

Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации

КУЛИКОВ А.Л., ИЛЮШИН П.В., ПЕЛЕВИН П.С.

Проведен анализ особенностей электрических режимов энергорайонов с объектами распределенной генерации (РГ) в различных схемно-режимных условиях. Выявлены значительные отклонения показателей качества электрической энергии и кратковременные колебания параметров режима в широком динамическом диапазоне в условиях быстрых электромеханических переходных процессов. Приведены основные принципы формирования дискриминаторных методов и показана возможность их использования при оценке параметров режима при отклонении показателей качества электрической энергии и влиянии различных искажающих факторов. Представлены упрощенная и полная структурная схемы дискриминаторного измерителя частоты и напряжения, показаны их преимущества. Обосновано применение алгоритма Герцеля для минимизации вычислительных затрат при реализации дискретного преобразования Фурье. Приведены результаты исследований динамических характеристик дискриминаторного измерителя для оценки параметров режима применительно к задаче противоаварийного управления. Показано, что в жестких условиях для цифровой обработки сигналов при уровне помеховых составляющих до 15% амплитуды напряжения погрешности оценки частоты и амплитуды сигнала напряжения не превышают 2,5%. На основании результатов имитационного моделирования доказана эффективность применения дискриминаторных методов в цифровой обработке сигналов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: распределенная генерация, переходный процесс, оценка параметров режима, статистические методы, дискриминаторные методы, аварийный режим

В последнее десятилетие развитие распределенной генерации (РГ) в России происходило за счет ввода в эксплуатацию объектов РГ на базе газотурбинных (ГТУ), газопоршневых (ГПУ) и дизельных (ДГУ) генерирующих установок (ГУ), подключаемых к распределительным сетям и/или к сетям внутреннего электроснабжения промышленных предприятий. Технологическое присоединение объектов РГ мощностью от единиц до десятков мегаватт позволяет обеспечивать электроснабжение потребителей в месте ее производства на сравнительно небольшой территории, не загружая при этом распределительную сеть высокого напряжения транзитными потоками мощности [1].

Под объектом РГ понимается электростанция, состоящая из одной или нескольких ГУ, подключаемая к распределительным сетям или сетям внутреннего электроснабжения потребителей электроэнергии на напряжении до 110 кВ включительно, максимально приближенная к узлу(ам) электропотребления, работающая параллельно с электроэнергетической системой или в автономном, изолированном и островном режимах, имеющая в точке общего присоединения суммарную установленную мощность до 25 МВт и использующая для производства всех видов энергии (электрическая; тепловая; холодная и др.) любые первичные источники энергии, включая возобновляемые.

Необходимо отметить, что энергорайоны, в том числе с объектами РГ, нормально работающие в составе энергосистемы, могут оказаться выделенными на островной режим работы с некоторым количеством потребителей в случае возникновения аварийных отключений в ремонтных режимах работы сети. Под островным режимом подразумевается такой режим работы энергорайона с одной или несколькими электростанциями (объектами РГ) и нагрузкой, который допустим по всем условиям электроснабжения и электропотребления, образующийся в результате отключения линии(й) связи с энергосистемой (в результате короткого замыкания или без него) и существующий до момента его синхронизации с энергосистемой [2, 3].

Особенности электрических режимов в энергорайонах с объектами РГ обусловлены малыми значениями механических постоянных инерции ГУ, а также низкой скоростью набора нагрузки ГУ на базе двигателей внутреннего сгорания, что приводит к значительным отклонениям параметров режима при внешних возмущениях и в результате набросов и сбросов нагрузки по другим причинам. Динамическая устойчивость ГТУ со свободной силовой турбиной и ГПУ при многофазных КЗ нормативной длительности не сохраняется, что требует проведения дополнительного анализа возможности и допустимости ресинхронизации ГУ, последствий

вторичных нарушений устойчивости ГУ и нагрузки, а также оценки эффективности принятых мер по предотвращению асинхронных режимов. Параметры переходных процессов в энергорайонах с объектами РГ существенно зависят от параметров нагрузки, становясь общими вследствие сопоставимых суммарных мощностей генерации и нагрузки и малых взаимных сопротивлений [4, 5].

Следует отметить, что в автономном, изолированном и островном режимах работы энергорайонов с объектами РГ наблюдаются значительные отклонения показателей качества электрической энергии и кратковременные колебания параметров режима в широком динамическом диапазоне в условиях быстрых электромеханических переходных процессов. Это обусловлено нелинейной и изменяющейся нагрузкой, применением электротехнического оборудования с элементами силовой электроники, а также стохастической выработкой электроэнергии ГУ на базе возобновляемых источников энергии.

В указанных условиях для обеспечения корректной работы цифровых устройств релейной защиты, автоматики энергосистем, телемеханики, синхронизированных векторных измерений и других требуется обеспечение быстродействия оценки параметров при достаточной их точности. Поэтому можно рассматривать значения частоты, напряжения и тока, которые используются в цифровых устройствах как случайные величины.

В статье приведены результаты исследования возможностей, разработки схемных решений и анализ характеристик оценки параметров режима энергорайонов с объектами РГ для их последующего использования в измерительных органах устройств защиты и автоматики.

Принципы формирования дискриминаторных методов оценки параметров. Из теории вероятностей известно [6], что совокупность случайных величин характеризуется совместной плотностью распределения. Можно ввести доопытную (или априорную) плотность распределения $p(\alpha)$, α – конечное число оцениваемых параметров), которая несет информацию относительно α до того, как принята дискретная реализация тока или напряжения \bar{y} . После получения реализации \bar{y} сведения о показателе α безусловно изменятся. Формально они содержатся в послеопытной (апостериорной) плотности распределения $p(\alpha|\bar{y})$. Таким образом, в статистическом смысле в $p(\alpha|\bar{y})$ заключена вся информация о числе α , которую можно получить в ходе наблюдения реализации \bar{y} .

Для определения послеопытной плотности распределения $p(\alpha|\bar{y})$ в статистике часто используют метод обратной вероятности, базирующийся на формуле Байеса:

$$p(\alpha|\bar{y})p(\bar{y}) = p(\alpha)p(\bar{y}|\alpha). \quad (1)$$

Все входящие в (1) функции – соответствующие условные и безусловные плотности распределения. Для заданного \bar{y} плотность $p(\bar{y})$ является числом и может рассматриваться как некоторый коэффициент пропорциональности. Тогда выражение (1) можно привести к следующему виду:

$$p(\alpha|\bar{y}) = kp(\alpha)p(\bar{y}|\alpha), \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности (константа); $p(\alpha)$ – доопытная плотность распределения параметров α ; $p(\bar{y}|\alpha)$ – плотность распределения дискретных значений \bar{y} при фиксированном α .

Относительно α зависимость $p(\bar{y}|\alpha)$ не может интерпретироваться как плотность вероятности, так как является обычной функцией. Чтобы подчеркнуть это, ее называют функцией правдоподобия.

Для выражения (2) целесообразно дать следующие пояснения. В доопытной плотности распределения $p(\alpha)$ содержатся сведения об α , которыми располагают до получения реализации \bar{y} . Функция правдоподобия $p(\bar{y}|\alpha)$ несет информацию, содержащуюся в текущем колебании \bar{y} . Послеопытная плотность распределения $p(\alpha|\bar{y})$ включает в себя все, что известно об α в статистическом смысле.

В практических задачах [например, 7, 8] при отыскании алгоритмов обработки удобнее использовать не функцию правдоподобия $p(\alpha|\bar{y})$, а отношение правдоподобия

$$l(\alpha) = p(\bar{y}|\alpha) / p_n(\bar{y}), \quad (3)$$

где $p_n(\bar{y})$ – условная плотность распределения дискретных значений искажающего (помехового) сигнала.

Поскольку обработке подлежит конкретная реализация \bar{y} , то $p_n(\bar{y})$ будет числом (константой), а выражение (2) представим в виде

$$p(\alpha|\bar{y}) = kp(\alpha)l(\alpha), \quad (4)$$

где k – новый коэффициент пропорциональности.

Из выражения (4) следует, что обработка принятого колебания тока (напряжения) должна быть связана с вычислением отношения правдоподобия $l(\alpha)$. При условии, что априорное распределение $p(\alpha)$ достаточно «широкое», то отношение правдоподобия $l(\alpha)$ практически совпадает с послеопытной плотностью вероятности $p(\alpha|\bar{y})$. Вычисление отношения правдоподобия часто связывают с текущим измерением, позволяющим получить оценки параметров и определить ошибки измерения по одной конкретной реализации \bar{y} без учета априорных данных.

Текущие оценки параметров токов и напряжений находятся по максимуму отношения правдопо-

добия. В окрестности этого максимума отношение правдоподобия аппроксимируем гауссовым многомерным законом распределения:

$$l(\alpha) = m \exp \left[-\frac{1}{2} (\alpha - \hat{\alpha})^T C_y (\alpha - \hat{\alpha}) \right], \quad (5)$$

где m – постоянный коэффициент; C – матрица точности текущего измерения параметров, элементы которой определяются соотношением [6]:

$$c_{y_i, j} = (\partial^2 / \partial \alpha_i \partial \alpha_j) \ln l(\alpha). \quad (6)$$

Получим послеопытную плотность вероятности, если $p(\alpha)$ и $l(\alpha)$ допускают аппроксимацию гауссовыми кривыми. При этом обозначим вектор средних значений априорного распределения $\hat{\alpha}_0$, а матрицу точности – C_0 . Для отношения правдоподобия введем соответствующие обозначения – $\hat{\alpha}_y$ и C_y . Тогда $p(\alpha | \bar{y})$ будет характеризоваться нормальным распределением, для которого вектор α назовем результирующей оценкой, а C – результирующей матрицей точности.

Логарифмируя (4) и учитывая нормальные распределения, получим:

$$-\frac{1}{2} (\alpha - \hat{\alpha})^T C (\alpha - \hat{\alpha}) = -\frac{1}{2} (\alpha - \hat{\alpha})^T C_0 (\alpha - \hat{\alpha}) - \frac{1}{2} (\alpha - \hat{\alpha}_y)^T C_y (\alpha - \hat{\alpha}_y) + \text{const}. \quad (7)$$

Сократим обе части равенства (7) на $-1/2$ и раскроем скобки слева и справа с группировкой членов, содержащих α во второй и первой степени:

$$\alpha^T C \alpha - 2 \alpha^T C \hat{\alpha} + \hat{\alpha}^T C \hat{\alpha} = \alpha^T (C_0 + C_y) \alpha - 2 \alpha^T (C_0 \hat{\alpha}_0 + C_y \hat{\alpha}_y) + \hat{\alpha}_0^T C_0 \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_y^T C_y \hat{\alpha}_y + \text{const}. \quad (8)$$

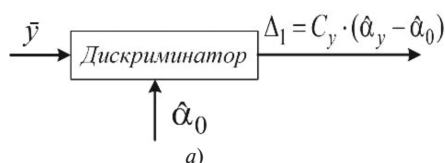
Отметим, что в выражении (8) учтено, что матрицы точности симметричны, поэтому для билинейных форм справедливо равенство $\alpha^T C \hat{\alpha} = \hat{\alpha}^T C \alpha$.

Сопоставим квадратичные и линейные формы относительно α и найдем:

$$C = C_0 + C_y; \quad (9)$$

$$C \hat{\alpha} = C_0 \hat{\alpha}_0 + C_y \hat{\alpha}_y. \quad (10)$$

Умножим слева обе части последнего равенства на C^{-1} :



$$\hat{\alpha} = C^{-1} C_0 \hat{\alpha}_0 + C^{-1} C_y \hat{\alpha}_y. \quad (11)$$

Подставляя $C_0 = C - C_y$ из выражения (9), окончательно получим [7, 9, 10]:

$$\hat{\alpha} = \hat{\alpha}_0 + C^{-1} C_y (\hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0). \quad (12)$$

Таким образом, выражения (9) и (12) позволяют находить характеристики результирующего распределения по известным $p(\alpha)$ и $l(\alpha)$.

Для скалярного параметра эти выражения приобретают вид:

$$1/\sigma^2 = 1/\sigma_0^2 + 1/\sigma_y^2;$$

$$\hat{\alpha} = \hat{\alpha}_0 + (\hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0) \sigma^2 / \sigma_y^2,$$

где σ^2 , σ_0^2 , σ_y^2 – дисперсии соответствующих одномерных гауссовых распределений в (4).

Устройства дискриминаторов, приведенных на рис. 1, вычисляющих невязку

$$\Delta_2 = \hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0, \quad (13)$$

либо пропорциональную ей величину

$$\Delta_1 = C_y (\hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0), \quad (14)$$

называют соответственно дискриминаторами второго и первого рода [например, 7, 8]. Разность (13) называют также величиной рассогласования или сигналом ошибки.

Для функционирования дискриминаторной схемы необходимо иметь априорное значение параметра α , близкое к истинному значению. Это значение α можно получить, реализуя предварительные оценки параметра ($\hat{\alpha}_0$) с применением последовательных или параллельных измерителей. Причем оценка параметра должна осуществляться в пределах области возможных значений параметра $\alpha_{\min}, \dots, \alpha_{\max}$ и предполагать при последовательном поиске перестраиваемую схему в пределах заданного диапазона. Отметим, что последовательный поиск требует большее время для оценки параметра, однако он проще с точки зрения технической реализации. Он не может быть рекомендован для измерения параметров токов и напряжений при наличии быстрых переходных процессов в энергообъектах с объектами РГ.

При реализации схемного решения дискриминатора с выходным эффектом, например $\Delta = \hat{\alpha}_y - \hat{\alpha}_0$, а

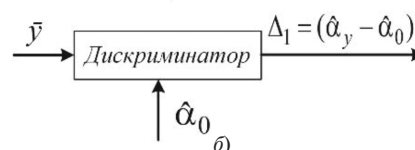


Рис. 1. Структурные схемы дискриминаторов первого (а) и второго (б) родов

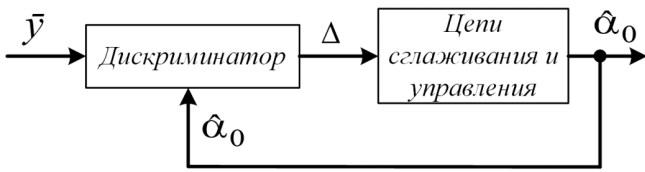


Рис. 2. Структурная схема следящего измерителя

также цепями сглаживания и обратной связью, как показано на рис. 2, приходим к схеме следящего измерителя, например [7, 9], предполагающего подачу управляющего воздействия в виде опорного параметра $\hat{\alpha}_0$.

Важно отметить, что при поиске оценки $\hat{\alpha}$ предполагается неизменность параметра на интервале наблюдения (временном «окне» анализа). При несоблюдении этого условия и соответствующем изменении параметра во времени измеритель (рис. 2) будет следить за изменением параметра и уменьшать ошибку рассогласования Δ . В этом случае изменяется опорное значение $\hat{\alpha}_0$, из которого можно получить требуемую оценку параметра в текущий момент времени. Реализация цепей сглаживания в схемном решении (рис. 2) может быть выполнена на основе различных подходов [7]. Целесообразно использовать сглаживание с применением процедуры минимизации среднего квадрата ошибки.

Следящие системы измерения реализуются и более строгим методом с учетом полного процесса оптимизации измерения, например [7]. При этом задается модель случайного изменения параметра, а затем выполняется оптимизационная процедура в соответствии с теорией оценивания случайных процессов, например [11]. Однако модельные подходы к оценке параметров режима в энергорайонах с объектами РГ затруднительны из-за множественности и высокой скорости их изменения в быстрых переходных процессах.

Вариант схемного решения измерителя параметров аварийного режима. Рассмотрим вариант реализации цифрового частотного дискриминатора с амплитудным детектированием для оценки частоты и

амплитуды напряжения переходного процесса. Одновременное измерение амплитуды и частоты напряжения в условиях быстрых переходных процессов является актуальной задачей для энергорайонов с объектами РГ. Пример структурной схемы дискриминаторного измерителя частоты и напряжения приведен на рис. 3.

Такой измеритель предполагает непрерывное оценивание и подстройку частоты напряжения. Постройка частоты реализуется с помощью цифрового генератора разностной частоты, на вход которого поступает разностный сигнал с выхода устройства вычитания дискриминатора. Функционирование генератора разностной частоты осуществляется в соответствии с дискриминаторной характеристикой, приведенной на рис. 4, отражающей зависимость рассогласования Δ от частоты сигнала напряжения на входе дискриминатора, осуществляя перенос входного дискретного сигнала напряжения $U \exp[2\pi f n t_d + \varphi(n t_d)]$ на частоту $f_0 = 50$ Гц.

Дополнительно в состав дискриминаторного измерителя (рис. 3) входят: два фильтра, выполненные с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и отстроенные по частоте от гармоники $f_0 = 50$ Гц на значение соответственно $+\Delta\alpha/2$ и $-\Delta\alpha/2$, где $\Delta\alpha$ – диапазон однозначного измерения частоты (рис. 4); цифровые амплитудные детекторы, выполненные, например, по схеме [9, 12, 13]; устройство вычитания. Совокупность цифровых фильтров с применением ДПФ и цифровых детекторов обеспечивает реализацию амплитудно-частотных характеристик (рис. 4,а) каналов обработки сигналов, а за счет применения устройства вычитания формируется дискриминаторная характеристика (рис. 4,б). Отметим, что текущее значение частоты определяется сигналом рассогласования дискриминаторной характеристики относительно частоты $f_0 = 50$ Гц.

Отдельный канал обработки сигнала на частоте $f_0 = 50$ Гц предназначен для оценки амплитуды напряжения. Следует отметить, что в принципе можно обойтись без такого специально выделенного канала, обеспечивая суммирование сигналов на

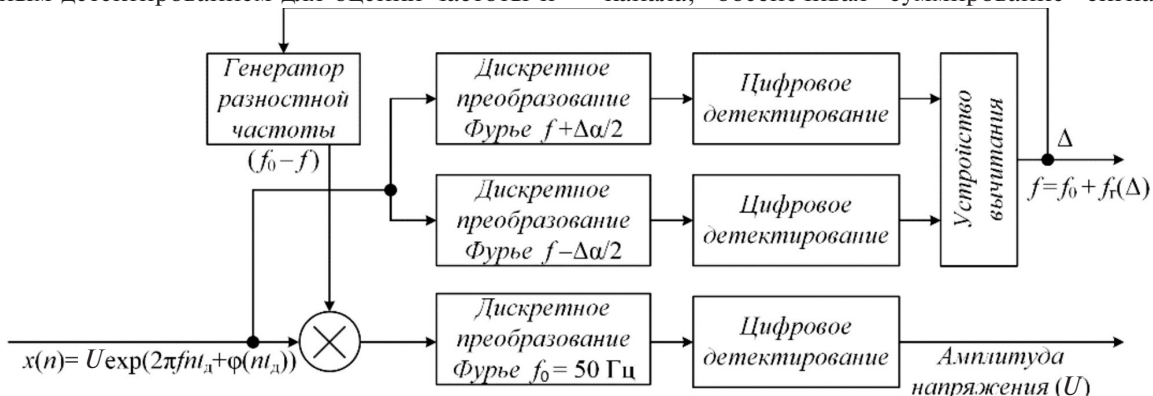


Рис. 3. Структурная схема дискриминаторного измерителя частоты и напряжения

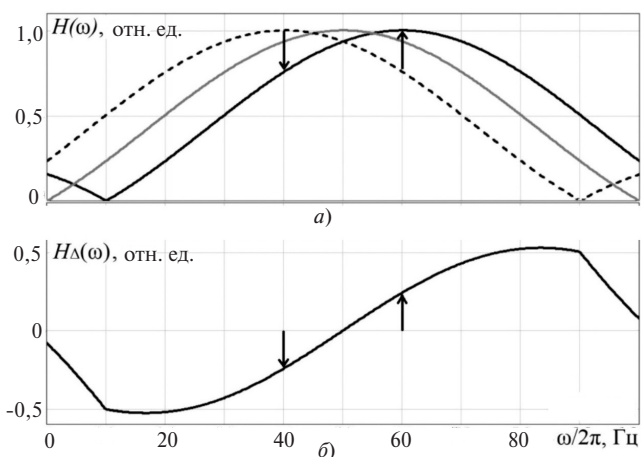


Рис. 4. Пояснения к принципу формирования дискриминаторной характеристики

выходах цифровых фильтров дискриминатора, однако оценка амплитуды напряжения с использованием такого суммирования потребует непрерывной калибровки измерителя при изменениях частоты входного сигнала напряжения.

Вместо устройства вычитания, как показано на рис. 3, возможны технические решения дискриминатора на основе отношения амплитуд напряжения на выходе каналов обработки, которые рассматриваются далее.

Оценка параметров аварийного режима с применением дискриминаторных методов. Пусть окно данных ДПФ на основной частоте содержит $N_0 = 80$ отсчетов сигнала, тогда время дискретизации составит $t_d = T_0 / N_0 = 0,02c / 80 = 250$ мкс. Выбранное время дискретизации считаем постоянной величиной, определяющей параметры аналого-цифрового преобразования (АЦП). Все остальные параметры цифровых фильтров ДПФ определяются относительно выбранного t_d .

При формировании дискриминаторной характеристики важно, чтобы она была линейной в заданном диапазоне частот и симметричной относительно точки, соответствующей основной частоте 50 Гц. В этом случае имеет место линейная зависимость выходного сигнала дискриминатора (Δ) от измеряемой величины (рис. 4).

В общем случае для построения ДПФ фильтра на определенной частоте (f') при заданном t_d необходимо в качестве длины окна данных (N) выбрать ближайшее целое число к расчетному значению $N' = (f_0 / f') N_0$ [12, 14, 15]. Так, при $f' = 60$ Гц $N' = (50/60) \cdot 80 \approx 67$, при $f' = 40$ Гц $N' = (50/40) \cdot 80 \approx 100$. Следует отметить, что при заданных параметрах АЦП для ДПФ фильтров разных частот изменяются число коэффициентов в импульсной характеристике, их значение и значение ошибок фильтрации [12–19]. Дополнительно изменяется ширина основного «лепестка» ампли-

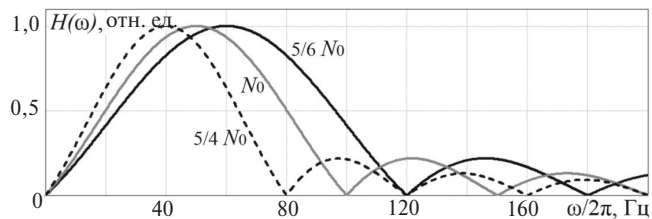


Рис. 5. АЧХ фильтров Фурье при изменении длины окна данных (N)

тудно-частотной характеристики ДПФ фильтра (рис. 5), а дискриминаторная характеристика при этом становится как нелинейной, так и несимметричной.

Отметим, что фильтрацию на требуемой частоте можно осуществить, взяв за основу ДПФ на $f_0 = 50$ Гц. При этом выполняется предварительное преобразование входного сигнала частоты (f') со «сдвигом» его спектра в частотной области на $\Delta f = (f' - f_0)$.

Пусть сигналу $x(t)$ соответствует изображение в частотной области $X(j\omega) \leftrightarrow x(t)$, введем новую переменную $\omega'' = \omega - \Delta\omega$. Используя свойство смещения частотного представления [13, 16], можно записать:

$$X''(j\omega'') = X(j\omega - j\Delta\omega) \leftrightarrow \exp(j\Delta\omega t)x(t). \quad (15)$$

Запишем функцию свертки сигнала $\exp(j\Delta\omega t)x(t)$ с коэффициентами фильтра Фурье на основной частоте в дискретном виде. Также учтем, что $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, $i = nt_d = n(N_0 / f_0)^{-1}$, тогда

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(e^{j\frac{2\pi}{Nf_0}(f'-f_0)(n-k)} x(n-k) \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \right). \quad (16)$$

Раскрывая скобки в выражении (16), имеем:

$$X_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \left(e^{j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)n} x(n-k) \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)k} e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \right). \quad (17)$$

Группируя множители под знаком суммы, получим соотношение:

$$X_1(n) = e^{j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)n} \sum_{k=0}^{N-1} \left(x(n-k) \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)k} \right). \quad (18)$$

Таким образом, выходной эффект фильтра, соответствующего (18) и частоте f' , будет определяться новыми коэффициентами импульсной характеристики $\left(\frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)k} \right); k=0, 1, \dots, N-1$, а

также экспоненциальным «поворотным» множителем

$$e^{j\frac{2\pi}{N}(\frac{f'}{f_0}-1)n}$$

Важно отметить, что этот экспоненциальный «поворотный» множитель приводит к трансформации временного масштаба окна данных для ДПФ на частоте f' . В то же время, поскольку модуль $X_1(n)$ в (18) численно равен модулю выражения под знаком суммы и не зависит от «поворотного» множителя, то при определении АЧХ фильтра последний может быть исключен.

Соответственно при ДПФ на разных частотах f' для дискриминаторной схемы «поворотные» множители также могут быть исключены. Такое упрощение приводит к общему выражению ДПФ на частоте $f' = f_0 h'$ в виде

$$X_h(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x(n-k) e^{-j\frac{2\pi}{N}kh'}), \quad (19)$$

где h' – коэффициент кратности частоты f' по отношению к основной частоте.

Таким образом (19) имеет вид, соответствующий общему выражению ДПФ, однако коэффициент h' не ограничен целочисленными значениями в отличие от стандартного ДПФ.

Для частоты $f' = 60$ и 40 Гц значения коэффициентов h' в выражении (19) составят соответственно 1,2 и 0,8. Амплитудно-частотные характеристики ДПФ фильтров указанных частот приведены на рис. 6. Анализ рис. 6 свидетельствует об идентичности частотных характеристик на частотах 40, 50 и 60 Гц.

Можно предложить несколько вариантов формирования дискриминаторной характеристики. Например, разностную характеристику можно получить путем разности протектированных сигналов на выходах фильтров для разных частот (например, 60 и 40 Гц):

$$H_{\Delta}(\omega) = H_{60}(\omega) - H_{40}(\omega). \quad (20)$$

Дискриминаторная характеристика, соответствующая выражению (20), приведена на рис. 7. Непосредственно характеристику рис. 7 использовать в качестве дискриминаторной затруднительно, поскольку при изменении амплитуды входного сигнала

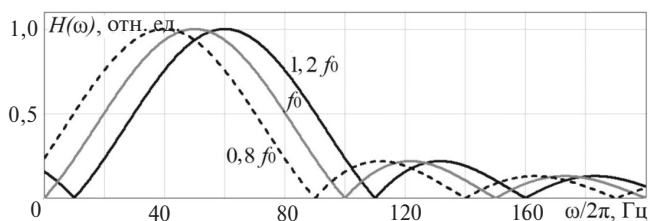


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика фильтров Фурье при различных значениях коэффициента h' в (19)

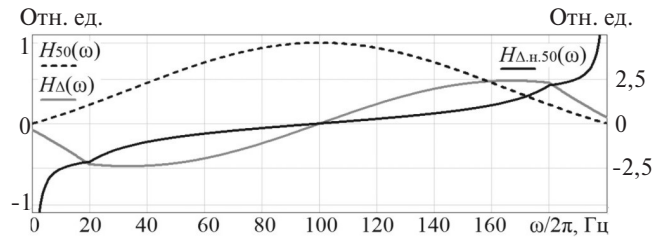


Рис. 7. Разностная дискриминаторная характеристика

ла напряжения (рис. 3) пропорционально изменится разность выходных сигналов цифровых фильтров. Таким образом, необходимо нормировать разностную характеристику (рис. 7) в соответствии с амплитудой напряжения. В качестве вариантов возможно нормирование по амплитуде выходного сигнала ДПФ на частоте 50 Гц, или по амплитуде выходного сигнала ДПФ одного из фильтров, используемых для вычисления разности (20). В первом случае выражение для определения дискриминаторной характеристики принимает вид:

$$H_{\Delta h 50}(\omega) = (H_{60}(\omega) - H_{40}(\omega)) / H_{50}(\omega). \quad (21)$$

Заметим, что в рассмотренном варианте к общей погрешности дискриминаторной схемы добавляется погрешность ДПФ на частоте 50 Гц.

При альтернативном подходе нормирование осуществляется по амплитуде результатов ДПФ одного из фильтров с АЧХ $H_{60}(\omega)$ или $H_{40}(\omega)$. В этом случае дискриминаторная характеристика соответствует отношению частотных характеристик фильтров и определяется равенствами:

$$H_{\delta 1}(\omega) = (H_{60}(\omega) - H_{40}(\omega)) / H_{40}(\omega) = \frac{H_{60}(\omega)}{H_{40}(\omega)} - 1; \quad (22)$$

$$H_{\delta 2}(\omega) = (H_{40}(\omega) - H_{60}(\omega)) / H_{60}(\omega) = \frac{H_{40}(\omega)}{H_{60}(\omega)} - 1. \quad (23)$$

Дискриминаторные характеристики, соответствующие выражениям (22) и (23), показаны на рис. 8. Как видно из рис. 8, характеристики $H_{\delta 1}(\omega)$ и $H_{\delta 2}(\omega)$ несимметричны относительно основной частоты. Устранить этот недостаток и добиться симметричности позволяет вычисление разности $H_{\delta 1}(\omega)$ и $H_{\delta 2}(\omega)$ согласно

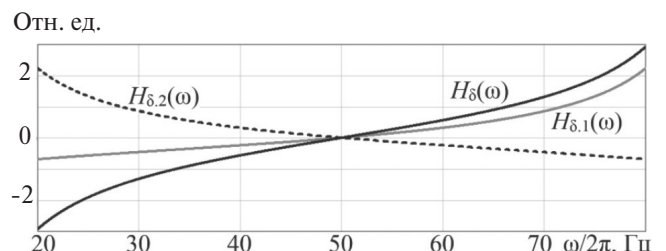


Рис. 8. Улучшенная дискриминаторная характеристика

$$H_{\delta}(\omega) = H_{\delta 1}(\omega) - H_{\delta 2}(\omega) = \frac{H_{60}(\omega)}{H_{40}(\omega)} - \frac{H_{40}(\omega)}{H_{60}(\omega)}. \quad (24)$$

Для улучшенной дискриминаторной характеристики (рис. 8) свойственны симметричность относительно основной частоты, а также линейность в широком диапазоне частот, что особенно важно для решаемой задачи.

Для практического примера конкретизируем техническое исполнение схемного решения (рис. 3). А для минимизации вычислительных затрат при реализации ДПФ воспользуемся алгоритмом Герцеля [17, 18].

Дискретное N -точечное преобразование Фурье сигнала $x(n)$ запишем в виде функции свертки:

$$X_h(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (x(n-k)e^{-j\frac{2\pi}{N}kh}). \quad (25)$$

Раскроем сумму из (25):

$$X_h(n) = \frac{2}{N} (x(n)e^0 + x(n-1)e^{-j\frac{2\pi}{N}h} + \dots + x(n-N+1)e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)h}), \quad (26)$$

затем преобразуем (26) к виду:

$$X_h(n) = \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}h} (x(n)e^{j\frac{2\pi}{N}h} + x(n-1)e^0 + \dots + x(n-N+1)e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-2)h} + x(n-N)e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)h} - x(n-N)e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)h}) \quad (27)$$

или

$$X_h(n) = \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi}{N}h} (x(n)e^{j\frac{2\pi}{N}h} - x(n-N)e^{-j\frac{2\pi}{N}(N-1)h} + \frac{N}{2} X_h(n-1)) = \frac{2}{N} (x(n) - x(n-N))e^{-j2\pi h} + X_h(n-1)e^{-j\frac{2\pi}{N}h}. \quad (28)$$

Выражение (28) соответствует ДПФ, настроенному на частоту hf_0 . При целочисленных h коэффициент $\exp(-j2\pi h)$ равен единице, тогда для дискретного фильтра частоты $f_0 = 50$ Гц выражение (28) принимает упрощенную форму:

$$X_1(n) = \frac{2}{N} (x(n) - x(n-N)) + X_h(n-1)e^{-j\frac{2\pi}{N}}. \quad (29)$$

При значении коэффициента $h=1,2$ дискретный фильтр Фурье соответствует частоте $f=60$ Гц, а (28) принимает вид:

$$X_{1,2}(n) = \frac{2}{N} (x(n) - x(n-N))e^{-j2\pi 1,2} + X_{1,2}(n-1)e^{-j\frac{2\pi}{N}1,2}. \quad (30)$$

Указанная последовательность рассуждений приводит к общей схеме рекурсивной реализации ДПФ (см. рис. 9), где обозначение Z^{-1} , Z^{-N} соответствует задержке на один и N дискретных отсчетов входного сигнала напряжения.

Отметим, что применение алгоритма Герцеля при реализации ДПФ (рис. 9) существенно сокращает вычислительные затраты, которые практически не зависят от длины «окна данных» сигнала N [17, 18].

Для нормального функционирования дискриминаторной схемы недостаточно только применения требуемых фильтров ДПФ. Поскольку окно данных фильтра рассчитывается, допустив равенство частоты сигнала частоте $f_0 = 50$ Гц, то при отклонениях частоты сигнала в установившемся режиме от значения $(2(Nt_d)^{-1} - f')$ на выходе ДПФ фильтров возникают осцилляции амплитуды выходных сигналов, например [19].

На рис. 10 показаны изменения частоты тестового сигнала напряжения во времени, при этом амплитуда сигнала считалась неизменной и составляла 100 В.

Анализ рис. 10 показывает, что частота колебаний амплитуды сигнала напряжения на выходе ДПФ фильтров пропорциональна частоте входного сигнала. Целесообразно сглаживать значения амплитуды напряжения после реализации ДПФ, выделив постоянную составляющую на выходе фильтра. Сглаживание выполняется путем интегрирования мгновенных значений амплитуды напряжения:

$$X_{0h'}(n) = \frac{1}{N''} \sum_{k=0}^{N''-1} X_{h'}(n-k), \quad (31)$$

где N'' — длина окна данных фильтра сглаживания, которую целесообразно изменять в зависимости от

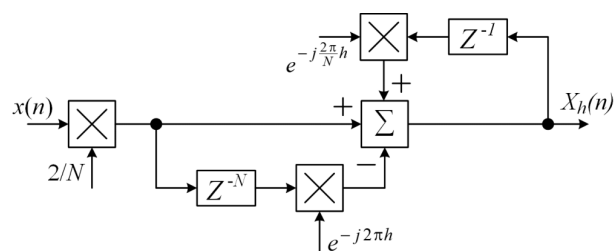


Рис. 9. Реализация ДПФ с применением алгоритма Герцеля

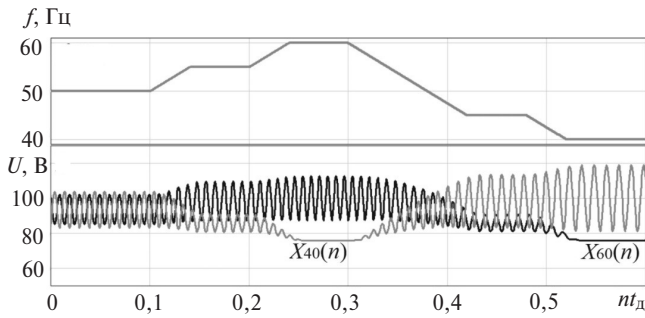


Рис. 10. Влияние частоты сигнала напряжения на искажения амплитуды на выходе ДПФ фильтра

текущей частоты f'' входного сигнала напряжения в соответствии с равенством

$$N'' = N_0 \frac{f_0}{f''} \quad (32)$$

Для точной оценки амплитуды напряжения $X''_{0h'}$ следует ввести корректировку сглаженного сигнала на выходе ДПФ фильтра ($X_{0h'}$). Корректировка осуществляется на основе значений АЧХ фильтра $H_{h'}(f'')$ и в соответствии с его h' коэффициентом (см. (19)):

$$X''_{0h'}(n) = X_{0h'}(n) (H_{h'}(f''))^{-1} \quad (33)$$

С учетом изложенных особенностей цифровой обработки сигналов структурная схема устройства, реализующего дискриминаторный метод оценки частоты и амплитуды напряжения, принимает вид, представленный на рис. 11. Выражения (21) и (24) используются для формирования дискриминатор-

ной характеристики устройства. На рис. 11 штриховыми линиями выделены отдельные блоки схемы, пунктирными – альтернативные цепи схемы.

Исследования динамических характеристик методов оценки параметров режима в энергорайонах с объектами РГ проводились применительно к задаче противоаварийного управления. Анализировались переходные процессы при отключении части генераторов в изолированном энергорайоне без КЗ (рис. 12) и с КЗ в основной сети (рис. 13). При этом провал напряжения в течение КЗ приводил к значительным изменениям характера переходного процесса в зависимости от состава нагрузки и параметров ГУ (использовались разные типы ГУ) [20–22]. Примеры переходных процессов, характеризующих указанные выше режимы и полученные по результатам имитационного моделирования, приведены на рис. 12 и 13. Моделирование проводилось в программном комплексе «Мустанг». С использованием осциллограмм (рис. 12 и 13) в дальнейшем оцениваются характеристики цифровой обработки сигналов напряжения на основе дискриминаторных методов.

Проводилось имитационное моделирование, целью которого являлось определение погрешностей оценки параметров напряжения в соответствии со схемой устройства (рис. 11). Моделирование реализовалось в программном комплексе «Mathcad». Для исследований также использовался тестовый сигнал напряжения с постоянной амплитудой 100 В, а частота изменялась во времени в соответствии с рис. 10.

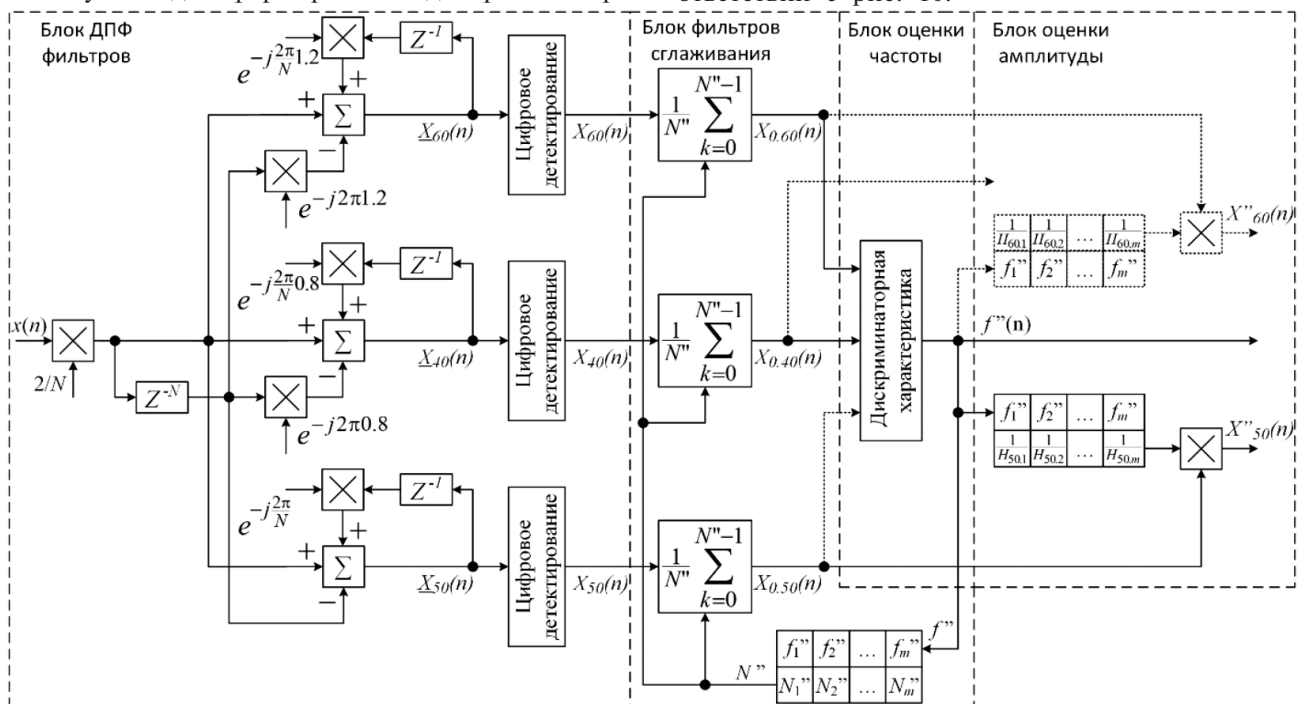


Рис. 11. Структурная схема устройства, поясняющая применение предлагаемого метода оценки частоты и амплитуды сигнала напряжения

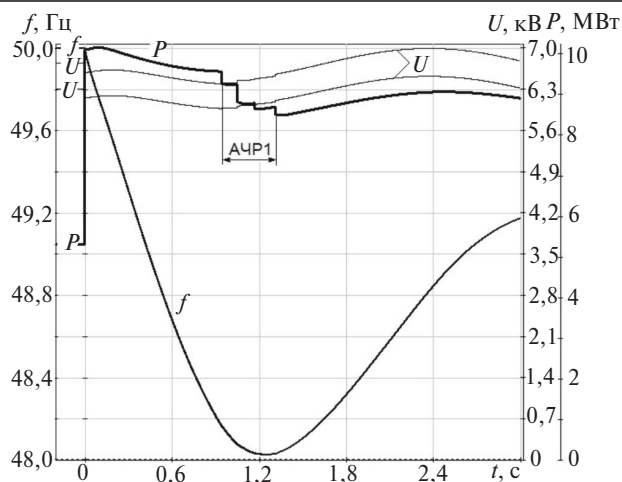


Рис. 12. Переходный процесс при отключении одного из двух работающих в энергорайоне турбогенераторов: U – напряжения на шинах ГУ и шинах электроприемников; P – выдаваемая ГУ активная мощность; f – частота в энергорайоне; АЧР1 – подсистема автоматической частотной разгрузки

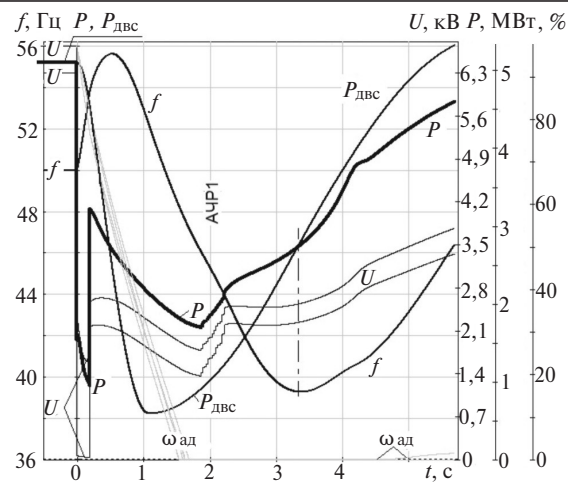


Рис. 13. Переходный процесс при отключении трех из шести работающих в энергорайоне газопоршневых ГУ в результате трехфазного КЗ: $P_{двс}$ – мощность на валу двигателя внутреннего сгорания ГПУ; $\omega_{ад}$ – угловая скорость групп асинхронных двигателей

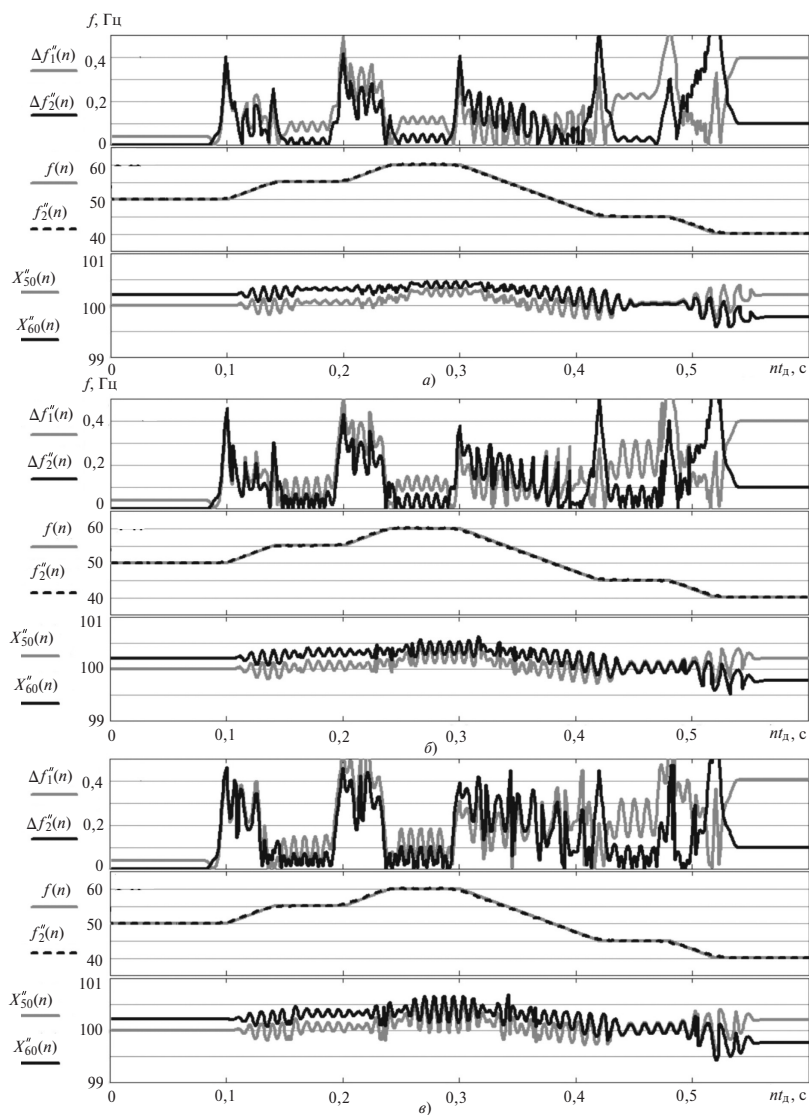


Рис. 14. К оценке точности измерения частоты и амплитуды напряжения дискриминаторным методом: $a - t_d = 0,25$ мс; $б - 0,5$ мс; $в - 1$ мс

На рис. 14 приведены измеряемые дискриминаторным методом (рис. 11) амплитуда и частота сигнала напряжения, а также ошибки оценки частоты. На рис. 14 приняты следующие обозначения: $\Delta f_1''(n)$ и $\Delta f_2''(n)$ – погрешности оценки частоты, характерные для различных вариантов дискриминаторной характеристики (выражения (21) и (24) соответственно); $f_2''(n)$ – расчетная частота при дискриминаторной характеристике (24); $f(n)$ – текущее (модельное) значение частоты сигнала напряжения; X_{50}'' , X_{60}'' – откорректированные значения амплитуды напряжения на выходах ДПФ фильтров соответствующих частот. Поскольку применение ДПФ фильтров приводит к некоторой задержке требуемого значения амплитуды напряжения, то для оценки погрешности на рисунках совмещены во времени кривые расчетной и текущей частоты.

Анализ рис. 14 позволяет сделать следующие выводы:

погрешность оценки частоты при использовании дискриминаторной характеристики (21) в целом больше, чем применение ее варианта (24). Поэтому для построения измерительных органов уст-

ройств противоаварийного управления в энерго-районах с объектами РГ целесообразно использовать вариант дискриминаторной характеристики, соответствующий выражению (24);

дискриминаторные методы оценки параметров режима обладают высокими динамическими характеристиками. Так, в установившемся режиме для диапазона 40–60 Гц погрешность измерения частоты сигнала напряжения не превышает 0,1 Гц. При значительных изменениях частоты сигнала напряжения во времени погрешность ее оценки возрастает. Однако и в этом случае высокие динамические характеристики дискриминаторных методов сохраняются. Так, при скорости изменения частоты 2,5 Гц (5%) за период промышленной частоты погрешность не превысила 0,5 Гц;

погрешность оценки амплитуды напряжения на выходах ДПФ фильтров не превышает 1%. При измерениях амплитуды напряжения для схемы (рис. 11) целесообразно применение ДПФ фильтрации на частоте 50 Гц в качестве основного канала цифровой обработки сигналов с ошибками не более 0,5%;

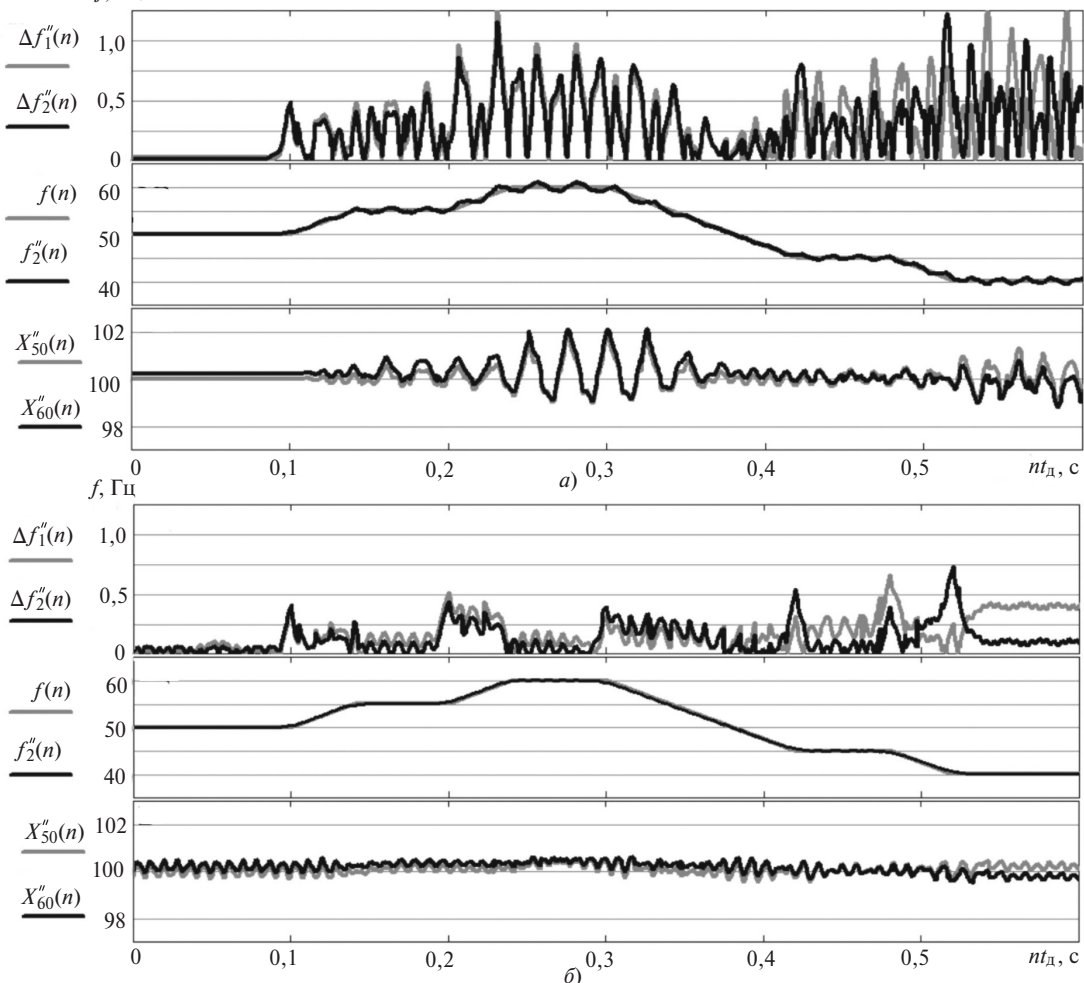


Рис. 15. К оценке точности измерения частоты и амплитуды напряжения дискриминаторным методом ($t_d = 0,5$ мс): а – при добавлении 2-й гармоники; б – то же некратной гармоники 170 Гц

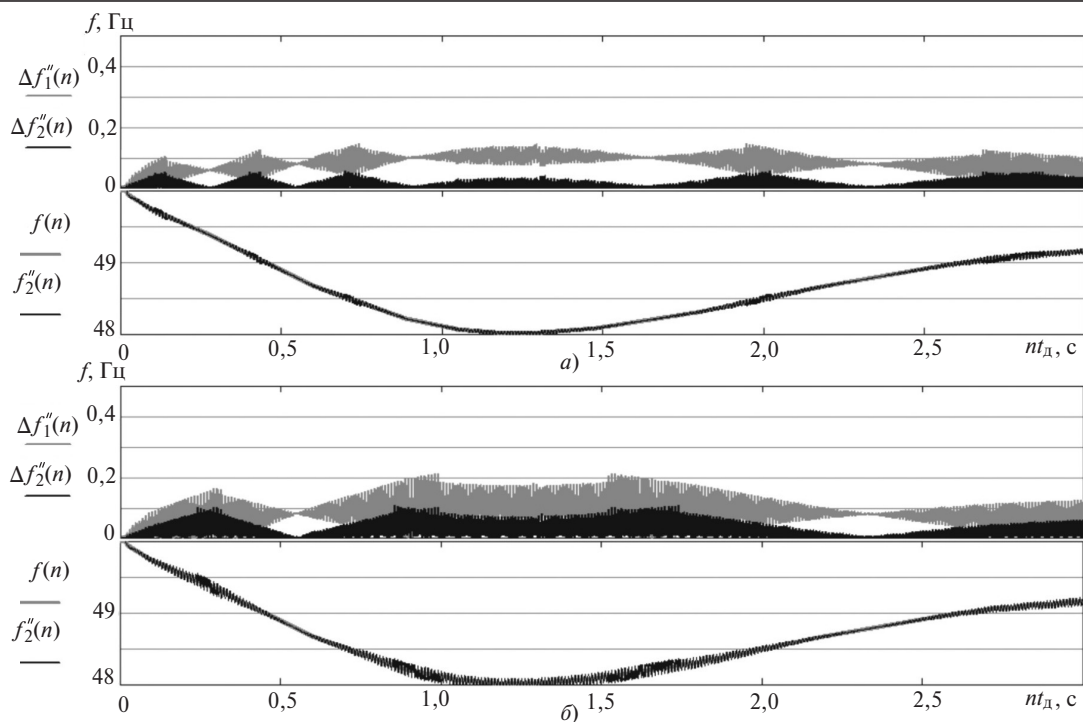


Рис. 16. Оценки погрешности и зависимости изменений расчетного и текущего значений частоты напряжения при реализации дискриминаторного метода: а – $t_d = 0,25$ мс; б – $0,50$ мс

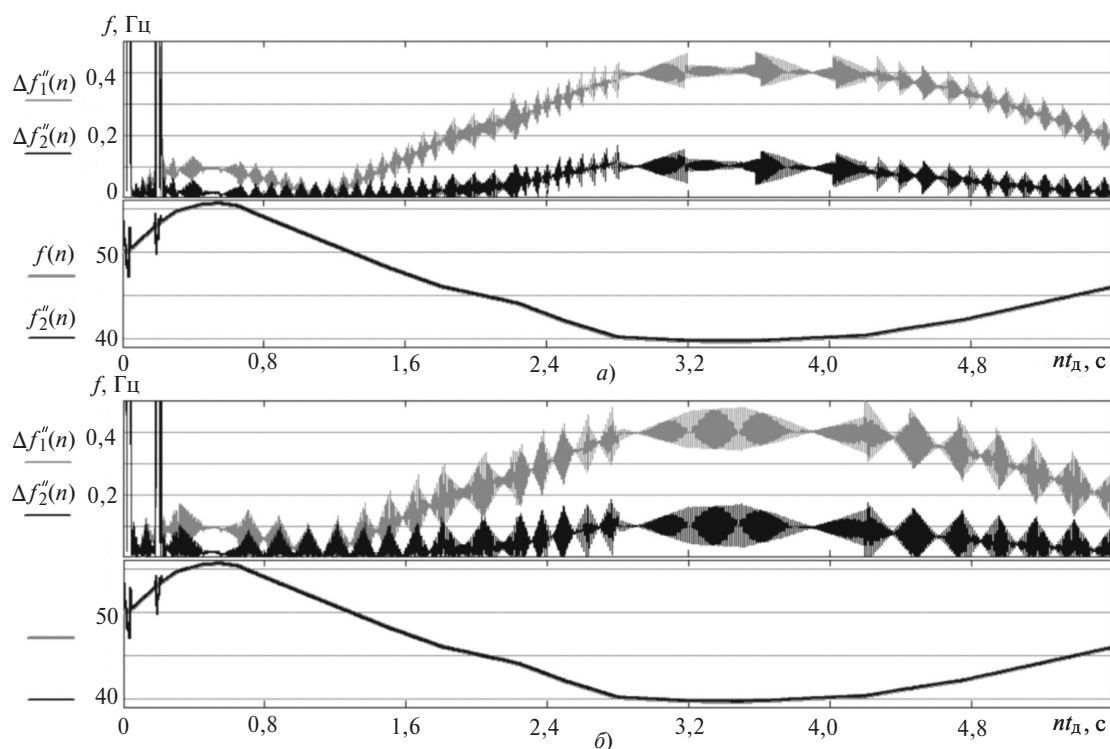


Рис. 17. Оценки погрешности схемы при значительном изменении частоты с $t_d = 0,5$ мс: а – $t_d = 0,25$ с; б – $0,50$ с

модельные эксперименты показали, что погрешность оценки параметров режима в целом снижается при увеличении частоты дискретизации.

Дополнительно проводились исследования по определению устойчивости дискриминаторных методов к изменениям параметров качества электрической энергии. В имитируемый входной сигнал

напряжения добавлялись вторая гармоника и компонента на некротной частоте 170 Гц. Выбирались достаточно жесткие условия для цифровой обработки сигналов при изменениях параметров режима, когда уровень помеховых составляющих достигал 15% амплитуды напряжения. На рис. 15 приведены результаты указанных имитационных экспе-

риментов. Следует отметить, что даже в таких условиях погрешности оценки частоты и амплитуды сигнала напряжения не превысили 2,5%.

На рис. 16 приведены зависимости (с разной частотой дискретизации), характеризующие точность измерения частоты напряжения, соответствующие переходному процессу (рис. 12) при отключении одного турбогенератора из двух в энергорайоне с объектами РГ.

На рис. 17 приведены зависимости (с разной частотой дискретизации), характеризующие точность измерения частоты напряжения и соответствующие переходному процессу при отключении трех газопоршневых ГУ из шести при трехфазном КЗ и работе АЧР1 в энергорайоне с объектом РГ (рис. 13).

Сопоставительный анализ, результаты которого приведены на рис. 16 и 17, свидетельствует о высоких динамических характеристиках дискриминаторных методов при оценке параметров режима.

Осциллограммы напряжения (рис. 14 и 15) показывают, что колебания амплитуды выходных сигналов ДПФ фильтров (рис. 11) не удается полностью компенсировать. Это объясняется тем, что число выборок, используемых в фильтре сглаживания, конечно и изменяется ступенчато в зависимости от частоты. Аналогичными причинами обусловлено наличие участков «нулевой» погрешности (например, рис. 15 и 16). Причем при более высокой частоте дискретизации (большем числе N отсчетов на период промышленной частоты) число участков «нулевой» погрешности становится больше, а ошибка в среднем имеет меньшую амплитуду, как показано на рис. 16,б.

Выводы. 1. Для оценки параметров режима в энергорайонах с объектами РГ целесообразно применение дискриминаторных методов, обладающих высокими динамическими характеристиками.

2. Цифровая обработка сигналов при реализации дискриминаторных методов оценки параметров напряжения имеет существенные особенности, которые необходимо учитывать при построении измерительных органов устройств противоаварийного управления.

3. Дискриминаторные методы оценки параметров режима и предложенные алгоритмы цифровой обработки сигналов могут найти широкое применение в задачах, где требуется обеспечение динамической устойчивости измерительных органов, в частности, в устройствах релейной защиты, автоматики энергосистем, телемеханики, синхронизированных векторных измерений и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение 14.577.21.0244 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEF157717X02440.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Самойленко В.О., Ерошенко С.А., Паздерин А.В.** Проблемы подключения и эксплуатации малой генерации. — Сб. докладов 5-й Международной научно-практической конф. в рамках специализированного форума «Expo Build Russia» «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии», 2016, с. 45–47.
2. **Семендяев Р.Ю., Фишов А.Г., Энхсайхан Э.** Восстановление нормального режима в локальных системах энергоснабжения, работающих автономно или параллельно с региональными электрическими сетями. — Новое в российской электроэнергетике, 2018, № 11, с. 50–61.
3. **Илюшин П.В.** Особенности реализации многопараметрической делительной автоматики в энергорайонах с объектами распределенной генерации. — Релейная защита и автоматизация, 2018, № 2 (31), с. 12–24.
4. **Фишов А.Г., Петришев А.В., Сердюков О.В.** Идентификация классов состояния автономной системы энергоснабжения для управления режимом ее параллельной работы с централизованной электрической сетью. — Вестник Иркутского государственного технического университета, 2018, т. 22, № 1 (132), с. 168–185.
5. **Семендяев Р.Ю., Фишов А.Г.** Анализ актуальности ограничений по устойчивости в сетях с распределенной генерацией. — Изв. Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, 2017, № 4 (44), с. 240–246.
6. **Венцель Е.С.** Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1998, 576 с.
7. **Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория.** Справочник. Изд. 2-е. /Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007, 512 с.
8. **Сосулин Ю.Г.** Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учебное пос. для вузов. М.: Радио и связь, 1992, 304 с.
9. **Куликов А.Л.** Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП/Под ред. М.Ш. Мисриханова. Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006, 315 с.
10. **Обалин М.Д., Куликов А.Л.** Применение адаптивных процедур в алгоритмах определения места повреждения ЛЭП. — Промышленная энергетика, 2013, № 12, с. 35–39.
11. **Ван Трис Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1/Пер. с англ. под ред. В.И. Тихонова. М.: Советское радио, 1972, 744 с.
12. **Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A.** Digital signal processing in power system protection and control. London: Springer, 2011, 316 p.
13. **Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш.** Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП: Учебное пос. М.: Энергоатомиздат, 2007, 198 с.
14. **Фальшина В.А., Куликов А.Л.** Алгоритмы упрощенной цифровой фильтрации электрических сигналов промышленной частоты. — Промышленная энергетика, 2012, № 5, с. 39–46.
15. **Куликов А.Л., Фальшина В.А.** Упрощенная адаптивная цифровая фильтрация электрических сигналов в условиях изменения частоты. — Изв. высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 2013, № 1–2, с. 57–67.
16. **Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов/Пер.с англ. М.: Мир, 1978, 848 с.
17. **Блейхут Р.** Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов/Пер. с англ. И.И. Грушко. М.: Мир, 1989, 448 с.
18. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer relaying for power systems. A John Wiley and Sons, Ltd, 2009, 344 p.
19. **Аржаников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2003, 272 с.
20. **Илюшин П.В.** Особенности противоаварийного управления при аварийных дефицитах мощности в автономных энергосистемах. — Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2016, № 5, с. 2–11.

21. **Илюшин П.В.** Особенности организации противоаварийного управления в сетях с современными генерирующими установками. — Вестник Иркутского государственного технического университета, 2018, т. 22, № 5 (136), с. 134—151.

22. **Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В.** Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018, 280 с.

[19.03.2019]

А в т о р ы: **Куликов Александр Леонидович** — доктор техн. наук, профессор Нижегородского государ-

ственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ).

Илюшин Павел Владимирович — кандидат техн. наук, проректор по научной работе Петербургского государственного института повышения квалификации.

Пелевин Павел Сергеевич — аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Elektrichestvo, 2019, No. 7, pp. 22–35

DOI:10.24160/0013-5380-2019-7-22-35

Application of Discriminator Methods for Estimating the Operating Parameters of Power Districts Containing Distributed Generating Facilities

KULIKOV Alexander L. (*Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

ILYUSHIN Pavel V. (*Petersburg Power Engineering Institute of Professional Development, St. Petersburg, Russia*) — Vice-rector on the Advanced Study, Cand. Sci. (Eng.)

PELEVIN Pavel S. (*NNSTU, Nizhny Novgorod, Russia*) — Engineer

The specific features of electrical operation modes in power districts containing distributed generating facilities under different conditions in terms of their circuit configurations and operation are analyzed. The analysis has revealed significant deviations of electric power quality indicators and occurrence of short-term fluctuations of operating parameters in a wide dynamic range under the conditions of fast electromechanical transients. The basic principles used to set up discriminator methods are outlined, and the possibility of using them in estimating the operating parameters under the conditions of deviations from normal electric power quality indicators and influence of various distorting factors is shown. Simplified and complete structural diagrams of the discriminator frequency and voltage measuring device are presented, and their advantages are shown. Application of the Goertzel algorithm for minimizing the computation effort in implementing the discrete Fourier transform is substantiated. The results from investigations into the dynamic characteristics of the discriminator measuring device for estimating the operating parameters as applied to emergency control are presented. It is shown that under harsh conditions for digital processing of signals with the level of interference components up to 15% of the voltage amplitude, the errors of estimating the voltage signal frequency and amplitude do not exceed 2,5%. Based on the simulation results, the effectiveness of using discriminator methods in digital processing of signals has been proven.

К е у в о р д с: distributed generation, transient, operating parameters estimation, statistical methods, discriminator methods, emergency mode parameters measuring device, estimation error

REFERENCES

- Samoilenko V.O., Yeroshenko S.A., Pazderin A.V.** *Sb. Dokladov 5-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konf. «Effektivnoye i kachestvennoye snabzheniye...»* (Collection of lectures of the 5th International conf. «Effective and quality supply and use of electric power», 2016, pp. 45—47.
- Semendyaev R.Yu., Fishov A.E., Enkhsaikhan E.** *Novoye v rossiiskoi elektroenergetike — in Russ. (New in the Russia electroenergy)*, 2018, No. 11, pp. 50—61.
- Ilyushin P.V.** *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya. — in Russ. (Relay defence and automation)*, 2018, No. 2 (31), pp. 12—24.
- Fishov A.G., Petrishchev A.V., Serdukov O.V.** *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — in Russ. (Bulletin of the Irkutsk State Technical University)*, 2018, vol. 22, No. 1 (132), pp. 168—185.
- Semendyaev R.Yu., Fishov A.G.** *Izvestiya Kirgyzkogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I. Razzakova — in Russ. (News of the Kirghiz state technical university of the name I. Razzakov)*, 2017, No. 4 (44), pp. 240—246.
- Ventsel' Ye.S.** *Teoriya veroyatnostei: Uchebnik dlya vysov — in Russ. (Probability theory: text-book for higher educational establishments)*. Moscow, Vysshaya shkola, 1998, 576 p.
- Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroyeniya i teoriya** (Radioelectronic systems: foundations of construction and theory). Reference book. 2nd edition. Edit. by Ya.D. Shirman. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
- Sosulin Yu.G.** *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii i radionavigatsii: Uchebnoye pos. dlya vuzov* (Theoretical bases of radio-location and radionavigation: Train aid for institutions of higher learning. Moscow, Radio i svyaz', 1992, 304 p.
- Kulikov A.L.** *Tsyfrovoye distantsionnoye opredeleniye povrezhdenii LEP* (Digital controlled from distance determination of damages of lines of electricity transmission)/Edit. by M.Sh. Misrikhanov. Nizhny Novgorod, Publ. of Volgo-vyatsk Academy of Government Service, 2006, 315 p.
- Obalin M.D., Kulikov A.L.** *Promyshlennaya energetika — in Russ. (Industrial energy)*, 2013, No. 12, pp. 35—39.
- Van Tris G.** *Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsii* (Theory of discovery, estimations and modulation). Vol. 1/Trans.

from Eng. Edit. by V.I. Tikhonov. Moscow, Sovetskoye radio, 1972, 744 p.

12. **Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A.** Digital signal processing in power system protection and control. London: Springer, 2011, 316 p.

13. **Kulikov A.L., Misrikhanov M.Sh.** *Vvedeniye v metody tsifrovoi releinoi zashchity vysokovol'tnykh LEP. Uchebnoye pos.* (Introduction to the methods of digital relay defence of high-voltage lines of electricity transmission: Train aid). Moscow, Energoatomizdat, 2007, 198 p.

14. **Fal'shina V.A., Kulikov A.L.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial energy)*, 2012, No. 5, p. 39–46.

15. **Kulikov A.L., Fal'shina V.A.** *Izv. Vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – in Russ. (News of higher educational establishments. Problems of energy)*, 2013, No. 1–2, pp. 57–67.

16. **Rabiner L., Gould B.** *Teoriya i primeneniye tsifrovoi obrabotki signalov* (Theory and application of digital treatment of signals). Tran. from Eng. Moscow, Mir, 1978, 848 p.

17. **Bleykhut R.** *Bystrye algoritmy tsifrovoi obrabotki signalov* (Rapid algorithms of digital treatment of signals). Trans. from Eng. I.I. Grushko. Moscow, Mir, 1989, 448 p.

18. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Computer relaying for power systems. A John Wiley and Sons, Ltd, 2009, 344 p.

19. **Arzhannikov Ye.A., Lukoyanov V.Yu., Misrikhanov M.Sh.** *Opredeleyeniye mesta korotkogo замыкaniya na vysokovol'tnykh liniyakh elektropredachi* (Location of short circuit on the high-voltage lines of electricity transmission). Moscow, Energoatomizdat, 2003, 272 p.

20. **Ilyushin P.V.** *Elektro*, 2016, No. 5, pp. 2–11.

21. **Ilyushin P.V.** *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of the Irkutsk State Technical University)*, 2018, vol. 22, No. 5 (136), pp. 134–151.

22. **Gurevich Yu.Ye., Ilyushin P.V.** *Osobennosti raschetov rezhimov v energosistemakh s raspredelennoi generatsiyey: monografiya* (Features of calculations of the modes in districts with the up-diffused generation. Monograph). Nizhny Novgorod. NIU RANKhiGS, 2018, 280 p.

[19.03.2019]