек.

Пример тестового сигнала и его спектра представлен на рис. 5.

На рис. 6 представлены временные зависимости оценки частоты и амплитуды суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний при частоте дискретизации УСВИ, равной 6400 Гц.

На рис. 7 представлены временные зависимости оценки частоты и амплитуды суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний при частоте дискретизации УСВИ, равной 1000 Гц.

Наблюдается существенное влияние на точность оценок параметров используемой

Таблица 1. Параметры модели наблюдаемого сигнала

Основная гармоника	$S_{nom}(J) = A_{nom} \cdot \sin(2\pi f_{nom} \cdot J \cdot dt)$ при $A_{nom} = 100$ ; $f_{nom} = 50$ Гц
Субгармоника	$S_{sub}(J) = A_{sub} \cdot \sin(2\pi f_{sub} \cdot J \cdot dt)$ при $A_{sub} = 1$ ; $f_{sub} = 40$ Гц, 20 Гц
Супергармоника	$S_{sup}(J) = A_{sup} \cdot \sin(2\pi f_{sup} \cdot J \cdot dt)$ при $A_{sup} = 1$ ; $f_{sup} = 60$ Гц

Тестовый сигнал:  $s(t) = S_{nom} + a \cdot S_{sub} + b \cdot S_{sup}$ , коэффициенты  $a, b$  устанавливаются в зависимости от условия опыта. Параметр  $J$  соответствует дискретному времени, диапазон изменения  $J$  зависит от окна обработки и интервала дискретизации

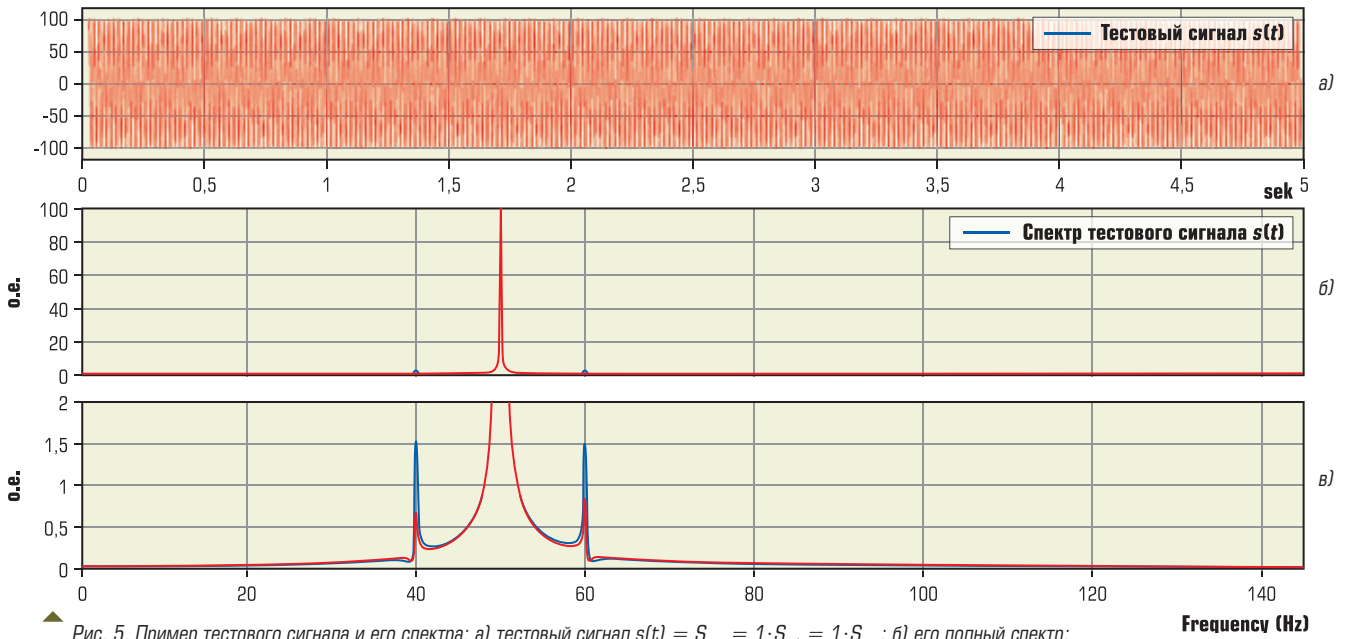


Рис. 5. Пример тестового сигнала и его спектра: а) тестовый сигнал  $s(t) = S_{\text{ном}} = 1 \cdot S_{\text{sub}} = 1 \cdot S_{\text{sup}}$ ; б) его полный спектр; в) увеличение масштаба по вертикальной оси для наблюдения составляющих спектра интергармоник;  $f_{\text{sub}} = 40 \text{ Гц}$ ,  $f_{\text{sup}} = 60 \text{ Гц}$

Рис. 6. Оценки частоты а) и амплитуды б) на временных зависимостях суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний при частоте дискретизации УСВИ, равной 6400 Гц. Сплошные кривые рассчитаны с окном 20 мсек, а пунктирные – 30 мсек

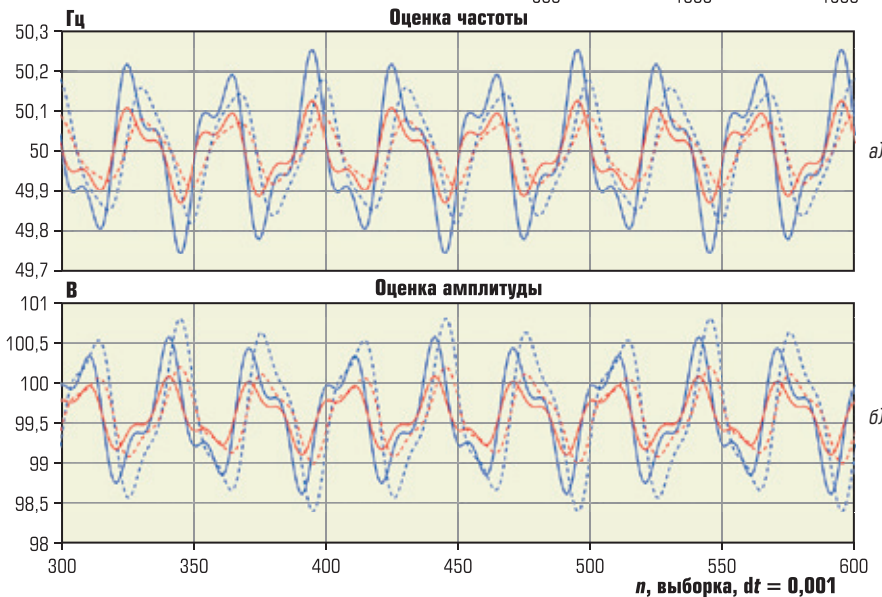
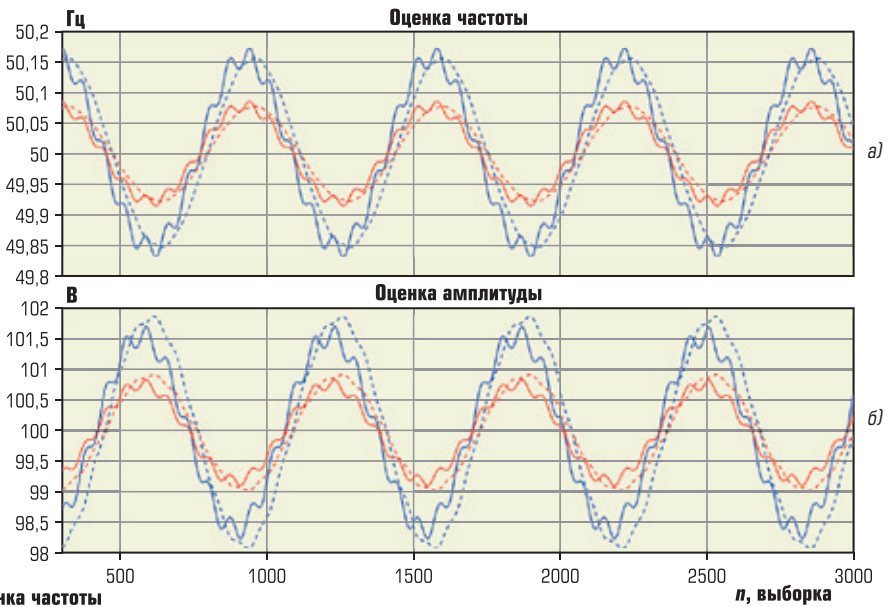


Рис. 7. Оценки частоты а) и амплитуды б) на временных зависимостях суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний при частоте дискретизации УСВИ, равной 10 000 Гц. Сплошные кривые рассчитаны с окном 20 мсек, а пунктирные – 30 мсек

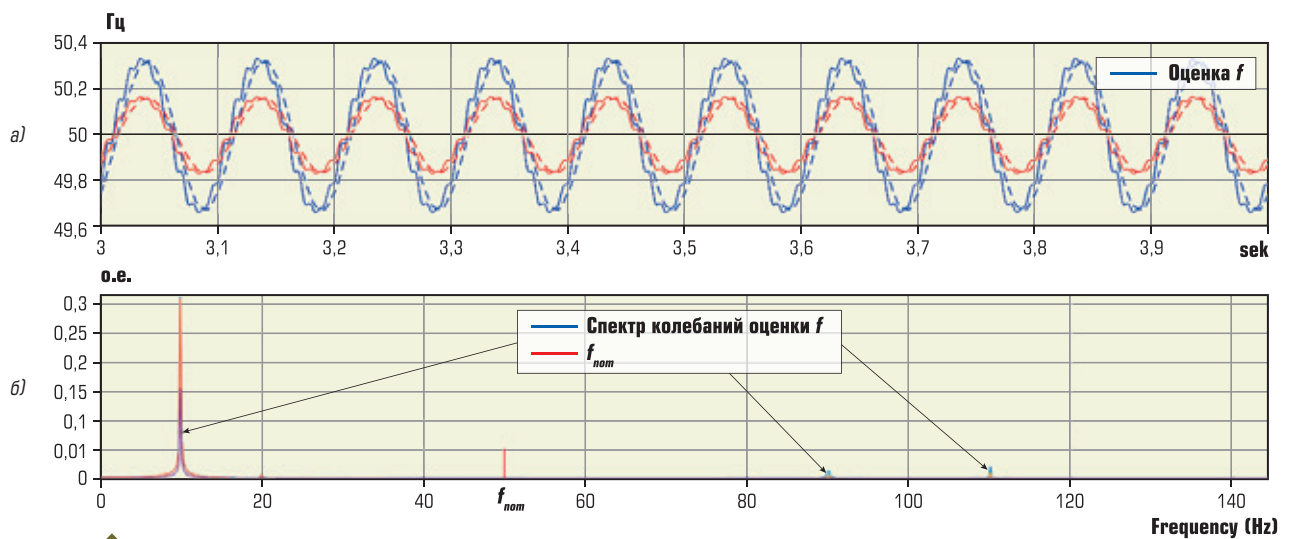


Рис. 8. На графике а) сплошными линиями представлены оценки частоты суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний. На графике б) представлен спектр этих оценок

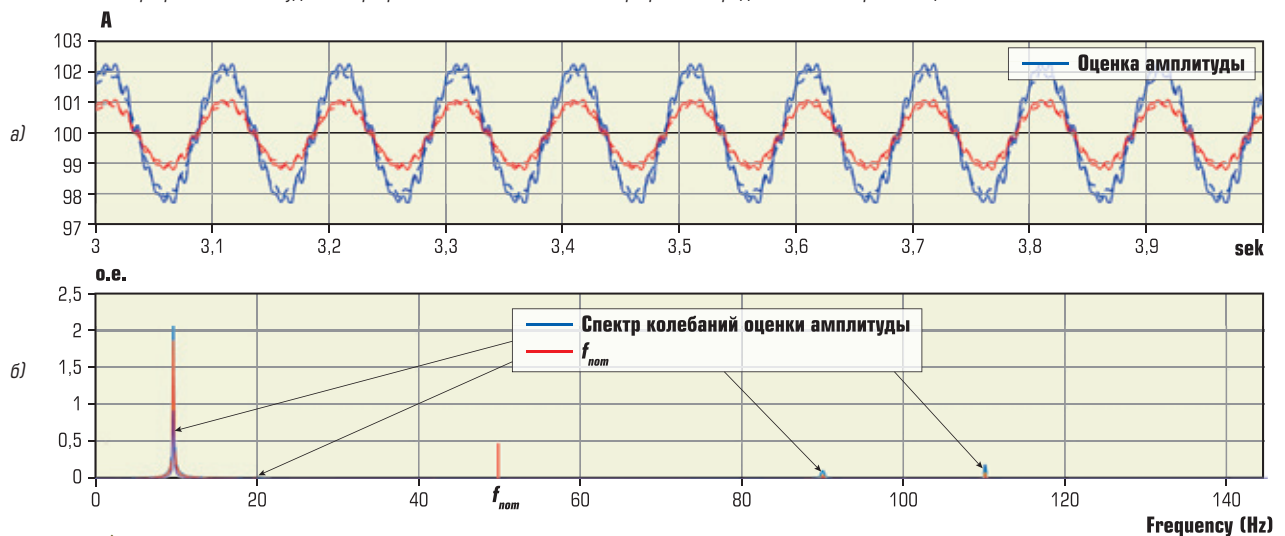


Рис. 9. На графике а) сплошными линиями представлены оценки амплитуды суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний. На графике б) представлен спектр этих оценок

в УСВИ частоты дискретизации. Далее (рис. 8 и 9) рассматриваются оценки, полученные при частоте дискретизации УСВИ, равной 6400 Гц.

Далее рассматривается ситуация получения оценок при наличии только субгармоники (например, крутильные колебания) (рис. 10).

На рис. 11-13 показаны оценки амплитуды и частоты суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний, проводится сопоставление их спектров.

### ВЫВОДЫ ПО АНАЛИЗУ ОПЫТОВ НА МОДЕЛЯХ

Опыты на моделях показали, что изменения состава мгновенных значений тестовых

сигналов, соответствующие изменениям характеристик интергармонических колебаний, точнее и проще наблюдать при анализе характеристик векторов режимных параметров. И оценки частоты, и оценки амплитуды векторов режимных параметров содержат требуемую информацию о спектральных характеристиках интергармоник, имеющих признаки развивающихся аварий.

Далее представлены экспериментальные данные, полученные на одной из станций, при наблюдении в течение трех лет. Для анализа использовались мгновенные значения напряжений и токов трех фаз трех генераторов, записанные на интервале несколько минут с частотой дискретизации 200 Гц. Оценка состояния производилась при анализе спектров всех данных.

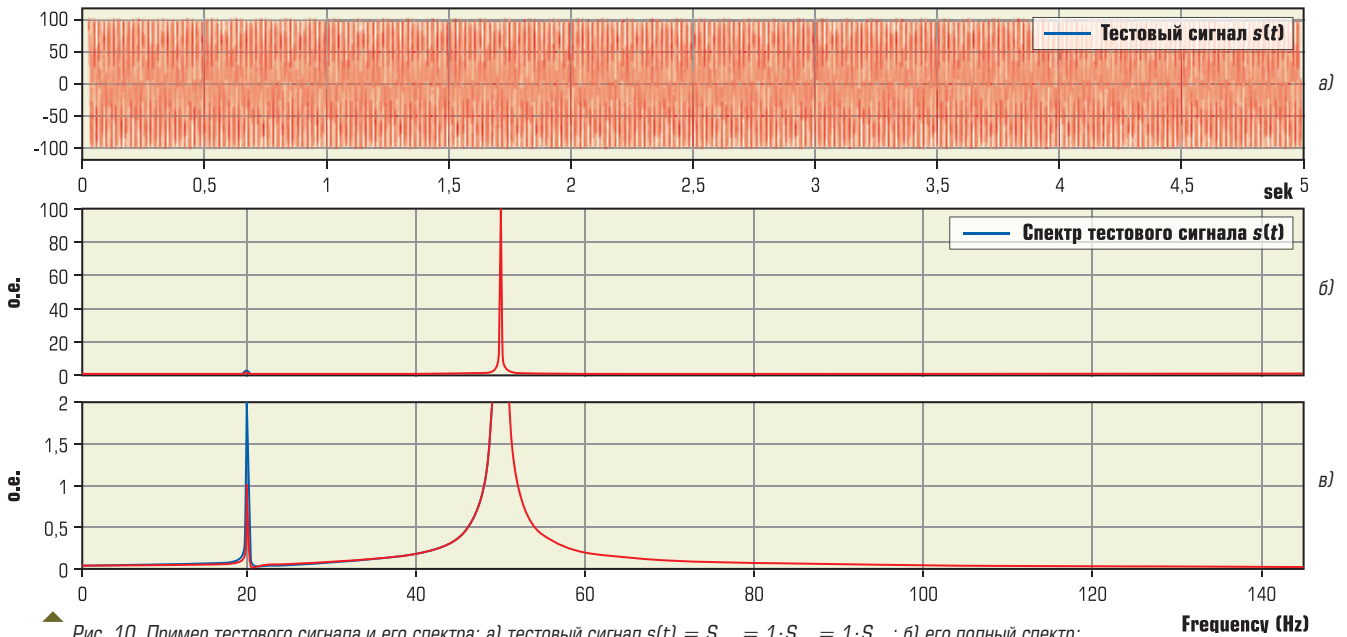


Рис. 10. Пример тестового сигнала и его спектра: а) тестовый сигнал  $s(t) = S_{nom} = 1 \cdot S_{sub} = 1 \cdot S_{sup}$ ; б) его полный спектр; в) увеличение масштаба по вертикальной оси для наблюдения составляющих спектра интергармоник;  $f_{sub} = 20$  Гц

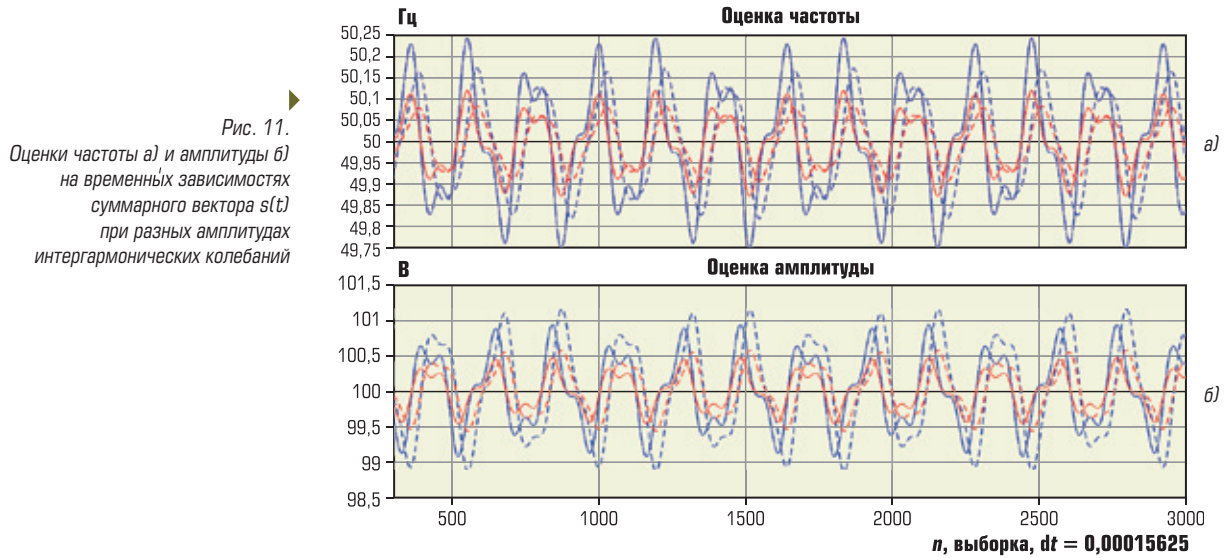


Рис. 11. Оценки частоты а) и амплитуды б) на временных зависимостях суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний

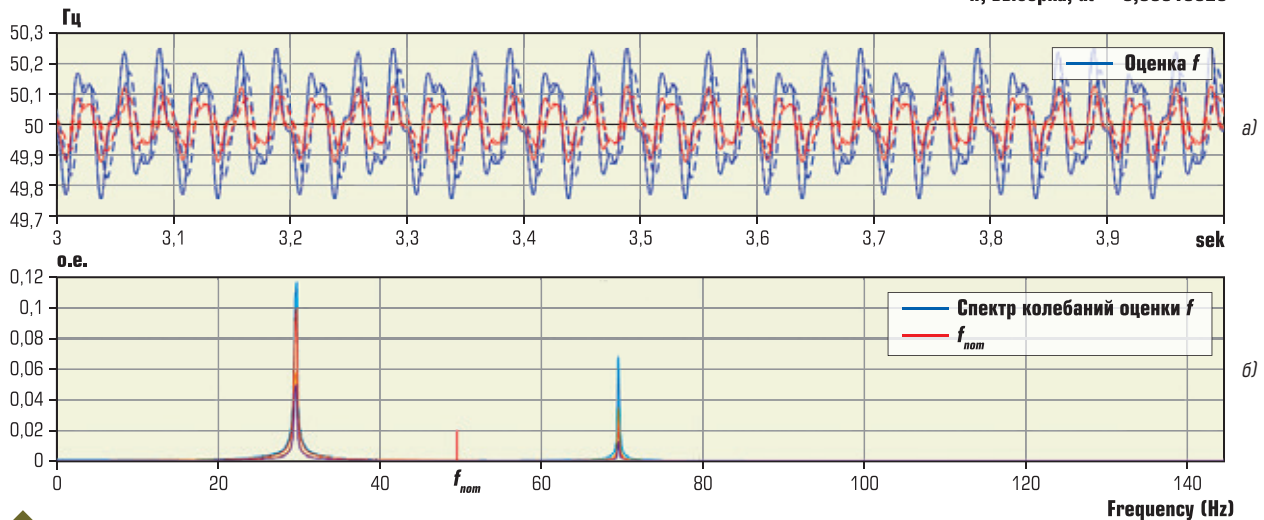


Рис. 12. На графике а) линиями представлены оценки частоты суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний. На графике б) представлен спектр этих оценок

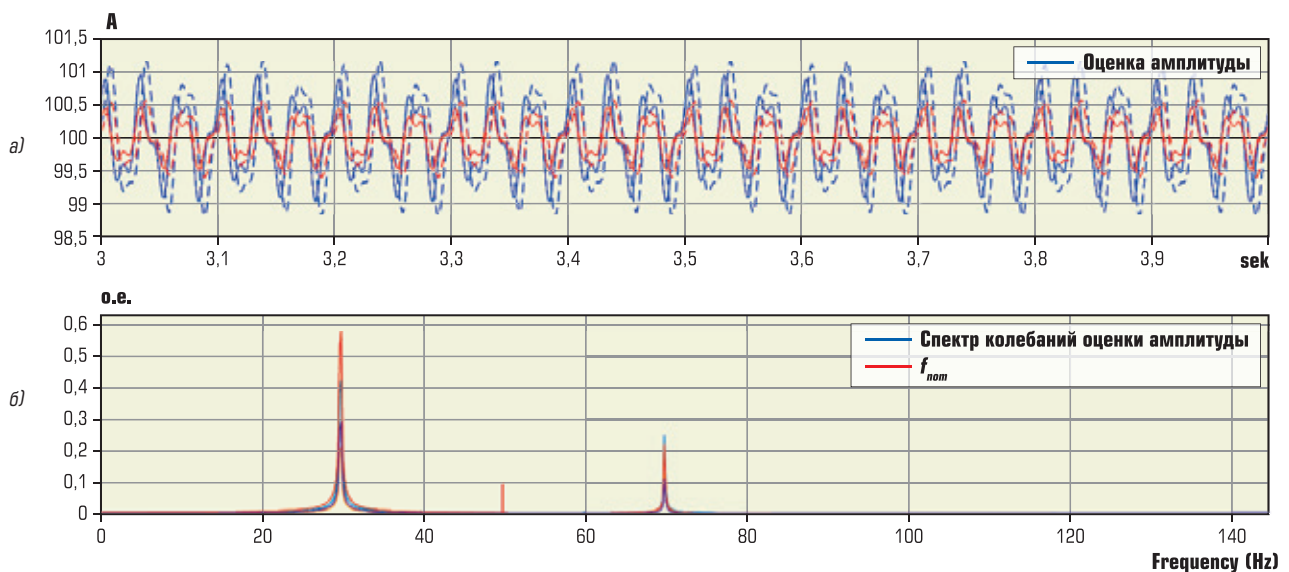


Рис. 13. На графике а) линиями представлены оценки амплитуды суммарного вектора  $s(t)$  при разных амплитудах интергармонических колебаний. На графике б) представлен спектр этих оценок

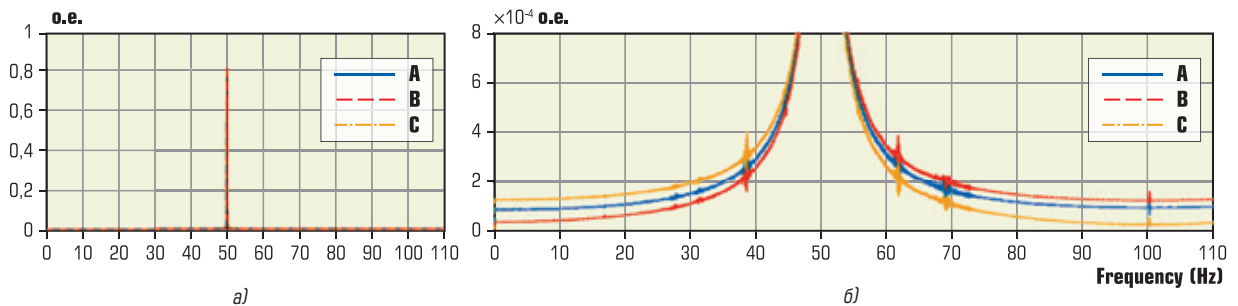


Рис. 14. Различные виды интергармонических колебаний в фазных токах генератора 2021 г.: а) полный спектр измеряемого сигнала; б) увеличение масштаба по вертикальной оси для наблюдения составляющих спектра интергармоник

Пример экспериментальных данных и их спектра показан на рис. 14.

После ремонта в сигналах напряжений и токов генераторов наблюдается существенное уменьшение низкочастотных колебаний. Это проявляется и в характеристиках соответствующего векторного представления сигналов, оценках частот и амплитуд. Здесь также для вычисления параметров векторов применяется фильтр Фурье с окном, равным 20 мсек – период номинальной частоты.

На рис. 15 видно, что низкочастотные колебания практически исчезли из частот фазных токов (показаны зеленым цветом) и во временной области, и в частотной, в соответствующем диапазоне частот.

Аналогично, после ремонта в амплитуде фаз тока также наблюдается существенное уменьшение низкочастотных колебаний (рис. 16). Это видно и во временной области и, в частотной, в соответствующем диапазоне частот: низкочастотные колебания исчезли из амплитуды фазных токов.

Ниже приводится оценка состава режимных параметров энергосистемы по измерениям УСВИ, дающих гораздо более точные оценки характеристик векторов этих параметров, по сравнению с фильтром Фурье. Точность оценок уменьшает дисперсию результатов.

После ремонта в частоте прямой последовательности тока наблюдается существенное уменьшение низкочастотных колебаний. Это видно и во временной области, и в частотной, в соответствующем диапазоне частот (рис. 17).

### Выводы по экспериментальным данным

1. Сравнение измерений, выполненных с большим интервалом времени, позволяет “увидеть” в различных сигналах происходящие изменения признаков аварии и прогнозировать их дальнейшее развитие.
2. Плановый ремонт положительно сказался на характеристиках генераторов, о чем говорит уменьшение амплитуды выявленных ранее гармоник.



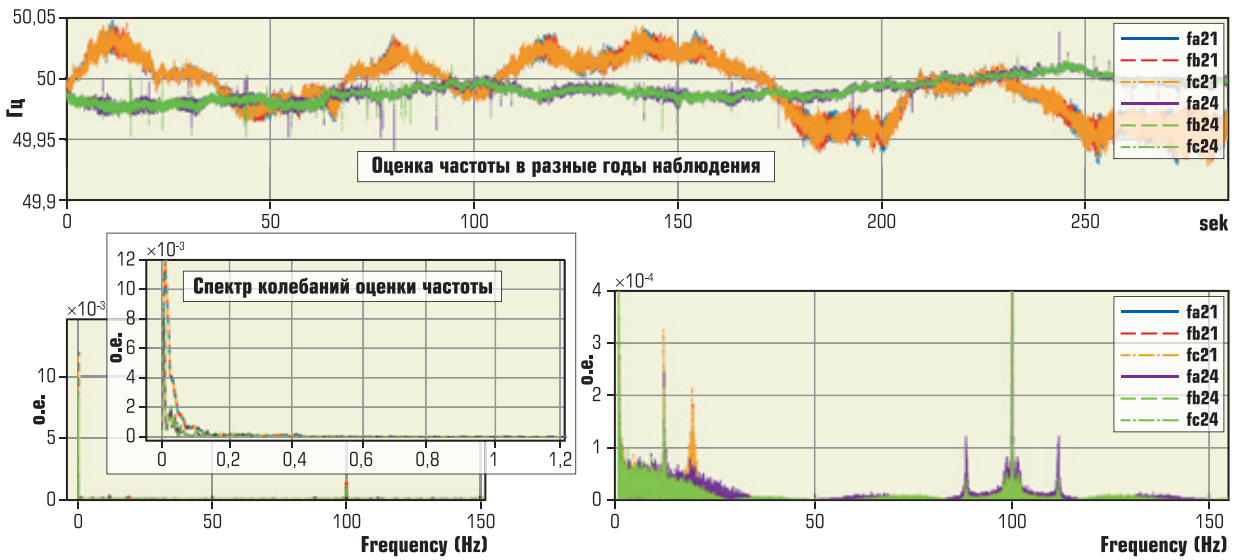


Рис. 15. Оценка частоты фазных токов и спектр их колебаний, 2021-2024 гг.

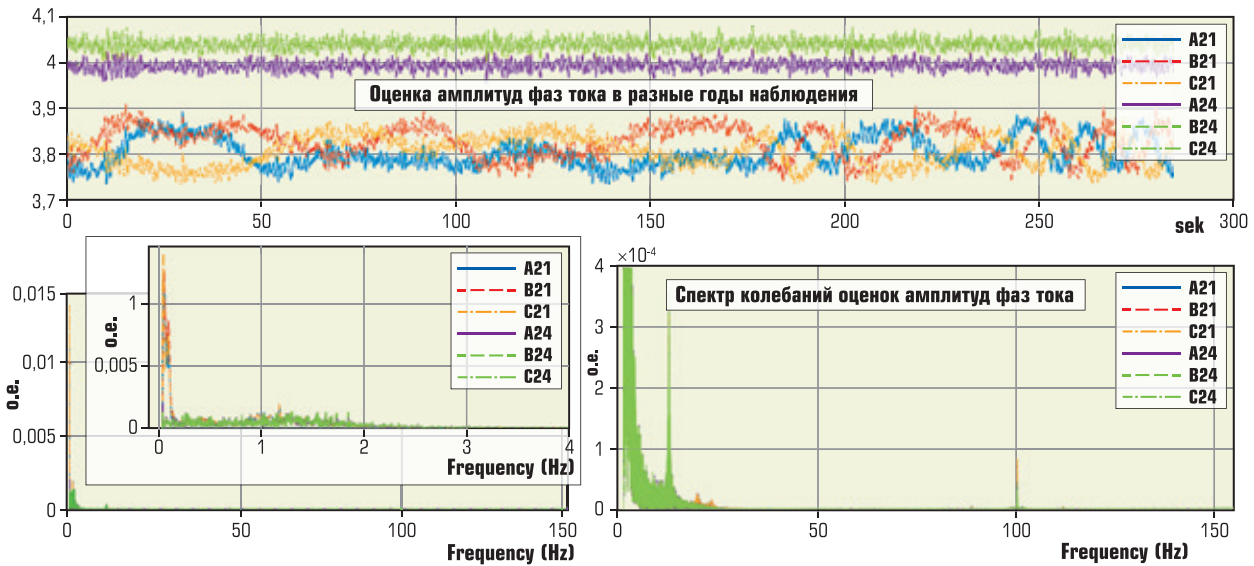


Рис. 16. Оценка амплитуд фазных токов и спектр их колебаний, 2021-2024 гг.

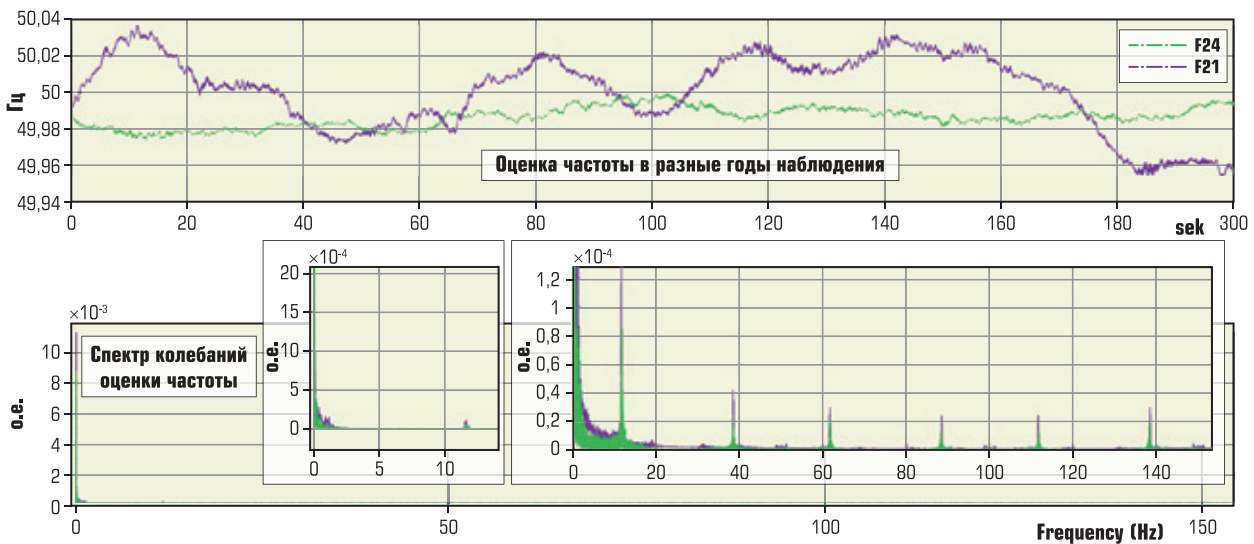


Рис. 17. Оценка частоты прямой последовательности напряжения и спектр ее колебаний, 2021-2024 гг.

3. Изменения спектрального состава колебаний режимных параметров для определения изменения характеристик интергармонических колебаний точнее и удобней вычислять при анализе характеристик векторов этих колебаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральный анализ характеристик векторов режимных параметров предоставляет простой способ выявления возможных механических повреждений генераторов на ранней стадии без применения специальных систем диагностики в режиме реального времени. Его использование позволяет определять появление и проводить прогнозирование развития различных дефектов генераторов и других электроэнергетических объектов [8-10].

Точность результатов оценки параметров интергармонических колебаний определяется высокой точностью измерения характеристик векторов режимных параметров энергосистемы, которые производятся различными измерительными устройствами, например, УСВИ и терминалами релейной защиты (хотя они имеют более низкую точность измерения), для которых определение спектров интергармонических колебаний может быть дополнительной опцией, работающей в реальном времени по заданному графику. Возможно увеличение точности расчета параметров субгармонических колебаний при усложнении алгоритма обработки сигналов.

### Список литературы

1. *Xu Y.H., Cao Y.P.* Research on mechanism of sub/sup-synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator // *Power System Technology*. 2018, vol. 42, No. 5, p. 1556-1564.
2. *Liu H.K., Xie X.R., He J.B.* et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017, vol. 32, No. 6, p. 47084720.
3. *Климова Т.Г., Ревякин В.А.* Субсинхронные и суперсинхронные колебания в электроэнергетической системе: возникновение, идентификация, обзор. *Энергетик*. 2022, № 5, с. 27-32.
4. *Казakov П.Н., Bagleybter O., Cebotari S., Barba R.* Диагностика торсионных колебаний генераторов на базе синхронизированных измерений. АО "РТСофт", GE Renewable Energy, Россия, Великобритания. Конференция РЗА-2021. Доклад, с. 4-4.
5. *Zhongming Ye, Bin Wu, Alireza Sadeghian.* Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition. *EEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 50, No. 6, december 2003.
6. *СТО 59012820.29.020.011-2016.* Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования. М., 2016.
7. *Климова Т.Г., Ревякин В.А.* Возможности применения устройств синхронизированных векторных измерителей в распределительных сетях // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2020, № 6, стр. 110-115.
8. *Dubravko Miljković.* Brief Review of Motor Current Signature Analysis, presented at HDKBR infnom, 15(2015), Croatia. April 29, 2015.
9. *Review A, Sudip Halder, Sunil Bhat, Daria Zychma, Pawel Snomwa.* Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis from Induction Motor – A Review. *Energies* 2022, 15, 8569. <https://doi.org/10.3390/en15228569>.
10. *Климова Т.Г., Казakov П.Н., Сизов А.С.* Дополнительные возможности диагностики генераторов на базе синхронизированных мгновенных измерений в системе СМПР. *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2024, № 3, с. 59-67.

*Национальный Исследовательский Университет "Московский энергетический институт", Москва:*

*Климова Татьяна Георгиевна – канд. техн. наук, доцент,*

*Ревякин Владимир Андреевич – аспирант.*

*АО "Искра Технологии", Москва:*

*Казakov Павел Николаевич – главный специалист,*

*Сизов Александр Сергеевич – начальник отдела технического развития.*